МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

«АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ І МАШИНОЗНАВСТВА – 2026»

THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

«ACTUAL PROBLEMS OF MECHANICS AND MECHANICAL ENGINEERING – 2026»

26 – 28 травня, 2026

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ



2026

МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

«АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ І МАШИНОЗНАВСТВА – 2026»

THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

«ACTUAL PROBLEMS OF MECHANICS AND MECHANICAL ENGINEERING – 2026»

26 – 28 травня, 2026

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ



2026

Тези доповідей Міжнародної наукової конференції
«Актуальні проблеми механіки і машинознавства – 2026» *[Електронний ресурс]*

Головний організатор:

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

Співорганізатори конференції:

Національний комітет України з теоретичної і прикладної механіки; Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України; Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України; Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України; Інститут гідромеханіки НАН України; Інститут транспортних систем і технологій НАН України; Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України; Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України; Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України; Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Інститут математики НАН України; Київський національний університет імені Тараса Шевченка; НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Криворізький національний університет; Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України; Українське ядерне товариство; ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки»; АТ «НАЕК «Енергоатом»

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Співголови:
Богданов В.Л., Назаренко В.М., Чирков О.Ю. (Україна)
Члени програмного комітету:
Бабій К.В. (Україна), Бобир М.І. (Україна), Бородій М.В. (Україна), Булат А.Ф. (Україна), Воробйов Є.В. (Україна), Воропаєв Г.О. (Україна), Жук Я.О. (Україна), Герасимчук О.М. (Україна), Гузь О.М. (Україна), Григоренко О.Я. (Україна), Долгов М.А. (Україна), Карпінос Б.С. (Україна), Ковтонюк П.І. (Україна), Круковський О.П. (Україна), Кубенко В.Д. (Україна), Кушнір Р.М. (Україна), Леонець В.А. (Україна), Молчанов О.М. (Україна), Назарчук З.Т. (Україна), Новогрудський Л.С. (Україна), Писаренко Г.Г. (Україна), Пошивалов В.П. (Україна), Радченко С.А. (Україна), Редчиць Д.О. (Україна), Русинов А.В. (Україна), Рущицький Я.Я. (Україна), Селіванов М.Ф. (Україна), Сергієнко І.В. (Україна), Сметанкіна Н.В. (Україна), Сторожук Є.А. (Україна), Ступнік М.І. (Україна), Марченко В.В. (Україна), Хіміч О.М. (Україна), Холоша В.І. (Україна), Хорошилов С.В. (Україна), Цибаньов Г.В. (Україна), Чепков І.Б. (Україна), Шевченко В.Г. (Україна), Шевченко І.А. (Україна), Шугайло О.П. (Україна), Тимоха О.М. (Україна), Agolovyan L. (Armenia), Altenbach H. (Germany), Berto F. (Italy), Carpinteri A. (Italy), Gogotsi Yu. (United States), Kaplunov Ju. (United Kingdom), Kovalovs A. (Latvia), Kujawski D. (United States), Murakami Y. (Japan), Müller W. (Germany), Nazarenko L. (Germany), Nao-Aki Noda (Japan), Pluvinage G. (France), Pokluda J. (Czechia), Rzadkowski R. (Poland), Sunder R. (India), Surace C. (Italy), Stolarski H. (United States), Tamulevicius S. (Lithuania), Toth L. (Hungary), Xu Jiujun (China).

ISBN 978-617-95433-0-2
https://www.doi.org/10.35668/978-617-95433-0-2

© Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

СЕКЦІЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

Відкриття конференції ……. 4

Секція 1 **Експериментально-розрахункові методи дослідження міцності матеріалів і конструкцій** …….. 4
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

Секція 2 **Механіка деформівних твердих тіл і конструкцій: композити, оболонки, довготривале деформування, руйнування, стійкість та взаємодія фізико-механічних полів** …….. 8
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Секція 3 **Актуальні проблеми геотехнічної і гірничої механіки** …….. 11
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України;
Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

Секція 4 **Гідротермодинаміка турбулентних потоків** …… 12
Інститут гідромеханіки НАН України

Секція 5 **Механіка об'єктів ракетно-космічної техніки та інших систем спеціального призначення** …….. 13
Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України

Секція 6 **Фундаментальні та прикладні дослідження інноваційних транспортних й енергетичних систем і технологій** …… 15
Інститут транспортних систем і технологій НАН України

Секція 7 **Математичні моделі та методи механіки неоднорідних структур** …… …… 18
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

Секція 8 **Міцність матеріалів та елементів конструкцій обладнання АЕС** 20
Українське ядерне товариство;
ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки»; АТ «НАЕК «Енергоатом»

Відкриття конференції

О. Ю. Чирков
Забезпечення міцності матеріалів і конструкцій як основа створення сучасної техніки. До 60-річчя заснування Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України…… 23
Я.Я. Рущицький
Особливості моделей нелінійного деформування матеріалів ……. 26
L. Schek, E. N. Vilchevskaya, W. H. Müller
On the Deformation Behavior of 4D-Printed Liquid Crystal Elastomers Under Change of Temperature — A Computational Analysis …..……... 28
M. I. Bobyr, Huang Tao
Damage and limit state of reinforced composite materials …..…….…… 29
L. Nazarenko, O. Yu. Chirkov, H. Altenbach
Strain-gradient elastic–plastic model ……. 30
С.А. Радченко, О.В. Зелений
Стратегія забезпечення продовження строку експлуатації елементів реактора ВВЕР-1000 АЕС України понад 60 років ……. 31

Секція 1

Експериментально-розрахункові методи дослідження міцності матеріалів і конструкцій

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

Г. Г. Писаренко, О.В.Войналович, А.М.Майло
Прогнозування залишкового ресурсу роботи машин з тривалим терміном експлуатації. ……. 35
Л.С. Новогрудський, М.Я. Оправхата
Вплив понижених температур та напрацювання в колії на міцність рейкової сталі …….. 37
Є. В. Воробйов, Л. С. Новогрудський, М. П. Адамчук, М. П. Земцов
Оцінка пошкоджуваності металевих матеріалів за параметрами електричного опору ……... 39
В.А. Льонець. Інтегральний вимірювальний комплекс конструкційних матеріалів, зварних з'єднань, деталей елементів конструкцій транспортних машин з вимірювальними одиночними тензодатчиками та багатоканальними перетворювачами ……. 41
А.В. Бялонович, А.В. Кравчук, О.В. Кононученко
Вплив частоти навантаження в діапазоні до 100 Гц на опір втомі алюмінієвого сплаву Д16 ……..……..... 42
М.Г. Чаусов, П.О. Марущак, В.В. Шманенко
Вплив динамічних незрівноважених процесів і криогенного охолодження на зміну механічних властивостей сталей …….. 44
С.В. Білодіденко, Г.М. Біліченко, В.І. Гануш, М.О. Щербінін
Діагностування металу кожуха доменної печі за контролем твердості …….. 46
Г. Цибаньов
Опис росту коротких тріщин експонентою з використанням параметрів модифікованої кривої втоми ……..... 48

А.П. Бовсуновський, М.В. Бородій, О.А. Бовсуновський
Оцінка граничного стану валопроводів парових турбін при короткому замиканні на турбогенераторі ……. 50
М. А. Біляєв
Порівняння надлишкового тиску на перекриття при вибуху на малих відстанях від нього ……..…….. 52
В.А. Максимюк, В.С. Ушакова, О.В. Ушаков
Про коефіцієнт динамічності у водяному кулеуловлювачі ……. 54
В.С. Дудніков
Установка для комбінованого навантаження оболонок при випробуванні на міцність і жорсткість ……. 56
В.С. Дудніков
Перетворювач лінійних переміщень ……..... 58
Н. В. Сметанкіна, С. О. Моргун
Напружено-деформований стан ротора сучасного суднового газотурбінного двигуна …….. 60
Є.В. Воробйов, Т.В. Анпілогова
Розвиток низькотемпературної стрибкоподібної деформації в умовах гравітаційного навантаження ……... 62
М.П. Адамчук, М.В. Бородій, З.С. Ясковець, С.А. Скакун
Розробка експериментальної методики дослідження взаємодії ефектів ратчетингу та повзучості …….. 64
В. Книш, С. Соловей, Б. Мордюк, А. Кадишев, М. Мальгін, В. Мірянін
Вплив високочастотної проковки та механічного легування нікелем на довговічність зварних з'єднань у 3,5% розчині NaCl ……..... 66
П. В. Яковчук, С. М. Шукаєв
Прогнозування довговічності металевих сплавів за багатоосьової втоми методом регресії гауссівського процесу …… 68
О.В. Лопата, А.Є. Солових, С.Є. Катеринич, В.М. Лопата
Залишкові напруження в покритті та методики їх визначення …… 70
В.І. Калініченко, І.Р. Качинська, О.О. Мікосянчик, І.П. Рибак
Моделювання термопружного стану різального інструменту …… 74
А.В. Рутковський, К.П. Буйських, Л.А. Лопата
Підвищення ресурсу матриць та пуансонів для виробництва трубчастих виробів з використанням технології іонно-плазмого термоциклічного азотування ……..…… 78
O. Derkach, A. Ratynskyi, R. Rzadkowski
Methodological Framework for Active Suppression of Flow-Induced Non-Stationary Vibrations Using Piezoelectric Patches …… 81
O. Derkach, A. Kovalovs, V. Kobzar
Experimental Methodology for Active Structural Health Monitoring of Composites Based on Nonlinear Resonance and Dissipative Properties Analysis ……. 83
В. О. Пальчиковський, А. В. Морозов, О. Л. Деркач, Ю. І. Торба
Дослідження впливу накопиченого втомного пошкодження на дисипативні характеристики композитної лопаті повітряного гвинта ……. 85
П.О. Булах, В.Є. Данилюк, Є.О. Кондряков, А.В. Бялонович
Застосування високошвидкісної грі мов страції для вдосконалення методики визначення енергетичних характеристик перешкод при пробитті високоміцними ударниками …… 87
G. Chyzhyk, O. Poliarus, D. Vedel, A. Kravchuk, J. Morgiel
Oxidation resistance of NiTi intermetallic alloy and NiTi-based composite at elevated temperatures …… 89

В. О. Дегтярев
Вплив ударного навантаження на опір втомі зварних з'єднань за умов зниженої кліматичної температури …… 91
В.П. Швець , П.О. Булах, О.М. Масло , А.А. Котляренкоа, А.М. Бабак, О.Є. Гопкало
Експрес-метод оцінки однорідності алюмінієвого сплаву Амг4 …… 93
В. М. Михалевич, О. В. Грушко, М. А. Колісник, А. А. грі , Ю. В. Добранюк, О. І. Тютюнник
Дослідження моделей еквівалентної пластичної деформації до руйнування у співставленні з критеріями міцності …….. 95
А. В. Широков
Вплив швидкості деформації на пробиття перешкоди із сталі Swebor 450 …… 97
А. В. Широков, О. М. Березовський
Особливості оцінки пробивної здатності елементів ураження з масою 1.. 5г … 99
Є. В. Савчук, С. М. Шукаєв
Новий параметр непропорційності на основі критичних площин деформацій 101
Р.В. Сіньковський, В.П. Ткачук
Сучасний стан та перспективи технологічного забезпечення якості FDM-деталей шляхом механічної обробки …….. 103
П. П. Гонтаровський, С. В. грі мов, Н. В. Сметанкіна, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик, Т.В. Протасова
Дослідження впливу ударної хвилі на напружено-деформований стан скління у тривимірній постановці …… 106
В.А. Пешко, А.П. Бовсуновський
Оцінка квазістатичної складової пошкодження високотемпературної області ротора під час зупинки турбіни …….. 108
О. В. Дроздов, Ю. М. Волков, А. В. Богомолов
Оцінка міцності на розтяг склопластиків із шаруватою структурою ……. 110
О. І. Моргун, П.В. Яковчук, С. М. Шукаєв
Прогнозування границі міцності пластиків, виготовлених адитивним методом, за допомогою алгоритмів машинного навчання …….. 112
С. М. Кабанник, А. Ж. Мейріс
Експериментально-розрахункове визначення аеродинамічних навантажень для оцінки стійкості лопаток до флатера ……. 114
М. К. Дауров, С.І. Білик, А.С. Білик
Композитні листові сталеві конструкції захисних споруд стійкі до пробиття уламками …… 116
О. В. Дроздов, Ю. М. Волков, М. П. Рудницький, О. П. Роменська, І. І. Деревянко
Визначення комплексу механічних властивостей тканого вуглепластику за підвищених температур …… 118
І. О. Буліч , О. Г. Карасьов, Г. О. Шумілін ,В. О. Харченко
Розрахунково-аналітичне обґрунтування критеріїв граничного стану деталей авіаційних ГТД методом моніторингу накопиченої циклічної пошкодженості 120
О. Яровицина, М. Черв'яков, І. Волосатов, Г. Хрущов, В. Пєстов, О. Завгородній
Аналіз термодеформаційного профілю багатошарового наплавленого металу Inconel 718 …….. 123
S. V. Filipkovskij, E. Polyakov
Modeling of an aircraft wing for studying aeroelastic vibrations ……... 125

Ю.В. Воронін. Пошкоджуваність та несуча здатність зварних з'єднань із композитних матеріалів ……. 127
Б.Карпінос, В. Шостак, А.Шульгін, П.Ковель, В.Самулеєв
Особливості напружено-деформованого стану ресурсолімітуючих елементів авіаційної техніки ПС ЗС України ……. 129
М. К. Кучер, Д.С. Авраменко
Плоскі задачі механіки термодеструктивних матеріалів за високих температур ……. 131
G. Chyzhyk, Ł. Rogal, T. Warski, Ł. Hawełek, J. Kasprzycki, R. Chulist, M. Godlewski, W. Maziarz
Microstructure and mechanical properties of Cu-Al-Mn-Ni shape memory melt spun ribbons subjected to cycling heat treatment ……..... 134
Zichun Wang, Ruoxuan Huang, Jiujun Xu, Jingsi Wang
In-situ formation and tribological properties of friction-induced amorphous carbon films ……. 136
І. К. Фесун, М. О. Вабіщевич
Удосконалення моделювання прогресуючого обвалення об'єкта будівництва на прикладі реального аварійного впливу …… 137
М. О. Цисар, В. В. Хворостяний, М. А. Долгов, Р. С. Старинко, В. Є. Бодунов
Оцінювання похибки вимірювань під час визначення рівня дефектності флоат-скла …… 139
В. В. Хворостяний, В. І. Закієв, Ю. І. Смірнов, М. А. Долгов, Є. Г. Гогоці, М. О. Цисар, А. В. Кравчук
Опір руйнуванню крихких матеріалів при мікродряпанні зі сколюванням кромки …… 142
В. І. Закієв, В. В. Хворостяний, І. М. Закієв, С. В. Ковальов, Д. В. Попов
Корекція діаграми індентування з урахуванням притуплення індентору та початкового контакту ……..…… 146
О. М. Герасимчук
Оцінка границі витривалості металевого матеріалу за його характеристиками пружно-пластичних властивостей і мікроструктури …….. 148
С.О.Тарасовська, С.І.Трубачев , О.С.Яковлева
Оцінка концентрації напружень в композитній пластині з отвором ……..... 150
В. А. Ромащенко, С. О. Тарасовська1, П. П. Лепіхін, О. С. Бейнер
Обмеження деяких критеріїв міцності анізотропних матеріалів …… 152
В.Г.Сидяченко, С.О.Пискунов, Д.Устенко
Пружно-пластичний скінчено-елементний аналіз напруженого-деформованого стану зразка для дослідження тріщиностійкості при змішаних (I+II+III) модах деформування …….. 155
О.А.Каток, Р.В.Кравчук, А.В.Середа, В.В.Харченко, М.П.Рудницький, С.І.Мотруніч, І.М.Клочков, М.О.Цисар Удосконалення методики визначення твердості титанових сплавів наоснові параметра локального опору пластичній деформації …….. 157
В.С.Майборода, Ю.С.Налімов, А.В.Рутковський
Поетапне відпрацювання режимів комплексної технологічної обробки на зразках зі сплаву ЕП 962 …….. 159
С. Романов. Аналіз метрологічного забезпечення вимірювання геометрії внутрішньої поверхні вигородки активної зони реактора ВВЕР-1000 …….. 162
Я. Дубик, В. Антонченко, В. Ясній
Нейромережеві сурогатні моделі для оперативного прогнозування напруженого стану та оцінки цілісності патрубків ВВЕР-1000 …..…… 164

Секція 2

Механіка деформівних твердих тіл і конструкцій: композити, оболонки, довготривале деформування, руйнування, стійкість та взаємодія фізико-механічних полів

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

S. Takada, Y. Mori, R. Suzuki
Analytical Investigation of Stress Distribution in a Semi-Infinite Elastic Medium Containing a Circular Cavity …….. 166
V.V. Zozulya, A. Saez, F. Garcia-Sanchez
A micropolar theory of curved beams with application to the mems/nems simulations ……..... 168
О. Я. Григоренко, Л. С. Рожок , Н.П. Борейко, Л.А. Крук, Л.В. Харитонова
Моделювання напруженого стану нетонких неоднорідних уздовж товщини еліптичних циліндричних оболонок різної довжини …..…..……..... 170
О. Кіпніс, О. Синявський
Оцінка застосовності моделі напівобмеженої підкладки при визначенні критичних параметрів зморщування неогуківського бішару …..……. 172
О.Я. Григоренко, І.А. Лоза, І.Л. Соловйов, С.М. Худолій, С.О. Сперкач
Поширення осесиметричних електропружних хвиль у порожнистому п’єзокерамічному циліндрі з урахуванням градієнту та квадруполя електричного поля ……. 174
О. Я. Григоренко, М. Ю. Борисенко, Н.П. Борейко, А.Д. Безугла
Застосування комбінованого методу до визначення частот вільних коливань шестикутних пластин з отвором …….. 176
О. О. Шкриль, В.Б. Долгошей
Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень прямим методом при використанні ПК ЛІРА-САПР …….. 178
Ю.М. Лаврич , С.В. Плаксін , Л.М. Погоріла
Мікрохвильові технології контролю надійності колійної структури магнітолевітуючого транспорту …….. 180
О.Є. Кучеренко
Фізико-інформовані нейронні мережі в задачах механіки деформівного твердого тіла …….. 183
В. І. Острик
Взаємодія крайової та внутрішньої тріщин у пружному клині ……. 185
С.В. Сінчило, В.М. Юрчук
Еволюція поодинокого профілю типу «kink» викликана генерацією другої гармоніки 187
В.М. Юрчук , С.В. Сінчило
Еволюція циліндричної радіальної хвилі з поодиноким профілем Макдональда викликана нелінійністю матеріалу …… 189
М.Бабешко, В.Савченко, П.Стеблянко
Деякі підходи до розв’язання задач термопластичності для тіл з функціонально-градієнтних матеріалів ……..... 191
Я.В. Павлюк
Визначення деформацій осьової повзучості в тонкостінних трубчастих елементах із лінійно-в’язкопружних матеріалів за умов складного напруженого стану ……. 194
О.О. Лук’янченко, О.В. Геращенко, О.В. Костіна
Динамічна поведінка оболонки резервуару з реальними недосконалостями форми при зовнішньому поверхневому тиску …….. 196

А. С. Колядюк .
Взаємодії ударної хвилі з складними комбінованими оболонками …..…… 198
І. В. Янчевський, О. Х. Остос
Гармонічні коливання пружної сферичної оболонки в податливій циліндричній трубці з ідеальними стисливими рідинами ……. 200
V. M. Pelikh
The solution of fatigue problems under combined loading by static torsion and symmetrical cyclic bending ……. 202
П.О. Булах, О.М. Масло, В.П. Швець
Вплив розсіяних пошкоджень на фізико-механічні характеристики теплостійких сталей при зміні виду навантаження …….. 204
І.Г.Грабар, О.В.Ксюковський, Д.А.Дубовик
Синтез, 3D-друк та експериментальні дослідження міцності анізотропних мультифракталів …… 206
О. П. Кривенко, П. П. Лізунов, О. Б. Калашніков
Моделювання методом скінченних елементів процесу втрати стійкості термопружних неоднорідних оболонок …….. 208
М. М. Ткачук, Н. Б. Скріпченко, М. А. Ткачук
Контактна взаємодія кулі з тором: моделі, методи та результати досліджень 210
О. М. Андрусенко
Моделювання станів вигинання та прихоплення бурильних колон у глибоких криволінійних свердловинах …… 212
А. В. Грабовський, М. М. Ткачук, А. Ю. Васильєв, М. А. Ткачук
Визначення впливу складу та властивостей компонентів композитних структур на характеристики корпусних елементів …… 214
І. П. Гречка, Г. В. Ткачук, В. І. Сєриков, О. С. Льозний
Контактна взаємодія елементів конструкцій: побудова параметричних розрахункових моделей ……. 216
I. Andrianov, G. Starushenko, S. Hapieiev
Electrically Actuated Rectangular Plates …… 218
А. С. Ольховський, О. Л. Деркач, І. К. Сенченков
Чисельне дослідження впливу локальних пошкоджень лопаток парової турбіни внаслідок ерозійного зносу на їх напружено-деформований стан …….. 220
В. С. Кравець, А. Казберук, А. Б. Чорненький
Аналіз напруженого стану кусково-однорідної анізотропної пластини на основі методу сингулярних інтегральних рівнянь …….. 222
Д. В. Бреславський, О. А. Татарінова, М. О. Грошевий, А. С. Хорошун, Х. Альтенбах
Моделювання процесів повзучості та побудова еволюційних рівнянь для параметру пошкоджуваності …… 224
Б. П. Маслов. Концентрація фазових мікронапружень та довготривала міцність метаматеріалів регулярної структури …… 226
О. О. Бедзір, В. М. Шопа
Контакт прорізної циліндричної оболонки з неоднорідним пружним заповнювачем …… 228
І. Сенченков, О. Червінко, С. Якименко
Термомеханічна поведінка і втомна міцність в’язкопружних тіл з концентраторами напружень при гармонічному навантаженні …… 230
А.В. Плащинська. Моделювання швидкості росту втомних тріщин у пластинах 7075-Т6 при асиметричному навантаженні ……..…… 232
Г. П. Марченко, І. А. Рудавська
Вплив тертя на поширення крайової тріщини в круговому диску під рухомим контактним навантаженням. ……. 234

А. Г. Зеленський
Моделювання напружено-деформованого стану нетонких лінійно пружних пластин і пологих оболонок …….. 236
В. І. Козлов, Ю. І. Лелюх, Л. П. Зінчук
Вимушені коливання та дисипативний розігрів порожнистої електров'язкопружної шаруватої півсфери з концентратором напружень …… 238
Р. В. Серафимович, Є. А. Сторожук
Розрахунки тришарової циліндричної оболонки з круговим отвором за 2D і 3D моделями …… 240
О. В. Романов, Д.П. Черноус
Довготривале деформування нелінійно-в'язкопружних матеріалів з врахуванням виду напруженого стану ……. 242
Н. Маланчук, Р. Мартиняк, О. Козачок
Гранична форма пружних півпросторів з поверхневими виїмками після фретинг зношування ……. 244
К. Чумак, Р. Мартиняк
Контакт пружного тіла та жорсткої основи з виїмкою за високої теплопровідності інтерфейсу ……. 246
І. Сенченков, О. Червінко, В. Усов. Модель термомеханічних процесів при блочному нарощуванні в'язкопластичних тіл ……. 248
В. П. Пошивалов
Стохастична модель довготривалої міцності конструкційних матеріалів при ізотермічній повзучості …….. 250
Д. О. Халапсіс, Т. В. Ходанен, А. Ю. Дреус
Теплові деформації в матеріалі за умов імпульсного електротермічного впливу 253
М. М. Кіндрат
Гранична рівновага композиції з пружним високомодульним стрічковим включеням ……. 255
Ю. М. Стреляєв, Р. М. Мартиняк. Часткове проковзування під час механічного та термомеханічного контакту пружних тіл …… 257
Р. Мартиняк, М. Селіванов, С. Плашенко
Термопружний контакт індентора та метаматеріального шару з негативним термічним розширенням …… 259
В. Л. Богданов, Д. М. Селіванов
Визначення траєкторії поширення тріщини в перфорованій пластині в рамках когезійної моделі …… 261
О.І. Лесик
Вплив початкових напружень на коефіцієнти інтенсивності напружень в плоскій задачі про тіло з двома паралельними тріщинами нормального відриву 263
М.І. Шайнога, О.В. Смаль
Розтяг пластини з абсолютно жорсткою шайбою та радіальною тріщиною, на продовженні якої утворилися пластичні зони …… 266
М.С. Слободян, Л.В. Маркевич
Розтяг пластини з отвором та радіальною ненаскрізною тріщиною, з урахуванням пластичних зон на її продовженні ……. 268
О. М. Добриденко, Ю. О. Манулін, І. А. Токар
Дослідження технічного стану агрегатів шасі літаків типу Су-27, для визначення можливості продовження їх ресурсу …… 270
А.С Бологін, П.О. Жикол
Втрата несучої здатності елементів конструкції авіаційної техніки при бойових ураженнях …….. 272

Секція 3

Актуальні проблеми геотехнічної і гірничої механіки

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України;
Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

В.Г. Шевченко, С.О. Авраменко
Експериментальні дослідження міцності цементно-піщаної суміші з додаванням механоактивованої золи виносу ТЕС ……. 274
М. Ярошевич, В. Пуць, Т. Ярошевич
Використання явища самосинхронізації інерційних віброзбудників для збудження бігармонічних коливань …….. 279
С.Р. Ільїн, Л.Г. Адорська , І.С. Ільїна
Інформаційна комп'ютерна технологія діагностики та керування технічним станом устаткування шахтних підйомних комплексів …….. 281
К. А. Безручко, О. В. Бурчак, Л. І. Пимоненко, О.В. Приходченко
Геомеханічні процеси, як чинник структурних перетворень твердих вуглеводневих матриць ……. 283
О. П. Круковський, С. І. Скіпочка, В. М. Сергієнко, Л. В. Прохорець
Експрес-оцінка міцності гірських порід неруйнівними методами ……. 285
О. тепанович , В.Круковська, Ю. Виноградов
Довгострокова працездатність металевого кріплення гірничих виробок в умовах корозійного впливу шахтних вод …… 288
Ларіонов Г.І., Рюміна Д. М.
Про один метод оцінювання чутливості функцій до варіації параметрів в прикладних задачах механіки …….. 290
Е.П.Фельдман, Н.О.Калугіна, О.О.Віннік
Закритичне зростання газонаповнених тріщин при розвантаженні вугільного/породного пласта …….. 294
О. В. Інкіна, Н. О. Калугіна, Ю. В. Хрипливець
Технологічний аналіз геотермальних систем для відбору тепла шахтних вод 296
Л. І. Стефанович, Е. П. Фельдман Самонагрівання вуглепородних відвалів за умов обмеженого доступу атмосферного кисню ……. 298
С. В. Тинина
Зональна дезінтеграція- причини, структура та розвиток ……..... 300
А. П. Мухачев, В. М. Яковлєв, В. Г. Шевченко, Д. О. Єлатонцев
Шляхи підвищення міцності і довговічності гірничого обладнання ……..... 303
В. М. Яковлєв, А. П. Мухачев, Д. О. Єлатонцев Про безпілотне машинне виймання залишкової руди з днищ блоків з торцевим випуском ……. 305
О.М. Молчанов, С.П. Мінєєв, В.Ф. Ганкевич, Н.О. Калугіна, В.Я. Киба
Оптимізація буріння свердловин ……. 307
В. Тимощук, Л. Рудаков, О. Орлінська, Д. Пікареня
Геомеханічна стійкість верхової дамби хвостосховища ……... 309
О.В. Орлінська, Д.В. Рудаков, Д.С. Пікареня, Л.М. Рудаков
Оцінка ризиків руйнування складних геотехнічних систем: статистичний аналіз аварійності на хвостосховищах світу ……. 312
Є.В. Семененко, О.О. Медведєва
Визначення параметрів пульпоутворення шляхом модулювання руху розсипу безнапірною течією бінгамо-шведовського середовища …… 316
О. А. Савицький
Ґрунтове середовище під поверхневим динамічним навантаженням ……. 319

М.О. Цисар, Т.О. Псярнецька, А.В. Клисько, С.О. Виноградов
Вплив режиму термічної обробки на величину границі міцності монокристалів алмазу типу Ib ……. 321
М.І. Лисиця, М.Г. Мар'єнков, Г.Н. Агальцов, А.В. Новікова, Н.М. Лисиця, Є.В. Калганков Експериментальні дослідження захисних елементів для сейсмо- та віброізоляції багатоповерхових будівель …… 324
Д. Лайков, М. Маліч,, С. Авраменко, Д. Маліч
Порівняння енергоефективності руйнування граніту у щокових дробарок з урахуванням дії дотичних напружень ……. 327

Секція 4

Гідротермодинаміка турбулентних потоків
Інститут гідромеханіки НАН України

В.Т.Грінченко, Н. С. Городецька
Про особливості коливальних процесів в пружних тілах ……. 329
І. Нестерук
Міцність конструкції як ключовий фактор ефективності транспортних засобів 331
А. В. Сохацький
Числове моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів: проблеми та перспективи …… 333
Н. Ф. Димитрієва
Дослідження вихрових течій у вентильованій каверні ……. 335
В. А. Воскобійник, Т. Радко, Г. Якобс, А. В. Воскобійник, А. М. Онищенко, О.А. Воскобойник
Вплив великомасштабної топографії дна на структуру океанічних течій …….. 337
С.В.Телима, Ю.І. Калугін
Моделювання процесу очистки стічних вод в біореакторах із закріпленим біоценозом ……... 339
В. А. Волощук, Є.І. Никифорович
Обґрунтування параметрів теплонасосних установок на основі методів ексергетичного аналізу ……. 341
В. В. Філонов, Г.О. Воропаєв
Співвідношення оцінки детонаційного імпульсу в 2D та 3D наближенні при застосуванні FRC-EM …… 343
В. В. Філонов, Д.О. Федоров
Гетерогенні властивості моделі суміші для швидкого прогнозу параметрів критичного витоку двофазного середовища ……. 345
Г. Воропаєв, О. Баскова
Особливості формування вихрової структури в гладких та частково гофрованих трубах за неізотермічних умов …… 347
Н.В. Розумнюк .
Течія в околі каверн різних форм та їх опір ……. 349
Я. Загуменний, Д. Кушнір, О. Сірош
Про методи розрахунку задачі руху крилового профілю поблизу екрану …… 351
Г. Воропаєв, С.Коваль
Чисельне моделювання виникнення парової каверни за тілом, що рухається … 353
Ю. М. Савченко, В. М. Семененко, Г. Ю. Савченко, О. І. Наумова
Дослідження руху суперкавітуючих тіл, що проникають у воду під малими кутами до горизонту ……... 355

Секція 5

Механіка об'єктів ракетно-космічної техніки та інших систем спеціального призначення

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України

А. П. Алпатов, С. В. Хорошилов
Наукова школа «Динаміка об'єктів космічної техніки».
Результати досліджень у 2021 – 2025 роках ……..... 357
Т. Ф. Мокрій, Л. Г. Лапіна, С.С. Пасічник
Аналіз напружено-деформованого стану пари «колесо–рейка» на коліях 1520 і 1435мм ……..... 359
О. Д. Ніколаєв, І.Д. Башлій, Д.В. Клименко
Сепараційні процеси в паливних баках космічних ступенів в умовах мікрогравітації та методи стабілізації положення палива в баках ……... 361
В.С. Дудніков
Дренажна магістраль ракети ……..... 363
В.С. Дудніков
Спосіб контролю тиску в ємностях ракет при тривалому зберіганні їх в заправленому стані ……..... 365
Н.С. Прядко, Г.О. Стрельников
Дослідження характеристик потоку в укороченому соплі ракетного двигуна ... 368
Ю.М. Сидоренко, Ю.І. Войтенко
Моделювання детонації заряду з мідним пористим сердечником ……..... 370
Ю.І. Войтенко, Ю.М. Сидоренко
Про механізми збільшення енергії під час вибуху складеного заряду, що містить реакційно здатні матеріали ……. 373
Д. О. Храмов, О. Л. Волошенюк, А. І. Маслова, О. О. Пироженко
Перспективи використання оптичних, теплових та мікрохвильових методів дистанційного зондування Землі в угрупованнях малих космічних апаратів …. 376
Д. В. Грищак, В. З. Грищак, Н. М. Д'яченков
Біфуркаційний стан та раціональне проєктування складених підкріплених оболонкових конструкцій ……. 378
К. Берхміллер, С.В. Хорошилов
Порівняльний аналіз моделей глибокого навчання для виявлення вибухонебезпечних об'єктів з застосуванням автономних робототехнічних систем ……. 380
О.О. Пироженко, А.І. Маслова, О.В. Пироженко
Щодо проєктування угруповання комерційних супутників дистанційного зондування Землі ……..... 383
О.О. Пироженко, А.І. Маслова, О.В. Пироженко
Щодо вибору робочої орбіти супутників дистанційного зондування Землі ….. 385
Е. Л. Гарт, Б. І. Терьохін
Вибір параметрів неоднорідності матеріалу для зниження концентрації напружень у циліндричній оболонці з круговим отвором ……... 387
Ю. М. Гольдштейн
Планування міжорбітальних перельотів багатоцільових низькоорбітальних місій видалення космічного сміття …….. 389
В. Н. Олійник, Т. Я. Батутіна
Про специфіку формування стартових акустичних навантажень під обтічником головної частини ракети …….. 391

О. А. Фоков, Д. С. Своробін, Д. А. Резця
Проблемні задачі використання ройової технології для керування відносним рухом об'єктів орбітального сервісу …….. 393
О. С. Чернявський, С. І. Долгополов, С. А. Шевченко
Особливості математичного моделювання запуску рідинного ракетного двигуна, що включає гідравлічні системи змінної структури …….. 395
В. К. Шамаханов, С. В. Хорошилов
Визначення похибок апроксимації параболічної поверхні при використанні металевого тканого полотна та опорних пластин ……..... 397
С. І. Долгополов, Н. В. Хоряк
Аналіз ефективності різних систем демпфування поздовжніх коливань рідинних ракет-носіїв …… 399
М. А. Асєєв, О. П. Лобунько
Проблеми та методи забезпечення охолодження теплонапружених деталей реактивних двигунів …….. 401
С. Ш. Векілов, О. Д. Ніколаєв, В. І. Ліповський, Р. О. Пустовий
Особливості моделювання тонкостінних соплових насадків, виготовлених за адитивною технологією L-PBF ……..... 404
Д. В. Горобець, М. Б. Соболевська
Моделювання напруженого стану елементів кульшового суглоба людини при експлуатаційних навантаженнях ……..... 406
Е. О. Лапханов
Проблема розробки аеростатних систем для захисту об'єктів критичної інфраструктури України від небезпечних літальних апаратів ……..... 409
Д.О. Литовченко, В.І. Конох, В.М. Сіренко
Спосіб керування літальним апаратом на позаатмосферній ділянці польоту …. 411
Д. Акімов, К. Дегтярьов, В. Гнітько, Д. Крютченко, М. Міщенко, О. Стрельнікова Аналіз надійності паливних баків ракет-носіїв під час експлуатації: транспортування, заправлення та старт ……..... 413
Д.В. Грищак, А.П. Дзюба, В.М. Сіренко
Проблемні задачі вагової оптимізації складених неоднорідних оболонкових конструкцій ……..... 415
Ю. О. Кваша, Н. А. Зіневич
Аеродинамічне вдосконалення форми лопаток направляючого апарата надзвукового компресорного ступеня ……..... 417
М. В. Марчук, Б. Д. Дробенко, В. С. Пакош, В. М. Сіренко, Д. В. Клименко, В. М. Марченко. Оцінка міцності навантажених елементів ракетно-космічної техніки з урахуванням специфіки їх структури та деформування ……..... 419
О. І. Бердник, М. Г. Литвин, О. О. Голобородько
Місячний лендер на екологічних компонентах палива …… 421
В. М. Харченко, Д. В. Клименко
Моделювання в програмному комплексі ANSYS випробування зразків гуми на зсув ……. 422
В.В. Сатокін
Контрольоване моделювання контактних елементів для мінімізації обчислювальних похибок і часу розрахунку …….. 424
Д.В. Акімов. Комплексна оцінка міцності кронштейнів кріплення шаробалонів при статичних та вібраційних навантаженнях …… 427
В. В. Бабуров
До аналізу напружено-деформованого стану та міцності складених контактних конструкцій ……..... 429

О. С. Палій, С. В. Сюткіна-Дороніна
Оптимізація структури та параметрів космічної індустріальної платформи ….. 432
D. Lazuchenkov
Estimation of satellite deorbit time from Low Earth Orbit ……. 434
Н.П. Сазина
Про підхід до визначення технічного рівня виробів ракетно-космічної техніки з урахуванням рівня компетентності групи експертів ……..... 436
Т.М. Кадильникова, В.В. Сілін
Тенденції та перспективи систем контролю мехатронних модулів в авіаційній техніці …….... 439
В. П. Пошивалов
Забезпечення надійності і безпеки стартових комплексів ракет-носіїв на етапі проєктування ……..... 441
О. О. Макарцев, Л. В. Кривобоков, А. В. Демченко, С. Б. Калениченко
Статистичний аналіз якості та стабільності в процесі ремонту виробів …….. 444
А.П. Дзюба, В.П. Пошивалов В.М. Сіренко
Застосування елементів теорії чутливості та результатів неруйнівних випробувань для підвищення достовірності числового прогнозування критичних навантажень конструкцій …….. 447
П. Г. Хорольський
Залежність шуканої точності системи з обсягом випробувань …… 449
Г. І. Сокол
Методи, моделі та методики розрахунків та експериментальних досліджень акустичних випромінювань при стартах РКП …….. 451
Ю. В. Книшенко
Математична модель системи реактивних двигунів малої тяги для розгінних блоків та космічних апаратів ……..... 453
Л. Л. Печериця
Статистичне визначення силового навантаження від газових струменів рушійних установок малої тяги на обтічні поверхні космічних апаратів …..... 456
В. В. Сорочинський, С. В. Хорошилов
Релейне керування відносним рухом космічних апаратів з використанням навчання з підкріпленням …….. 460

Секція 6

Фундаментальні та прикладні дослідження інноваційних транспортних й енергетичних систем і технологій

Інститут транспортних систем і технологій НАН України

Д.О. Редчиць, С.В. Моісеєнко, У.М. Тучина, О.В. Акіменко
Чисельне моделювання турбулентного обтікання роторів дар'є та савоніуса вертикально-осьових вітроенергетичних установок ……. 462
А. В. Зінченко, Д. О. Редчиць
До питання оптимізації проточних частин радіальних вентиляторів ……. 465
Р. С. Юрков, Л. І. Книш
Оптимізація параметрів фазоперехідного теплового акумулятора методами нерівноважної термодинаміки ……. 467
В. О. Поляков
Раціональна структура керування зображуючою точкою стану механічної підсистеми маглев поїзда …….. 469

В.А. Шаломєєв, В.Л. Грешта, Ю.О. Чушкіна, Г.В. Табунщик
Вплив ітрію на механічні властивості та жароміцність магнієвого сплаву для елементів конструкцій літальних апаратів ……... 471
В. В. Огліх, О. В. Шаповалов, В. В. Лісунова
Модель маршрутизації перевезень у дискретному просторі за умов ресурсних обмежень …… 474
В.С. Дудніков
Електромеханічні пристрої повороту лопатей вітроколеса вітроенергетичних установок з горизонтальною віссю обертання …….. 476
Ю. О. Жулай, С.В. Комаров
Спосіб проходки свердловин буровим снарядом з кавітаційним гідровібратором з урахуванням динамічних властивостей породи в вибої …… 478
Ю.М. Лаврич, С.В Плаксін, Л.М Погоріла , А.Ю. Підчасов
Концептуальні основи створення вантажної магнітолевітаційної транспортної системи ……..... 480
В. Ю. Скосар, С. В. Комаров , Н. В. Бурилова , С. В. Бурилов
Свинцево-карбоновий акумулятор для транспортних систем ……. 482
В.Ю. Скосар, Ю.В. Шкіль
Низькошвидкісний магнітолевітаційний транспорт……..... 484
В. Ю. Скосар, С. В. Тарасов
Приміський магнітолевітаційний транспорт …….. 486
Ю. О. Жулай, О. Д. Ніколаєв
Перспективний напрямок технології очистки теплообмінників атомних електростанцій…… 488
В. І. Єлісєєв, В. Ю. Скосар
Чисельний аналіз розрядних кривих для тягових акумуляторів типу AGM ….. 490
Г. Є. Дешко
Визначення раціональних параметрів горіння турбулентних струменів пропану у камерах згоряння енергетичних установок ……. 492
А. Г. Борисенко, Р. С. Юрков, В. С. Бейцун
Створення тривимірної моделі теплопереносу в теплоприймальному каналі з використанням нанорідини в якості теплоносія ……. 494
С.В. Тарасов, О.В. Сухова, О.В. Дороша
Розрахунки напружено-деформованого стану здвоєної прямокутної решітки свинцево-кислотного VLRA-акумулятора ……. 496
С.В. Тарасов, О.В. Сухова, В.А. Іванов, О.Л. Видута
Порівняння характеристик напружено-деформованого стану прямокутних і діагональних решіток свинцево-кислотних акумуляторів …… 498
С.В. Тарасов, М.В. Куваєв, М.Г. Снєгірьов
Система магнітної левітації на основі обертового масиву Хальбаха ……..... 499
С. В. Тарасов, О. Н. Молотков
Ефективність керування обертанням ротора Дар’є змінами його конфігурації та гальмівного моменту генератора ……..... 501
М.В. Куваєв, О.В. Александров
Вплив товщини постійного магніту на електромагнітний момент електричної машини з поперечним полем ……..... 503
С. В. Тарасов, І. Ю. Костюков, С.В. Мойсеєнко, В. С. Бейцун
Визначення осьової сили потоку в імпульсних моделях Н-ротора Дар'є … 505
О.В. Дорош, А.С. Тарасов, И.Б. Чашина, В.П. Гладенко
Аналіз напружено-деформованого стану композитних акумуляторних пластин із внутрішньою мідною основою ……..... 507

І.Ю. Костюков, С.В. Мойсеєнко, А.С. Тарасов, І.Б. Чашина
Врахування характеристик горизонтальної траверси в імпульсних моделях Н-ротора Дар'є ……. 509
В.О. Дзензерський, О.В. Сухова, В.А. Іванов
Вплив тривалості старіння на міцнісні характеристики сплавів Pb-Ca-Sn для струмовідводів свинцево-кислотних акумуляторів …….. 511
В. С. Бейцун, С. В. Тарасов
Комплексна методологія визначення континуальних та локальних податливостей елементів багатоланкових механічних систем …… 513
І. Ю. Костюков, О. Л. Видута, М. В. Фесенко
Обчислення похилої траверси в імпульсних моделях Н-ротора Дар'є …… 515
В.О. Дзензерськийа, О.В. Сухова, В.А. Іванов, А.С. Тарасов
Моделювання розподілу міцності на розрив всередині анодів і катодів літій-іонних акумуляторів ……. 517
О.В. Акіменко, С. Ю. Послявський
Методика чисельного моделювання просторових нестисливих потоків на основі рівнянь нав'є-стокса із застосуванням методу контрольних об'ємів … 518
С.В. Плаксін, В.І. Магро
Проєктування ефективних антенних решіток для технологічної системи позиціонування в режимі реального часу ……. 520
S.Tarasov, D.Dehtiarov
Dynamic Analysis of Offshore Pile Foundations for H-Darrieus Wind Turbines … 522
С. А. Кошель, М.Д. Кошель
Моделювання та калібрування кондуктометричних сенсорів у рідких середовищах …… 524
С. А. Кошель, М.Д. Кошель
Застосування кондуктометричних сенсорів в енергетичних і транспортних системах …….. 526
С. В. Плаксін, О. Б. Гниленко
Перспективи впровадження гнучких фотоелектричних перетворювачів третього покоління в енергосистеми транспортних засобів ……..... 528
Ю.В. Шкіль
Моніторинг динамічних параметрів магнітоплана на основі методу вимірювання сферичності фронту хвилі зондувального випромінювання …… 530
Ю.В. Шкіль, С.В. Плаксін, І.В. Тимченко, Л.М. Погоріла
Залежність енергетичних характеристик лінійного синхронного двигуна магнітоплану від довжини фідерних ліній …… 531
Ю. М. Лаврич, Л. М. Погоріла
Інноваційна технологія побудови магнітолевітаційної енергосистеми …….. 533
М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповська
Імпульсний метод контролю стану працездатності накопичувача енергії в системі енергозабезпечення транспортних засобів ……..... 535
М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповська
Розробка алгоритму визначення поточного стану працездатності електрохімічних накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення транспортних засобів …… 537
М. С. Арсенюк
Чисельне моделювання структури течії навколо безпілотного апарату типу «літаюче крило» ……..... 540
Ю.М.Лаврич, Л. М. Погоріла
Енергетичні технології побудови гібридних накопичувачів електричної енергії …….. 542

С. В. Плаксін, О. О. Голота
Режими роботи 2-х режимного тягово-левітаційного модуля ……..... 544
Ю. В. Шкіль, О. О. Голота
Просторова стабілізація екіпажу високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи ……..... 546
Ю. В. Шкіль, О. О. Голота
Екологічно раціональна енергосистема, як основа перспективного високошвидкісного наземного транспорту ……..... 548
С. В. Плаксін, Д. В. Устименко
Порівняльний аналіз систем підвішування екіпажу в магнітолевітаційних транспортних системах ……. 550
С. В. Плаксін, Д. В. Устименко
Лінійні електродвигуни в магнітолевітаційних транспортних системах ……. 552
Ю. В. Шкіль, Є. М. Чуприна
Вплив довжини фідерної лінії на енергетичні показники лінійного тягового електродвигуна магнітолевітаційного транспорту ……. 554
А.М. Муха, Ю.В. Шкіль, Є.М. Чуприна
Використання мікропроцесорної платформи Arduino Mega для керування натурними моделями високошвидкісних магнітолевітаційних поїздів …….. 556
М.В. Костиря, М.Д. Кошель, С.В. Корпач
Фактори електрохімічної стійкості залізних електродів лужного акумулятора в транспортних та енергетичних системах ……. 558

Секція 7

Математичні моделі та методи механіки неоднорідних структур

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

О. В. Марчук
Аналітичний розв’язок термопружної задачі для функціонально градієнтних пологих оболонок та плит за наявності внутрішнього джерела енергії …… 560
Х.І. Середницька
Задача термопружності для міжфазної тріщини з ділянками контакту за умов неідеального теплообміну …… 562
Я.Д.П’янило, Г.Т.Лянце, Г.М.П’янило
Визначення концентрації та потоку речовини у водних розчинах пористих середовищ з використанням похідних дробового порядку …….. 564
В. І. Острик
Контакт зі зчепленням і проковзуванням берегів міжфазної тріщини за складного навантаження …….. 566
А. Величкович, І. Шацький, В. Шопа
Розсіювання енергії у фрикційному демпфері з розімкнутою рівноміцною оболонкою …… 568
О. Вовк, Р. Кушнір
Аналітично-числовий підхід до розв’язування задач термопружності для термочутливих кусково-однорідних тіл ……. 570
Ю. В. Токовий, Д. І. Бойко
Побудова розв’язків тривимірних задач теорії пружності для неоднорідного трансверсально ізотропного шару …….. 572

Ю. В. Токовий, М. Й. Юзв'як
Дослідження напружень у плоскодеформованому планарно-неоднорідному прямокутному брусі ……. 574
О.Д. Онопрієнко, В.Б. Говоруха, Т.С. Кагадій, А.Г. Шпорта
Математичне моделювання в задачах з урахуванням електропружних та п'єзомагнітних властивостей матеріалів ……. 576
В. В. Пастернак, Г. Т. Сулим
Моделювання умов взаємодії пружних суцільних середовищ із тонкими включеннями у системах кристал – квазікристал ……. 578
В. В. Михаськів, І. Я. Жбадинський
Реакція пружної матриці з двоперіодичними жорсткими дисковими включеннями на хвильове навантаження …….. 580
Г. Ю. Гарматій, Б. М. Калиняк
Термонапружений стан термочутливого порожнистого циліндра з ФГМ покриттям за конвективно-променевого теплообміну …….. 582
О. І. Кваснюк
Періодична система близько розміщених анізотропних включень різної гладкої форми у анізотропній матриці за антиплоскої деформації ……. 584
Ю. В. Бойчук
Математична модель визначення температури поверхні під шаром ізоляції за даними інтенсивності вихідного випромінювання …… 586
Б.Д. Дробенко, М.В. Марчук, М.М. Хом'як, Д.В. Клименко, В.М. Сіренко, В.М. Харченко Математичне і комп'ютерне моделювання процесів деформування складних конструкцій за руйнівних навантажень …… 588
Р. М. Кушнір, Я. М. Пастернак , Г. Т. Сулим
Взаємодія тонких оболонкових включень у пружному середовищі за гармонічних коливань ……. 590
Л. І. Постолакі
Визначення напружено-деформованого стану циліндра під дією власної ваги з використанням варіаційного підходу …… 592
Є.М. Ірза
Методика оптимізації режимів термообробки елементів конструкцій із функціонально-градієнтних матеріалів …….. 594
О. Р. Гачкевич, Т.В. Козакевич, Т. Волчаньскі
Проблеми визначення фазового складу та залишкових напружень у сталевих тілах за нагріву ……. 596
Б. І. Гайвась, А. Дмитрук
Воднево-індуковане руйнування металів: декогезійно-дифузійна модель ……. 598
К. В. Васільєв, Г. Т.Сулим
Непрямий метод граничних елементів у задачах поздовжнього зсуву анізотропних тіл з тріщинами …… 600
А. В. Столярова, С. М. Гребенюк
Визначення ефективних в'язкопружних характеристик при поздовжньому розтягу двофазового композиту ……... 602
Р. Рабош, Р. Андрійчук, В. Міщенко
Моделювання динамічної взаємодії тонкостінного п'єзоелектричного включення із п'єзоелектричною матрицею …… 605
М. В. Маковійчук, Т. М. Даляк
Двобічні оцінки граничних навантажень за згину циліндричної оболонки з поздовжніми колінеарними тріщинами …….. 606
Л. Р. Куротчин
Напружено-деформований стан пружно-пластичної однорідної пластини з двома тріщинами …….. 608

О. В. Солодун
Вищі резонанси коливань рідини в тороїдальних контейнерах ……. 610
О. І. Тужеляк
Вплив зміни напрямку ортотропії на динамічну поведінку пластини з включеннями за дії розподіленого навантаження …….. 612
Р. Андрійчук, Ю. Максимів, В. Матус, В. Пороховський
Розсіяння SH-хвиль періодичним міжфазним масивом пластинчастих п’єзоелектричних включень ……. 614
І. С. Скородинський
Визначення контактного тиску між нескінченним в’язкопружним двопараметричним шаром та жорсткою основою …… 615
В.П. Ревенко
Метод розв’язання зв'язаної задачі теорії термопружності за дії об'ємних сил 617
Poliakov V. L.
On the Biofiltration of Water Contaminated with Organic Pollutants …….. 619

Секція 8

Міцність матеріалів та елементів конструкцій обладнання АЕС

Українське ядерне товариство;
ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки»;
АТ «НАЕК «Енергоатом»

Oliver Martin
The VERLIFE Guidelines – 2024 Version and On-going Revision …….. 622
О. П. Шугайло
Аналізи старіння, що визначають строк служби, та практика їх застосування при обґрунтуванні довгострокової експлуатації елементів і конструкцій АЕС 623
V. Pištora, M. Pošta, K. Šišková
Assessment of thermal-hydraulic uncertainties within APAL project …….. 625
P. Gal, J. Cerny, V. Pistora
Fatigue assessment of welds with incomplete penetration and in structurally complex areas ……. 627
М.В. Баняс, А.О. Касяненко, М.С. Зарицький, С.А. Радченко
Методологічні підходи до оцінки міцності крихкого руйнування корпусу та внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 …….. 629
А.О. Касяненко, М.В. Баняс, М.С. Зарицький, Є.Л. Данильчук, С.А. Радченко
Аналіз імовірності крихкого руйнування як інструмент кількісної оцінки безпеки корпусів реакторів ВВЕР-1000 …… 631
В. М. Дємєнков, О. П. Шугайло, Д. С. Брік, Б. О. Чумель
Оцінка розпухання вигородки корпусу реактору ВВЕР-1000 в межах реалізації проєкту DELISA-LTO (EURATOM) ……. 633
Є.Л. Данильчук, М.В. Баняс, С.А. Радченко
Комплексний підхід до оцінки безпечної експлуатації вигородки реактора ВВЕР-1000: від вимірювань формозміни до прогнозних розрахунків …… 635
Д. В. Рубан, Р. О. Ліщук, Г. Ю. Євлахович
CFD аналіз для цілей обґрунтування міцності елементів ВБ реактора ВВЕР-1000 …… 637
В. О. Посох, А. А. Келін
Збереження кваліфікації діючого обладнання як один із основних критеріїв безпечної довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС …… 639

І. О. Трусов, В. О. Посох
Методологічні підходи щодо переоцінки сейсмостійкості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС ……. 641
О. В. Халченков, О. П. Шугайло, А. В. Панченко, М. А. Комар Аналіз підходів до оцінки міцності захисної оболонки ВВЕР-1000 при екстремальних динамічних впливах з використанням ПК ЛІРА-САПР …… 643
О-р.П. Шугайло, Д.І. Рижов
Впровадження у національну практику сучасних міжнародних підходів до оцінки безпеки елементів АЕС за техногенних впливів ……... 645
І.О. Трусов
Методологічні підходи до оцінки сейсмостійкості будівельних конструкцій та споруд атомних електростанцій …… 647
В.І. Щербій, І.О. Трусов, Л.Ф. Первушова
Розрахунок поверхових спектрів відгуку будівель і споруд енергоблоків атомних електростанцій з урахуванням заглиблення фундаментів ……. 649
Л.Ф. Первушова
Обґрунтування цілісності та герметичності гермооб'єму та ГСО енергоблоку ВВЕР-1000 при розширених проєктних умовах категорії Б (важких аваріях) 651
М.С.Барабаш, О.В. Журавльов
Досвід чисельного моделювання та оцінки міцності конструкцій будівель та споруд АЕС ……. 654
М.А. Ромашкіна
Визначення еквівалентних внутрішніх зусиль у пластинних аналогах методом скінченних елементів у LIRA-FEM при оцінці міцності будівельних конструкцій АЕС…….. 656
Б. Ю. Писаревський
Нові обчислювальні методи динаміки конструкцій у LIRA-FEM: ритц-вектори, модальний аналіз із демпфуванням, модальна суперпозиція для оцінювання міцності елементів конструкцій обладнання АЕС …….. 658
А. А. Келін, Т.П. Донець
Підходи до розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації кабельних конструкцій енергоблоків АЕС …….. 660
А. Богдан, В. Гусак, В. Антонченко
Оцінка цілісності підземних трубопроводів системи технічного водопостачання відповідальних споживачів АЕС при обґрунтуванні довгострокової експлуатації …… 662
G. Petofi
IAEA activities in support to long term operation and ageing management ……. 664
Robert Krivanek
OECD/NEA Project on 'LTO Beyond 60 Years' and LTO Beyond 60 Years Perspectives 665
О. В. Тригубенко, Е.М. Чалий, С.А. Радченко, В.М. Ревка
Нормативні особливості оцінки ресурсу корпусу реактора ВВЕР-440 у період після відновлювального відпалу ……. 667
С. М. Банько, О. П. Шугайло, Д. С. Брік, А. М. Колупаєв
Створення бази даних матеріалів корпусів реакторів АЕС за підсумками реалізації проєкту ENTENTE (EURATOM) …….. 670
М. Заразовський, С. Агеєв, В. Гусак
Особливості обґрунтування безпечної експлуатації КР ХАЕС-1 для ДСЕ …… 672
Я.П. Черняк, О.П. Шугайло, А.А. Бабінець, К.С. Бендюг
Особливості переходу від радянських стандартів до національних для основних та зварювальних матеріалів, дозволених до використання на АС України ……... 674

Є.О. Кондряков, А.В. Кравчук, В.В. Харченко
Експериментально-розрахункові дослідження процесів зародження та розповсюдження тріщини в сталі 22К …… 676
А. М. Жовтобрюх, В.Г.Сидяченко, А.А.Котляренко
Методологія врахування двовісного навантаження за наявності коротких тріщин з використанням двопараметричного критерія руйнування …… 678
С. О. Котречко, К. Ф. Сорока, В. М. Ревка
Коригування порогового рівня енергії удару металу корпусів ядерних реакторів в процесі експлуатації ……. 680
Ю. Я. Мєшков, Г. П. Зіміна
Механічні властивості металевих матеріалів і втрата тримкої здатності елементів конструкцій під дією концентраторів напружень …… 682
С. О. Котречко,Г. П. Зіміна, В. М. Ревка
Інженерно-адаптована версія Локального підходу до руйнування та її використання для прогнозування величини граничного флюенса на корпус реактора …….. 684
С.О. Котречко, О.В. Зацарна, С. Радченко
Врахування ефекту втрати перенапруження при визначенні референсної температури на зразках-свідках типу PCVN …….. 686
Т. В. Пирогов, М.С. Скоромний, В.В. Ярмолюк
Вдосконалення (еволюція) розрахункової моделі парогенератора ПГВ-1000М при обґрунтуванні безпечної експлуатації на період ДСЕ енергоблоків АЕС України ……..... 688
А.І. Новіков, О.С. Кучер, А.А. Ференець, С.Д. Мальований.
Обґрунтування безпечних меж зазорів аварійних опор ГЦТ на енергоблоках з ВВЕР-1000 ……. 690
А.І. Новіков, О.С. Кучер, Р.П. Приходько, С.Д. Мальований
Оцінка впливу температурної стратифікації теплоносія в розрахунках на міцність трубопроводів енергоблоків з ВВЕР-1000 ……. 692
А.І. Новіков, С.О. Кучер, Р.П. Приходько, М.Ю. Швець, С.Д. Мальований
Підходи до виконання робіт з розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації трубопроводів та трубопровідних арматур ……. 694

Забезпечення міцності матеріалів і конструкцій як основа створення сучасної техніки . До 60-річчя заснування Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

О. Ю. Чирков

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

chirkale82@gmail.com

Ключові слова: Інститут проблем міцності, наукові школи, основні напрями діяльності, механіка деформівного твердого тіла, механіка руйнування, термосилове навантаження, моделі та методи оцінки міцності.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України є одним із провідних наукових центрів у галузі механіки деформівного твердого тіла, міцності матеріалів і конструкцій. Заснований у 1966 році академіком НАН України Г.С. Писаренком, Інститут протягом шести десятиліть проводить фундаментальні та прикладні дослідження, спрямовані на розвиток теоретичних основ міцності, довговічності й надійності матеріалів і конструкцій, а також на створення моделей і методів оцінювання їхньої міцності за складних умов термосилового навантаження. На сьогодні Інститут залишається єдиною в Україні спеціалізованою науковою установою, де комплексно досліджуються міцність і довговічність існуючих та нових матеріалів, а також конструктивних елементів у реальних умовах експлуатації й екстремальних термосилових навантажень.

Наукові школи Інституту, започатковані академіком Г.С. Писаренком, зробили вагомий внесок у розвиток механіки матеріалів і конструкцій, фізики міцності та механіки руйнування, а також у розроблення моделей і методів розв’язання широкого спектра науково-прикладних задач сучасної техніки. За роки діяльності в Інституті сформувалися відомі наукові школи: дослідження міцності матеріалів і конструкцій в екстремальних умовах, заснована академіком Г.С. Писаренком; теорія коливань неконсервативних механічних систем, очолювана академіком В.В. Матвєєвим; розробки критеріїв руйнування і теорій міцності матеріалів за умов циклічного навантаження, сформована під керівництвом академіка В.Т. Трощенка; дослідження закономірностей деформування та руйнування матеріалів і конструкцій за складного напруженого стану, започаткована академіком А.О. Лебедєвим.

Загальна концепція наукової діяльності Інституту ґрунтується на органічному поєднанні фундаментальних і прикладних досліджень, що дає змогу ефективно вирішувати актуальні проблеми міцності матеріалів і конструкцій на високому науковому рівні та доводити результати наукових розробок до їхнього вагомого практичного використання. Стратегічне планування діяльності та наукові пріоритети Інституту базуються на розвитку потужної й унікальної експериментальної бази разом зі створенням новітніх моделей та методів розрахунку елементів конструкцій сучасної техніки.

На сьогодні парк випробувальних установок і стендів Інституту налічує понад 150 одиниць. До його складу входять серійні випробувальні машини й обладнання промислового виробництва, що експлуатуються у своїй оригінальній комплектації, а також серійні машини і обладнання, які суттєво модернізовані й дооснащені додатковими технічними засобами для проведення спеціалізованих досліджень. Важливою складовою експериментальної бази є оригінальні випробувальні стенди, машини та обладнання, розроблені й виготовлені в Інституті. Більшість із них є унікальними науковими установками без аналогів в Україні. Результати науково-технічних розробок Інституту у сфері створення та модернізації випробувального обладнання захищено 675 авторськими свідоцтвами і патентами.

Найбільш оригінальне й унікальне обладнання, розроблене в Інституті для дослідження міцності матеріалів і конструктивних елементів в екстремальних умовах термосилового навантаження, віднесено до наукових об'єктів, що становлять національне надбання України. Серед них – високотемпературний газодинамічний стенд, пневмогідравлічний кріогенний стенд, а також стенди для дослідження процесів ударного й імпульсного навантаження. Значний науковий і практичний інтерес становить також інше випробувальне обладнання, створене в Інституті. Зокрема, прикладом таких розробок є автоматизований стенд для визначення нестаціонарних аеродинамічних характеристик та дослідження динамічної стійкості систем тіл, що здійснюють коливання в потоці.

Інститут забезпечує функціонування Центру колективного користування машиною для механічних випробувань матеріалів INSTRON, який надає послуги з визначення механічних характеристик матеріалів і роботоздатності конструктивних елементів. Робота Центру підтримується Інститутом не лише технічно, а й методично з використанням власного досвіду й оригінальних, передових науково-технічних розробок, що фактично перетворює його на Центр передового досвіду. Інститут забезпечує діяльність Центру механічних випробувань матеріалів і елементів конструкцій, до компетенції якого входять випробування металевих і полімерних матеріалів відповідно до національних, європейських та міжнародних стандартів.

Протягом своєї історії Інститут розвиває широкий спектр фундаментальних і прикладних досліджень у галузі механіки матеріалів і конструкцій, спрямованих на отримання нових наукових результатів та їхнє практичне застосування. Основні напрями наукової діяльності включають: граничний стан і критерії міцності матеріалів і конструкцій; розрахункові та експериментальні методи визначення напружено-деформованого стану; дослідження процесів руйнування та живучості конструкцій, а також коливання неконсервативних механічних систем.

Подальший розвиток наукових напрямів зумовлений потребою вирішення актуальних науково-технічних задач, зокрема: визначення граничного стану та критеріїв міцності елементів конструкцій в енергетичному й транспортному машинобудуванні, авіаційній та ракетно-космічній техніці, а також у тепловій і атомній енергетиці, що експлуатуються в екстремальних умовах; дослідження цілісності та живучості матеріалів і конструкцій з тріщиноподібними дефектами під статичним і циклічним термомеханічним навантаженням; забезпечення вібраційної надійності механічних систем; розроблення моделей і методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкцій з врахуванням технологічних та експлуатаційних чинників: удосконалення методів неруйнівного контролю для оцінки

технічного стану конструкцій; створення розрахункових та інструментальних методів визначення залишкового ресурсу на стадіях розвитку розсіяного і локалізованого пошкоджень. За роки діяльності Інституту розроблено сучасні методи експериментального дослідження механічних властивостей матеріалів, створено нові моделі та методи розрахункового аналізу процесів деформування і руйнування, а також отримано вагомі практичні результати, що знайшли застосування в атомній галузі, енергетичному й транспортному машинобудуванні, авіаційній та космічній техніці. В останні роки Інститут залучений до вирішення науково-технічних проблем, спрямованих на зміцнення обороноздатності та забезпечення національної безпеки держави.

Практична спрямованість діяльності Інституту підтверджується багаторічною плідною співпрацею з високотехнологічними підприємствами України, зокрема: «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля», АТ «Антонов», АТ «Івченко-Прогрес», ДП НВК «Зоря-Машпроект», НАЕК «Енергоатом», АТ «МОТОР СІЧ», ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор», Національний університет оборони України, НВО «ПРАКТИКА», ТОВ «Енергетичні насоси» та інші.

В останні роки результати розрахункових досліджень знайшли відображення у розвитку уточнених методів розрахункового обґрунтування міцності та залишкового ресурсу критичних елементів обладнання реакторних установок із водо-водяним енергетичним реактором. Порівнюючи з наявними підходами, що застосовуються в атомній галузі України та міжнародній практиці, отримані результати дозволили виявити додатковий резерв міцності корпусу ядерного реактора завдяки врахуванню внутрішнього розмірного масштабу мікроструктури та ефекту локального зміцнення металу, встановити вплив поверхневих дефектів корозійного походження на опір руйнуванню корпусу парогенератора, а також отримати прогнозні оцінки незворотної формозміни вигородки активної зони реактора з урахуванням докритичного пошкодження металу за моделями в’язкого руйнування залежно від накопиченої дози нейтронного опромінення. Розроблені моделі й методи розрахунку створюють підґрунтя для розв’язання актуальних задач обґрунтування безпечної експлуатації енергоблоків атомних електростанцій України та продовження строків їхньої служби.

Важливу роль у поширенні наукових результатів відіграє міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми міцності», що видається Інститутом з 1969 року. Журнал перекладається англійською мовою та виходить під назвою «Strength of Materials». Він індексується в провідних міжнародних наукометричних базах, що підвищує видимість української науки у світі. За підсумками 2024 року імпакт-фактор журналу «Strength of Materials» становив 0,9.

Сьогодні Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України продовжує активно розвивати фундаментальні та прикладні дослідження, підтримує міжнародне наукове співробітництво та готує висококваліфіковані наукові кадри. Ювілей Інституту є нагодою відзначити вагомий внесок його співробітників у розвиток науки та висловити впевненість у подальших успіхах у розв’язанні актуальних проблем механіки та матеріалознавства.

Шістдесят років діяльності Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України – це історія становлення та розвитку потужної вітчизняної наукової школи, значних фундаментальних здобутків і вагомого внеску у світову механіку матеріалів і конструкцій.

Особливості моделей нелінійного деформування матеріалів

Я.Я. Рущицький

Інститут механіки ім. С. П. Т*имошенка НАН України, Київ, Україна*

ryshch@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: нелінійна теорія пружності, нелінійні моделі, особливості моделей

Виступ стосується механіки матеріалів. Механіка як наука зараз перетворилася в дуже розгалужену область знань. Існують різні критерії класифікації механіки. Далі аналізується редукціонізм в рамках діалектики Гегеля.

Друга значно більша частина доповіді присвячена нелінійним моделям. Вони аналізуються і формулюються.

Особливість 1. Кількість моделей досягає кількох десятків всі вони десь відмінні між собою і є іменними (наприклад, модель Трелоара, модель Огдена, модель Менегана - Мурнагана).

Особливість 2. В рамках концепції про поділ пружних матеріалів на три типи – гіпопружні, пружні, гіперпружні - переважна більшість моделей стосується гіперпружних матеріалів. Тут первинним поняття механіки є потенціал (внутрішня енергія деформування).

Особливість 3. Кожен потенціал має представлення через перші три алгебраїчні інваріанти тензора деформації, чи тензора градієнтів деформації.

Особливість 4. Звичайно, потенціал записується в декартовій системі координат. Однак може бути представленим і в будь-якій іншій системі координат завдяки використанню інваріантів. Формули для представлення перших трьох інваріантів в різних криволінійних системах координат відомі.

Особливість 5. Представлення потенціалів є формально відмінним від класичного представлення потенціалу для лінійної моделі Гука. Переважно воно на один порядок менше представлення Гукового потенціалу.

Особливість 6. Пружні константи моделей визначаються експериментально. Зберігаються умови універсальних деформацій: простого розтягу-стиску, простого зсуву, всестороннього розтягу-стиску.

Особливість 7. Ця особливість виявлена в механіці метаматеріалів (зокрема, ауксетичних матеріалів). Два факти характеризують цю особливість.

Факт 1 полягає у тому, що визначальне поняття механіки ауксетичних матеріалів (відношення поперечної до повздовжньої деформації в експерименті на простий розтяг-стиск) може бути коректно описане лише моделями нелінійної теорії пружності. Воно нелінійно залежить від поздовжньої деформації, тоді як в лінійній моделі відношення Пуассона трасформується в пружну константу – коефіцієнт Пуассона.

Факт 2 свідчить, що нелінійні моделі описують нове явище - один і той же мате-

ріал в умовах простого розтягу–стиску деформується пружно (конвенціонально) при малих поздовжних деформаціях і ауксетично (неконвенціонально) при великих поздовжних деформаціях.

1. Guz A.N., Rushchitsky J.J. Short introduction to mechanics of nanocomposites. – Rosemead, CA: Scientific & Academic Publishing, 2013. – 280 p.
2. Rushchitsky J.J., *Nonlinear Elastic Waves in Materials.* – Heidelberg: Springer, 2014. 455 p.
3. Rushchitsky J.J. Foundations of Mechanics of Materials. Copenhagen: Ventus Publishing ApS, 2021 - 276 p.

Features of models of nonlinear deformation of materials

J.J.Rushchitsky

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine

ryshch@inmech.kyiv.ua

This lecture is devoted tp mecanics of materials. The first part os relATeO to the gebera; problems, which are linkewith nonlinearity.
The second more larger part of the lecture is devoted to nonlinear models. They are analyzed and commented. The list of features is proposed.

Keywords: : nonlinear elasticity theory, nonlinear models, features of models

On the Deformation Behavior of 4D-Printed Liquid Crystal Elastomers Under Change of Temperature — A Computational Analysis

L. Schek, E. N. Vilchevskaya, W. H. Müller[1]

Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik, LKM, Einsteinufer 5, 10587 Berlin, Germany.

[1] wolfgang.h.mueller@tu-berlin.de

Keywords: *4D printing, liquid crystal elastomer, FE simulation, Mori-Tanaka scheme, distribution function, shape function.*

This paper focuses on an FE simulation of Liquid Crystal Elastomers (LCE). For this purpose, a new method is proposed based on the combination of nonlinear deformation analysis based on a St. Venant-Kirchhoff law, *i.e.*, a physically linear but geometrically nonlinear stress-strain relationship. The deformation gradient is decomposed multiplicatively into elastic, (classical) thermal, and phase transformation parts. For the transformation part a novel representation is chosen based on an orientation parameter within a distribution function for the mesogens. This parameter can be linked to temperature. The stiffness tensor in the St. Venant-Kirchhoff law as well as the tensor of thermal expansion (for the thermal part of the deformation gradient) are obtained from Mori-Tanaka homogenization schemes. It is shown that classical thermal expansion with positive expansion coefficients and realistic values does not contribute much to the total large deformations. The mayor contribution comes from phase transformation. It is, therefore, misleading to model the deformation of LCEs during temperature change by classical thermal expansion, although exactly this is done in the literature by a trick–namely, using negative anisotropic thermal expansion coefficients.

1. Шек, Л., Вільчевська, О. М., & Мюллер, В. Г. (2025). Computational analysis of the deformation behavior of 4D-printed liquid crystal elastomers under change of temperature. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, 2(9), 134-148.

Damage and limit state of reinforced composite materials

M. I. Bobyr[1], Huang Tao

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

[1] m. bobyr@kpi.ua

Keywords: reinforced composites, thermodynamics of irreversible processes, constitutive equations, damage models, limit state.

The widespread use of reinforced composite materials in load-bearing structural elements for various applications necessitates the development of methods for calculating their load-bearing capacity. Operational loads lead to the formation of extensive distributed damage at the micro- and meso-levels, including matrix microcracking, fibre damage, shear damage, and interlaminar delamination. This leads to the degradation of the mechanical properties of anisotropic reinforced composite materials. Based on the fundamental principles of the thermodynamics of irreversible processes and continuum damage mechanics, phenomenological damage parameters are introduced into the constitutive equations to describe the mechanisms of diffuse fracture [1, 2]. The Weibull distribution [3] and the hypothesis of equivalence of the specific energies of damaged and undamaged reinforced composite materials were employed and substantiated. A methodology has been developed for determining the parameters of the corresponding models. The validity and applicability limits of the damage models were verified through comprehensive experimental studies of reinforced composite materials under various static and cyclic loading conditions and different reinforcing fibre lay-up configurations. This made it possible to identify patterns in the degradation of the mechanical properties of the fibre and matrix, shear damage within the laminate, and interlaminar delamination.

1. Huang T. Prediction ability analysis of phenomenological strength criteria for composites. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), **11**(1), 54–65 (2024).
2. Tao H. Numerical and analytical method of damage development in anisotropic plates. International Scientific and Technical Conference “The Progressive Technics, Technology and Engineering Education”, XXIV, 27–30 (2025).
3. Huang T., Bobyr M. A review of delamination damage of composite materials. Journal of Composites Science, **7**(11), 468 (2023).

Strain-gradient elastic–plastic model

L. Nazarenko[a] , O. Yu. Chirkov[b1], H. Altenbach[a]

[a]Otto von Guericke University, Magdeburg, Germany

[b]Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] chirkale82@gmail.com

Keywords: elastic-plastic model, strain gradient elasticity, Drucker's postulate, boundary value problem, variational formulation.

Consider a simplified strain-gradient elastic-plastic model that incorporates size-dependent effects associated with the microstructure of an isotropic material [1,2]. It is assumed that the elastic strains and their gradients are described by the equations of the simplified strain-gradient elasticity theory [3,4]. The plastic flow equations are formulated using a dissipation function expressed in terms of the plastic strain rates and their corresponding gradients. According to the adopted formulation, the elastic–plastic model is enriched by including gradients of both elastic and plastic strains, thereby extending the modeling capabilities through the introduction of an internal material length scale associated with elasticity and plasticity-induced dissipation. An alternative approach is employed in which the plastic flow equations are integrated over the loading stage. As a result, the constitutive relations are formulated not in incremental form but directly in terms of the full components of stresses, strains, and their gradients. A distinctive feature of the resulting equations is their formal similarity to the equations of the deformation theory of plasticity. This property facilitates the analysis of the consistency of the formulation and its application to boundary-value problems. The conditions under which the considered strain-gradient elastic–plastic model does not contradict Drucker's postulate are determined. A variational formulation of the boundary-value problem is presented in mixed form with respect to displacements, strains, stresses, and strain gradients. Finally, results of solving the model problem of uniaxial tension in a square plate with a narrow U-tip cutout, within the strain gradient elasticity theory, are presented.

1. Nazarenko L., Chirkov A. Yu., Altenbach H. Mixed finite element method for a simplified gradient elastic-plastic model: formulation, implementation, and application to representative problems. "The International Conference on Plasticity, Damage & Fracture 2026", Geelong, Australia, Jan. 3-8, 2026.
2. Chirkov O.Y., Nazarenko L. Simplified Elastic-Plastic Model with a Strain Gradient, Strength of Materials, **57**(3), 459–478 (2025).
3. Chirkov A. Yu., Nazarenko L., Altenbach H. Plane crack problems within strain gradient elasticity and mixed finite element implementation, Comp. Mech., **74**(3), 703–721 (2024).
4. Nazarenko L., Chirkov A. Yu., Altenbach H. Axisymmetric problem within strain-gradient elasticity and mixed FEM solution for cylinders with cracks under tension, Math. Mech. Solids, **30**(12), 2896–2914 (2025).

Стратегія забезпечення продовження строку експлуатації елементів реактора ВВЕР-1000 АЕС України понад 60 років

С.А. Радченко[1], О.В. Зелений

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] s.radchenko@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: корпус реактора, внутрішньокорпусні пристрої, вигородка реактора, зразки-свідки, крихка міцність.

Продовження строку експлуатації діючих АЕС є однією з найважливіших тенденцій сучасного етапу розвитку атомної енергетики та найбільш ефективним напрямом вкладення коштів для збереження генеруючих потужностей. Власний досвід України та досвід провідних країн світу вказують на можливість продовження строку експлуатації АЕС на 30 років і більше.

Обґрунтування такої можливості для елементів реактора енергоблоків ВВЕР-1000 досягається за рахунок реалізації стратегії забезпечення надійної та безпечної експлуатації у надпроектний термін і включає:

- аналіз всього комплексу наявних робіт з оцінки технічного стану та продовження строку експлуатації (ОТС та ПСЕ);
- виявлення проблемних питань, що обмежують можливість продовження експлуатації елементів реактора терміном на 60 років і більше;
- розробку та реалізацію планів дій щодо забезпечення цілісності та ресурсу елементів реактора на строк 60 років і більше з урахуванням рекомендацій щодо:
    - вдосконалення нормативної та методологічної бази;
    - вдосконалення розрахункових методів;
    - аналізу та управління старінням;
    - модернізації матеріальної бази та програмного забезпечення;
    - виконання науково-дослідних робіт.

Під час виконання робіт з ОТС та ПСЕ для елементів реактора виявлено низку актуальних питань, вирішення яких необхідне для подальшого продовження терміном до 60 і більше років.

Одним із найскладніших питань для корпусу реактора, що обмежує його ресурс, є комплексна задача оцінки крихкої міцності. В Україні діяла низка нормативних документів щодо розрахунку корпусу реактора на крихку міцність, що призводило до невизначеності отриманих результатів. Наразі для оцінки крихкої міцності корпусів реакторів використовується стандарт [1], який регламентує процедури з:

- визначення геометричних розмірів постульованих тріщин;
- виконання теплогідравлічних розрахунків;
- застосування методу скінченних елементів в розрахунках параметрів механіки руйнування;
- визначення допустимих значень параметрів механіки руйнування в основному металі та наплавленні КР.

Визначення окрихчування металу КР виконується шляхом випробувань зразків-свідків, які розміщені в реакторі та повинні піддаватися прискореному нейтронному опроміненню для можливості прогнозування деградації матеріалу корпусу. Зразки досліджуються в рамках штатних, модернізованих або додаткових програм. Штатні програми ЗС не розраховані на здійснення матеріалознавчого супроводу КР на термін 60 і більше років. Додатково слід враховувати, що впровадження нового палива компанії Westinghouse призводить до зменшення накопиченого флюєнсу на зразках за рахунок наявності бланкета у нових ТВЗ, що вимагає перегляду термінів вивантаження комплектів ЗС та схеми модернізації штатних збірок зі ЗС.

Для вирішення цих питань в рамках «Комплексу розрахунково-аналітичних робіт з обґрунтування ДСЕ КР ВВЕР-1000 за ЗС» розроблений відповідний «Перелік заходів» [2], спрямований на забезпечення моніторингу змін механічних властивостей металу й оцінку ресурсу КР.

Ключовою проблемою продовження внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) є наявність формозміни вигородки реактора, що призводить до:

- вичерпання зазорів «тепловиділяюча збірка – вигородка» та «шахта внутрішньокорпусна (ШВК) – вигородка»;
- недотримання крихкої міцності кріпильних елементів вигородки в понад проектний період експлуатації.

Для забезпечення цілісності та ресурсу ВКП реакторів енергоблоків ВВЕР-1000 на термін 60+ розроблено відповідний документ [3], який включає вдосконалення методичної, технічної та розрахункової бази щодо:

- визначення радіаційних розігріву та пошкодження вигородки та ШВК;
- розрахунків на міцність та формозміну ВКП;
- оцінки технічного стану ВКП;
- організації та виконання вимірів геометричних розмірів вигородки.

Обмеження ресурсу опорних елементів реактора пов'язане з можливим прискореним окрихченням сталей. Для вирішення цієї задачі розроблено документ [4] і вже створено матеріалознавчий канал для дослідного реактора. В рамках загальної стратегії забезпечення надійної та безпечної експлуатації обладнання енергоблоків у надпроектний термін розроблено бази розрахункових моделей тепломеханічного обладнання та трубопроводів, відповідні програмні засоби, що базуються на сучасних методах механіки руйнування, бази даних обліку ЗС.

Реалізація вищезазначених заходів створила достатнє підґрунтя для можливості обґрунтування безпечної експлуатації елементів реактора енергоблоків ВВЕР-1000 на строк 60 років і більше.

1. СОУ НАЕК 177:2023 Інженерна, наукова і технічна підтримка. Методика оцінки крихкої міцності корпусів реакторів ВВЕР.
2. «Перелік заходів з обґрунтування довгострокової експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000 за зразками свідками»
3. План дій ДП «НАЕК «Енергоатом» щодо забезпечення цілісності та ресурсу внутрішньокорпусних пристроїв реакторів енергоблоків ВВЕР-1000.
4. «Програма опромінення зразків з матеріалу опорних елементів реактора ВВЕР-1000».

Strategy for ensuring the extension of the operational life of the WWER-1000 reactor elements of the Ukrainian NPP beyond 60 years

S. Radchenko[1], O. Zeleny[a]

Affiliate "SS "Scientific and Technical Centre" of JSC "NNEGC "Energoatom", Kyiv, Ukraine.

[1] s.radchenko@direkcy.atom.gov.ua

In the paper, topical issues are considered, the resolution of which is necessary to ensure a safe lifetime extending beyond 60 years for the vessel, its internals, and support elements of the WWER-1000 reactor. To achieve the objectives, improvements to the normative base and calculation methods were implemented. Special attention was paid to embrittlement determination using standard and modernized programs of surveillance specimens, which are located in the reactor and exposed to accelerated irradiation for predictive purposes. Performing these tasks required developing a large number of calculation models of equipment and pipelines, corresponding program applications, and databases.

Keywords: reactor vessel, RPV internals, core baffle, surveillance-specimens, brittle strength.

Прогнозування залишкового ресурсу роботи машин з тривалим терміном експлуатації

Г. Г. Писаренко[a1], О.В.Войналович[б2], А.М.Майло[a3]

[a]Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

[1]georgiy.pysarenko@gmail.com,[2]voynalovich@nubip.edu.ua, [3]maylo@ipp.kiev.ua

Ключові слова: дефектоскопічний контроль, накопичення пошкоджень, експлуатаційні тріщини, залишковий ресурс

До важливих і водночас складних задач машинобудування (зокрема сільськогосподарського та транспортного) та використання машин належить проблема підвищення надійності (довговічності) деталей і металоконструкцій [1, 2]. Особливе місце займає прогнозування ресурсу машин на стадії їх експлуатації. Складність встановлення критеріїв оцінення довговічності та прогнозування ресурсу роботи полягає насамперед у багатофункціональності складових елементів машини та особливостях їх взаємодії.

Сучасний підхід до експлуатаційної надійності машин передбачає періодичний контроль стану металоконструкції чи деталей машини, коли оцінюють спектральний складструктурозалежних дефектів, що виникають і розвиваються у процесі експлуатації, з метою уникнення зруйнування металоконструкції [3]. Наявність динамічної структури системи технологічних і експлуатаційних дефектів вимагає системи високотехнологічного апарату науково-технічного забезпечення системи сервісного обслуговування мобільних сільськогосподарських машин на всіх етапах експлуатації. Системний сервіс технічного забезпечення машин, в яких деталі зазнають інтенсивного силового та корозійного навантаження,має бути спрямовано на виявлення дефектів у критичних зонах елементів металоконструкцій з найбільшою ймовірністю руйнування за нерегулярного втомного навантаження, визначення оптимальної тривалості міжремонтних періодів, окреслення основних вимог щодо доступності вузлів для контролю їх стану, підвищення ймовірності виявлення дефектів в елементах конструкції.

Під час виконання пошукових науково-дослідних роботі Інститутом проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України разом з Національним університетом біоресурсів і природокористування України було розроблено апаратний комплекс автоматизованого контролю визначення закономірностей накопичення експлуатаційного пошкодження на базі портативного магнітодинамічного компаратора, що дозволяє визначати спектральний склад просторових частот процесу накопичення експлуатаційних тріщин у відповідальних деталях вузлів тракторів[4].

У цій роботі представлено методологію оцінення залишкового ресурсу тракторів чи їх окремих компонентів після тривалої експлуатації на основі даних дефектоскопічного контролю. Ця методологія базується на підходах методу аналізу кінетики пошкодженості металевих конструкцій, які зазнавали нерегулярного механічного навантажування,враховуючи, що еволюція фрактальної розмірності

корелює з просторовою частотою спектру мікропластичних дефектів на межі циклічної плинності, а граничне значення фрактальної розмірності не залежить від параметрів механічного навантажування[1]. Встановлено, що кінетика інтенсивності зародження експлуатаційних мікротріщин у масиві відповідальних деталей тракторів характеризується діапазоном 0,6-0,7 відносної тривалості експлуатації тракторів, що відповідає діапазону 11-13 років. Цей показник рекомендовано вважати нормативним критерієм безпечної експлуатації тракторів.

1. Войналович О.В., Писаренко Г.Г., Майло А.М. та ін. *Методи дослідження закономірностей накопичення експлуатаційного пошкодження металоконструкцій за тривалої експлуатації та оцінення ресурсу сільськогосподарської техніки: монографія*. Київ: НУБіП України (2019).
2. Олег Герасимчук, Олег Кононученко. *Мікроструктурозалежна модель втомного руйнування – новітній підхід у прогнозуванні опору втомі конструкційних сплавів: монографія*. Київ: Академперіодика (2025).
3. Georgiy Pisarenko, Oleksandr Voinalovych, Ivan Rogovskii, Myhailo Motrich. Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates.*18th International Scientific Conference "Engineering for rural development", Jelgava, Latvia, 22-24.05.2019*,199-205 (2019).https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N248.pdf.
4. Писаренко Г.Г., Войналович О.В., Майло А.М. Сучасні методи дослідження розсіяного пошкодження в конструкційних матеріалах та прогнозування довговічності.*Machinery&Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukraine,*Vol. 10,No 2,77-83 (2019).DOI: 10.31548/machenergy.2019.01.063-069.

Forecasting the remaining service life of machines with long service lives

G. Pysarenko[a1], O. Voinalovych[b2], A. Майло[a3]

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1]georgiy.pysarenko@gmail.com, [2]voynalovich@nubip.edu.ua, [3]maylo@ipp.kiev.ua

To calculate the risk and safety indicators of the tractor it is proposed to use the data of defectoscopic control of the array of responsible tractor parts and to analyze the kinetics of accumulation of the total damage in the array of these parts by analogy with the estimation of the boundary elasticity of the surface layer of metal by multi-cycle fatigue. It is established that the dependences of the kinetics of the accumulation of cracks in the details of systems (units) of the tractor with a high degree of reliability can be described by exponential diagrams within the studied range of service life, which is characteristic of the laws of monotonic accumulation in model samples of structural materials of scattered fatigue damage.

Keywords: defectoscopic control, accumulation of damage, operational cracks, residual resource

Вплив понижених температур та напрацювання в колії на міцність рейкової сталі

Л.С. Новогрудський[a1], М.Я. Оправхата[б]

[a]Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]АТ "НАЕК " Енергоатом", Київ, Україна

[1] novogrud@ukr.net

Ключові слова: механічні характеристики; напрацювання; температура; рейкова сталь, допустимі напруження.

Надійність функціонування залізничного транспорту в значній мірі визначається станом рейкових колій, , які повинні зберігати гарантовану несучу здатність протягом всього терміну роботи, забезпечуючи при цьому максимально можливу довговічність і високу втомну міцність в умовах експлуатації. Однак відомо, що рейки з мартенситної сталі в умовах навантажень, що змінюються, можуть зменшувати свою циклічну міцність і довговічність, а також схильні до крихких зламів в холодну пору року [1] . Це пов'язано з процесами старіння, накопичення значних пластичних деформацій, структурних змін в металі, ін. за час експлуатації.

Небезпека деградації механічних властивостей матеріалу рейок, раптових зламів і поверхневих руйнувань вказує на необхідність детального вивчення закономірностей змін механічних характеристик рейкових сталей при тривалому впливі експлуатаційних навантажень та температур. Зокрема, значне значення має вивчення закономірностей зміни в таких умовах величини границі плинності рейкової сталі, що до якої визначаються допустимі категорії напружень, і, отже, оцінюється міцність рейки [2].

Метою цієї роботи була оцінка впливу охолодження до 213 К на міцність рейкової сталі після її тривалої експлуатації в рейковій колії.

Для досліджень використано матеріал рейок типу Р65 виробництва ПАТ «МК «Азовсталь» із сталі М76 у вихідному стані та після їх тривалої експлуатації в колії. В якості вихідного стану в даних дослідженнях використано матеріал нової рейки після термічної обробки (середній відпуск). Експлуатаційне напрацювання рейок відбувалось на прямолінійній та криволінійній ділянках колії і на момент їх зняття сумарна кількість пропущеного тоннажу склала близько 900 млн. т брутто. Зразки для досліджень вирізали з головки рейки у повздовжньому та поперечному напрямках.

Встановлено, що дія експлуатаційних навантажень на рейки в колії приводить до зміцнення їх матеріалу в поперечному напрямку та зниженню значень характеристик міцності в повздовжньому напрямку. Так рівень умовної границі плинності в поперечному напрямку рейки з напрацюванням в прямолінійній ділянці колії на 10,4 % перевищує аналогічні значення в повздовжньому напрямку цієї рейки. Для матеріалу рейки у вихідному стані зміна температури випробувань від 293 К до 213 К несуттєво змінює величину умовної границі плинності як в повздовжньому, так і в поперечному напрямку. Також незначними виявилися зміни значення умовної границі плинності в повздовжньому напрямку рейки з напрацюванням в криволінійній ділянці колії. Але,

при пониженні температури від 253 К до 233 К зменшення значення умовної границі плинності в повздовжньому напрямку рейки з напрацюванням в прямолінійній ділянці колії склало ~30 %. Суттєве температурне зміцнення (~20 % при охолодженні від 293 К до 213 К) спостерігалось в поперечному напрямку рейки з напрацюванням в криволінійній ділянці колії .

За допомогою методики [2] та отриманих значень умовної границі плинності рейкової сталі визначили значення розрахункових допустимих напружень. Встановили, що значення розрахункових допустимих напружень для матеріалу рейки з напрацюванням в прямолінійній ділянці колії при охолодженні до 213 К на 31 % менше регламентованого нормативними документами рівня.

Таким чином, зміна значень умовної границі плинності рейкових сталей в процесі роботи рейок в залізничних коліях призводить до суттєвого зниження рівня розрахункових допустимих напружень, що необхідно враховувати при проектуванні залізничних колій особливо тих, які працюють в прямолінійних ділянках в умовах понижених температур. Отримані результати підтверджують необхідність в проведенні розширених експериментальних досліджень впливу експлуатаційних факторів на механічні характеристики рейкової сталі.

1. Л.С. Новогрудський, М.Я. Оправхата, О.В. Качура. Вплив охолодження на міцність рейкової сталі, *Mechanics and Advanced Technologies, № 2(80),92-97,(2017).*
2. Е.І. Даниленко, В.В. Рибкін, *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість,* Транспорт України, Київ (2004).

The influence of low temperatures and track service life on the strength of rail steel

L. Novogrudskyi[1a], M. Opravkhata[b]

[a]G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine
[1] novogrud@ukr.net

The effect of cooling to 213 K on the characteristics of M76 rail steel after its long-term operation in the railway track was studied. It was established that the greatest decrease in the strength of steel at w temperatures is caused by the long-term operation of rails made of this steel in straight sections of the track, which must be taken into account when designing them.

Keywords*: mechanical characteristics; operating time; temperature; rail steel, permissible stresses.*

Оцінка пошкоджуваності металевих матеріалів за параметрами електричного опору

Є. В. Воробйов[1], Л. С. Новогрудський, М. П. Адамчук, М. П. Земцов

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] evsv1@meta.ua

Ключові слова: пошкоджуваність, залишкова деформація, питомий електричний опір, структура.

Відомо, що одними з найбільш структурно залежних властивостей металевих матеріалів, окрім механічних, є електричні властивості, зокрема питомий електричний опір. Зміна його величини свідчить про зміну структури й фазового складу матеріалу [1]. Тож параметром, що ототожнює пошкоджуваність матеріалу, було використано цю електричну характеристику. Ступінь пошкоджуваності матеріалу D визначали за виразом, форма якого є одною з прийнятих при оцінці пошкоджуваності за будь якими параметрами

$$D = 1 - |\Delta\rho/\rho_0|,$$

де ρ – питомий опір, що дорівнює $\rho = RF/l$, тут R – електричний опір матеріалу на ділянці довжиною l; F – площа перетину матеріалу на цій ділянці; ρ_0 – питомий опір у вихідному стані; $\Delta\rho$ – зміна питомого опору після певної деформації ε.

В роботі наведено результати досліджень пошкоджуваності сталей аустенітного класу 03Х20Н16АГ6, 03Х13Н9Г19АМ2, контрастної до них за структурою рейкової сталі перлітного класу М76, феррітної сталі ОН9, алюмінієвих сплавів АМцС, Д20, АМг5. Проведені дослідження дозволили встановити закономірності впливу попередньої пластичної деформації при розтязі, згині, кручені та малоцикловій втомі на питомий електричний опір та пошкоджуваність вказаних сталей та сплавів.

Показано, що величина питомого електричного опору та пошкоджуваність досліджених сталей та сплавів суттєво залежать від виду деформування. Зокрема виявлено, що розтяг, на відміну від інших видів деформування, призводить до зменшення величини питомого електричного опору.

Оцінено пошкоджуваність та її питому величину D_ε як таку, що припадає на одиницю залишкової пластичної деформації:

$$D_\varepsilon = (1 - D_l)/\varepsilon_d, \qquad (1)$$

де D_l – гранична величина пошкоджуваності, ε_d – максимальна рівномірна пластична деформація.

При розтязі алюмінієвих сплавів найбільшу чутливість до деформацій за цим показником виявив сплав Д20, а найменшу – сплав АМг5 (рис. 1).

За аналогією з (1), показник чутливості металу до малоциклової втоми певного виду та амплітуди деформації можна визначити, як

$$D_N = (1 - D_l)/N_l,$$

де N_l – відповідне число циклів навантаження.

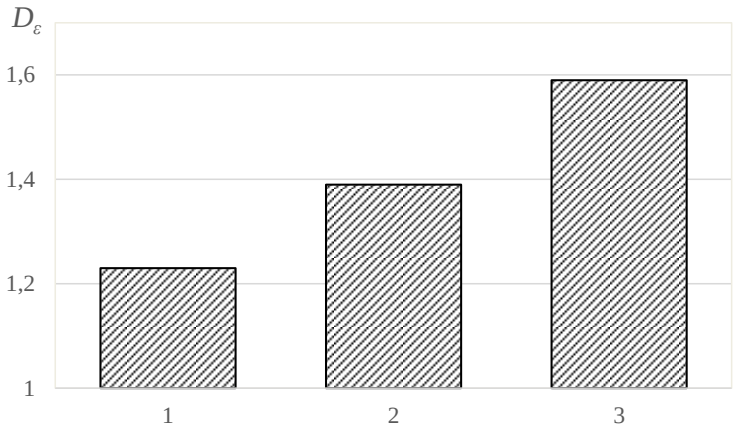


Рис. 1. Характеристики чутливості алюмінієвих сплавів до пошкоджуваності розтягом: 1 – АМг5, 2 – АМцС, 3 – Д20.

Таким чином, проведені дослідження показують ефективність оцінки пошкоджуваності ряду металевих матеріалів за параметрами електричного опору та раціональність подальших досліджень пошкоджуваності матеріалів різних класів за цими параметрами в умовах однорідного, неоднорідного та складного напруженого стану.

Анотація. Встановлено закономірності впливу попередньої пластичної деформації при розтязі, згині, кручені та малоцикловій втомі на питомий електричний опір та пошкоджуваність сталей різних класів та алюмінієвих сплавів. Обгрунтовано та експериментально підтверджено ефективність оцінки пошкоджуваності металевих матеріалів за параметрами електричного струму.

1. В. Г. Лифшиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. *Физические свойства металлов и сплавов: 2 изд. доп. и перераб.,* Металлургия, Москва (1980).

Assessment of damageability of metallic materials based on electrical resistance parameters

E. Vorobyov[1], L. Novogrudskyi, M. Zemtsov, M. Adamchuk

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] evsv1@meta.ua

The regularities of the influence of preliminary plastic deformation during tension, bending, torsion and low-cycle fatigue on the electrical resistivity and damageability of steels of different classes and aluminium alloys have been established. The effectiveness of assessing the damageability of metallic materials by electric current parameters has been substantiated and experimentally confirmed.

Keywords: damageability, residual deformation, electrical resistivity, structure.

Інтегральний вимірювальний комплекс конструкційних матеріалів, зварних з'єднань, деталей елементів конструкцій транспортних машин з вимірювальними одиночними тензодатчиками та багатоканальними перетворювачами

В.А. Леонець

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

viktorleonec746@gmail.com,leonV@ipp.kiev.ua

Ключові слова: надійність, рухомий склад, тензометричний метод, зварні з'єднання.

На замовлення АТ «Укрзалізниця» співробітниками Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України розроблені, виготовлені та метрологічно атестовані бортові вимірювальні комплекси АВК-Т1, БВК-6, які призначені для досліджень міцності, надійності тягового та моторвагонного рухомого складу України з подовженими початково призначеними строками служби.

Практично необмежена тривалість моніторингу технічного стану їх головних рам кузовів, візків, механічних елементів екіпажних частин надає можливість аналізувати за допомогою створеної компютерної програми технічний стан всього досліджуваного парку вище наведеного рухомого складу АТ «Укрзалізниці».

В доповіді наведені додаткові можливості успішного подовження строків служби всіх серій не лише залізничного рухомого складу, а також транспортних машин різноманітного призначення. Розроблено диференційний тензометричний метод статистичної обробки довговічності зварних з'єднань. Модернізовані гідравлічні гасителі коливань електровозів всіх серій ЧС дозволяють здійснювати прискорений візуальний контроль технічного стану штоків шляхом нероз'ємного ремонту.

Прилади БВК-6 придатні для контролю технічного стану елементів конструкцій коліс залізничного рухомого складу. Можливі тензометричні прецизійні вимірювання напружено-деформованого стану деталей, елементів конструкцій, які обертаються в інших транспортних машинах.

Integrated measuring complex of structural materials, welded joints, parts of structural elements of transport vehicles with measuring single strain gauges and multi-channel converters

V.A. Leonets

An onboard measurement systems, AVK-T1 and BVK-6, were developed. These systems are designed to study the strength and reliability of traction and multiple-unit rolling stock with extended service life. Continuous monitoring of the technical condition of main frames, bogies, and mechanical components enables long-term analysis of structural performance using specialized software.

Вплив частоти навантаження в діапазоні до 100 Гц на опір втомі алюмінієвого сплаву Д16

А.В. Бялонович[1], А.В. Кравчук, О.В. Кононученко

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1]abyalonovich@gmail.com

Ключові слова: циклічне навантаження, довговічність, високо частота, алюмінієвий сплав.

Випробування на втому при частотах, характерних для експлуатаційних навантажень вимагають значних матеріальних витрат часу та експлуатаційного обслуговування. Так, випробування мінімальної кількості зразків на одному рівні навантаження (5-7зразків) на базі 10^6 циклів за частоти навантаження 2-3 Гц займає 500-2000 годин (21-40 діб) безперервної роботи випробувальної машини. Якщо необхідно зробити вибір з декількох матеріалів, доводиться проводити великий комплекс випробувань на втому. Надмірних витрат матеріальних ресурсів в такому випадку можна уникнути, якщо підвищити частоту навантаження за випробування необхідної кількості зразків досліджуваних за втоми.

Проблема впливу частоти навантаження на опір втомі не є новою але і зараз залишається актуальною. Так в роботі [1] досліджено вплив частоти на втомні характеристики алюмінієвих сплавів за частоти навантаження 75 Гц та 20 кГц. В роботі [2] досліджували вплив ультразвукового навантаження на опір втомі. Порівнювали вплив частоти 400Гц та 20кГц. Використання ультразвукового навантаження дозволило авторам отримати експериментальні результати при 10^9 циклів.

В роботі досліджено вплив підвищення частоти навантаження алюмінієвого сплаву Д16 з 5Гц до 100Гц. Цей сплав широко використовується в авіабудуванні. Відповідно до нормативних документів втомні випробування необхідно проводити за частоти при яких при експлуатації відбувається максимальний вплив на конструкцію, тобто 2-3 Гц. Підвищення частоти до 100 Гц дало б змогу в десятки разів пришвидшити отримання характеристик опору втомі.

Втомні випробування проводили за синусоїдального навантажування у м'якому режимі за кімнатної температури, асиметрія циклів R = 0,1. Частоти навантаження 100…110Гц (високочастотне навантаження) та 5Гц (низкочастотне навантаження). База втомних випробувань становила 10^7 циклів для високочастотного навантаження та 10^6 циклів для частоти 5Гц. Високочастотне навантаження проводили на резонансній машині RUMUL TESTRONIC 50kN, низкочастотне - на машині BISS 202 25kN.

Використовували плоскі зразки прямокутної форми 200х36 мм з поперечним перерізом 36х1,5 мм з концентратором у вигляді центрального отвору діаметром 6 мм (теоретичний коефіцієнт концентрації напружень 2,55). Зразки було вирізано поперек напрямку прокатування, як найменш міцного напрямку.

Криву втоми досліджених зразків показано на рис. 1. Видно, що в діапазоні навантажень 90..200 МПа різниця між низкочастотним та високочастотним навантаженням не перевищувало 27%. Для рівнів менше 140 МПа, що відповідають руйнуванню зразка 10^5 та більше циклів, різниця кількості циклів не перевищувала 5%.

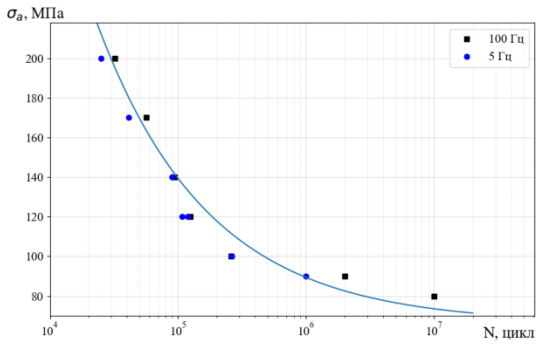


Рис. 1. Крива втоми алюмінієвого сплаву Д16 за частот навантаження 100 та 5Гц.

З урахуванням типового розкиду експериментальних результатів опору втомі можна заключити що проведені випробування показали можливість дослідження алюмінієвого сплаву Д16 за підвищенної частоти навантаження.

1. Engler-Pinto Jr, Carlos & Sr, R.J. & Lasecki, J.V. & Mayer, Herwig & Allison, J.E.. (2007). Effect of frequency and environment on high cycle fatigue of cast aluminum alloys. VHCF-4 - 4th International Conference on Very High Cycle Fatigue. 421-427.
2. N. Schneider, J. Bödecker, C. Berger, M. Oechsner, Frequency effect and influence of testing technique on the fatigue behaviour of quenched and tempered steel and aluminium alloy, International Journal of Fatigue, Volume 93, Part 2, 2016, Pages 224-231, https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.013.

The influence of load frequency up to 100 Hz on the fatigue resistance of aluminum alloy D16

A.V. Byalonovich, A.V. Kravchuk, O.V. Kononuchenko

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

This study investigates the effect of raising the loading frequency from 5 Hz to 100 Hz on the fatigue resistance of D16 aluminum alloy, which is widely used in aircraft structures. Fatigue tests were conducted under sinusoidal loading (R = 0.1) at room temperature, using both low-frequency (5 Hz) and high-frequency (100–110 Hz) regimes with test bases of 10^6 and 10^7 cycles, respectively. Results show that within the stress range of 90–200 MPa, the difference in fatigue performance between low- and high-frequency loading did not exceed 27%, and for stress levels below 140 MPa the difference was less than 5%. Considering the typical scatter of fatigue data, the findings confirm the feasibility of accelerated fatigue testing of D16 alloy at elevated loading frequencies without significant loss of accuracy.
Keywords: cyclic loading, durability, high frequency, aluminum alloy

Вплив динамічних незрівноважених процесів і криогенного охолодження на зміну механічних властивостей сталей

М.Г. Чаусов[а1], П.О. Марущак[б2], В.В. Шманенко[а3]

[а]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна
[б]Тернопільській національний технічний університет ім. І. Пулюя, Тернопіль, Україна

[1] chausov@nubip.edu.ua (автор для листування), [2] tntu@gmail.com, [3] v.shmanenko@nubip.edu.ua

***Ключові слова**: динамічні незрівноважені процеси, ударне-коливальне навантаження, нержавіючі сталі, зміна механічних властивостей.*

Нержавіючі сталі різних класів знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості, зокрема в кріогенній і ракетно-космічній техніці. Вони можуть піддаватися складним режимам навантаженням, зокрема, ударно-коливальним. У цьому випадку, за рахунок раптового накопичення надлишкової енергії в деяких елементах механічної системи активується динаміка внутрішніх процесів у матеріалах і виникають динамічні незрівноважені процеси (ДНП) за умов нелінійної (хаотичної) динаміки.

Автори вперше у світовій практиці розробили ефективну методику реалізації ДНП у конструкційних матеріалах за рахунок ударно-коливального навантаження (УКН) різної інтенсивності [1]. Досліди, проведені авторами з оцінювання впливу ДНП за рахунок УКН різної інтенсивності на зміну вихідних механічних властивостей матеріалів різних класів за кімнатної температури, дали змогу систематизувати закономірності цього впливу й уточнити розрахунки на міцність відповідальних конструкцій.

Метою цієї роботи є дослідження нових ефектів сумісної дії кріогенного охолодження й УКН різної інтенсивності на зміну механічних властивостей аустенітних сталей AISI 201 і AISI 301.

Експериментальні дослідження проводили на модифікованій випробувальній машини ZD-100Pu з пристосуванням для імпульсного введення енергії за рахунок УКН різної інтенсивності та додатково встановленою камерою охолодження. Час попередньої кріогенної витримки зразків із досліджуваних сталей становив 1 годину. Діапазон імпульсного введення енергії в сталі складав $\varepsilon_{імп}$ = 3,09…13,5%. Структурні зміни в сталі AISI 301 при різних рівнях інтенсивності УКН за кріогенного охолодження досліджували, використовуючи трансмісійний електронний мікроскоп JEOL-2100F.

На рис. 1 подані результати експериментальних досліджень циліндричних зразків діаметром 6,5 мм. Ліва координата на рис. 1 – шкала деформації сталей, права – шкала межі міцності. Тут цифрами позначені номери випробуваних зразків.

Виявлено непрогнозований характер зміни деформацій обох сталей після реалізованого режиму навантаження (див. рис. 1). Зокрема, при реалізації $\varepsilon_{імп}$ = 11,1…11,6 % для обох сталей спостерігається катастрофічне падіння деформації. Цей процес пов’язаний з розпаковкою механічних двійників та їх перехрещенням. Це створює максимум структурних перешкод і, як наслідок, деформація локалізується [2].

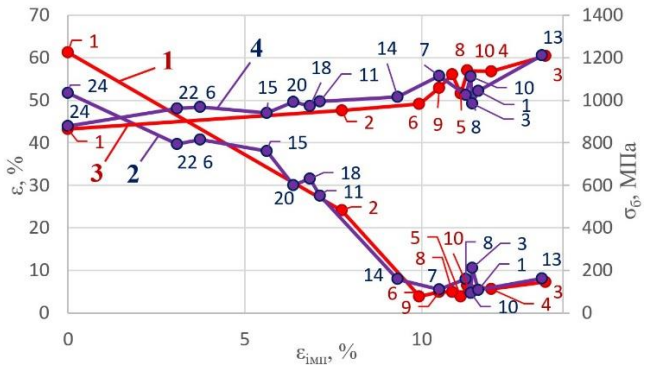


Рис. 1. Порівняльні дані щодо зміни механічних властивостей нержавіючих сталей AISI 301 (криві 1, 3) і AISI 201 (криві 2,4) залежно від інтенсивності імпульсного введення енергії $\varepsilon_{імп}$ у сталі в рідкому азоті: 1, 2 – зміна пластичності; 2, 4 – зміна межі міцності.

1. Chausov, M. G., Berezin, V. B., Pylypenko, A. P., & Hutsaylyuk, V. B. (2015). Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 50(1), 61-72. https://doi.org/10.1177/0309324714548085
2. Chausov, M., Maruschak, P., Pylypenko, A., Shmanenko, V., Lisnichuk, M., Yudina, D., & Sovák, P. (2025). Changes in the mechanical properties and structural condition of stainless steel AISI 301 caused by the combined effect of impact-oscillatory loading and cryogenic cooling. Effects caused by holding specimens in liquid nitrogen for 1 h. *Vacuum*, 240, 114541. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114541

Influence of Dynamic Nonequilibrium Processes and Cryogenic Cooling on Changes in the Mechanical Properties of Steels

M.G. Chausov[a1], P.O. Marushchak[b2], V.V. Shmanenko[a3]

[a]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine.

[1] chausov@nubip.edu.ua (corresponding author), [2] tntu@gmail.com, [3] v.shmanenko@nubip.edu.

New experimental data are analyzed to assess the preliminary combined effect of dynamic nonequilibrium processes (DNP) and cryogenic cooling for 1 hour on changes in the mechanical properties of two grades of stainless steel, AISI 201 and AISI 301. The steels have similar initial mechanical properties; however, they differ significantly in chemical composition. DNP implementation was achieved through impact-oscillatory loading of varying intensities. This study has established that the range of pulsed energy input, εimp = 11.1–11.6%, is critical for the deformation capacity of both steels. In particular, at ε_{imp} = 11.1–11.6%, the deformation of AISI 301 steel during repeated static tension decreases to 3.83%, and that of AISI 201 steel to 4.67%. The structural state of AISI 301 steel was thoroughly investigated using physical methods, and a physical explanation of the observed mechanical effects is provided.

Keywords: dynamic nonequilibrium processes, impact-oscillatory loading, stainless steels, change in mechanical properties.

Діагностування металу кожуха доменної печі за контролем твердості

С.В. Білодіденко[1], Г.М. Біліченко, В.І. Гануш, М.О. Щербінін

Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1] s.v.bilodidenko@ust.edu.ua

Ключові слова: твердість, в'язкість руйнування, пошкодженність, доменна піч, кожух

Зростаючий попит на подовжений термін служби конструкцій підкреслює необхідність надійних прогнозів довговічності [1]. Подовження терміну служби застарілих об'єктів техніки є екологічно чистим заходом, що сприяє максимальному використанню матеріалів і збільшенню пропускної продуктивності виробництва. Таке рішення приймається після ретельного дослідження технічного стану із застосуванням засобів технічної діагностики.

Вимірювання твердості виглядає як один з найзручніших способів діагностування металу, оскільки відноситься до неруйнівних методів. Такій думці сприяє удосконалення конструкцій твердомірів і поширення їх переносних портативних варіантів. Але слід розуміти, що величина твердості безпосередньо реагує на зміну структури металу. Твердометрія зараз набуває актуальності з винаходом методу, де ступінь пошкоджуваності матеріалу оцінюється не за абсолютними значеннями твердості, а за параметрами розсіювання ii значень, як більш показними, ніж сама твердість. Метою дійсної роботи було отримання діагностичної моделі кожуху доменної печі (ДП) за контролем параметрів твердості з прогнозними можливостями відносно залишкового ресурсу.

Оцінку деградації металу шляхом вимірювання твердості автори провели для металевих конструкцій, що відпрацювали 14 років у якості кожуху агрегату. Кожух виготовлено зі сталі 09Г2С, яка досить часто використовується в несучих конструкціях.. З неохолоджуваної ділянки шахти кожуху (1 зона, висота 24,9 м), з охолоджуваної ділянки шахти кожуху (2 зона, висота 20 м), з фурменої ділянки кожуху (3 зона).

Дослідження твердості проводили на зразках, які попередньо були випробувані на циклічний триточковий згин. В результаті було отримано показники циклічної в'язкості руйнування K_{fc}. Для вимірювань твердості був використаний портативний ультразвуковий твердомір NOVOTEST ТУ-Д3 та перетворювач У1. Вимірювання здійснюється контактно-резонансним методом за допомогою алмазного індентора. Він залишає малопомітний відбиток малого розміру. Потім їхня поверхня була поділена на ділянки розміром 10*10 мм. Кількість ділянок в залежності від розміру зразка складала від 36 до 42.

Із співставлення результатів дослідження твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С видно, що кореляція між критичними величинми K_{fc} і коефіцієнтами варіації твердості v_{HB} має лінійний характер (табл.1):

$$K_{fc}^{d} = K_{fc} - r_{HBS} v_{HB}. \quad (1)$$

В такому випадку присутній тут КІН K_{fc} має зміст циклічної в'язкості руйнування для ідеального **непошкодженого** металу. Найбільш тісна кореляція спостерігається

для максимальних КІН циклу. Для них в цьому рівнянні $K_{fc}= K_{fcmax}=110\ MPa\sqrt{m}$, а коефіцієнт пропорційності $r_{HBS}=1{,}9\ (MPa\sqrt{m})/\ \%$.

Таблиця 1.

Результати вимірювань твердості зразків кожуху

Зона розташування зразків, *i*	Кількість ділянок в зразку	Середня твердість по зразку *HB*, МРа	Коефіцієнт варіації твердості по зразку, v_{HBi}	Відносний коефіцієнт варіації твердості v_{HBi}/v_{HB2}
1 зона	36	180,7	0,06	1,7
2 зона	36	146,9	0,035	1,0
3 зона	42	127,5	0,12	3,4

Маючи зв'язок між показником твердості v_{HB} і критичним показником в'язкості руйнування K_C (це може бути показник K_{fc}, так і порогове значення розмаху КІН ΔK_{th}) можна об'єктивно встановити допустиме значення діагностичного параметра $[K_C]$. Він розраховується на підставі навантаження, що діє в певній зоні (елементі) кожуху за розміром виявлених при обстеженні дефектів. Можна також штучно встановити допустиме значення прямого діагностичного параметру $[v_{HB}]$. Зазвичай, воно в 3-4 рази більше від свого мінімального значення v_{HBmin}, яке відповідає непошкодженому стану. Прогнозні можливості з'являються після отримання кінетики зміни діагностичного параметру. Для цього кінетику прямого діагностичного параметру перебудовують в кінетику непрямого параметру, яким є показник в'язкості руйнування.

Diagnosing the metal of the blast furnace casing by hardness control

S. Belodedenko[a1], G. Bilichenko[a], V. Hanush[a] , M. Scherbinin[a]

[a]Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, Ukraine.

[1] s.v.bilodidenko@ust.edu.ua

Basic load-bearing structures determine the total service life of objects, since they cannot be replaced. Therefore, their technical condition is crucial when extending the operation of engenieringl facilities, in particular blast furnace campaigns. The peculiarities of the application of the hardness control method to find out the degree of metal degradation after long-term operation are considered. The linear relationship between the cyclic toughness of 09Mn2Si steel and the coefficient of variation in the hardness of the casing surface has been found. An algorithm for predicting the residual lifetime of casing zones based on the results of hardness measurement is proposed. The areas of the casing with the largest and least damaging were found.

Keywords: *hardness, fracture toughness, damage, blast furnace, casing*.

Опис росту коротких тріщин експонентою з використанням параметрів модифікованої кривої втоми

Г. Цибаньов

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

tsybanov@ukr.net, g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua

Ключові слова: утомне пошкодження, опис кінетики та механізму росту короткої тріщини, кристалографічна тріщина, модифікована крива втоми, параметри експоненти

У практиці розрахунку утомної довговічності матеріалів і елементів конструкцій визначаючим чинником є рівень пошкодження матеріалу. Відомі різні характеристики, які приймаються за параметр пошкодження, та найбільш очевидним і контрольованим може бути розмір тріщини.

У доповіді розглянуто процес утомного пошкодження матеріалів у вигляді кінетики росту коротких тріщин у гладких зразках від початку циклічного навантаження і до руйнування. Для цього застосована натуральна експонента, параметри якої визначаються параметрами раніше запропонованої модифікованої кривої втоми [1]. Таке представлення утомного пошкодження і можливі похибки прогнозування росту коротких тріщин обґрунтовано за експериментальними даними ферито-перлітної сталі 42CrMo4, взятих з роботи [2].

Дослідженнями [2] встановлено тісний взаємозв'язок циклічних пластичних деформацій з ростом коротких тріщин і можливість їх опису експонентою. Приймаючи співвідношення у вигляді залежності Осгуда-Рамберга [3], нами показана можливість визначати параметри росту коротких тріщин та тривалості стадії їх зародження (за лінією Френча [4]) з використанням постійних модифікованої кривої втоми [1,5]. Застосована наступна залежність для опису росту короткої тріщини:

$$a = a_0 \cdot \exp(k_1 N), \qquad (1)$$

де a_0 – розмір вихідного дефекту матеріалу, k_1- коефіцієнт, N - поточне значення кількості циклів навантаження.

Величини a_0 і k_1, пораховані за постійними модифікованої кривої втоми [1,5]. Аналіз відповідності розрахункової за (1) кінетики росту коротких тріщини і цифровізованих експериментальних даних роботи [2] дозволяє визначити умови переходу короткої втомної тріщини від стадії росту за кристалографічними площинами до росту від нормального напруження. Залежність (1) з розрахованими параметрами визначає основну тенденцію кінетики росту коротких тріщин у дослідженій сталі за багатоциклової втоми. При цьому спостерігаються відхилення від експерименту за кількох циклічних напрацювань (N) при довговічностях $N_f \lesssim 300000$ цикл. З аналізу експериментальних і розрахункових даних витікає, що означені відхилення пов'язані зі зміною механізму руйнування сталі, а саме: у залежності від рівня прикладеної амплітуди напружень (і відповідної N_f) змінюється тривалість стадії кристалографічного росту тріщини. Єдина залежність (1) не здатна коректно описати кінетику росту короткої тріщини при зміні механізмів руйнування і тому стає придатною за довговічностей, коли розмір тріщини, яка росте за кристалографічними площинами, досягає і перевищує певне значення (10 зерен фериту, 300 мкм) і після

цього відбувається перехід до росту за вимушеними площинами від дії нормальних напружень. Встановлена лінійна залежність між розміром кристалографічно-залежної тріщини і відносною довговічністю N_f/N_0 (N_0 – абсциса зламу кривої втоми).

Одержані у дослідженні результати дають змогу розширити інформаційність параметрів модифікованої кривої втоми для опису кінетики росту коротких тріщин, а також установити зв'язок розміру тріщини, яка росте за кристалографічними площинами, з рівнем циклічного навантаження (довговічності).

1. Г.В. Цыбанёв, Описание кинетики роста коротких поверхностных усталостных трещин с использованием параметров кривой усталости, *Проблеми міцності*, №2, 89-98, (2018).
2. J. Polak, Plastic strain-controlled short crack growth and fatigue life, *Int. Journ. Fat.*, 27, 1192–1201 (2005).
3. W. Ramberg, W.R. Osgood, *Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note No. 902. National Advisory Committee for Aeronautics*, Washington DC, (1943).
4. H. J. French, Fatigue and the Hardening of Steels. *Trans. ASST (American Society for Steel Treating)*, Vol. 21, pp. 899–946, (1933).
5. G. V. Tsybanyov, French line prediction for steels using experimental data to construct a fatigue curve. Part 2. Method verification and estimation of calculation errors, *Str Mat*, 55, No. 4, 713–719 (2023). https://doi.org/10.1007/s11223-023-00560-1

Description of short crack growth by an exponent using parameters of modified S-N curve

G. Tsybanyov

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv,

tsybanov@ukr.net, g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua

The possibility of describing the kinetics of short fatigue crack growth by an exponential dependence the parameters of which are determined using the constants of a modified S-N curve, has been investigated. This approach has been verified using experimental data for 42CrMo4 steel taken from the literature. It is shown that the exponent reflects the main trend of short crack growth. However, the calculated deviations from the experimental data are significantly reduced starting from a certain load level. It has been established that this is associated with the growth of a crystallographically dependent crack to the level (~300 μm, 10 ferrite grains), when the transition to failure due to action of normal stress does not cause a sharp change in the kinetics of short crack growth. Although this occurs at higher stresses (closer to low-cycle fatigue life) and leads to different growth kinetics of crystallographically dependent cracks and cracks due to action of normal stresses.

Keywords: *short crack as fatigue damage, description of kinetics and mechanisms of short crack growth, crystallographic crack, exponent parameters, modified S-N curve*

Оцінка граничного стану валопроводів парових турбін при короткому замиканні на турбогенераторі

А.П. Бовсуновський[а1], М.В. Бородій[б], О.А. Бовсуновський[б]

[а]Інститут атомної та теплової енергетики НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, Київ, Україна
[б]Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] apbovsunovsky@gmail.com

Ключові слова: вал турбіни, крутильні коливання, коротке замикання, критичний розмір тріщини, умови руйнування.

Відомі з історії теплової енергетики випадки катастрофічного руйнування парових турбін [1] були зумовлені головним чином тривалим накопиченням розсіяного втомного пошкодження [2] у роторах турбін через термомеханічні навантаження, подальшим виникненням локальних пошкоджень у вигляді тріщин різного виду, їхнім розвитком до досягнення критичного розміру, за якого раптове виникнення динамічного крутного моменту призводило до руйнування турбіни. Головними причинами виникнення динамічного крутного моменту були нештатні режими роботи турбогенератора, які виникали при підключенні турбогенератора до мережі з неточною синхронізацією, а також при короткому замиканні на турбогенераторі [1].

Головна ідея дослідження полягала у розробці методу визначення граничного стану валопровода парової турбіни з втомним пошкодження типу тріщини при динамічному навантаженні в результаті виникнення короткого замикання на турбогенераторі, а також у встановленні факторів, які зумовлюють руйнування валопроводу турбіни за наявності тріщини певного типу і розміру. Граничний стан енергетичного обладнання визначався як такий, за досягнення якого подальша експлуатація обладнання була неможливою або небезпечною з точки зору гарантування збереження цілісності.

В роботі запропоновано метод оцінки критично небезпечних розмірів кільцевої, поперечної і поздовжньої тріщини, за яких коротке замикання на турбогенераторі зумовлює руйнування валопровода турбіни, тобто досягнення його граничного стану. Оцінка критично небезпечних розмірів тріщини ґрунтувався на визначенні динамічних крутних моментів, які виникають на найбільш напружених ділянках валопровода турбіни в результаті короткого замикання на турбогенераторі [3, 4], амплітуд напружень на цих ділянках і коефіцієнтів інтенсивності напружень у тріщині того або іншого типу, що знаходиться на цих ділянках. Найменша тріщина, для якої коефіцієнт інтенсивності напружень досягає величини в'язкості руйнування роторної сталі, вважалась критично небезпечною, тобто такою, що призводить до втрати цілісності валопроводом турбіни при короткому замиканні на турбогенераторі. З використанням запропонованого метода визначено критичні розміри кільцевої, поперечної і радіальної тріщини за різних її параметрів (розміри і місцеположення) у валопроводах парових турбін К-220-44-2М, К-325-23,5 і К-1100-60/1500-2М.

1. A.P. Bovsunovsky, Fatigue damage of steam turbine shaft at asynchronous connections of turbine generator to electrical network, *J. of Physics: Conference Series*, 628 conference 1, 012001 (2015). https://doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012001.
2. V.T. Troshchenko, L.A. Khamaza, Fatigue fracture stages of metals and alloys and stage-to-stage transition criteria, *Strength of Materials*, 50, №3, 529–539 (2018) https://doi.org/10.1007/s11223-018-9998-1
3. Гришин М.М., Зайцев Б.П., Морачковський О.К., Пащенко Ю.Г., Кантор О.Г. Динаміка системи роторів турбоагрегату потужністю 1100 МВт. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, № 3(1328), 55–60 (2019). https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.08
4. N.G. Garmash, Further investigation of the stressed state of turbine shaftings during short circuits. *Newsletter of NTU "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and installation*, 15,141-145 (2015).

Assessment of of steam turbine shaft limit state at a short circuit on a turbogenerator

A. Bovsunovsky[a1], M. Borodii[b], O. Bovsunovsky[b]

[a]Educational and Scientific Institute of Atomic and Thermal Energy NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute, Kyiv, Ukraine
[b]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] apbovsunovsky@gmail.com

The objective of the study was to develop a method for determining the limit state of the steam turbine shaft assembly with fatigue damage of the crack type under dynamic loading as a result of a short circuit on the turbogenerator. It is proposed a method for estimating the critically dangerous sizes of annular, transverse and longitudinal cracks, at which a short circuit on the turbogenerator causes the destruction of the turbine shaft assembly, i.e. reaching its limit state. The estimation of critically dangerous crack sizes was based on determining the dynamic torques that arise in the most stressed sections of the turbine shaft assembly because of a short circuit on the turbogenerator, the amplitudes of stresses in these sections and the stress intensity coefficients in a crack of one type or another located in these sections.

Keywords: turbine shaft, torsional vibrations, short circuit, critical crack size, failure conditions

Порівняння надлишкового тиску на перекриття при вибуху на малих відстанях від нього

М. А. Біляєв[1]

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

[1] biliaiev_ma-2024@knuba.edu.ua

Ключові слова: вибуховий вплив, сталезалізобетонне перекриття, збірний залізобетон, перфоровані балки, надлишковий тиск.

Класичні підходи до оцінювання вибухового навантаження як закордоном [1, 2] так і в Україні [3] орієнтовані на усереднений вплив на конструкцію в цілому і не відображають локальних ефектів, характерних для близьких підривів [4, 5].

Військовий час показав необхідність оцінки локальних ударно-вибухових впливів на основні конструкції будівель (покриття, перекриття і стіни) з метою виключення або, принаймні, обмеження руйнувань та недопущення прогресуючих руйнувань. При цьому висока швидкість монтажу залишається актуальною як для цивільного сектору, так і для сформованого переважно підчас війни напряму захисних конструкцій і споруд. За цими двома критеріями об'єктом дослідження були обрані повністю збірні сталезалізобетонні перекриття.

На першому етапі було створено детальну модель збірного сталезалізобетонного перекриття розміром 12х6м, по балкам з круглими перфораціями стінки кроком 3 м і прольотом 12м. Виділено дві основні зони пошкоджень: локального пробиття плити (Зона А, Рис. 1.) та відривому анкерних упорів від плити (Зона Б, Рис. 1). Запропоновано основні напрями підвищення вибухостійкості конструкції - збільшення товщини плити та удосконалення зсувних зєднань сталевих балок.

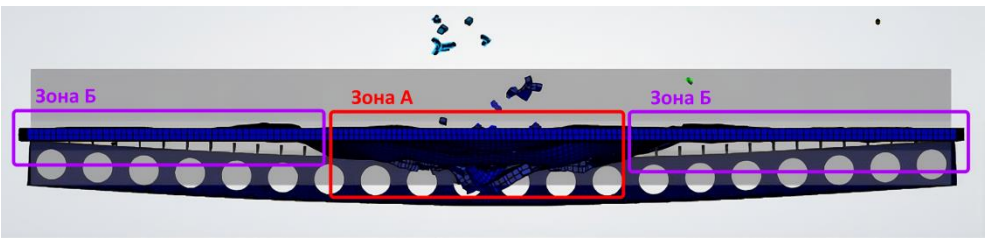


Рис. 1. Характер руйнування з двома характерними зонами А і Б

Другим етапом стала серія спрощених моделей вибуху тротилового заряду масою 50, 75 та 100 кг на відстанях 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 м від поверхні плити. За результатами апроксимовано декілька варіантів закономірності зміни пікового надлишкового тиску на перекриття, серед яких визначено оптимальний з точки зору від'ємних похибок і простоти використання (1):

$$P = (0.575 \cdot m - 5.624) \cdot x^{-1.50} \quad (1)$$

1. Department of Defense (2008). *UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions*. Washington, DC: U.S. Department of Defense, 1867 p.
2. European Committee for Standardization (2025). *EN 1991-1-7:2025 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-7: Accidental actions.* Brussels: CEN, 80 p, Current.
3. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (2019). *ДБН В.1.2-4:2019 Інженерно-технічні заходи цивільного захисту.* Київ: Мінрегіон України, 28 с, Чинний.
4. National Research Council (1995). *Protecting buildings from bomb damage: Transfer of blast effects mitigation technologies from military to civilian applications.* Washington, DC: National Academies Press, 112 p. https://doi.org/10.17226/5021
5. National Defense Research Committee (1946). *Effects of impact and explosion: Summary technical report of Division 2 (Vol. 1).* Washington, DC: National Defense Research Committee, 512 p.

Comparison of overpressure on floor slabs under blast loading at small distances

M. Biliaiev[a1]

[a] Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.

[1] biliaiev_ma-2024@knuba.edu.ua

Blast loading acting on structural elements due to detonation at small distances differ significantly from those predicted by traditional engineering approaches. This study examines a peak overpressure acting on precast-steel hybrid composite floor subjected to explosion close to it`s surface. Numerical simulations were performed using the Ansys Explicit Dynamics solver. First stage of the research focused on identifying the main failure mechanisms under blast loading. Two typical damage zones were noted: local slab perforation zone and shear connectors pull-out zone. Second stage included a parametric study of TNT charges with masses of 50, 75, and 100 kg located at distances of 0.5–2.0 m from the slab surface. Numerical results were used to obtain several approximations describing variation of peak overpressure acting on the slab. Optimal relationship was selected based on its accuracy and simplicity for engineering application.

Keywords: blast loading, composite structures, hybrid structures, precast concrete, castellated beams, cellular beams, overpressure.

Про коефіцієнт динамічності у водяному кулеуловлювачі

В.А. Максимюк [а1], В.С. Ушакова[а], О.В. Ушаков[б]

[а]Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[б]Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ, Україна

[1] desk@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: циліндричний водяний кулеуловлювач, макет, експеримент, реєстратор LMS SCADAS Mobile, деформації, тиск, швидкість ударної хвилі.

Для вивчення динамічних явищ у циліндричному гідрокулеуловлювачі було виконано експерименти в Центрі колективного користування приладами «Аналізатор динамічних процесів» з використанням 8-канального реєстратора LMS SCADAS Mobile (Бельгія). Відстрілювались кулі масою 8 г з початковою швидкістю 325 м/с. Вимірювались (рис. 1) колові деформації (ε) на зовнішній поверхні сталевої (E=210 ГПа) труби висотою 2 м, радіусом R=0,1 м і товщиною стінок h=5 мм за допомогою наклеєних тензорезисторів фірми «ВЕДА» типу КФ 5П1-3-120-Б-12. Тиск у воді оцінювався спрощено за формулою зі статики $p = \varepsilon Eh/R$.

Для прямого вимірювання тиску (рис.2) в ударній хвилі використовувались два занурювані малоінерційні датчики динамічного тиску PCB-W138A05 фірми PCB Piezotronics, виготовлені за технологією ICP з вбудованим підсилювачем. Колова деформація оцінювався спрощено за формулою зі статики $\varepsilon = pR/Eh$.

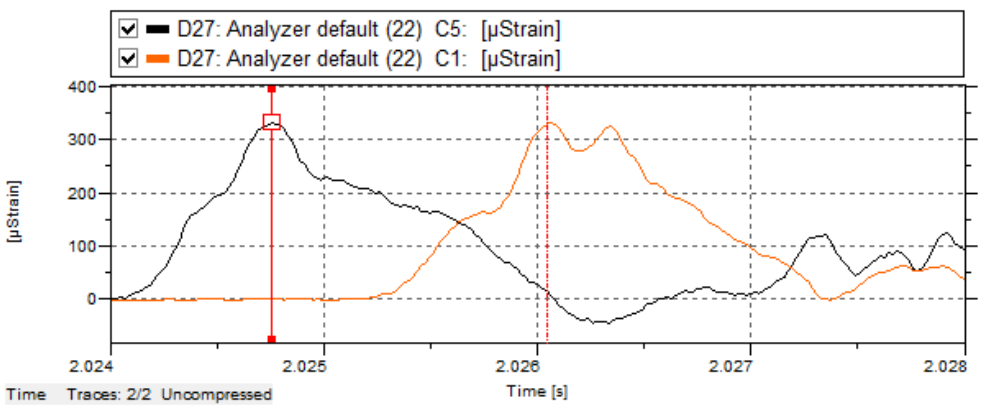


Рис. 1. Осцилограми колових деформацій на зовнішній поверхні циліндра.

Шість тензорезисторів (канали С1–С6) і два датчики тиску (канали С7, С8) було підключено до 8-канального реєстратора. Датчики тиску (канали С7, С8) були розташовані біля внутрішньої стінки труби на відстані 1,35 м один від одного і навпроти відповідних тензодатчиків (канали С5, С1). Вертикальними курсорами було виміряно час, за який максимуми деформації (рис. 1) і тиску (рис. 2) пробігають цю відстань. За зими даними обчислювалась швидкість ударної хвилі v.

Результати вимірювань оброблялися програмним забезпеченням LMS Test.Xpress. Встановлювались параметри імпульсу первинної ударної хвилі:

максимальний тиск у воді поблизу внутрішньої поверхні труби p, максимальна колова деформація на зовнішній поверхні труби ε, півширина $\Delta t_{1/2}$ (табл. 1).

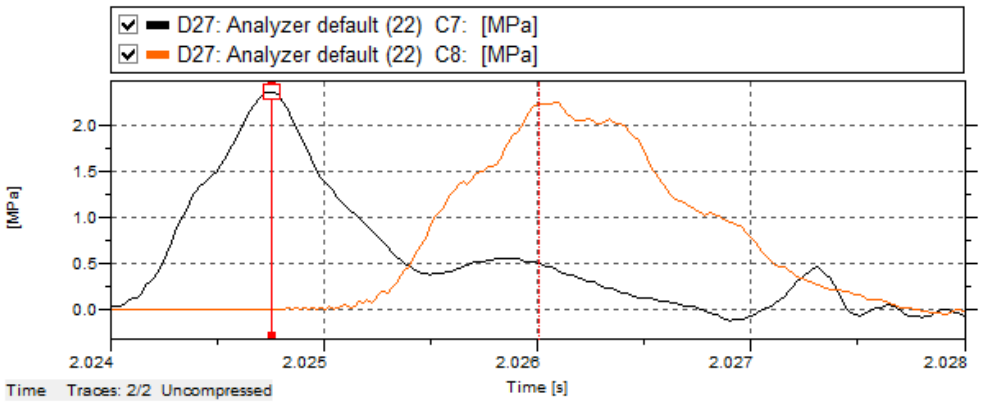


Рис. 2. Осцилограми прямого вимірювання тиску.

Таблиця 1.

Результати прямих і непрямих вимірювань

Вимірювання	*p, МПа*	*ε, мкм/м*	$\Delta t_{1/2}$, *мс*	*v, м/с*
Датчик тиску	**2,35**	224	0,68	1040
Тензодатчик	3,49	**333**	1,25	1047

Порівнюючи пряме вимірювання колової деформації (**333** мкм/м) з розрахованим (224 мкм/м) на основі прямого вимірювання тиску (**2,35** МПа), можна оцінити коефіцієнт динамічності в даному експерименті – 1,49.

Experimental study of the dynamic mechanical phenomena in a vertical water bullet trap

V. Maksymyuk [a1], V. Ushakova[b], O. Ushakov[b]

[a]S.P. Tymoshenko Institute of Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Institute of Special Equipment and Expertise, the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] desk@inmech.kyiv.ua

The pressure in the shock wave in a cylindrical bullet trap *was measured using submersible dynamic pressure sensors. The circular deformations on the outer surface of the cylinder were measured using strain gauges. The dynamic coefficient was estimated.*

Keywords: cylindrical water bullet trap, model, experiment, LMS SCADAS Mobile recorder, deformations, pressure, shock wave velocity.

Установка для комбінованого навантаження оболонок при випробуванні на міцність і жорсткість

В.С. Дудніков

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

dudvlad1944@gmail.com

Ключові слова: оболонка, навантажуючий пристрій, види навантажень

Установка містить основу 1, перехідник 2, чотири навантажуючих пристрої 3, 4, 5, 6, виконаних, наприклад, у вигляді гідравлічних або електромеханічних домкратів, керованих дистанційно за допомогою системи управління. Перехідник 2 має опорну поверхню 7, нахилену під кутом 45 до основи 1. Оболонка 8 за допомогою технологічного кільця 9 консольно закріплюється на поверхні 7 перехідника 2. Навантажуючі пристрої одним кінцем приєднуються шарнірно до основи 1, іншим кільцем до технологічного кільця 10 верхнього торця оболонки. Місця приєднання навантажуючих пристроїв до основи 1 і оболонці 8 вибрані так, що одна пара навантажуючих пристроїв 3, 4 розташовується в площині, що проходить через вісь нахиленої оболонки, а інша пара 5, 6 розташовується в іншій площині, перпендикулярній першій площині, на рівні верхнього торця оболонки. Таким чином, площини розташування пар навантажуючих пристроїв перетинаються між собою під кутом 90°, при цьому кожна з площин утворює з основою 1 кут в 45°. Усі навантажуючі пристрої забезпечені силовимірювальними пристроями 11, які використовуються як датчики зворотного зв'язку в системі управління взаємодією навантажуючих пристроїв (см. рис.) [1].

Установка працює наступним чином.

По команді від системи управління навантажуючі пристрої включаються в роботу в певній послідовності або одночасно, створюючи зусилля того або іншого напряму і величини. Розтягування-стискування оболонки 8 забезпечується синхронним спрацьовуванням навантажуючих пристроїв 3, 4, при цьому пристрої 5, 6 не створюють ніяких зусиль і тільки лише відстежують положення оболонки. Для вигину оболонки в площині розташування навантажуючих пристроїв 3, 4 останнім задаються протилежні по напряму, але однакові за величиною, зусилля (чи переміщення). Один з навантажуючих пристроїв працює на втягування штока, інший - на виштовхування, залежно від напряму вигину. Для вигину оболонки в перпендикулярному напрямі синхронно на втягуванні або виштовхуванні штоків працюють навантажуючі пристрої 5, 6. Якщо шток пристрою 5 втягується, а шток пристрою 6 виштовхується, то оболонка випробовує закручування. При зміні напряму переміщення штоків навантажуючих пристроїв 5, 6 оболонка 8 закручується в інший бік. При розузгодженні в широких межах навантажуючих пристроїв 5, 6 за величиною і напрямом зусилля, що розвивається, оболонка випробовуватиме спільну дію вигину і кручення в ту або іншу сторону.

При зміні співвідношення між величинами і напрямом зусиль пристроїв 3, 4 оболонка випробовуватиме позацентрове розтягування-стискування або спільну дію

розтягування- стискування і вигину в ту або іншу сторону. Одночасна дія навантажуючих пристроїв 3, 4, 5, 6 забезпечує таке комбіноване вантаження як розтягування-стискування з крученням і вигином в двох взаємно перпендикулярних площинах. Оскільки чотири навантажуючі пристрої розбиті на дві пари, розташовані в двох взаємно перпендикулярних площинах, то ці пари можуть працювати незалежно один від одного. Таким чином це спрощує програму і систему управління ними. Зменшується вірогідність перерегулювання і автоколивань, що дає можливість підвищити точність датчиків зворотного зв'язку системи управління. Комбіноване навантаження конструкції може здійснюватися шляхом послідовних в часі етапів простих вантажень. Незалежність роботи пар навантажуючих пристроїв дозволяє безпосередньо в процесі навантаження міняти в широких межах співвідношення між силовими чинниками комбінованого навантаження. Усе це разом дає можливість точніше імітувати в процесі випробувань черговість прикладення в часі реальних експлуатаційних навантажень. Ефективність розглянутої установки полягає в можливості на одній і тій же матеріальній частині проімітувати послідовно в часі випадки е к с п л у а т а ц і й н о г о навантаження

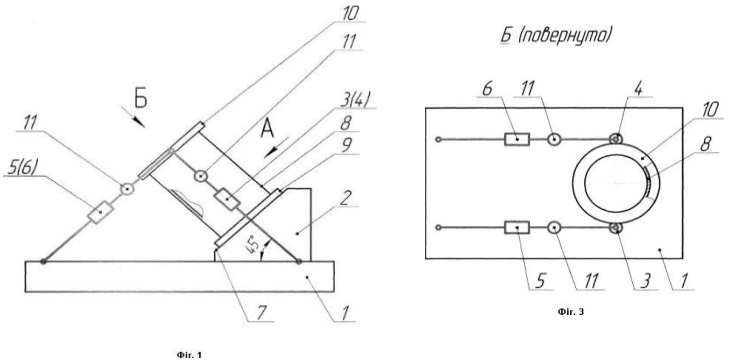


Рис. Принципова схема установки

1. Патент України на корисну модель №102181, 2015. Установка для комбінованого навантаження оболонок при випробуванні на міцність і жорсткість. Дудніков В.С., Кукушкін О.Е.

Installation for combined loading of shells during strength and stiffness testing

V. Dudnikov
Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

dudvlad1944@gmail.com

A device for combined loading of shell structures during strength and stiffness tests has been developed. It is distinguished by increased efficiency of the device due to more efficient use of the power of loading devices and expanded possibilities in implementing real loading conditions of structures by providing the possibility of changing the ratio between force factors over time directly during combined loading, as well as simplifying the control system.

Keywords: shell, loading device, types of loads

Перетворювач лінійних переміщень

В.С. Дудніков

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

dudvlad1944@gmail.com

Ключові слова: тензорезистор, компоненти деформацій, лінійні переміщення

Дане повідомлення відноситься до контрольно-вимірювальної техніки, а саме до будови тензорезисторних перетворювачів лінійних переміщень і може бути використана у різних галузях науки і техніки, скрізь, де потрібне дистанційне вимірювання переміщень і деформацій у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

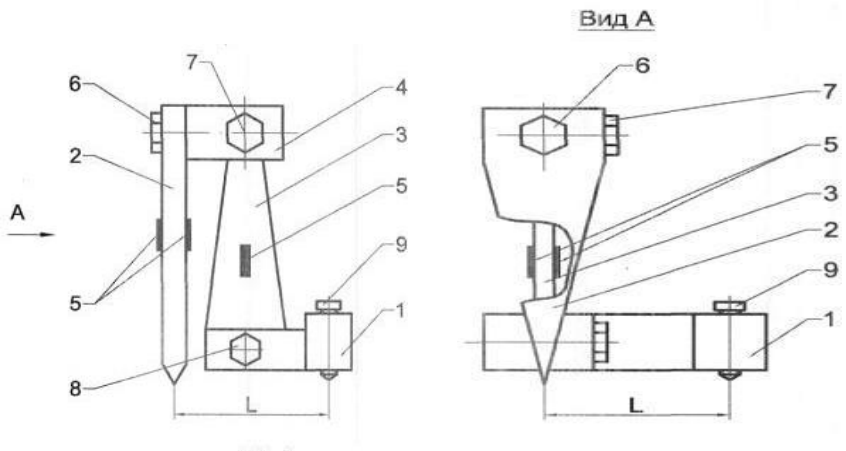
Перетворювач містить корпус 1, два плоских чутливих елемента 2, 3, які з'єднані між собою кронштейном 4. Елементи 2, 3 виконані у вигляді балочок рівного опору. На них наклеєні тензорезистори 5. Елемент 2 консольно закріплений на кронштейні 4 за допомогою болта 6 (рис.) [1].

Кінці елемента 3 закріплені в кронштейні 4 і корпусі 1 болтами 7, 8 відповідно. У корпусі 1 встановлені гвинти 9, 10, за допомогою яких перетворювач спирається на поверхню досліджуваного об'єкта (на кресленні не показано). Як третя опорна точка використовується другий (незакріплений) кінець чутливого елемента 2. Площини чутливих елементів 2, 3 взаємно перпендикулярні, а осі їх паралельні. Три опорні точки перетворювача розташовуються в вершині і на променях прямого кута, утвореного перетином двох взаємно перпендикулярних напрямків вимірювання переміщень. При цьому вісь чутливого елемента 2, не пов'язаного з корпусом 1, розташована в площині чутливого елемента 3, закріпленого в корпусі 1. Три контактні точки перетворювача при опорі на поверхню досліджуваного об'єкта утворюють систему двох взаємно перпендикулярних координат, пов'язану з поверхнею об'єкта. Відстань між рухомою точкою на кінці чутливого елемента 2 до двох нерухомих точок на кінцях гвинтів 9, 10 дорівнює базовій відстані L.

Перетворювач працює таким чином. При навантаженні об'єкта його поверхня деформується, внаслідок чого відстань між опорними точками змінюється. Ця зміна відстані фіксується перетворювачем, що спираються на поверхню об'єкта трьома точками. Рухома точка, що розташована на кінці чутливого елемента 2, переміщується разом з точкою поверхні об'єкта у двох взаємно перпендикулярних напрямках відносно двох інших нерухомих опорних точок перетворювача. При цьому чутливі елементи 2, 3 згинаються. Тензорезистори 5, що наклеєні на елементи 2, 3 та включені в вимірювальну схему, наприклад мостову, видають сигнал, пропорційний величині та напрямку переміщень рухомої точки перетворювача відносно системи координат, що задається самим перетворювачем. Замір величини переміщень точки в двох взаємно перпендикулярних напрямках на величині базової відстані L дозволяє судити про величину компонентів деформацій у точці, а, також, про рівень напруженого стану.Замір обох компонентів деформацій (переміщень на заданій базовій довжині) в точці поверхні проводиться одночасно в часі, а тому їх значення є спільними і погодженими з процесом навантаження об'єкта. За рахунок застосування

пропонованого перетворювача підвищується вірогідність визначення рівня напружено-деформованого стану об'єкта, при цьому в 2 рази скорочується кількість необхідних навантажедь об'єкта.

Рис. Конструкція перетворювача



1. Патент України на корисну модель №102222, 2015. Дудніков В.С., Векілов С.Ш.

Linear displacement transducer

V. Dudnikov

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

dudvlad1944@gmail.com

The linear displacement transducer performs remote measurement of displacements and deformations in two mutually perpendicular directions and allows one to judge the magnitude of the deformation components at a point, as well as the level of the stress-strain state of the object under study. Measurement of both deformation components at a point on the surface is carried out simultaneously in time, and therefore their values are common and consistent with the process of loading the object. By using the proposed transducer, the probability of determining the level of the stress-strain state of the object increases, while the number of necessary loads on the object is reduced by 2 times

.**Keywords**: strain gauge, strain components, linear displacements.

Напружено-деформований стан ротора сучасного суднового газотурбінного двигуна

Н. В. Сметанкіна[а], С. О. Моргун[б1]

[а]Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, Україна
[б]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна
[1] serhii.morhun@nuos.edu.ua

Ключові слова: ротор газотурбінного двигуна, динамічні напруження, скінчені елементи, глобальна система координат, пружні та температурні деформації

Досліджуваний ротор турбіни знаходиться під впливом ряда чинників, спричинених одночасною дією турбулентного потоку робочого тіла та відцентрової сили. Це призводить до появи механічних та температурних напружень, комплексний вплив яких значно знижує довговічність ротора в цілому. Більше того, при зміні моди вимушених коливань відбувається також і зміна полів переміщень ротора. Тому при дослідженні напружено-деформованого слід застосовувати комплексний підхід, враховуючи всі перелічені вище фактори.

Напружено-деформований стан твердого тіла визначається згідно з узагальненим законом Гука [1]:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\}) \quad (1)$$

де $\{\sigma\}$ – вектор напружень; $[D]$ – матриця пружності; $\{\varepsilon\}$ – вектор пружних деформацій; $\{\varepsilon_T\}$ – вектор температурних деформацій.

Ротор розташовано в глобальній декартовій системі координат (рис. 1).

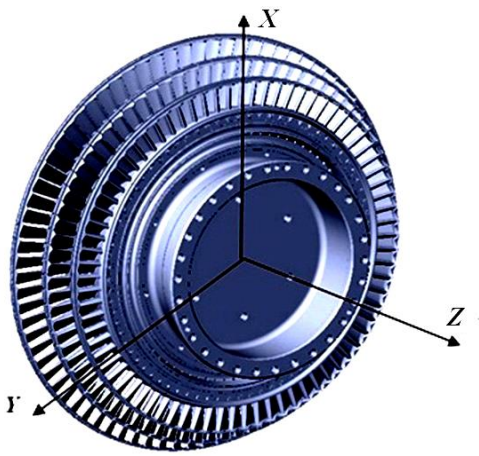


Рис. 1. Ротор в глобальній декартовій системі координат.

Проведемо скінчено-елементну апроксимацію ротора з використанням криволінійних скінчених елементів гексагонального типу [2]. Вектори пружних та температурних деформацій скінченого елемента мають наступну структуру:

$$\{\varepsilon_e\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{Xe} \\ \varepsilon_{Ye} \\ \varepsilon_{Ze} \\ \gamma_{XYe} \\ \gamma_{XZe} \\ \gamma_{YZe} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \delta_{Xe}}{\partial X} \\ \frac{\partial \delta_{Ye}}{\partial Y} \\ \frac{\partial \delta_{Ze}}{\partial Z} \\ \frac{\partial \delta_{Xe}}{\partial Y} + \frac{\partial \delta_{Ye}}{\partial X} \\ \frac{\partial \delta_{Xe}}{\partial Z} + \frac{\partial \delta_{Ze}}{\partial X} \\ \frac{\partial \delta_{Ye}}{\partial Z} + \frac{\partial \delta_{Ze}}{\partial Y} \end{Bmatrix} \qquad \{\varepsilon_{Te}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{XTe} \\ \varepsilon_{YTe} \\ \varepsilon_{ZTe} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \alpha \begin{Bmatrix} T_{Xe} \\ T_{Ye} \\ T_{Ze} \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

$(e = 1, \ldots, j)$

де ε_{Xe}, ε_{Ye}, ε_{Ze} – деформації розтягнення скінченого елемента в напрямках координатних осей *X, Y, Z*; γ_{XYe}, γ_{XZe}, γ_{YZe} – деформації зсуву скінченого елемента в напрямках координатних осей *X, Y, Z*; δ_{Xe}, δ_{Ye}, δ_{Ze} – узагальнені переміщення скінченого елемента в напрямках координатних осей *X, Y, Z;* ε_{XTe}, ε_{YTe}, ε_{ZTe} – температурні деформації скінченого елемента в напрямках координатних осей *X, Y, Z*; T_{Xe}, $T_{Ye,}$ T_{Ze} - проекції поля температур скінченого елемента на осі глобальної системи координат ротора.

1. Shulzhenko M. G., Zinkovskyi A. P., Olkhovskyi A. S. Vibration stress of the last single stage of a steam turbine after repair of a single blade. *Strength Mater*, 54, 565-575. https://doi.org/10.1007/s11223-022-00433-z

2. Smetankina N., Morhun S. Determination of the stress-strain state of the rotor of an improved single-shaft gas turbine engine. *Strength Mater*, 57, 58-68 (2025). https://doi.org/10.1007/s11233-025-00746-9

The modern marine gas turbine rotor stress-strain state

N. Smetankina[a], S. Morhun[b1]

[a]Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

[b]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

[1] serhii.morhun@nuos.edu.ua

The studied turbine rotor is under the influence of a number of factors caused by the simultaneous action of the turbulent flow of the working fluid and centrifugal force. This leads to the appearance of mechanical and temperature stresses, the complex effect of which significantly reduces the durability of the rotor as a whole. Moreover, when changing the mode of forced oscillations, the fields of rotor displacements also change. Therefore, when studying the stress-strain, a comprehensive approach should be used, taking into account all the factors listed above

Keywords: gas turbine engine rotor, dynamic stresses, finite elements, global coordinate system, elastic and thermal strain.

Розвиток низькотемпературної стрибкоподібної деформації в умовах гравітаційного навантаження

Є.В. Воробйов[1], Т.В. Анпілогова

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1]evsv1@meta.ua

Ключові слова: стрибок деформації , чисельне дослідження, гравітаційне навантаження, кінетика.

За температур, які нижчі за 30 К, пластична деформація металів втрачає стійкість у результаті виникнення ефекту низькотемпературної стрибкоподібної деформації. Його найбільш небезпечним проявом є різкий перехід від пружного деформування до швидкісної локалізованої пластичної течії, тобто раптове зниження або втрата несівної здатності конструкційного елемента з можливим досягненням надмірної деформації чи руйнування. Розвиток стрибка деформації за заданої початкової температури проявляється як властивість системи зразок–машина залежно від її характеристик, які можна розділити на дві головні групи. Перша з них включає ті, які стосуються матеріалу, друга – системи навантаження, зокрема, виду потенційної енергії, що переходить у роботу деформування. Основні дослідження прояву зазначеного ефекту у пружній системі навантаження у залежності від механічних характеристик металу і динамічних характеристик системи, а також кінетики стрибка деформації за температури 4 К було виконано у роботі [1, 2].

На практиці існують не тільки пружні, але і дуже великі вагові навантаження у поєднанні з кріогенними температурами, як у водневих баках ракет-носіїв. Кількісні показники розвитку стрибка деформації металів завдяки потенційній енергії поля гравітації залишалися невідомими. Але було розроблено відповідну математичну модель [3], конкретизовану для зразків конструкційних сплавів, розтягуваних у середовищі рідкого гелію за допомогою підвішеного вантажу. Наступним кроком було дослідження [4], що виявило вплив властивостей металу та системи гравітаційного навантаження на низькотемпературну стрибкоподібну деформацію, і було показано, що в такому випадку досягається значно більша локалізована деформація, а найбільш вразливими до негативних наслідків даного ефекту за гравітаційного навантаження є попередньо деформовані матеріали та такі, що мають площадку плинності.

Метою цієї роботи є чисельне дослідження кінетики процесу деформації зразків сталі 03Х20Н16АГ6 і алюмінієвого сплаву АМг5 – визначення амплітуди величин швидкостей $\dot{\varepsilon}_D$, прискорень $\ddot{\varepsilon}_D$, тривалості стрибка τ_D в залежності від головних чинників, що впливають на цей процес (стартове напруження σ_0, що корелює з міцністю матеріалу, та приєднана маса M).

Нижче показано їх вплив на швидкість деформації, що визначає як тривалість стрибка, так і прискорення деформації, а отже і супутні динамічні навантаження. Результат розрахунків дає зміну швидкості деформації у процесі стрибку для досліджуваних матеріалів. Графіки для сталі і алюмінієвого сплаву подібні, але амплітудні значення різко відрізняються. За максимальних величин останнього $\dot{\varepsilon}_D$ складає 19 c^{-1} для сталі і 7 c^{-1} – для алюмінієвого сплаву, рис. 1. Залежності $\dot{\varepsilon}_D$ від приєднаної маси (рис. 2) виявилися досить слабкими.

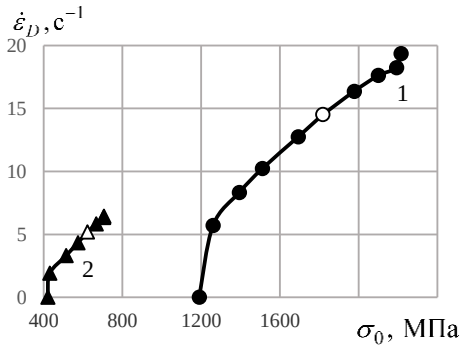


Рис. 1. Залежність амплітуди величини швидкості деформації від стартового напруження: сталь03Х20Н16АГ6 (1) і алюмінієвий сплав АМг5 (2)

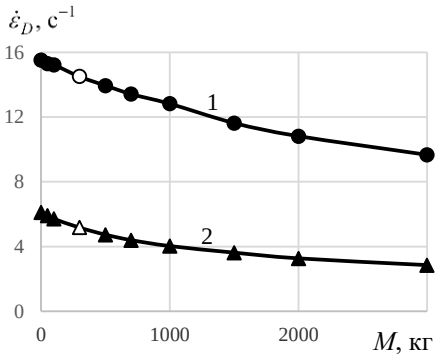


Рис. 2. Залежність амплітуди величини швидкості деформації від приєднаної маси: сталь03Х20Н16АГ6 (1) і алюмінієвий сплав АМг5 (2)

Таким чином, швидкість деформації, як і її прискорення сягають великих величин. При цьому, в порівнянні з пружною системою навантаження, у гравітаційній системі величина $\dot{\varepsilon}_D$ змінюється незначно, $\ddot{\varepsilon}_D$ зменшується приблизно вдвічі, тоді як деформація ε_D та тривалість стрибка зростають у кілька разів.

1. E.V. Vorob'ev and T.V. Anpilogova, Numerical analysis of the deformation instability of metals in liquid helium, *Computational Mater Sci*, **68**, 66–72 (2013). https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.10.008
2. E.V. Vorob'ev and T.V. Anpilogova, Kinetics of Low-Temperature Discontinuous Deformation of Metals, *Cryogenics*, **68**. 59–66 (2015). https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.02.004
3. E.V. Vorobyov and T.V. Anpilogova, Simulation of low-temperature localized serrated deformation of structural materials in liquid helium under different loading modes and potential energy accumulation, *Strength Mater*, **56**, №. 3, 533-542 (2024). https://doi.org/10.1007/s11223-024-00668-y
4. E.V. Vorobyov and T.V. Anpilogova. Influence of Metal and Loading System Characteristics on Low-Temperature Jump-Like Strain with Regard to the Type of Accumulated Potential Energy. *Strength Mater* **57**, № 2. 247–256 (2025). https://doi.org/10.1007/s11223-025-00761-w

Development of low-temperature jump deformation under gravitational loading

E.V. Vorobyov[1] and T.V. Anpilogova

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1]*evsv1@meta.ua*

Numerical methods have revealed the influence of alloy characteristics and loading system on the kinetics of low-temperature jump deformation under different types of accumulated potential energy. Compared with the elastic loading system, in the gravitational system the amplitude of the deformation rate changes insignificantly, while the deformation and jump duration increase several times.

Keywords: strain jump, numerical study, gravitational loading, kinetics.

Розробка експериментальної методики дослідження взаємодії ефектів ратчетингу та повзучості

М.П. Адамчук[1], М.В. Бородій, З.С. Ясковець, С.А. Скакун

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] m.p.adamchuk@gmail.com

Ключові слова: Експериментальне дослідження, ратчентинг, повзучість, трубний елемент.

Велика кількість елементів конструкцій піддаються навантаженням, коли їх опорні елементи не обмежують переміщення. Це викликає явище незворотного накопичення деформацій, що відбувається за циклічного навантаження з ненульовим значенням середнього напруження. Такий ефект спостерігається як залежно, так і незалежно від часу під навантаженням. Тому розрізняють два процеси: перший – це ріст незворотних деформацій внаслідок активного циклічного пружно-пластичного навантаження (ратчетинг). Інший – накопичення деформацій за дії тривалого статичного навантаження, тобто повзучість. У багатьох випадках ці процеси відбуваються одночасно. Якщо за циклічного навантаження матеріал зазнає ефекту ратчетингу, наявність часових витримок в циклах може збільшувати загальну деформацію за рахунок повзучості, що суттєво впливає на втомне пошкодження і довговічність. Тому дослідження взаємодії зазначених процесів є актуальною задачею.

Дана робота є продовженням експериментів, виконаних на пнемо-гідравлічному стенді Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, де були отримані експериментальні криві ратчетингу за двовісного ступінчатого навантаження циклічним внутрішнім тиском трубних елементів Ду 200 із сталі 20 [1, 2]. В згаданих роботах досліджувався вплив зміни амплітудного і середнього напруження циклу на накопичення деформації ратчетингу в коловому і осьовому напрямках. Метою цієї роботи є розробка та відпрацювання експериментальної методики дослідження одночасного прояву ефектів ратчетингу та повзучості.

Програма експерименту передбачала чотирьохступінчасте циклічне навантаження тиском трубного елемента зі сталими значеннями середнього та амплітудного напружень із різними часовими витримками за максимального тиску та кімнатної температури. Перша базова ступінь відповідала активному навантаженню (ратчетинг) тривалістю витримки 1 сек (100 циклів), наступні (ратчетинг+повзучість), де: друга ступінь – витримка 5 сек (30 циклів); третя – 10 сек (30 циклів); четверта – 20 сек (30 циклів). На рис. 1 наведено графік зміни сумарної деформацій від ратчетингу та повзучості в коловому напрямку для всієї програми навантаження. Результати засвідчили, що наявність часових витримок пришвидшує накопичення деформацій за рахунок деформацій повзучості (див. рис. 1).

В результаті роботи розроблено та відпрацьовано експериментальну методику дослідження взаємодії ефектів ратчетингу та повзучості, встановлено швидкість накопичення деформацій в залежності від числа циклів навантаження та тривалості витримок під максимальним навантаженням.

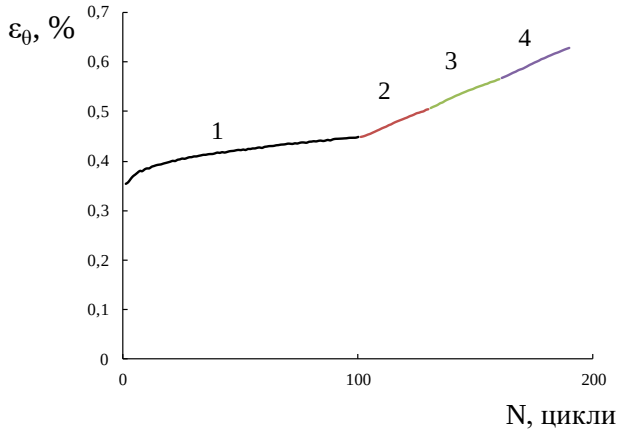


Рис. 1. Зміна характеру деформування трубного елементу за наявності деформацій повзучості.

Анотація. Розроблена методика експериментального дослідження взаємодії ефектів ратчетингу і повзучості для оболонкових конструктивних елементів. Об'єкт дослідження циліндричний трубний елемент, підданий дії циклічного навантаження пульсуючим внутрішнім тиском. Отримані графіки ратчетингу «без» та «за» наявності деформацій повзучості, які засвідчили збільшення швидкості накопичення деформацій в циклах, що характеризують взаємодію ефектів ратчетингу і повзучості.

1. Adamchuk M.P., Borodii M.V., Stryzhalo V.O., Yaskovets Z.S., Skakun S.A. Cyclic creep of pipes under block-type loading by internal pressure, *Materials Science*, **58**(2), 237–244 (2022).
2. Adamchuk M.P., Borodii M.V., Yaskovets Z.S. Cyclic mean stress variation effect on pipe ratcheting, *Strength of Materials*, **55**(5), 898–907 (2023).

Development of the experimental research method for ratcheting-creep interaction

M. Adamchuk, M. Borodii, Z. Yaskovets, S. Skakun

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] m.p.adamchuk@gmail.com

A methodology for experimental study of the interaction of ratcheting and creep effects for shell structural elements has been developed. The object of study is a cylindrical tubular element subjected to cyclic loading by pulsating internal pressure. Ratcheting graphs "without" and "with" the presence of creep deformations were obtained, which showed an increase in the rate of strain accumulation in cycles characterizing the interaction of ratcheting and creep effects.

Keywords: Experimental study, ratcheting, creep, tubular element.

Вплив високочастотної проковки та механічного легування нікелем на довговічність зварних з'єднань у 3,5% розчині NaCl

В. Книш[a1], С. Соловей[a,б], Б. Мордюк[a,в], А. Кадишев[a], М. Мальгін[a], В. Мірянін[a]

[a]Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України, Київ, Україна
[б]Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[в]Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна

[1] 2052382@gmail.com

Ключові слова: високочастотна механічна проковка, стикове зварне з'єднання, корозійна втома, циклічна довговічність, легування, ультрадисперсний нікель

Для гарантованого підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань металоконструкцій, які експлуатуються в умовах змінного навантаження, широко застосовуються методи поверхневого пластичного деформування (ППД), одним з яких є високочастотне механічне проковування (ВМП) [1, 2]. Перспективним напрямом є застосування комбінованих видів обробки на основі ВМП та легування корозійностійкими матеріалами поверхневого шару металу [3, 4]. Легування корозійностійкими матеріалами дозволяє підвищити корозійну стійкість поверхневого шару металу, а відповідно і збільшує циклічну довговічність зварних з'єднань у корозійному середовищі.

В даній роботі досліджена ефективність застосування технології ВМП з одночасним механічним легуванням поверхні ультрадисперсним нікелем до стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД розмірами 350х70х12 мм. Виготовляли 3 серії зразків: у вихідному стані після зварювання (перша серія), після зміцнення ВМП (друга серія) та після зміцнення за комбінованою обробкою: технологією ВМП з додаванням в зону обробки ульрадисперсного нікелю задля механічного легування поверхні (третя серія). Всі зразки випробовувались за одновісного змінного навантаження у 3,5 розчині NaCl.



а *б* *в*

Рис. 1. Загальний вигляд зони шва стикового зварного з'єднання: *а* – у вихідному стані; *б* – після зміцнення ВМП; *в* – під час зміцнення ВМП з одночасним механічним легуванням нікелем

Експериментально встановлено, що циклічна довговічність незміцнених стикових зварних з'єднань у 3,5 % розчині NaCl знаходиться в діапазоні від 121 тис. до 197 тис. циклів змін напружень, збільшується після зміцнення за технологією ВМП (від 773 тис. до 1120 тис. циклів) та за комбінованою обробкою – від 1200 тис. до 1467

тис. циклів змін напружень. Таким чином, зміцнення стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД комбінованою обробкою (технологією високочастотної механічної проковки з одночасним механічним легуванням ультрадисперсним нікелем) збільшує їх циклічну довговічність у 3,5 % розчині NaCl до 40% у порівнянні зі зміцненням лише ВМП, що згідно електронно-мікроскопічних та рентгено-спектральних даних забезпечується формуванням корозійно стійкого поверхневого шару, насиченого нікелем.

1. V. Knysh, S. Solovei, V. Kir'yan and V. Bulash, Increasing the corrosion fatigue resistance of welded joints by high-frequency mechanical peening, Strength Mater, 50, 443–477 (2018). https://doi.org/10.1007/s11223-018-9988-3.
2. J. Weinert, S. Gkatzogiannis, I. Engelhardt, et al. Investigation of corrosive influence on the fatigue behaviour of HFMI-treated and as-welded transverse non-load-carrying attachments made of mild steel S355. Int J Fatigue, 151, #106225 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106225.
3. V. Knysh, B. Mordyuk, S. Solovei, et al. Combining electric discharge surface alloying and high-frequency mechanic impact post-processing for increased corrosion fatigue life of as-welded transverse non-load-carrying attachments of the S355 steel. Int J Fatigue, 177, #107926 (2023). https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107926.
4. V. Knysh, B. Mordyuk, G. Prokopenko, S. Solovey, Increasing corrosion fatigue of welded joints of steel 15KhSND with construction defects by electric discharge surface alloying and high frequency mechanical impact. Metallofiz Noveish Tekhnol, 41, 1631–1652 (2019). https://doi.org/10.15407/mfint.41.12.1631

Effect of high-frequency mechanical impact treatment and mechanical alloying by nickel on fatigue durability of welded joints in 3.5% NaCl solution

V. Knysh[a1], S. Solovei[a,b], B. Mordyuk[a,c], A. Kadyshev[a], M. Malgin[a], V. Miryanin[a]

[a]E.O. Paton Electric Welding Institute, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, the NASciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[c]G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] 2052382@gmail.com

The fatigue behaviour of butt-welded specimens of 15KhSND steel was studied in a 3.5% NaCl solution after welding, high-frequency mechanical impact (HFMI) process, and HFMI combined with surface mechanical alloying by ultrafine nickel. As observed, the corrosion fatigue life of butt welds increased up to 40% higher after the combined HFMI + mechanical alloying process than that after a single HFMI due to the formation of a nickel-enriched surface layer (shown by SEM and EDS), which possesses enhanced corrosion resistance and suffers lesser surface damage and stress concentration.
Keywords: high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment, butt-welded joint, corrosion fatigue, fatigue life, alloying, ultrafine nickel.

Прогнозування довговічності металевих сплавів за багатоосьової втоми методом регресії гауссівського процесу

П. В. Яковчук[1], С. М. Шукаєв

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

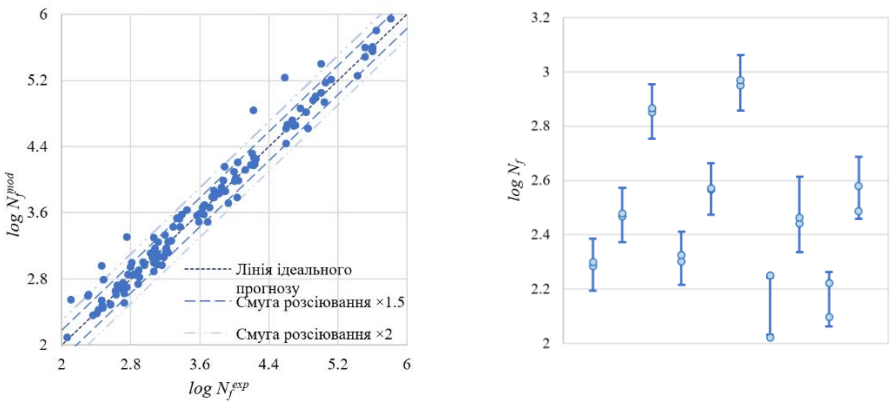
[1] yakovchuk.pavlo@lll.kpi.ua

Ключові слова: багатоосьова втома, прогнозування довговічності, машинне навчання, регресія гауссівського процесу

Експлуатація багатьох відповідальних інженерних конструкцій відбувається в умовах багатоосьового циклічного навантаження, що значно ускладнює прогнозування їх довговічності [1]. Традиційні критерії багатоосьової втоми не завжди забезпечують достатню точність прогнозування. У зв'язку з цим зростає інтерес до пошуку і використання інноваційних підходів, зокрема, методів машинного навчання, які здатні враховувати складні нелінійні залежності між параметрами навантажування та довговічністю матеріалу [2].

Серед різних алгоритмів машинного навчання особливу увагу привертають ймовірнісні моделі, зокрема регресія гауссівського процесу (Gaussian Process Regression), яка демонструє високу ефективність у задачах прогнозування втомної довговічності [3]. У даній роботі для прогнозування втомної довговічності металів застосовано саме її, так як ця модель дозволяє отримувати не лише точкове значення прогнозу, але й оцінку невизначеності прогнозування у вигляді стандартного відхилення [4].

Модель було натреновано на результатах експериментальних досліджень багатоосьової втоми 15 металевих сплавів, частково описаних в роботі [5]. За вхідні параметри було обрано характеристики навантаження та властивості матеріалів, а за функцію відгуку - логарифм кількості циклів до руйнування.



а *б*

Рис. 1. Результати прогнозування довговічності методом регресії гауссівського процесу: *а* – порівняння прогнозованих і експериментальних значень довговічності; *б* – довірчі інтервали прогнозу для окремих експериментальних точок з повторами.

Результати прогнозування представлено на Рис. 1а у вигляді діаграми «експеримент–прогноз», де порівнюються експериментальні значення довговічності з результатами моделі. На Рис. 1б додатково показано довірчі інтервали прогнозу для експериментів з повторами, отримані на основі стандартного відхилення моделі.

Аналіз результатів показує, що більшість прогнозів моделі знаходяться в межах подвійної факторної смуги від експериментальних даних. Отримані довірчі інтервали узгоджуються з фактичним розсіюванням експериментальних результатів, що свідчить про здатність моделі регресії гауссівського процесу оцінювати як значення довговічності, так і похибку прогнозу.

Отримані результати демонструють перспективність застосування ймовірнісних моделей машинного навчання для задач механіки руйнування.

1. Pagliari, L., Concli, F.: A review of multiaxial low-cycle fatigue criteria for life prediction of metals. International Journal of Damage Mechanics. 34, 377–414 (2025). https://doi.org/10.1177/10567895241280788.
2. Chen, J., Liu, Y.: Fatigue modeling using neural networks: A comprehensive review. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 45, 945–979 (2022). https://doi.org/10.1111/ffe.13640.
3. Yakovchuk, P.V., Kravchenko, V.V., Shukayev, S.M.: Prediction of the Multiaxial Fatigue Life of Metals Using Machine Learning Methods. Strength of Materials. 57, 279–288 (2025). https://doi.org/10.1007/s11223-025-00764-7.
4. Karolczuk, A., Słoński, M.: Application of the Gaussian process for fatigue life prediction under multiaxial loading. Mechanical Systems and Signal Processing. 167, 108599 (2022). https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108599.
5. Savchuk, Y., Yakovchuk, P., Shukayev, S.: Input Parameter Analysis for Low-Cycle Multiaxial Fatigue Models Using Artificial Neural Network. KEM. 1035, 59–69 (2025). https://doi.org/10.4028/p-YA35mB.

Prediction of Fatigue Life of Metallic Alloys under Multiaxial Loading Using Gaussian Process Regression

P. V. Yakovchuk[a1], S. M. Shukayev[a]

[a]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

[1] yakovchuk.pavlo@lll.kpi.ua

Prediction of fatigue life under multiaxial loading is challenging due to complex loading conditions and significant experimental scatter. In this study, Gaussian Process Regression (GPR) is used to predict the fatigue life of metallic materials under multiaxial loading. Unlike many machine learning models, GPR provides both point predictions and estimates of prediction uncertainty in the form of confidence intervals. The predicted fatigue lives were compared with experimental data using a predicted-versus-experimental diagram, and the scatter bands were evaluated against results of repeated experiments. The results show that the predicted confidence intervals are consistent with the observed experimental scatter.

Keywords: multiaxial fatigue, fatigue life prediction, machine learning, Gaussian process regression.

Залишкові напруження в покритті та методики їх визначення

О.В. Лопата[а1], А.Є. Солових[б], С.Є. Катеринич[б], В.М. Лопата[в]

[а]Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б] Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
[в]Національний транспортний університет, Київ, Україна

[1]email: lopata-sasha@ukr.net

Ключові слова: залишкові напруження, захисні покриття, напружено-деформований стан, геометричні параметри покриття, електроіскрове легування, термічні напруження

З літературного огляду визначено коло невирішених задач, які пов'язані з проблемами довговічності захисних покриттів та технології їх формування, а також оцінки впливу його напружено-деформованого стану на експлуатаційні характеристики поверхневого шару деталей чи інструменту. Як правило, покриття не існує без основи, на яку воно наноситься, тому інформація про напружено-деформований стан останньої є необхідним знанням для конструювання оптимальних за геометричними параметрами покриттів.

Методику визначення осьових залишкових напружень у призматичних стрижнях прямокутного перерізу із сталі У8 з покриттям товщиною 30…35 мкм, отриманим електроіскровим легуванням запропоновано авторами [1]. На основі результатів експерименту та даних про швидкості травлення покриття і основи зразка будували залежність $y = \sigma_e(\delta_i)$, за аналітичними залежностями обчислювали похідну й інтеграл за допомогою методу параболічної апроксимації та правила трапеції. Побудовані епюри залишкових напружень у покритті
та на межі його з основою (рис. 1).

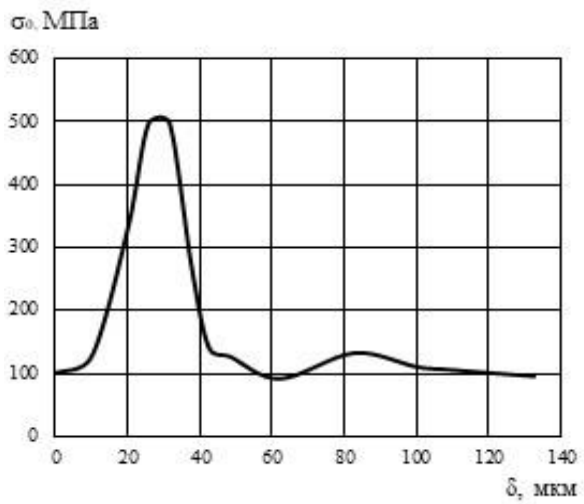


Рис. 1. Епюри залишкових напружень по товщині покриття, отримані за формулами

Нанесення твердосплавного покриття шляхом електроіскрової обробки спричинило виникнення залишкових напружень розтягу з максимумом на межі покриття та основи зразка. Залишкові напруження в покриттях (рис. 2), які наносяться

різними способами, визначаються наступними факторами: різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття та основи, при цьому температура в процесі формування покриття відрізняється від температури його експлуатації (термічні напруження); наявністю захоплених атомів газу і неповним структурним упорядкуванням, що відбувається в покритті при його формуванні; утворенням на поверхні розділу проміжних фаз, обумовлених взаємною дифузією матеріалів покриття і основи при високих температурах з об'ємом, що відрізняється від об'ємів матеріалів покриття і основи [2].

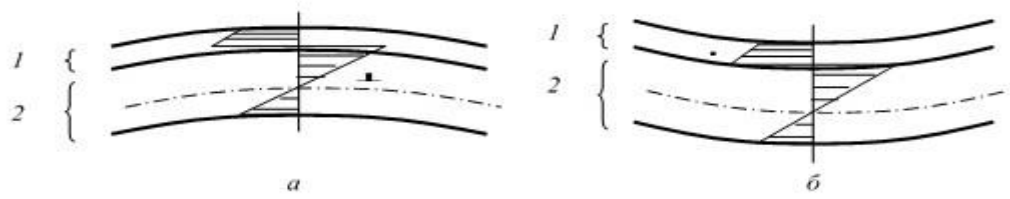


Рис. 2. Епюри залишкових напружень в основі з PVD покриттям TiN, TiC *(а)* та електроіскровим покриттям ВК 8*(б)*, їх знак та характер прогину пластинки в залежності від типу покриття, де: *1* – покриття; *2* – основа

Авторами [3] були проведені чисельні розрахунки залишкових напружень на пластинках із сталі Р6М5 з покриттям з нітриду титану, які вони порівнювали з експериментальними результатами. На рис. 3 представлена залежність максимальних залишкових напружень σ_{max} від різної товщини покриття δ.

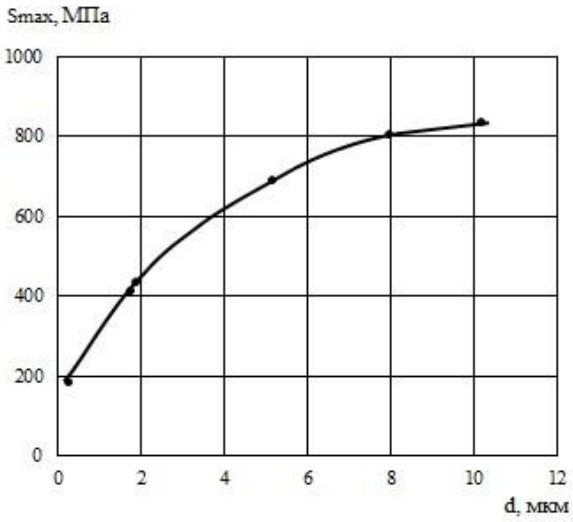


Рис. 3. Залежність максимальних залишкових напружень σ_{max} від товщини покриття δ

Експериментальні досліди залишкових напружень вони проводили по методу Давіденкова [3] на зразках розміром 100х5х3 мм. Суть методу полягає в послідовному видаленні шару покриття зі зразка і вимірюванні геометричних розмірів і деформації

останніх після зняття кожного шару. Видалення шару нітриду титана проводили шляхом електролітичного травлення в 10 % водяному розчині HCl. Катодом при цьому була пластина з нержавіючої сталі, анодом – зразок з покриттям. Місця, що не підлягали травленню, захищали хлорвініловим лаком.

Чисельний розв'язок задачі (рис. 4) і експериментальна перевірка (рис. 3) виконана авторами показали, що максимальні залишкові напруження розтягу, які можуть викликати руйнування покриття, формуються поблизу границі розділу покриття-основа зі сторони покриття. Для покриття товщиною δ = 10 мкм ці напруження досягають 880 МПа, однак не руйнують цілісність системи покриття-основа, що говорить про більш високу межу міцності даної системи.

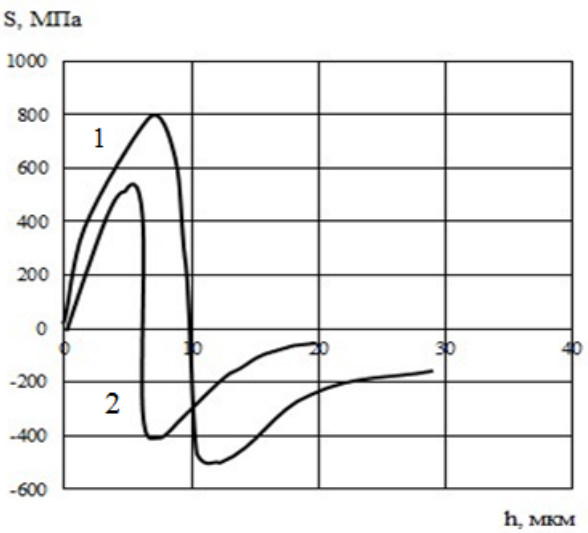


Рис. 4. Розподіл залишкових напружень σ по товщині зразка h з TiN – покриттям на сталі Р6М5: *1* – δ = 10 мкм, l = 50 мкм; *2* – δ = 5 мкм, l = 25 мкм

В роботі [4] були проведені досліди залишкових напружень в покриттях методом гнучкого зразка, основним критерієм цих напружень була кривизна здеформованого зразка, при цьому приймали наступні припущення: товщина покриття на всіх ділянках зразка однакова; здеформований зразок представляє собою циліндричну поверхню, тобто радіус кривизни у всіх точках однаковий; центральний кут гнучкого зразка складає не менш ніж 180^0, у випадку коли кут більший за 180^0 необхідно використовувати гнучкий зразок з більшою товщиною. Залишкові напруження в покритті розраховували за формулою:

$$\sigma = \frac{\delta_1^2 \cdot E}{6r\delta_2} \tag{1}$$

де σ – залишкові напруження в покритті, ГПа; Е – модуль пружності матеріалу основи, ГПа;

δ_1 і δ_2 – відповідно товщина гнучкого зразка і покриття, мм; r – радіус кривизни гнучкого зразка, мм

Залежність залишкових напружень в нітрид титановому покритті від сумарної товщини покриття при різних товщинах підшару чистого титану отриманих авторами представлена на рис. 5.

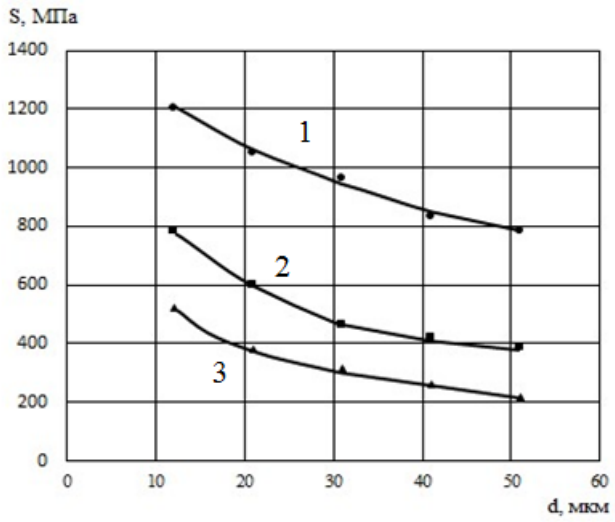


Рис. 5. Залишкові напруження в покритті з нітриду титану TiN *(1)*, та в покритті TiN з підшаром чистого титану товщиною 0,2 і 0,5 загальної товщини покриття відповідно *(2, 3)*

Аналіз напружено-деформованого стану покриттів в цілому зводиться до визначення залишкових напружень, які виникають після процесу його нанесення. При цьому розрахунок НДС композиції „основа-покриття” від дії експлуатаційних навантажень висвітлений не в повній мірі, у зв’язку з складністю розрахунку конструкцій з суттєво відмінними геометричними параметрами та фізико-механічними характеристиками матеріалів.

1. Бережницька М.П., Паустовський О. В., Кириленко С. М., Губін Ю. В. Визначення залишкових напружень в електроіскрових покриттях. *Проблемы прочности*. 2003. №6. С. 127 – 133.
2. Подстригач Я.С. Диффузионная теория деформации сплошной среды. Киев, Наук. думка, 1964. 126с.
3. Новиков Н.В., Воронкин М.А., Бессонов А.В., Смагленко Ф.П. Оценка остаточных напряжений втонких инструментальных покрытиях. *Проблемы прочности*. 1988. №1. С. 73 – 74.
4. Матвеев Н.В., Краснов А.Н., Милосердов И.В., Орещенков Ю.В., Изволенский Е.В. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме. *Проблемы прочности*, 1985, № 5 С. 90-93.

Моделювання термопружного стану різального інструменту

В.І. Калініченко[а1], І.Р. Качинська[а], О.О. Мікосянчик[б], І.П. Рибак[в]

[а]Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
[в]Національний транспортний університет, Київ, Україна

[1]email: v-lik@ukr.net

Ключові слова: термопружний стан, моделювання, різальний інструмент, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, надійність, міцність

В металообробній промисловості широко використовуються різальні інструменти, які в процесі експлуатації піддаються нерівномірному температурному впливу [1]. Тому для ефективного використання різального інструменту необхідно знати, як змінюються термопружні напруження його різальної частини в залежності від умов її експлуатації [2]. Задача визначення напружено-деформованого стану (НДС) різального інструменту пов'язана із значними проблемами постановочного та обчислювального характеру. Розрахунок напруженого стану різальної частини інструменту складної геометричної форми вимагає розробки спеціальних методик, які враховують особливості дії високих температур і умов деформування.

Аналіз методів теорій деформування і руйнування твердого тіла показує, що такі методики можуть бути створені на основі чисельних методів. Найбільш ефективним для аналізу НДС різальної частини інструменту є метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє будувати розрахункові схеми, виходячи з фізичної постановки задачі, а варіаційно-різнична природа МСЕ робить можливим математичний аналіз розрахункових моделей більш точним [3].

Реалізація цих методів можлива з використанням ЕОМ, що дозволяє повністю автоматизувати весь складний процес розрахунку НДС різальної частини інструменту і візуально представляти результати моделювання. Використання МСЕ для визначення впливу параметрів режимів різання на НДС і прогнозування надійності та міцності різального інструменту при механічній обробці матеріалів є актуальним.

При різанні основним джерелом утворення теплоти являється тертя між різальним інструментом, деталлю і стружкою та їх пластична деформація. При цьому частина тепла локалізується в поверхневому шарі інструмента. Тому, для визначення температурного стану інструменту була розв'язана крайова задача нестаціонарної теплопровідності. В цьому випадку стружку розглядали як конвекційне джерело тепла (нагріву) по його поверхні [4].

Так як робочі поверхні інструменту знаходяться в особливо жорстких умовах термонавантаження, то розглянуто процес токарної обробки сталі 45 відрізним різцем з Р6М5 (передній кут $\gamma = 7^0$, задній кут $\alpha = 12^0$). Режими різання: швидкість різання V = 0,8 м/с, подача s = 0,1 мм/об, глибина різання t = 2 мм.

На основі геометричних параметрів різального інструменту (кути нахилу, радіус стружколамаючої канавки та ін.) побудовано його твердотільну модель шляхом модифікування простого примітиву. Мінімальний розмір скінчених елементів вибрали

500 мкм, при цьому модель різальної частини інструменту мала 1989 вузлів і 1576 елементів (Рис. 1).



Рис. 1. Твердотільна модель різального інструменту *(а)* та розбиття її різальної частини на гексагональні скінчені елементи *(б)*

Оскільки в інструменті найбільш навантаженими є робочі кромки то аналізу підлягала тільки його різальна частина (рис. 1, б), яку розбивали на гексагональні скінченні елементи для отримання більш точного розподілу температурного поля. Для розрахунку термопружного стану необхідно врахувати фізико-механічні властивості матеріалу різальної частини інструменту та граничні умови. Фізико-механічні властивості сталі Р6М5, які використовували для розрахунку, приведено у таблиці 1.

В процесі аналізу моделі є можливість змінювати властивості матеріалу і атрибути скінченного елемента, його розмір (масштабуванням), тип скінченних елементів, додавати проміжні вузли, а також збільшувати або зменшувати ступені вільності [5].

Таблиця 1.

Фізико-механічні властивості сталі Р6М5

Модуль пружності E, МПа	Модуль зсуву G, МПа	Коефіц.. Пуассона, μ	Густина матеріалу ρ, кг/м^3	Коефіцієнт лінійного подовження $\alpha\times10^{-6}$/К	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/м·К	Питома теплоємність, Дж/кг·К
2.25×10^5	$8{,}8\times10^4$	0.21	7800	5,3	27	650

Розроблена модель розрахунку термопружних напружень різальної частини інструмента дозволить визначити конкретні їх величини в залежності від умов процесу різання. Зміна розподілу температурного поля на етапі врізання інструменту в деталь приведені на рис. 2.

На поверхні різальної частини було задано конвекційне джерело тепла яке виникає в процесі контакту стружки з інструментом, при цьому початкова температура на поверхні тіла 20°С. Моделюючи процес врізання інструменту в деталь теплові джерела задавались як функція часу. При цьому температура передньої поверхні змінювалась від 20 до 850 °С, в той час як на задній поверхні змінювалась від 20 до 650°С.

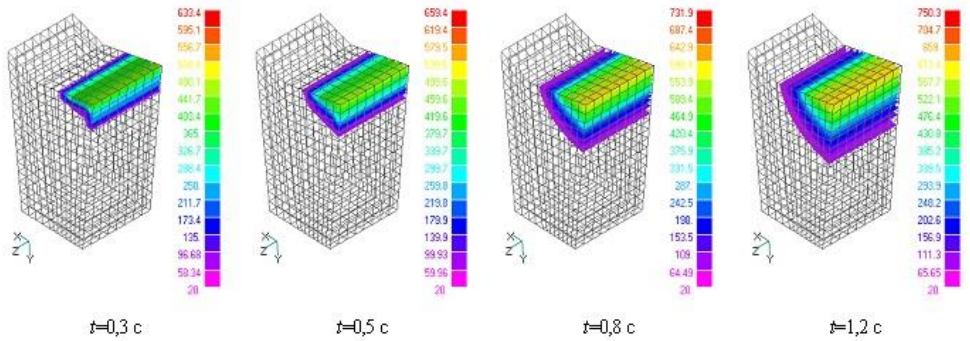


Рис. 2. Зміна температурного поля різальної частини інструменту в процесі врізання

Результати моделювання показали, що під час врізання в інструменті виникає нерівномірне поле напружень від температури (рис. 3), де максимуми корелюють з зонами різального інструменту які частіше всього зношуються.

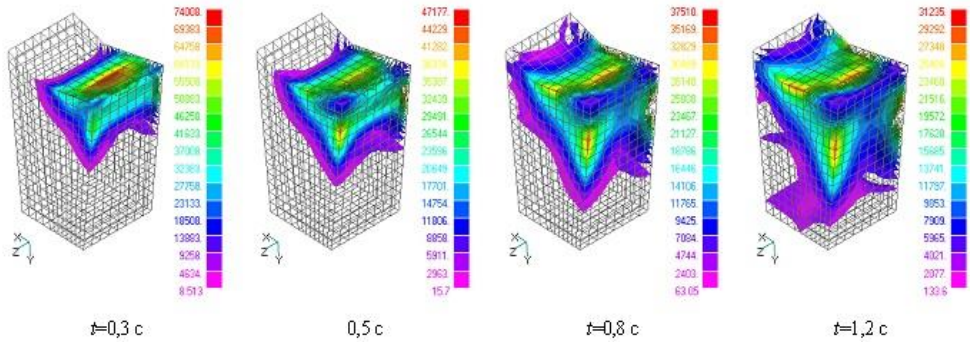


Рис. 3. Зміна еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ різальної частини інструменту в процесі врізання

Можливість розрахунку напружень від впливу температурних факторів дозволить визначити оптимальні умови роботи для конкретного типу інструменту з урахуванням умов його експлуатації.

1. А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. Теплофизика процессов механической обработки. Учеб. пособие. Киев – Одесса, Либидь, 1991. 240 с.
2. В.А. Остаф'єв, М.О. Нощенко. Об'ємне моделювання термопружної міцності твердосплавного ріжучого інструмента при обробці деталей приладів. Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2002. №4. С. 7-14.
3. В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пособие:
4. Основы механики разрушения. Под ред. В.В. Панасюка. 1988. Киев, Наук. думка. 488с.
5. В.І. Калініченко Моделювання термопружного стану різального інструменту. Сверхтвердые материалы. 2005. №1. С. 78–80.

6. В.С. Антонюк В.І. Калініченко Аналіз робочої поверхні різального інструменту методом скінчених елементів. Новые процессы и их модели в ресурсо- и энергосберегающих технологиях. Одесса, АТМ Украины, 2003. С. 3– 6.

Design of the термопружного state of cutting instrument

V. Kalinichenko[a1], I. Kachynska[a], O. Mikosianchyk[b], I. Rybak[c]

[a]G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]State University Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine.
[c] National Transport University, Kyiv, Ukraine.

[1] email: v-lik@ukr.net

For determination of the temperature state of instrument the regional task of non-stationary heat conducting was untied. The worked out model of calculation of tensions of cutting part of instrument allows to define their concrete sizes depending on the terms of cutting process. Design results showed that during cutting in an instrument arose up the uneven field of tensions from a temperature, where maximums correlate with the zones of cutting instrument that wear out mostly. Possibility of calculation of tensions rom influence of temperature factors allows to define optimal terms of work for the concrete type of instrument taking into account his external environments.

Keywords: design, cutting instrument, tensely-deformed state, method of eventual elements, reliability, durability

Підвищення ресурсу матриць та пуансонів для виробництва трубчастих виробів з використанням технології іонно-плазмого термоциклічного азотування

А.В. Рутковський[1], К.П. Буйських, Л.А, Лопата

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] email: rut2000@ukr.net

Ключові слова: імпульсне термоциклічне вакуумне іонно-плазмове азотування, покриття, дифузійні шари, твердість, механічні та триботехнічні характеристики

Забезпечення конкурентоспроможності, надійності, довговічності виробів можна досягти двома основними напрямками: розробкою нових матеріалів, що мають більш високий рівень фізико-механічних і експлуатаційних властивостей та формуванням на поверхнях деталей захисних і зміцнювальних покриттів ресурсозберігаючими технологіями.

Технологія імпульсного термоциклічного вакуумного іонно-плазмового азотування матеріалів поверхні деталей дозволяє скоротити тривалість процесу, отримати більш тверді шари за глибиною, стабільні структури і необхідні властивості азотованих поверхонь [1].

Численними дослідженнями встановлено, що покриття істотно впливають на механічні властивості основи і композиції покриття – основа, причому цей вплив може бути як позитивним, тобто викликає підвищення механічних та триботехнічних характеристик, так і негативним, що викликає їх зниження.

З усіх видів покриттів або дифузійних шарів іонний процес азотування доведений до технологічної досконалості, відповідає більшості сучасних вимог та оцінюється як високопродуктивний, високоефективний, енергозберігаючий та екологічно чистий.

Процес імпульсного термоциклічного вакуумного іонно-плазмового азотування матеріалів запропонований для зміцнення штампового інструменту – пуассонів та матриць для гарячого та холодного пресування.



Рис 1. Зношена матриця для штампування трубчастих елементів, які використовуються для подальшої обробки, після впливу термоциклічних навантажень

Вихід із ладу штампового інструменту відбувається через термоциклічні навантаження. Деталь в процесі протяжки, нагріває матрицю до температури 1000-1100^{0}С, а потім інструмент різко охолоджується і після нетривалої експлуатації в

процесі нагрівання-охолодження на штампованому інструменті з'являється сітка розтріскування (рис. 1).

На матриці (рис. 1) видно зношений матеріал у вигляді поздовжніх рисок, які виникли при термоциклічних навантаженнях. Оскільки матриці та пуансони виготовлені з матеріалу 4Х5МФС, а матеріал містить достатню кількість хрому, то в процесу імпульсного термоциклічного іонно-плазмового вакуумного азотування відбувається утворення нової сполуки – нітриду хрому, яка має високу теплостійкість та низький коефіцієнт тертя.

Розроблена технологія імпульсного термоциклічного іонно-плазмового вакуумного азотування відрізняється тим, що нагрівання деталі здійснюється тільки поверхневим підведенням енергії тліючого розряду. У розрідженому вакуумному газовому середовищі, що складається з азоту та аргону, між катодом (деталь) і анодом (стінка вакуумної камери) збуджується циклічний розряд керованої потужності. При цьому позитивні іони газу з високою енергією бомбардують поверхню деталі, нагрівають її до температури насичення і дифундують в поверхневий шар, формуючи в ньому твердий розчин азоту в металі, а при досягненні межі розчинності – нітридні фази.

Таким чином, захисне покриття, що зміцнює, фактично являє собою модифікований (легований) поверхневий шар матеріалу деталі, одержуваний шляхом адресного підведення енергії тліючого розряду.

Початкова термообробка виконується до досягнення твердості 48 … 50 HRC. Процес триває близько 10-24 годин. За цей період твердість азотованого шару підвищується до 700…750 HV, а товщина зміцненого шару досягає 0,4..0,7 мм.

Розроблена технологія термоциклічного іонно-плазмового вакуумного азотування відрізняється тим, що при зміцненні деталі нагрівається тільки її поверхневий шар. При цьому контролюються два параметра – максимальна и мінімальна температура поверхні деталі [2].

На рисунку 2 показано штамповий інструмент – матриці для гарячого пресування, які оброблені методом імпульсного термоциклічного іонно-плазмового вакуумного азотування: до азотування (*а*) та після азотування (*б*)



Рис. 2. Штамповий інструмент – матриці для гарячого пресування:до азотування (*а*) та після азотування (*б*)

Імпульсне термоциклічне іонно-плазмове вакуумне азотування успішно використовується для зміцнення трубчастих пуансонів (Рис. 3) [3].



Рис. 3. Зміцнений пуансон для оброблення трубчастих заготовок

Таким чином, термоциклічне іонно-плазмове вакуумне азотування підвищує твердість, зносостійкість, корозійну стійкість і границю витривалості інструмента, при цьому не відбувається змін його розмірів і форми, тому відпадає необхідність у подальшій фінішній механічній обробці. Ресурс оброблених матриць був підвищений в 2-2,3 рази.

1. Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковський, А. Ю. Кумуржі, В.С. Антонюк Застосування іонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2015. Вип №3(74). С. 28 – 33.
2. Патент України на корисну модель 141322 МПК С 23 С 14/48, С 23 С 14/48 Спосіб контролю процесу іонно-плазмового азотування / Рутковський А.В., Прихожа Д.В., Антонюк В.С.; заявл. 30.05.2019 р., опубл. 10.04.202. Бюл. № 7. 2020.
3. V.G. Kaplun and P.V. Kaplun Ion Nitriding in Hydrogen Free Media (Іонне азотування в безводневих середовищах), monograph. Khmelnytskyi, Khmelnytskyi National University. 2015. 318 p.

Increasing the life of dies and punches for the production of tubular products using ion-plaza thermocyclic nitriding technology

A. Rutkovskiy[1], K. Buiskykh, L. Lopata

G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] email: rut2000@ukr.net

Thermocyclic ionoplasma vacuum nitriding increases the hardness, wear resistance, corrosion resistance and endurance limit of the tools, while there are no changes in its size and shape, so there is no need for further finishing machining. The resource of the processed matrices was increased by 2-2.3 times.

Keywords: impulsive thermal-cycle vacuum ion-plasma nitriding, coverage, diffusive layers, hardness, mechanical and триботехнічні descriptions

Methodological Framework for Active Suppression of Flow-Induced Non-Stationary Vibrations Using Piezoelectric Patches

O. Derkach[a1], A. Ratynskyi[a], R. Rzadkowski[b]

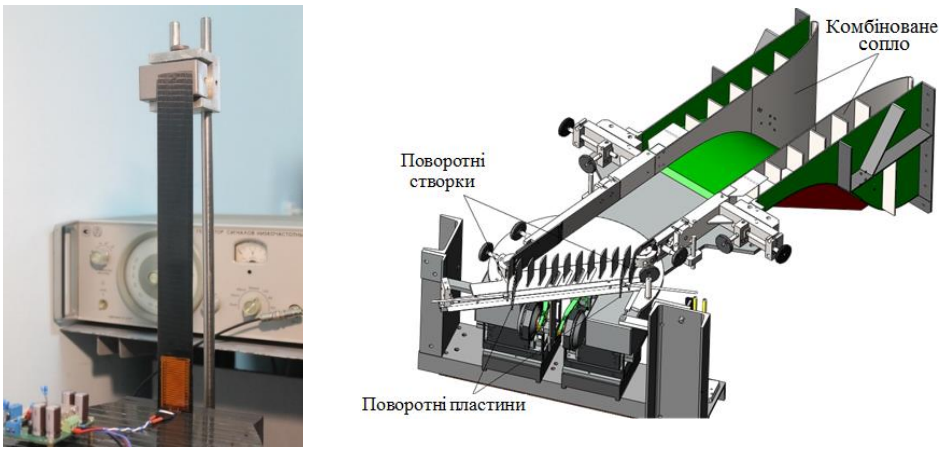
[a]G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]Institute of Fluid-Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Gdańsk, Poland

[1] derkach@ipp.kiev.ua

Keywords: piezoelectric patches, active damping, active flutter suppression, flow-induced vibrations, blade cascade, dynamic stability, unsteady aerodynamic forces.

Flow-induced non-stationary vibrations are among the main factors limiting the dynamic reliability of slender structural elements operating in aerodynamic environments, including turbomachinery blades, blade cascades, and lightweight composite components. In critical operating regimes, the interaction between the flow and the vibrating structure may lead to a reduction of the total damping, onset of self-excited vibrations, and loss of dynamic stability.

The present work has a methodological character and aims at combining two research directions developed by the authors: (i) experimental determination of unsteady aerodynamic forces and dynamic stability limits of vibrating blade cascades, and (ii) active vibration damping of flexible composite elements by means of piezoelectric patches and feedback control. Previous studies have shown that piezoelectric actuators and sensors can effectively modify the modal characteristics and damping properties of flexible structures, while experimental methods for blade cascades make it possible to identify aerodynamic loads and flutter boundaries under various flow conditions [1–3].



a b

Fig. 1. Experimental facilities used in the study: a – cantilever composite beam specimen with surface-bonded piezoelectric patch used for active vibration damping experiments; b – experimental setup for investigation of unsteady aerodynamic forces and dynamic stability of oscillating blade cascades in flow.

The proposed approach is based on the development of an integrated aeroelectromechanical model of a vibrating structural element with surface-bonded piezoelectric patches in flow. In this framework, the experimentally identified unsteady aerodynamic forces are combined with a structural dynamic model and an active control law generating counteracting piezoelectric actuation. The main objective is to increase the total system damping and to shift the boundary of dynamic instability toward safer operating conditions.

Special attention is paid to the formulation of efficiency criteria for active control, including reduction of vibration amplitudes, increase in equivalent damping, and extension of the dynamic stability boundary. The developed methodological framework is intended as a basis for further analytical, numerical, and experimental studies on active flutter suppression and active damping of flow-induced vibrations in blade-like composite structures.

1. Derkach O.L., Zinkovskyi A.P., and Savchenko O.V. Active damping of nonstationary vibrations of a three-layer electro-viscoelastic composite plate. *Strength Mater*, **52**, 876–888 (2020). https://doi.org/10.1007/s11223-021-00241-x
2. Yershov R., Savchenko O., Zinkovskii A., and Derkach O. Electronic system for calculation-experimental determination of the modal and damping characteristics of active viscoelastic beams. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 858-863 (2020). https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088927
3. Tsymbalyuk V., Gnesin V., Rzadkowski R., Sokoloski J. Experimental and numerical investigation of 2D palisade flutter for the harmonic oscillations. *In: Hall K.C. (ed.) Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines*. Dordrecht: Springer, 53–63 (2006).

Активне демпфування нестаціонарних коливань, індукованих потоком, за допомогою п’єзоелектричних накладок

О. Деркач[a1], А. Ратинський[a], Р. Жадковскі[б]

[a]Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]Інститут проточних машин імені Р. Шевальського ПАН, Гданськ, Польща

[1] derkach@ipp.kiev.ua

Розглянуто можливість застосування п’єзоелектричних накладок для активного демпфування нестаціонарних коливань елементів конструкцій, індукованих потоком. Запропоновано методологічний підхід до поєднання активного керування коливаннями з експериментальним визначенням нестаціонарних аеродинамічних сил та меж динамічної стійкості лопаткових решіток. Показано перспективність підходу для задач аероеластики та підвищення вібраційної надійності турбомашин.

Ключові слова: активне демпфування, п’єзоелектричні накладки, коливання, індуковані потоком, аероеластика, нестаціонарні аеродинамічні сили, динамічна стійкість, лопаткові решітки.

Experimental Methodology for Active Structural Health Monitoring of Composites Based on Nonlinear Resonance and Dissipative Properties Analysis

O. Derkach[a1], A. Kovalovs[b], V. Kobzar[a]

[a]G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]Riga Technical University, Riga, Latvia

[1] derkach@ipp.kiev.ua

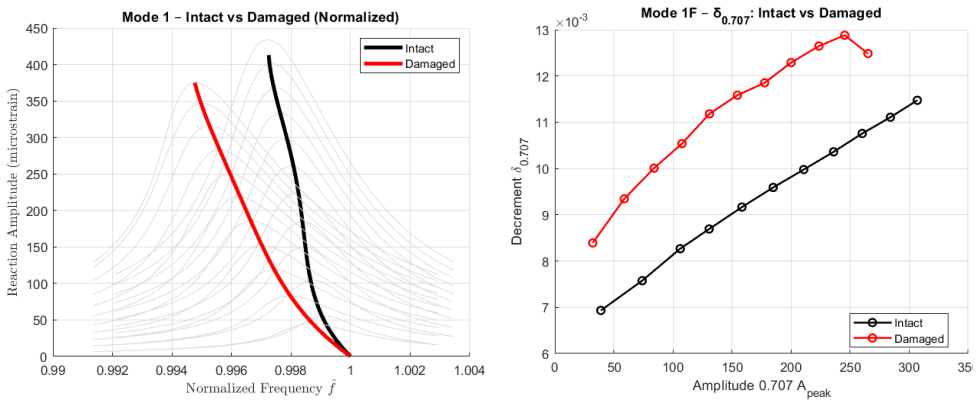
Keywords: carbon fiber reinforced plastic, nonlinear resonance vibrations, damping, energy dissipation, piezoelectric actuators, structural health monitoring, nondestructive diagnostics.

The aim of this study is to develop a methodology for nondestructive vibration-based monitoring and diagnostics of local damage in multilayer composite structural elements based on the analysis of their nonlinear dynamic characteristics – namely, the amplitude dependence of the resonance frequency (the so-called backbone curve) and dissipative properties – using piezoelectric actuators. The development of such a methodology will enable the creation of relatively inexpensive and efficient structural health monitoring systems compared with existing approaches.

In the proposed approach, active PZT elements are used for continuous monitoring of the structural condition of critical engineering components. To investigate the influence of local damage on the nonlinear dynamic properties of composite elements – specifically the backbone curves and the amplitude dependence of the logarithmic decrement – cantilever beam specimens made of carbon fiber reinforced polymer were manufactured and tested. The working part of the specimens consisted of eight CFRP layers and had dimensions of 20×3×190 mm. The specimen with an enlarged root section was clamped with a constant force in a massive steel plate [1]. To minimize energy losses during vibration tests, the plate with the specimen was suspended using steel strings, which significantly reduced the transfer of vibration energy to the foundation.

Vibrations of the specimens were excited by a piezoelectric actuator operating in a self-oscillation regime with controlled excitation amplitude. The vibration amplitude was regulated by adjusting the electric voltage applied to the actuator electrodes. Strain measurements were performed using a strain-gauge sensor.

A series of experimental studies of the dynamic properties of the cantilever specimens was carried out both in the initial undamaged state and after introducing localized low-energy impact damage. The procedure for determining the dynamic parameters was integrated directly into the vibration excitation and measurement system using a PZT actuator patch and strain-gauge data acquisition. As a result, resonance curves for different excitation amplitudes and amplitude-dependent logarithmic decrements were obtained for excitation voltages ranging from 20 V to 200 V (Fig. 1). The vibration amplitude was automatically maintained at a predetermined level by regulating the current supplied to the piezoelectric actuator.



a b

Fig. 1. Resonance backbone curves for locally damaged and intact beams (a) and the corresponding damping dependences (b) for excitation voltages ranging from 20 to 200 V.

The experimental results demonstrate that, for specimens with localized impact damage, defect-induced stiffness degradation leads to nonlinear changes in the amplitude-frequency response. This effect results in an increase in the effective damping capacity of the composite beam. Consequently, the amplitude dependence of the logarithmic decrement exhibits a steeper gradient with respect to the deformation amplitude.

1. Kobzar V., and Derkach O. Experimental techniques for studying the effect of local damage on damping properties of CFRP cantilever beams. *Structural Integrity Procedia*, **59**, 344–351 (2024). https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.049

Експериментальна методика активного структурного моніторингу композитних матеріалів на основі аналізу нелінійного резонансу та дисипативних властивостей

О. Деркач[a1], А. Ковальовс[б], В. Кобзар[a]

[a]Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна.
[б]Ризький технічний університет, Рига, Латвія

[1] derkach@ipp.kiev.ua

Розроблено експериментальну методику активного за допомогою п'єзоелектричних актуаторів неруйнівного моніторингу локальних пошкоджень композитних елементів із вуглепластику на основі аналізу нелінійних резонансних характеристик і дисипативних властивостей. Показано, що пошкодження призводить до зміни скелетних кривих, зростання демпфування та амплітудної залежності логарифмічного декременту коливань.

Ключові слова: вуглепластик, нелінійні резонансні коливання, демпфування, розсіювання енергії, п'єзоелектричні актуатори, моніторинг технічного стану, неруйнівна діагностика.

Дослідження впливу накопиченого втомного пошкодження на дисипативні характеристики композитної лопаті повітряного гвинта

В. О. Пальчиковський[а], А. В. Морозов[а], О. Л. Деркач[б1], Ю. І. Торба[а]

[а]АТ "Івченко-Прогрес", Запоріжжя, Україна
[б]Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] derkach@ipp.kiev.ua

Ключові слова: композитна лопать, вуглепластик, втомне пошкодження, демпфування, розсіювання енергії в матеріалі, нелінійні резонансні коливання, неруйнівна діагностика.

Застосування нових матеріалів, зокрема полімерних композиційних матеріалів, армованих вуглецевими волокнами, є одним із пріоритетних напрямів розвитку авіаційної техніки та підвищення техніко-економічних показників газотурбінних двигунів [1–2]. Дослідження вібраційної міцності композитних матеріалів і відповідальних елементів конструкцій, що експлуатуються в умовах динамічних навантажень, є необхідною передумовою забезпечення їх надійності та безпечної експлуатації. Водночас для підвищення довговічності конструкцій, удосконалення технологій їх виготовлення та оцінювання тривалої міцності принципове значення має своєчасна діагностика дефектів і пошкоджень [3].

Міцність композиційних матеріалів у значній мірі визначається їх чутливістю до ініціювання та подальшого розвитку мікро- та макродефектів структури. Відомо, що характеристики розсіювання механічної енергії у волокнистих композитах є більш чутливими до наявності локальних пошкоджень, ніж зміни їх жорсткісних характеристик [4]. У зв'язку з цим аналіз демпфувальних властивостей може розглядатися як ефективний індикатор ранніх стадій деградації матеріалу.

У доповіді розглянуто підхід до оцінки накопиченого пошкодження композитної лопаті повітряного гвинта (рис. 1) на основі аналізу змін частоти резонансних коливань та характеристик демпфування залежно від амплітуди у процесі втомних випробувань.

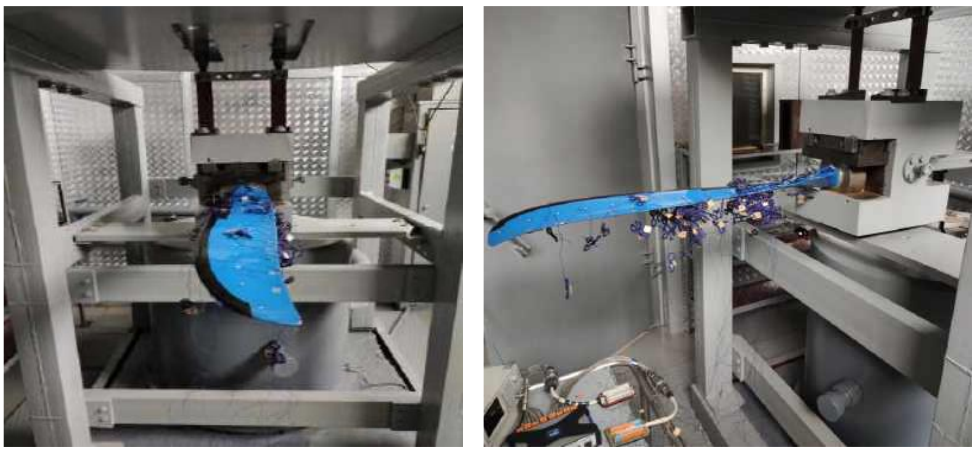


Рис. 1. Препарована лопать на вібраційному електродинамічному стенді.

За результатами експериментальних досліджень встановлено:

1. Накопичення пошкоджень у композитній лопаті супроводжується зростанням рівня розсіювання енергії, що підтверджує можливість кількісного оцінювання ступеня пошкодження за зміною демпфувальних характеристик.
2. Із розвитком пошкодження спостерігається зниження резонансної частоти, що відображає деградацію жорсткості матеріалу та може бути використано як додатковий інформативний критерій оцінки стану лопаті.
3. Виміряне демпфування залежить від рівня прикладених напружень: зі зростанням амплітуди навантаження (напружень) фіксуються вищі значення демпфування, що свідчить про нелінійний характер дисипативних процесів у пошкодженому композиті.

Оскільки рівень розсіювання енергії в композитній лопаті та частотна основного нелінійного резонансу є чутливими до мікроструктурних дефектів, зазначені параметри можу бути використані під час випробувань на довготривалу міцність.

1. В.О. Пальчиковський, А.В. Морозов, Ю.І. Торба, Методи діагностування дефектів деталей авіаційних двигунів з композиційних матеріалів, *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, **173**, № 4, 102–109 (2021). https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4sup1.14
2. A.V. Morozov and G.I. Lvov, A procedure for the numerical determination of the strength criterion parameters of a three-dimensionally reinforced composite material, *Strength Mater*, **56**, 53–61 (2024). https://doi.org/10.1007/s11223-024-00626-8
3. О.Л. Деркач, К.В. Савченко, Є.О. Онищенко, С.М. Кабанник, *Коливання елементів конструкцій турбомашин з урахуванням недосконалостей їх структури і розсіювання енергії*, Наукова думка, Київ (2024) https://doi.org/10.15407/978-966-00-1934-8
4. V. Kobzar and O. Derkach, Experimental techniques for studying the effect of local damage on damping properties of CFRP cantilever beams, *Structural Integrity Procedia*, **59**, 344–351 (2024). https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.049

Study of the Effect of Accumulated Fatigue Damage on the Dynamic Characteristics of a Composite Propeller Blade

V. Palchykovskiy[a], A. Morozov[a], Yu. Torba[a], O. Derkach[b1]

[a]JSC “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine
[b]G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength, the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] derkach@ipp.kiev.ua

This study proposes an approach to evaluate accumulated fatigue damage in a composite propeller blade based on changes in resonance frequency and damping during fatigue tests. Damage growth is accompanied by increased energy dissipation and reduced resonance frequency, reflecting stiffness degradation. These parameters can be applied in durability testing.

Keywords: composite blade, carbon fiber–reinforced polymer (CFRP), fatigue damage, damping, material energy dissipation, nonlinear resonance vibrations, nondestructive diagnostics.

Застосування високошвидкісної відеореєстрації для вдосконалення методики визначення енергетичних характеристик перешкод при пробитті високоміцними ударниками

П.О. Булах[1], В.Є. Данилюк, Є.О. Кондряков, А.В. Бялонович

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] pavelbulakh@gmail.com

Ключові слова: динамічне навантаження, початкова швидкість ударника, високошвидкісна відеокамера, траєкторія руху ударника, пневмо-динамічний стенд

В роботі запропоновано підхід до вдосконалення існуючої методики дослідження балістичної стійкості перешкод. Результати експериментів, отримані за допомогою запропонованого підходу, сприяють підвищенню точності розрахункових методів при моделюванні процесів пробиття та узагальненні даних контрольних випробувань.

Дослідження поведінки матеріалів за умов високошвидкісної взаємодії охоплює кілька основних аспектів. До них належать аналіз механізмів, що визначають перебіг ударного процесу, дослідження зміни фізико-механічних характеристик матеріалів під дією інтенсивного динамічного навантаження, а також оцінювання впливу короткочасних імпульсних навантажень на цілісність та працездатність різних конструкцій і інженерних споруд.

При оцінки стійкості високоміцних сталевих перешкод до пробиття бронебійними ударниками експериментально визначається ударний імпульс пробиття перешкоди з використанням методу балістичного маятника [1]. Відповідні розрахунки ґрунтуються на рівнянні енергетичного балансу. Цей підхід дозволяє отримувати надійні та достатньо точні дані щодо стійкості різних матеріалів і конструкцій на їх основі в умовах спеціалізованих лабораторних досліджень.

Для підвищення якості та інформативності дослідження процесу взаємодії ударника та перешкоди пропонується додатково використовувати високошвидкісну відеокамеру. Це дає можливість детально реєструвати перебіг усього процесу зіткнення, зокрема оцінювати зміну траєкторії руху ударника на початковій та завершальній стадіях взаємодії з перешкодою, а також простежувати деформацію як ударника, так і перешкоди під час їх контактної взаємодії (рис.1).

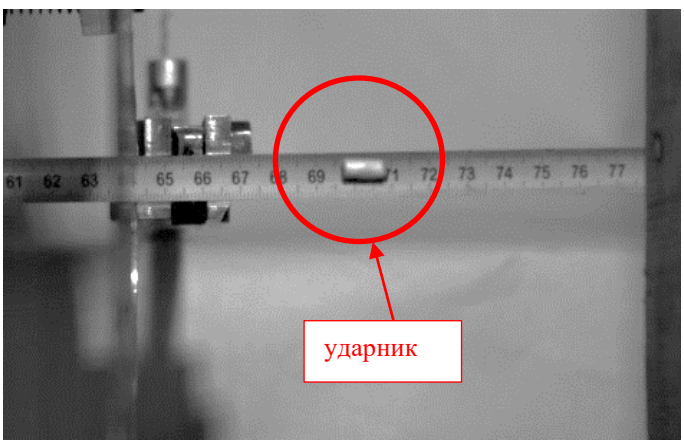


Рис. 1 – Траєкторія руху ударника під час експериментальних досліджень.

В роботі на пневмо-динамічному стенді [2] було проведено серію випробувань перешкод на високошвидкісне пробиття високоміцними ударниками. Для реєстрації

процесу пробиття використовувалась високошвидкісна відеокамера Photron Fastcam Nova S9 з максимальною розподільною здатністю – 200 000 кадрів за секунду. За результатами досліджень було зареєстровано механізм покрокового руйнування перешкоди та ударника, а також зафіксовано форми коливань балістичної перешкоди.

Отримані результати можуть бути використані для виявлення ділянок із найбільшими рівнями напружень під час коливань, оцінювати ймовірність виникнення резонансу та, в подальшому, для підвищення надійності конструкцій при динамічних навантаженнях. Це дає можливість оцінити локалізацію енергії удару та моделювати процеси взаємодії при високошвидкісних навантаженнях, що є важливим при дослідженнях процесів пробиття елементів балістичного захисту.

Таким чином, експериментальні результати, отримані із застосуванням запропонованого підходу, сприяють підвищенню точності розрахункових моделей при відтворенні процесу пробиття і узагальненні отриманих даних.

1. Авєтов А. А., Данилюк В.Є., Олексюк О.М. Методика дослідження параметрів пробою з реєстрацією ударного імпульсу // Труди академії. К: – 2001 – № 27 – С.47 – 51.

2. Kondryakov, E.O., Danylyuk, V.E. & Kharchenko, V.V. Fracture Energy Characteristics of High-Strength Steels Penetrated with Armor-Piercing Strikers at Velocities Up to 1000 m/s. Strength Mater, 55 (2), 245–253 (2023).

Application of High-Speed Video Recording for Improving the Methodology of Determining Energy Characteristics of Barriers under Perforation by High-Strength Projectiles

P. Bulakh[a1], V. Danylyuk[a], E. Kondryakov[a], A. Byalonovich[a]

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] pavelbulakh@gmail.com

An improved express methodology has been developed for determining the energy characteristics of high-strength steel barriers under perforation by armor-piercing projectiles. The methodology combines the ballistic pendulum method with high-speed video recording at frame rates of up to 200,000 frames per second, employing the PHOTRON FASTCAM NOVA S9 high-speed camera. The proposed approach provides a comprehensive investigation of deformation and fracture processes based on the energy balance equation, and enables the determination of the reduced perforation impulse of the barrier and the projectile velocity after its passage through the barrier using simplified computational models.

Keywords: dynamic loading, initial speed of the striker, high-speed video camera, trajectory of the striker, pneumodynamic stand.

Oxidation resistance of NiTi intermetallic alloy and NiTi-based composite at elevated temperatures

G. Chyzhyk[a,b], O. Poliarus[a,c], D. Vedel[c], A. Kravchuk[a,b], J. Morgiel[a]

[a]Institute of Metallurgy and Materials Science, the Polish Academy of Sciences, Krakow, Poland.
[b]G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[c] Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

chyzhyk.g@imim.pl

Keywords: oxidation resistance, intermetallic alloy, composite, high-temperature oxidation kinetics.

NiTi intermetallic compound is characterized by high corrosion resistance, enhanced heat and scale resistance at temperatures above 500–600 °C, as well as high mechanical properties [1]. The main drawback of this material is a significant reduction in strength properties at elevated temperatures for NiTi. The introduction of components based on refractory metal nitrides into the composition of intermetallic matrices allows for the creation of new composite materials with controlled structure and phase composition, as well as the targeted modification of their physical, mechanical, and service properties.

The high-temperature oxidation behavior of NiTi intermetallic, as well as the developed NiTi–(TiN, ZrN, NbN) composite system, was studied in detail at 500 °C, 800 °C and 1000 C. High-temperature oxidation tests were conducted under cyclic conditions in air: at 500 °C and 800 °C, the specimens were subjected to 10 cycles of 10 hours each, and at a temperature of 1000 °C to 20 cycles of 5 hours each were conducted. The total oxidation exposure time for each temperature regime was 100 hours.

The results show that, despite the formation of a thin oxide film on the samples surface at 500 °C, no measurable changes in the oxidation kinetics were detected beyond the experimental error of the measurement system (Fig. 1a).

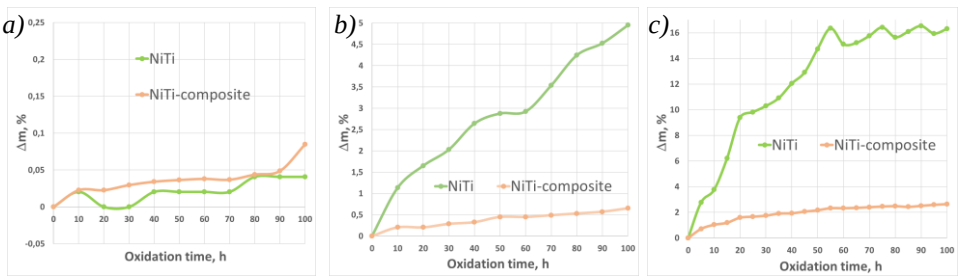


Fig. 1. Kinetic curves of high-temperature oxidation in air of the intermetallic and composite at 500 °C (a), 800 °C (b), and 1000 °C (c).

For the NiTi intermetallic and the NiTi–based composite, a linear relationship between the specific mass gain and oxidation temperature during high-temperature oxidation at 800 °C and 1000 °C was observed (Fig. 1b,c). In particular, the NiTi-based composite demonstrated improved oxidation resistance at 1000 °C compared with the original

intermetallic alloy. The total mass gain of the composite reached Δm = 2.64% and Δm = 16.31% for the NiTi intermetallic.

Fig. 2 presents the surfaces and cross-sections of specimens oxidized at 500 °C, 800 °C and 1000 °C for 100 hours. Surface analysis of the NiTi intermetallic oxidized at 500 °C revealed the formation of localized oxide regions under these conditions. At higher temperatures (800 °C and 1000 °C), the intermetallic surface became completely covered by oxide scales.

As shown in the SEM/BSE images in Fig. 2a–c, two types of oxides can be distinguished on the surface according to the EDS analysis. In addition, the oxide crystal size

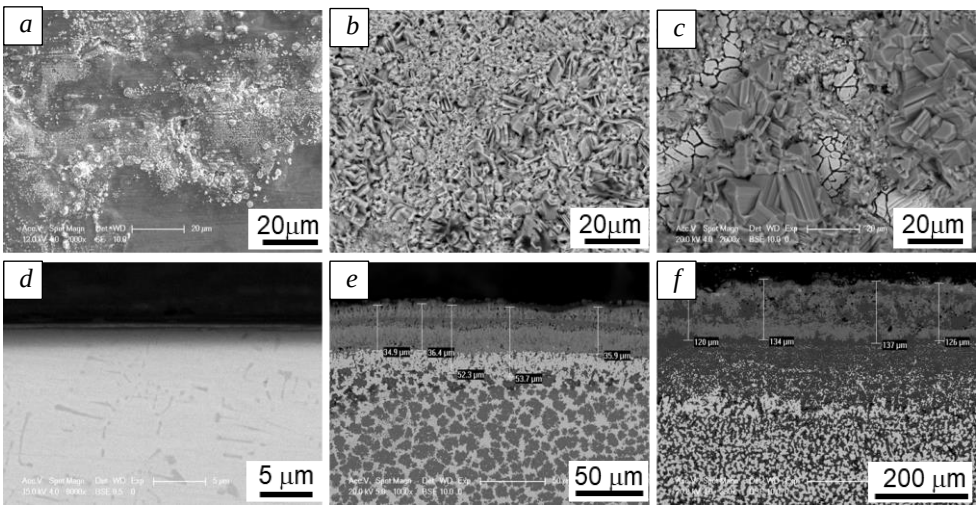


Fig. 2. SEM images of surface (a-c) and cross-sectional (d-f) morphologies NiTi intermetallic after 100 hours oxidations at 500 °C (a, d), 800 °C (b, e), 1000 °C (c, f)

increased with increasing oxidation temperature. The first type of oxide contained 58.35 at.% O, 40.62 at.% Ti and 1.03 at.% Ni, whereas the second contained 30.40 at.% O, 3.30 at.% Ti and 66.29 at.% Ni. The oxide scale thickness at the maximum test temperature of 1000 °C was more than four times greater than that of the scale formed at 800 °C (Fig. 2e–f).

Based on the obtained results, it can be concluded that the addition of refractory metal nitrides into the NiTi-based composite improved its high-temperature oxidation resistance compared with the original intermetallic alloy. Formation of a characteristic oxide scale on the surface may provide a solid-lubricant effect when the composite or a coating based on it is used under friction conditions

Acknowledgement. The work was carried out as part of the project “Development of new MMCs coating based on NiAl, NiTi intermetallic matrix reinforced with high entropy nitrides (Cr, Zr, Nb, V, Al, Ti)N” of the international program “Long-term program to support Ukrainian research teams at the Polish Academy of Sciences, carried out in collaboration with the U.S. National Academy of Sciences with the support of external partners” (Project registration number PAN.BFB.S.BWZ.355.022.2023).

1. V. Kravchuk, G. V. Chyzhyk, O. M. Poliarus, R. V. Kravchuk, Yu. O. Vronska, J. Kasprzycki and G. V. Prykhodko, Methods for studying the mechanical properties of medium- and high-entropy nitrides and intermetallics, *Strength Mater*., 57, 289–303 (2025). https://doi.org/10.1007/s11223-025-00772-7

Вплив ударного навантаження на опір втомі зварних з'єднань за умов зниженої кліматичної температури

В. О. Дегтярев

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

viadeg09@gmail.com

Ключові слова: опір втомі, ударне навантаження, низька температура, зварне з'єднання.

Досвід використання дорожньо - будівельної та транспортної техніки за низької кліматичної температури показав, що кількість відмов зростає, у середньому, в 3-4 рази. При цьому в розрахунках використовуються характеристики циклічної міцності, отримані в умовах плавного навантаження за кімнатної температури, що не завжди відповідає реальним умовам експлуатації. Тому були проведені дослідження для з'ясування причини цього явища. Випробовувались зварні зразки за умов зниженої кліматичної температури при гармонічному та повторному ударному навантаженні на установках ДСО-1 і ДСО-2 [1] при двох значень коефіцієнта асиметрії циклу напруження R = 0 і 0,5. В якості об'єктів досліджень були обрані стикові зварні з'єднання низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД і 12ГН2МФАЮ, які знаходять широке застосування в машинобудівних зварних конструкціях. Для порівняння були випробувані аналогічні зварні зразки низьковуглецевої сталі Ст.3кп. При R = 0 використовувались зразки шириною 80 мм з високими залишковими напруженнями ($\sigma_{зал}$), які створювались шляхом наплавлення валика вздовж зразка посередині його ширини, а при R = 0,5 - зразки шириною 40 мм без них.

В умовах ударного навантаження при -60°С деякі зразки руйнувались крихко. У цьому випадку критерієм руйнування зразка вважали його поділ на дві частини. За результатами випробувань було визначено параметри рівнянь кривих втоми, побудованих у напівлогарифмічних координатах. Значення цих параметрів та границь витривалості (σ_R) випробуваних зварних з'єднань наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1.

Опір втомі стикових зварних з'єднань низьковуглецевої та низьколегованих сталей за умов ударного навантаження при -60°С

№ п. п.	Марка сталі	$\sigma_{зал}$	R	Рівняння кривої втоми	σ_R *МПа*
1	Ст.3кп	нема	0	σ_{yt} = 813 –104,6·lgN	154
2	09Г2С	нема є нема	0 0 0,5	σ_{yt} = 758,3 – 86,4·lgN σ_{yt} = 624 –74,75·lgN σ_{yt}= 973,4 –104,6·lgN	214 153 314
3	10ХСНД	є нема	0 0,5	σ_{yt} = 897 –116,3·lgN σ_{yt} = 1156 –131,2·lgN	165 329
4	12ГН2МФАЮ	є нема	0 0,5	σ_{yt} = 1715 –252,5·lgN σ_{yt} = 1735 –232,5·lgN	124 270

Аналіз отриманих результатів показав, що границя витривалості (на базі $2 \cdot 10^6$

цикл.) зразків в умовах повторного ударного навантаження на 21 – 23% нижче, чим при гармонічному. Слід зауважити, що зниження границі витривалості зразків з прокатною поверхнею і концентратором у вигляді отвору в цих умовах становить всього 6%. Металографічні дослідження показали, що мікропори в зварному шві в умовах ударного навантаження на відміну від гармонічного стають небезпечними концентраторами напружень, які ініціюють зародження тріщини втоми.

Таблиця 2.

Опір втомі стикових зварних з'єднань низьковуглецевої сталі та низьколегованих сталей за умов гармонічного навантаження при -60ºС

№ п. п.	Марка сталі	$\sigma_{зал}$	R	Рівняння кривої втоми	σ_R *МПа*
1	Ст.3кп	нема	0	–	178
1	09Г2С	нема	0,5	$\sigma_t = 1333{,}2 - 149{,}5 \cdot \lg N$	395
3	10ХСНД	нема	0,5	$\sigma_t = 1252{,}7 - 132 \cdot \lg N$	427
4	12ГН2МФАЮ	нема	0,5	$\sigma_t = 1819{,}4 - 234 \cdot \lg N$	345

Оскільки таке зменшення опору втомі зварних з'єднань експериментально встановлено лише в умовах ударного навантаження при низької кліматичної температурі, можна припустити, що саме цей вид випробувань дозволяє більш достовірно оцінити циклічну міцність зварної конструкції за знижених кліматичних температур, ніж загальноприйняті випробування в умовах гармонічного навантаження.

1. В. А. Дегтярев. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла, *Проблемы прочности,* № 10, 110-113 (1982). https://doi.org/10.1007/BF00770146

The effect of shock loading on the fatigue resistance of welded joints under conditions of reduced climatic temperature

V. O. Dehtiarev

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

viadeg09@gmail.com

Fatigue tests conducted on stick welded joints of low-alloy steels under conditions of impact and harmonic loading at low climatic temperatures showed a significant decrease in their fatigue resistance under repeated impact loading.

Keywords: fatigue resistance, impact load, low temperature, welded joint.

Експрес-метод оцінки однорідності алюмінієвого сплаву АМг4

В.П. Швець[а1] , П.О. Булах[а] , О.М. Масло[а] , А.А. Котляренко[а] , А.М. Бабак[б] , О.Є. Гопкало[а]

[а] Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б] НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

[1] volodymyr_shvets@ukr.net

Ключові слова: метод LM-твердості, однорідність матеріалу, коефіцієнт гомогенності, твердість, алюмінієвий сплав.

В роботі за результатами експериментальних досліджень представлено оцінку ступеню однорідності елемента конструкції, виготовленого з алюмінієвого сплаву АМг4.

В якості основної характеристики для оцінки поточного стану матеріалу є коефіцієнт гомогенності m, що розраховується за методом LM-твердості [1, 2]. Метод базується на визначенні параметрів розсіювання значень твердості при багаторазових вимірюваннях у ортогональних напрямках і використовується як експрес-метод оцінки якості металу. В основі методу лежить визначення механічних характеристик матеріалу за результатами вимірювання твердості та їх розсіювання (відмінність) в залежності від напряму вимірювання, яке характерне для всіх матеріалів, а ступінь цього розсіювання суттєво залежить від структурного стану. Як наслідок, про зміну структурного стану матеріалу в заданих умовах роботи можна судити за деяким параметром розсіювання його механічних властивостей. У методі LM-твердості цим параметром є коефіцієнт гомогенності m двопараметричного розподілу Вейбулла, який застосовується для опису розсіювання вимірюваних значень.

Згідно зі стандартом [1] із визначення рівня розсіяних пошкоджень, що базується на методі LM-твердості, значення коефіцієнта m визначали за 30 вимірюваннями. Максимальні значення коефіцієнта гомогенності m характерні для умовно непошкодженого стану металу до початку експлуатації. Точність визначення коефіцієнта гомогенності m складала ±0,05.

Основною метою роботи було визначення з двох сплавів різних поставок матеріалу з вищим рівнем структурної однорідності. Для порівняння характеристик міцності сплавів проведено додатково випробування на розтяг зразків, виготовлених з кожного матеріалу, та виконано металографічні дослідження.

Встановлено, що значення твердості першого зразка досліджуваних сплавів в трьох ортогональних напрямках становлять: 1 - 81,5; 2 – 80,8; 3 – 80,3, а в другого відповідно: 1 - 91,7; 2 – 91,4; 3 – 90,0 і залишається практично на одному рівні у всіх напрямках, тобто по зміні твердості судити про однорідність матеріалу практично неможливо. Водночас значення твердості першого зразка приблизно на 12 % нижче порівняно з другим.

В свою чергу коефіцієнт гомогенності для першого зразка також залишається практично незмінним у всіх досліджуваних напрямках. Отримані досить високі значення коефіцієнта свідчать про високий рівень структурної однорідності матеріалу. Другий зразок має дещо вищу однорідність, а в третьому напрямку сягає 92,8. Виходячи з отриманих результатів можна припустити, що досліджувані матеріали мають відмінні технології виробництва. Другий матеріал при виготовленні піддавався механічному впливу (прокатка, пресування тощо).

Отримані експериментальні дані показують можливість ефективного застосування методу LM-твердості для оцінки однорідності та поточного стану

елементів конструкцій з алюмінієвих сплавів, що зазнають впливу експлуатаційних навантажень та механічної обробки. Також отримані характеристики однорідності можуть бути використані для прогнозування їх залишкового ресурсу. Проведені дослідження показали ефективність використання методу LM-твердості для проведення оцінки поточного стану металу. Метод LM-твердості може бути застосований безпосередньо на елементах конструкцій, що діагностуються та промислового обладнання, при цьому суттєво не змінюючи стан поверхні.

1. ДСТУ 7793:2015. Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом LM-твердості. Метод випробування. Чинний від 01. 04. 2016.
2. В.П. Швець, *Дослідження однорідності структури керамічних матеріалів,* Вісник НТУ «ХПІ» № 52, 2014р. С. 157–162.

Express method for assessing the homogeneity of aluminum alloy AMg4

V. Shvets[a1], P. Bulakh[a], O. Maslo[a], A. Kotliarenko[a], A. Babak[b], O. Gopkalo[a]

[a] G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b] NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

[1] volodymyr_shvets@ukr.net

The paper presents the results of experimental studies of the degree of homogeneity of a structural element made of aluminum alloy AMg4.

The main characteristic for assessing the current state of the material structure is the homogeneity coefficient m, which is calculated by the LM-hardness method. The LM-hardness method can be applied directly to the diagnosed structural elements and industrial equipment, without significantly affecting the surface condition.

Keywords: LM-hardness method, material homogeneity, homogeneity coefficient, hardness, aluminum alloy

Дослідження моделей еквівалентної пластичної деформації до руйнування у співставленні з критеріями міцності

В. М. Михалевич[а1], О. В. Грушко[б], М. А. Колісник[в], А. А. Штуць[в], Ю. В. Добранюк[а], О. І. Тютюнник[а]

[а]Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна
[б]Університет безперервної освіти Кремс, Вінер-Нойштадт, Австрія
[в]Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, Україна

[1]mykhalevych@vntu.edu.ua

Ключові слова: інтенсивність напружень; показник напруженого стану; критерій Писаренка–Лебедєва; критерій Кокрофта–Летема–Оха

У задачах механіки деформівного тіла опис граничних станів матеріалів, що супроводжуються незначними непружними деформаціями або їх відсутністю, традиційно базується на класичних критеріях міцності, сформульованих у просторі напружень. Водночас протягом останніх десятиліть широкого поширення набули моделі руйнування, що використовують залежність граничної пластичної деформації від параметрів напруженого стану. Незважаючи на відмінності у механічній природі процесів, що лежать в основі зазначених підходів, їх співставлення та порівняльний аналіз у подібних системах координат залишаються недостатньо дослідженими.

У праці [1] запропоновано для умов плоского напруженого стану подавати класичні критерії міцності у вигляді залежності інтенсивності напружень σ_i від безрозмірних показників напруженого стану та розроблено методику перетворення відомих залежностей до виду $\sigma_i = f(\eta)$, де η– відношення першого інваріанта тензора напружень до інтенсивності напружень (stress triaxiality).

Особливого значення запропонована форма подання критеріїв міцності набуває з урахуванням того, що моделі граничних пластичних деформацій, які протягом останніх декількох десятиліть набули бурхливого розвитку, при стаціонарному деформуванні за умови плоскої деформації традиційно подаються у формі $\varepsilon_{fs} = \varphi(\eta)$. Проведено порівняльний аналіз аналітичних співвідношень для критерію міцності Писаренка–Лебедєва та деформаційного критерію Кокрофта–Летема–Оха, що належать до найпоширеніших для відповідних умов застосування. На основі методики, що запропонована в [**Error! Reference source not found.**, 2], ці критерії перетворено до вигляду

$$\sigma_i = \frac{\sigma_c}{1-\frac{b}{3}\left\{\eta+2cos\left[\frac{1}{3}arccos\left(\frac{1}{2}\eta(3-\eta^2)\right)\right]\right\}0{,}75^{1-\eta}},\ \eta\in[-2;2],$$

$$\varepsilon_{fs} = \frac{3C}{\eta+2cos\left[\frac{1}{3}arccos\left(\frac{1}{2}\eta(3-\eta^2)\right)\right]},\ \eta\in[-2;2],$$

де σ_c – абсолютне значення граничного напруження одноосьового стиску; b, C - матеріальні сталі. Очевидною є формальна подібність цих співвідношень. Показано, що в останньому з них знаменник тотожно дорівнює нулю для $\eta\in[-2;-1]$. Отже, у зазначеному діапазоні критерій Кокрофта–Летема–Оха втрачає фізичний зміст, тоді як критерій Писаренка–Лебедєва вироджується у сталу величину, що дорівнює σ_c. У діапазоні $\eta\in(-1;2]$ відповідні аналітичні співвідношення

спрощуються та відображають зменшення граничних значень інтенсивності напружень або еквівалентної пластичної деформації зі зростанням показника напруженого стану. Формальне співставлення залежностей $\sigma_i = f(\eta)$ та $\varepsilon_{fs} = \varphi(\eta)$ створює єдину методологічну основу для систематизації, побудови нових і вдосконалення існуючих критеріїв, а також дозволяє виявляти узагальнені закономірності поведінки матеріалів у широкому діапазоні умов деформування. Особливого значення це набуває у зв'язку зі зростаючою роллю сучасних програмних комплексів (Abaqus, LS-DYNA, DEFORM-3D тощо).

Концептуальна відмінність теорії міцності від теорії граничних пластичних деформацій полягає у залежності останніх від історії зміни показника напруженого стану в процесі деформування. Це зумовило необхідність порівняльного аналізу найпоширеніших моделей з позицій теорії підсумовування пошкоджень. У роботі розглянуто моделі, запропоновані Райсом–Трейсі, Макклінтоком, Вержбіцьким, Делем та ін., актуальність яких підтверджується їх активним використанням у сучасних дослідженнях.

1. A.A. Lebedev, V.M. Mikhalevich, On the choice of stress invariants in solving problems of mechanics, Strength Mater, **35**, 217–224 (2003). https://doi.org/10.1023/A:1024605520187
2. V. Mykhalevych, Y. Dobraniuk, V. Matviichuk et al., A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary*,13(1), 64–70 (2023).http://doi.org/10.35784/iapgos.3496

Study of Models of Equivalent Plastic Strain to Fracture in Comparison with Strength Criteria

V. Mykhalevych[a1], O. Hrushko[b], M. Kolisnyk[c], A. Shtuts[c], Y. Dobraniuk[a], O. Tiutiunnyk[a]

[a]Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine,

[b]University for Continuing Education Krems, Department for Integrated Sensor Systems, Wiener Neustadt, Austria,

[c]Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

[1]mykhalevych@vntu.edu.ua

The paper presents a comparative analysis of strength criteria and models of limiting plastic strain. For the case of plane stress, the strength criteria are transformed into analytical relationships between stress intensity and a dimensionless stress-state parameter. Using the Pisarenko–Lebedev and Cockcroft–Latham–Oh criteria as examples, the formal similarity between the analytical expressions of strength theory and the theory of limiting plastic strains is demonstrated. The possibility of identifying generalized regularities in material behaviour over a wide range of deformation conditions is shown.

Keywords: elastic-plastic model, strain gradient, Drucker's postulate, boundary value problem, variational formulation.(Times New Roman, 9 pt)

Вплив швидкості деформації на пробиття перешкоди із сталі Swebor 450

А. В. Широков

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

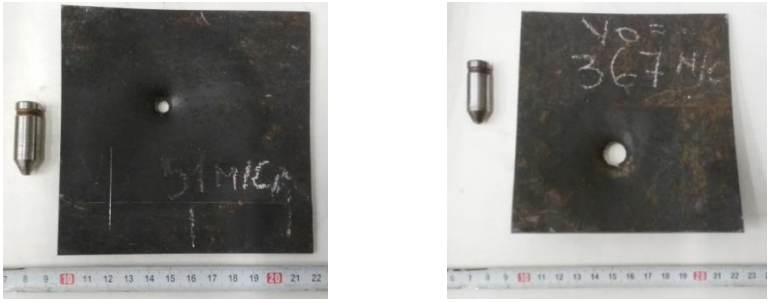
shirokov.andrey.v@gmail.com

Ключові слова: чисельне моделювання, швидкість деформації, пробиття перешкоди, LS-Dyna.

Числові методи при розрахунках швидкоплинних процесів на сьогоднішній день є важливим і досить ефективним інструментом, наприклад при моделюванні процесів, що протікають в екстремальних умовах навантаження, наприклад, при дослідженні вибухового навантаження конструкцій [1], або проникненні ударників [2]. В той же час, на даний момент, числове моделювання, не може замінити традиційних експериментальних методів дослідження, тому продовжується аналіз впливу різних параметрів моделей матеріалів на достовірність розрахунків.

Для оцінки впливу швидкості деформації проводили експериментальне і чисельне дослідження ударної взаємодії циліндричного ударника з конічною формою головної частини і перешкоди із сталі Swebor 450 товщиною 3 мм.

На рисунку 1 наведено фотографії результатів ударної взаємодії елементів ураження з перешкодою.



а) б)

Рис. 1. Результати взаємодії ударника з перешкодою із сталі Swebor 450 зі швидкістю 51 м/с (а) і 367 м/с (б).

Чисельне моделювання проводили в двомірній вісесиметричній постановці. Для моделювання перешкоди використовували спрощене рівняння Джонсона-Кука, яке не враховує вплив температури. Параметри, що були розраховані зі статичних і динамічних даних сталі Swebor 450 наведені у таблиці нижче.

Таблиця 1.

Параметри сталі Swebor 450 для спрощеного рівняння Джонсона-Кука

Матеріал	A, МПа	B, МПа	n	C
Swebor 450	1200	1538	0,377	0,1929

Враховуючи, що ударник практично не деформувався його моделювали за допомогою недеформованого матеріалу Rigid [3].

Критерієм оцінки достовірності виступала заперешкодна швидкість ударника. Так при початковій швидкості 51м/с ударник не пробиває перешкоду, а при 367м/с заперешкодна швидкість в експерименті склала 290,2м/с.

Розрахунок проводили для двох варіантів параметрів перешкоди. В першому використовували тільки статичні коефіцієнти моделі Джонсона-Кука (*A*, *B*, *n*), а в другому враховували вплив швидкості деформації і додавали коефіцієнт *C* (таблиця 1). Результати звели в таблицю 2. Для випадку не пробою при початковій швидкості ударника 51 м/с констатували тільки якісний результат: пробій – не пробій.

Таблиця 2.

Оцінка впливу врахування швидкості деформації

Початкова швидкість ударника, м/с	Заперешкодна швидкість ударника, м/с			Відносна похибка, %	
	Експеримент	Статичні коефіцієнти	Всі параметри	Статичні коефіцієнти	Всі параметри
51	0 (не пробій)	5,1	0 (не пробій)	Не віно	Вірно
367	290,2	365,3	298,9	25,9	3,0

Аналіз результатів показує, що врахування швидкості деформації підвищує рівень достовірності чисельного моделювання і зі збільшенням швидкості ударника розбіжність між даними, отриманими за статичними параметрами, і з врахуванням швидкості деформації зростає.

1. A. Showichen, *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions: PhD thesis*, Cranfield university, (2008).
2. M.A. Iqbal, A. Diwakar, A. Rajput, N.K. Gupta, Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **62**, 40–53 (2012). http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.01.005
3. LS-DYNA Theory manual./ March 2006.

The effect of strain rate on the penetration of a barrier made of Swebor 450 steel

A.V. Shyrokov

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] shirokov.andrey.v@gmail.com

An experimental and numerical study was carried out on the penetration of a single-layer homogeneous barrier made of Swebor 450 steel by a cylindrical impactor with a conical head. It was shown that taking into account the strain rate increases the reliability of numerical modeling, and as the velocity of the impactor increases, the discrepancy between the data obtained using static parameters and those obtained by taking the strain rate into account grows.

Keywords: numerical simulation, strain rate, penetration, LS-Dyna.

Особливості оцінки пробивної здатності елементів ураження з масою 1 .. 5г

А. В. Широков[1], О. М. Березовський

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] shirokov.andrey.v@gmail.com

Ключові слова: експериментальна оцінка пробивної здатності, елементи ураження, балістичний маятник.

При проєктуванні захисних елементів конструкцій від дії різних елементів ураження потрібно знати пробивну здатність останніх. Для цього проводяться відповідні експериментальні дослідження. Найпростіші і найбільш обмежені це полігонні випробовування в яких елементами ураження зазвичай виступають кулі різних калібрів. Метання інших предметів (кулька, паралелепіпед, складна геометрія) стикається із значними складнощами, а то й зовсім неможливе.

Подібних недоліків позбавлений випробувальний стенд ПК80, який дозволяє досліджувати поведінку елементів ураження довільної форми з діаметром до 15 мм і масою до 40 г в діапазоні швидкостей навантаження до 800 м/с. Він оснащений балістичним маятником, що дає можливість окрім інформації пробиття/не пробиття визначати енергію, що була затрачена на руйнування/деформацію перешкоди і розрахувати заперешкодну швидкість ударника. В такий спосіб отримується більше інформації щодо особливостей його поведінки при пробитті перешкоди і, відповідно, можна більш повно оцінити пробивну здатність конкретного ударника.

Загальна схема випробувального стенду ПК80 представлена на рисунку 1.

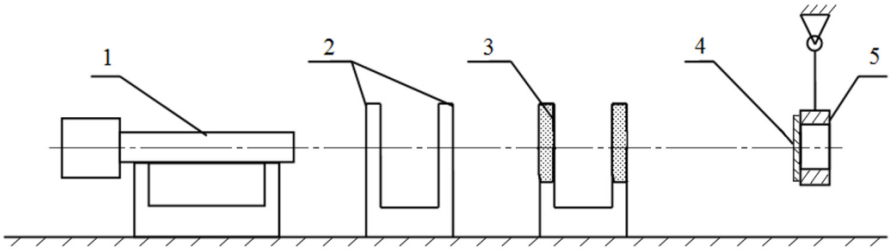


Рис. 1. Схема випробувального стенду ПК80 де: 1 – пневмо-газовий копер; 2 – відсікач газів; 3 – датчик швидкості; 4 – перешкода; і 5 – балістичний маятник.

Елемент ураження довільної форми з діаметром до 15 мм і масою до 40 г, що закріплений в пластиковому піддоні, розганяється в трубі пневмо-газового копра 1 до необхідної швидкості в діапазоні 50 – 1000м/с, яка фіксується датчиком швидкості 3 і взаємодіє з перешкодою 4, яку закріплено на балістичному маятнику 5.

Суть методу полягає в тому, що при випробовуванні перешкода пробивається ударником наскрізь (плита маятника на якій кріпиться перешкода має спеціальний центральний отвір для вільного прольоту ударника і уламків перешкоди після пробиття перешкоди), у результаті чого маятникові передається ударний імпульс, який відхиляє його від положення рівноваги, що фіксується самописцем [1, 2]. За

величиною відхилення маятника можна розрахувати енергетичні втрати, що обумовлені деформуванням і руйнуванням перешкоди. Такий розрахунок базується на рівнянні балансу енергії.

Відзначимо, що в базовому варіанті діаметр розгінної труби складає 15 мм а маса балістичного маятника – 20,5 кг. Це дозволяє з гарною точністю проводити оцінку пробивної здатності елементів ураження з масами більше 15 г. Ударники з меншими масами порядку 1 .. 5 г мають діаметр до 9 мм, що призводить до збільшення впливу пластикового піддона на результати через його масу, яка в деяких випадках дорівнює масі елемента ураження. Окрім того, такі ударники викликають незначні відхилення маятника, що вносить значну похибку у визначення енергії, що була затрачена на руйнування/деформацію перешкоди.

Через це було проведено модернізацію випробувального стенду яка включала: розробку та виготовлення додаткової системи кріплення для розгінної труби з внутрішнім діаметром 9мм і балістичного маятника з вагою 1,3 кг. Дані заходи дозволили зменшити вагу пластикового піддона з 2 .. 5 г до 0,5 .. 1,8 г і збільшити відхилення балістичного маятника в 4 .. 8 разів. Це значно підвищило точність визначення енергії, що була затрачена на руйнування/деформацію перешкоди, а також заперешкодної швидкості ударника.

1.В. В. Астанин, Г. В. Степанов, Энергетические характеристики разрушения алюминиевой плиты при пробивании стальным ударником, *Проблемы прочности*, № 10, 93–95 (1983).

2. В. В. Астанин, *Деформирование и разрушение преград при пробивании цилиндрическим ударником*, Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов, 23–27 (1986).

Specifics of estimating the penetrating capability of projectiles weighing 1–5 g

A.V. Shyrokov[1], O.M. Berezovskiy

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] shirokov.andrey.v@gmail.com

We describe a test stand and methodology for the experimental evaluation of the penetration capability of freely shaped projectiles. The essence of the method lies in the use of a ballistic pendulum to determine the energy expended by the projectile to destroy/deform the barrier and to calculate the projectile's velocity through the barrier. In this way, more information is obtained regarding the characteristics of its behavior when penetrating the barrier, and, accordingly, the penetration capability of a specific projectile can be more fully assessed.

Keywords: experimental estimation of penetration capability, projectiles, ballistic pendulum.

Новий параметр непропорційності на основі критичних площин деформацій

Є. В. Савчук[1], С. М. Шукаєв

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна
[1] saweug@gmail.com

Ключові слова: непропорційне навантаження, критична площина, параметр непропорційності, малоциклова втома.

Оцінка довговічності конструкційних елементів за умов багатовісного непропорційного навантаження є однією з ключових задач механіки твердого деформівного тіла. Непропорційне навантаження характеризується зміною напрямку головних деформацій протягом циклу, що призводить до активації додаткових систем ковзання, зміцнення матеріалу та скорочення довговічності. Ступінь непропорційності траєкторії навантаження характеризується параметром непропорційності $f_{NP} \in [0, 1]$, значення якого дорівнює нулю за пропорційного навантаження та одиниці за колової траєкторії (в просторі Губера-Мізеса).

Одне з перших визначень параметра непропорційності було запропоновано в роботі Каназави та ін. [1]. Параметр визначався як коефіцієнт обертання — відношення розмаху зсувних деформацій на площині під кутом 45° до площини максимального зсуву та максимального розмаху зсувних деформацій. Цей підхід мав зрозумілу механічну інтерпретацію, однак був обмежений простими траєкторіями. Пізніше іншими авторами були запропоновані альтернативні підходи [2, 3], які розширили можливості застосування, але втратили прямий зв'язок з параметрами деформацій на критичних площинах.

В роботі Каназави та ін. [1] також було показано, що максимальне падіння довговічності за непропорційного навантаження залежить від відношення розмахів деформацій $\lambda_\varepsilon = \Delta\gamma/\Delta\varepsilon$. За критичного значення $\lambda_\varepsilon = 1 + \nu_{eff}$ (зокрема $\lambda_\varepsilon \approx 1{,}5$ при $\nu_{eff} = 0{,}5$) всі площини мають однаковий рівень амплітуд зсувних деформацій, що супроводжується різким збільшенням лінійних деформацій на площині максимального зсуву (Рис. 1). Важливість параметрів критичних площин було продемонстровано в роботах [4].

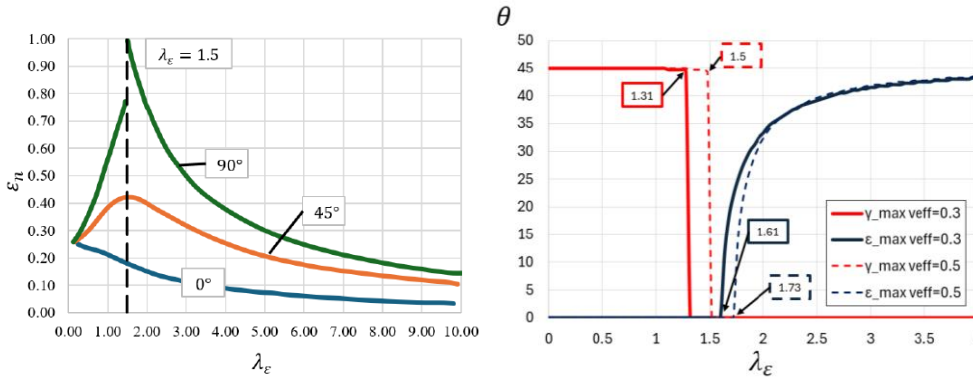
Розвиваючи ідею Каназави про зв'язок деформацій на суміжних площинах, запропоновано новий параметр непропорційності, який визначається як відношення розмахів зсувних деформацій на двох критичних площинах:

$$f_{NP,\gamma} = \Delta\gamma_{\varepsilon-max} \,/\, \Delta\gamma_{\gamma-max},$$

де $\Delta\gamma_{\varepsilon-max}$ — розмах зсувних деформацій на площині максимальної лінійної деформації, $\Delta\gamma_{\gamma-max}$ — розмах зсувних деформацій на площині максимального зсуву. За пропорційного навантаження зсувні деформації на площині максимального розтягу відсутні ($\Delta\gamma_{\varepsilon-max} = 0$), відповідно $f_{NP,\gamma} = 0$. За збігу критичних площин $\Delta\gamma_{\varepsilon-max} \approx \Delta\gamma_{\gamma-max}$ і $f_{NP,\gamma} \to 1$.

Порівняння запропонованого параметра з існуючими визначеннями показало, що для інтегральних параметрів $f_{NP} = 1$ досягається лише при $\lambda_\varepsilon = 1{,}73$ (колова траєкторія у координатах Губера-Мізеса). Натомість $f_{NP,\gamma} = 1$ у діапазоні $1{,}3 \le \lambda_\varepsilon \le$

1,73, що відповідає області збігу критичних площин (Рис.2). Існує характерний діапазон $\lambda_\varepsilon \in (1{,}5–1{,}6)$, в якому ефект непропорційності проявляється максимально за будь-якого рівня пластичних деформацій ($\nu_{eff} \in 0{,}3 - 0{,}5$).



а *б*

Рис. 1. Вплив відношення деформацій λ_ε на критичні площини: а — лінійні деформації на площині максимального зсуву при $\Delta\gamma = 3\%$ [1]; б — кути критичних площин залежно від λ_ε та ν_{eff}

Таким чином, запропонований параметр $f_{NP,\gamma}$ враховує рівень пластичних деформацій через залежність від ν_{eff}, не потребує інтегрування вздовж траєкторії і визначається виключно з параметрів критичних площин.

1. Kanazawa, K., Miller, K.J., Brown, M.W.: Low-Cycle Fatigue Under Out-of-Phase Loading Conditions. J. Eng. Mater. Technol. 99, 222–228 (1977). https://doi.org/10.1115/1.3443523

2. Itoh, T., Sakane, M., Ohnami, M., Socie, D.F.: Nonproportional Low Cycle Fatigue Criterion for Type 304 Stainless Steel. J. Eng. Mater. Technol. 117, 285–292 (1995). https://doi.org/10.1115/1.2804541

3. Borodii, M.V.: An engineering method for determining nonproportionality parameter under biaxial fatigue loading. Proc. ASME PVP Conference (1996).

4. Savchuk, Y., Yakovchuk, P., Shukayev, S.: Input Parameter Analysis for Low-Cycle Multiaxial Fatigue Models Using Artificial Neural Network. Sci. Books Abstr. 12, 56–59 (2025). https://doi.org/10.4028/b-Ecdg3c

A New Non-Proportionality Parameter Based on Critical Planes of Strain

Y. Savchuk[a1], S. Shukayev[a]

[a]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

[1] saweug@gmail.com

This study proposes a new non-proportionality parameter f_{NP},γ for multiaxial low-cycle fatigue, defined as the ratio of the shear strain range on the critical plane of maximum normal strain to that on the critical plane of maximum shear strain. Analytical investigation reveals that the orientation of critical planes depends on the strain ratio λ_ε and the effective Poisson's ratio ν_{eff}. A characteristic range of λ_ε is identified where both critical planes coincide ($\Delta\theta \approx 0°$), corresponding to $f_{NP},\gamma = 1$. The proposed parameter inherently accounts for the level of plastic deformation through ν_{eff}, providing a physically grounded and computationally simple measure of non-proportionality for fatigue life prediction.

Keywords: non-proportional loading, critical plane, non-proportionality parameter, low-cycle fatigue, multiaxial loading.

Сучасний стан та перспективи технологічного забезпечення якості FDM-деталей шляхом механічної обробки

Р.В. Сіньковський[1], В.П. Ткачук

[a] Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

[1] rsinkovskyi@khmnu.edu.ua

Визначено ключові фактори, що обмежують використання FDM-деталей у прецизійних вузлах машин, зокрема «сходинковий ефект» та анізотропію властивостей. Обґрунтовано переваги гібридного виробництва. Виявлено, що лезова обробка (фрезерування) дозволяє досягти шорсткості Ra < 1.6 мкм та точності IT7-IT9. Встановлено необхідність врахування взаємозв'язку параметрів друку (інфіл, орієнтація шарів) із параметрами механічного оброблення для забезпечення заданих трибологічних характеристик поверхні. Отримані результати є теоретичним підґрунтям для розробки автоматизованих технологічних процесів виготовлення функціональних деталей машин з використанням комбінованих АТ та ЧПК-технологій.

Ключові слова: FDM-друк, PETG, механічне постоброблення, шорсткість поверхні, гібридне виробництво, ЧПК-фрезерування, анізотропія властивостей, полімерні матеріали.

Вступ та актуальність теми. Впровадження концепції Industry 4.0 висуває жорсткі вимоги до оперативності та гнучкості виробництва, що робить адитивні технології (АТ) незамінним інструментом. Технологія FDM (Fused Deposition Modeling) є лідером за поширеністю завдяки використанню широкого спектра інженерних термопластів, таких як PETG, ABS та Carbon-filled Nylon [1]. Проте бар'єром для їх використання у функціональних вузлах залишається «сира» якість поверхні. Невідповідність шорсткості (Ra 12.5-50 мкм) та точності (IT12 і вище) вимогам прецизійного машинобудування зумовлює перехід до стратегії «Гібридного виробництва» - поєднання адитивного формування з наступною прецизійною субтрактивною обробкою на верстатах з ЧПК [2,3].

Дана робота спрямована на систематизацію знань про вплив параметрів механічної обробки та структурних особливостей FDM-деталей на вихідні показники якості. Особлива увага приділяється виявленню кореляцій між орієнтацією шарів та стратегіями фрезерування, що є критичним для розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації режимів різання.

Виклад основної проблеми. Процес різання FDM-деталей кардинально відрізняється від обробки монолітних полімерів через внутрішню мікрогеометрію заготовки [4]. Опір матеріалу різанню постійно змінюється залежно від траєкторії інструменту відносно напрямку укладання ниток. Найкращі показники якості досягаються, коли вектор подачі перпендикулярний до напрямку шарів, що мінімізує ризик їх відшарування [5].

Низька теплопровідність PETG та інших полімерів призводить до того, що майже вся енергія різання перетворюється на тепло, яке концентрується в зоні контакту. Це викликає локальний перегрів, що перевищує температуру склування (Tg), призводячи до «намазування» пластику на різальну кромку та утворення ворсистості.

Щільність заповнення (infill) та товщина стінок визначають жорсткість заготовки. Низький відсоток заповнення провокує мікровібрації під час фрезерування, що негативно впливає на стабільність розмірів [6].

До методів фінішного оброблення необхідно відести:

1. Хімічні методи - використання розчинників (ацетонова лазня, пари етилацетату) дозволяє отримати дзеркальну поверхню. Однак цей процес є некерованим: відбувається деградація механічних властивостей поверхневого шару та «завалювання» гострих кромок і отворів [1,3].
2. Абразивні методи – це шліфування та віброгалтування, які ефективні для видалення підтримки, але не здатні виправити похибки геометричної форми, отримані під час друку [3].
3. Лезова обробка на ЧПК (фрезерування, точіння) - це найбільш прогресивний метод. Завдяки високій точності позиціонування інструменту вдається досягти параметрів Ra < 1.6 мкм та точності IT7-IT9, що дозволяє інтегрувати пластикові деталі в складні механічні збірки [2,5].

Для успішного впровадження гібридної технології необхідно використовувати фрези з полірованими передніми поверхнями та гострими кромками (радіус округлення $\rho \leq 5$ мкм). Це зменшує силу тертя та запобігає термічній дестукції.

Припуск має бути більшим за глибину міжшарових порожнин. Оптимальним є значення 0.4-0.8 мм, що дозволяє інструменту працювати в суцільному тілі матеріалу, уникаючи переривчастого різання по «сходинках».

Рекомендується застосування високих швидкостей різання (v) при мінімальних подачах на зуб (s_z), що забезпечує «холодне» різання та високу якість мікрорельєфу [5].

Висновки та напрями подальших досліджень.

Аналіз показує, що для PETG-пластику критичним є баланс між швидкістю друку та режимами постобробки. Наукова новизна подальшої роботи полягатиме у встановленні математичних залежностей між параметрами укладання шарів та вихідною шорсткістю після фрезерування. Це дозволить створити цифрову модель прогнозування якості, що є необхідною умовою для подальших досліджень.

1. Hashmi, A. W., et al. (2022). A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts. Rapid Prototyping Journal, 28(1), 1-25. DOI:10.1108/RPJ-06-2021-0133.
2. Esquivel, A., et al. (2025). Machinability of Sintered Metallic and Polymer Materials in Additive Manufacturing. Applied Sciences, 15(23), 12455. DOI: 10.3390/app152312455.
3. Lopes, A. C., et al. (2023). Post-processing of FDM parts: A review of state-of-the-art and future trends. Journal of Manufacturing Processes, 92, 154-178. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.02.050 .
4. Cekic, A., et al. (2024). Surface Quality Related to Face Milling Parameters in 3D Printed Carbon Fiber-Reinforced PETG. Polymers, 16(5), 621. DOI: 10.3390/polym16050621.
5. Kushnirchuk, A. S., & Tkachuk, V. P. (2025). Technological assurance of the quality of machine parts obtained from plastics by 3D printing. Dissertation PhD, Khmelnytskyi National University. (Аналіз сил різання та стратегій фрезерування).

6. Moshiri, M., et al. (2024). Optimising surface roughness and dimensional accuracy of FDM PETG parts. International Journal of Interactive Design and Manufacturing. DOI: 10.1007/s12008-024-01755-9.

Current State and Perspectives of Technological Quality Assurance of FDM Parts through Mechanical Processing

R.V. Sinkovskyi[a1], V.P. Tkachuk [b] (Times New Roman, Bold, 10 pt)

[a]Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine.
[b] Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine.

[1] rsinkovskyi@khmnu.edu.ua

Key factors limiting the use of FDM parts in precision machine units, specifically the "staircase effect" and anisotropy of properties, have been identified. The advantages of hybrid manufacturing are justified. It was found that blade machining (milling) allows achieving a surface roughness of Ra < 1.6 μm and an accuracy class of IT7-IT9. The necessity of considering the relationship between printing parameters (infill, layer orientation) and mechanical processing parameters to ensure specified tribological surface characteristics has been established. The results obtained serve as a theoretical basis for developing automated technological processes for manufacturing functional machine parts using combined AM and CNC technologies.

Keywords: FDM printing, PETG, mechanical post-processing, surface roughness, hybrid manufacturing, CNC milling, anisotropy of properties, polymer materials.

Дослідження впливу ударної хвилі на напружено-деформований стан скління у тривимірній постановці

П. П. Гонтаровський, С. В. Угрімов, Н. В. Сметанкіна, Н. Г. Гармаш[1], І. І. Мележик, Т. В. Протасова

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, Україна

[1] garm.nataly@gmail.com

Ключові слова: скління, ударна хвиля, метод скінченних елементів, пружно-пластична модель, імпульсне навантаження.

Забезпечення ефективного функціонування і надійної, безпечної й тривалої експлуатації наземної спеціальної техніки різних типів, літальних апаратів та цивільних споруд є важливим і актуальним завданням [1]. Збереження міцності, захисних характеристик і прозорості скління у таких об'єктах у широкому діапазоні різних силових навантажень – ключова складова цієї проблеми [2, 3]. Одним із видів аварійних навантажень на скляні елементи конструкцій є повітряно-ударні хвилі, що виникають у результаті вибухів різного походження. Їх вплив, насамперед, визначається різкою зміною тиску на поверхні скління. Швидкий викид енергії під час вибуху приводить до різкого збільшення тиску з наступним його поступовим зменшенням до звичайних значень [4]. Дослідження дії повітряно-ударної хвилі на елементи скління важливе для забезпечення міцності конструкцій.

Створено програмне забезпечення для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій у тривимірній постановці методом скінченних елементів при дії імпульсних та ударних навантажень з урахуванням пластичних деформацій та неоднорідності матеріалу, яке дозволяє проводити аналіз поведінки конструкцій, оцінювати їх міцність і довговічність при робочих навантаженнях та посилених впливах у випадках різних нештатних ситуацій [5].

За допомогою розробленого програмного забезпечення проведено моделювання дії повітряної ударної хвилі від підриву тротилового заряду масою m на скло, розташоване на відстані l від місця вибуху і закріплене по краям. Виконано розрахункові дослідження для різних варіантів скла і маси заряду.

Розглянуто дію ударної хвилі по нормалі на скло розмірами 0,4×50×80 см і 1×100×160 см від вибуху заряду масою 10 кг на відстані 20 м та 200 кг і 500 кг на відстані 50 м від скла. Установлено, що руйнування скла буде мати місце в усіх розглянутих випадках.

Для скла розміром 0,4×50×80 см при масі заряду 10 кг руйнування відбудеться на поверхні, протилежній дії ударної хвилі, при масі заряду 200 кг скло руйнується на поверхні дії ударної хвилі. Для скла розміром 1×100×160 см руйнування відбувається на поверхні, протилежній дії ударної хвилі, на 5-6 мс її впливу.

Визначено залежність характеру руйнування скляних конструкцій від параметрів впливу повітряно-ударної хвилі. Одержані результати дозволять проводити аналіз поведінки конструкцій з урахуванням реальних експлуатаційних факторів та оцінювати їх міцність і довговічність при посилених впливах у випадках різних нештатних і аварійних ситуацій. Практичне значення отриманих результатів полягає у

можливості прогнозування ступеня пошкодження скляних елементів при різних сценаріях вибухового навантаження, що дозволяє розробляти рекомендації для проєктування захисних споруд та оцінки ризиків у цивільних і промислових об'єктах.

1. P. P. Hontarovsky, N. V. Smetankina, , S. V. Ugrimov, N. H. Harmash, I. I. Melezhyk, Simulation of the Crack Resistance of Ion-Exchange Strengthened Silicate Glass Subject to Bending Strain, *International Applied Mechanics.* **58** (6), 715–724 (2022). https://doi.org/10.1007/s10778-023-01195-0
2. Y. M. Rodichev, N. V. Smetankina, O. M. Shupikov, S. V. Ugrimov, Stress-strain Assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load, *Strength of Materials*, **50**, iss. 6, 868 – 873 (2018). https://doi.org/10.1007/s11223-019-00033-4
3. P. P. Hontarovsky, N. V. Smetankina, S. V. Ugrimov, N. G. Garmash, I. I. Melezhyk Numerical investigations of the crack resistance of ion-strengthened sheet glass under bending strains, *Journal of Mechanical Engineering*, 24, no 3, 27–34 (2021). https://doi.org/10.15407/pmach2021.03.027
4. Н. В. Сметанкіна, С. В. Угрімов, Математичне моделювання відгуку багатошарового скла на вибухове навантаження з урахуванням фази розрідження, *Вісник Херсонського національного технічного університету,* № 3(1), 164−170 (2018).
5. P. Gontarovskyi, N. Garmash, I. Melezhyk, Numerical modeling of dynamic processes of elastic-plastic deformation of axisymmetric, *Advances in Mechanical and Power Engineering, CAMPE 2021*, Springer, Cham, 334-342 (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_34

Investigation of the impact of a shock wave on the stress-strain state of glazing in a three-dimensional model

P. Hontarovsky, S. Ugrimov, N. Smetankina, N. Garmash[1], I. Melezhyk, T. Protasova

Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

[1] garm.nataly@gmail.com

Using software developed to solve dynamic three-dimensional problems in plasticity theory, a simulation was carried out of the effect of an air shock wave generated by the detonation of a TNT charge on glazing. Computational studies were performed for various types of glass and charge masses. The dependence of the nature of the destruction of glass structures on the parameters of the air shock wave's impact has been determined. The results obtained will enable the analysis of structural behaviour taking into account real operational factors and the assessment of their strength and durability under severe impacts in various abnormal and emergency situations. The practical significance of the results lies in the ability to predict the extent of damage to glass elements under various explosive load scenarios, which enables the development of recommendations for the design of protective structures and risk assessment in civil and industrial facilities.

Keywords: glazing, shock wave, finite element method, elastic-plastic model, impulse load.

Оцінка квазістатичної складової пошкодження високотемпературної області ротора під час зупинки турбіни

В.А. Пешко[1], А.П. Бовсуновський

[a]Інститут атомної та теплової енергетики, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

[1] vapeshko@gmail.com

Ключові слова: парова турбіна, зупинка, нестаціонарний процес, тепловий стан, напружений стан, параметр Ларсона-Міллера, циклічне пошкодження, квазістатичне пошкодження.

Згідно до нормативних документів України [1] оцінка залишкового ресурсу високотемпературних елементів парових турбін виконується за темпом накопичення статичної та циклічної складових пошкодження. Зокрема циклічне пошкодження встановлюється на основі допустимого числа циклів для певного характеру навантаження, яке в свою чергу визначається величиною амплітуди інтенсивності деформації [2]. В той же час для деяких нестаціонарних режимів роботи турбіни, таких як зупинка, характерна робота при достатньо високих температурах та напруженнях що є характерними факторами для процесу повзучості. В даній роботі пропонується підхід до визначення квазістатичної складової пошкодження при циклічних навантаженнях, характерних для нестаціонарних процесів експлуатації.

Об’єктом дослідження пропонується ротор середнього тиску турбіни К-200-130 в області галтелі 13-го ступеня з боку наступних ступенів, в якій найбільш часто діагностуються значні кільцеві тріщини при експлуатації. Нестаціонарний процес що досліджується – зупинка зі зривом вакууму, під час якої ротор зазнає стрімкого охолодження та значних термічних напружень.

Використовуючи метод скінченних елементів, було вирішено задачу нестаціонарної теплопровідності в металі ротора та отримано епюри розподілу термічних напружень під час зупинки. Зокрема на рис. 1 представлено динаміку зміни температури та інтенсивності напружень по Мізесу в найбільш навантаженій області ротора.

Отримані значення температури та інтенсивності напружень були осереднені з кроком в 100 секунд використовуючи інтеграл Робінсона [3]. Для відповідних середніх значень інтенсивності напружень було визначено параметр Ларсона-Міллера [4] та допустимий час роботи металу $[t_{p,j}]$ для режиму навантаження що характерний в даний період часу. Для кожного з часових відрізків розраховано відносне пошкодження та побудовано криву накопичення пошкодження в роторі середнього тиску за перші 6000 секунд зупинки зі зривом вакууму турбіни К-200-130 (рис. 2).

Найбільш стрімке накопичення пошкодження спостерігається протягом періоду часу 700-3000 с коли наявні високі температури (508-480 °С) та інтенсивності напружень (120-190 МПа). Накопичене протягом зупинки квазістатичне пошкодження металу складе 0,0009 %. Враховуючи циклічну складову пошкодження від дії амплітуди деформацій [1] сумарне пошкодження металу за 1 цикл зупинки складе 0,0021 %.

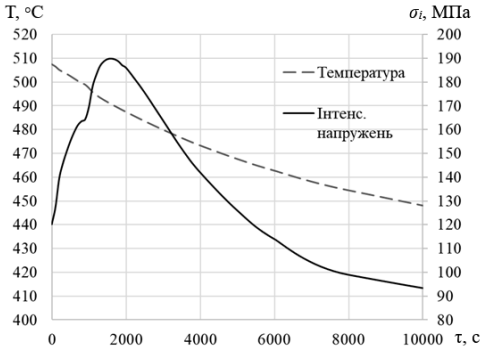


Рис. 1. Динаміка зміни температури та напружень в роторі під час зупинки

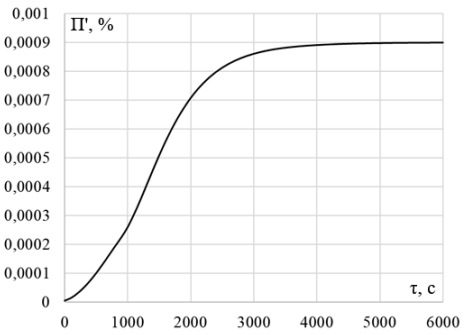


Рис. 2. Крива накопичення квазістатичного пошкодження в роторі під час зупинки

За 2000 циклів зупинки, пошкодження в основному металі ротора спричинене лише термічними напруженнями під час зупинки становить 4,2 %, що з врахуванням інших механізмів пошкодження здатне суттєво обмежити індивідуальний ресурс.

1. М. Г. Шульженко, *Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбіни: СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-52:2011*, Міністерство палива та енергетики України, Київ: ГРІФРЕ (2011).
2. H. Gharehbaghi, M. Aghaei, Investigation of creep-fatigue interaction in steam turbine rotor, Forces in Mechanics, **19**, 100314 (2025).
3. E. L. Robinson, Effect of Temperature Variation on the Long-Time Rupture Strength of Steels, *Transactions of the ASME*, **74**(5), 777–780 (1952).
4. F. R. Larson, J. Miller, A time-temperature relationship for rupture and creep stresses, *Transactions of the ASME*, **74**(5), 765–771 (1952).

Estimation of the quasi-static component of damage to the high-temperature region of the rotor during turbine shutdown

V. Peshko[a1], A. Bovsunovsky[a]

[a]Institute of Atomic and Thermal Energy, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

[1] vapeshko@gmail.com

An approach for determining the quasi-static component of damage under cyclic loads is presented using the example of a fillet of the 13th stage of the intermediate-pressure rotor of the K-200-130 turbine during a shutdown with a vacuum breakdown. The dynamics of temperature and intensity changes in the studied area are calculated using the finite element method. The permissible operating time of the metal for certain time intervals is determined using the Robinson integral and the Larson-Miller parameter. The total damage to the metal for 2000 shutdown cycles from the action of thermal stresses alone is 4.2%. Taking into account other damage mechanisms, the obtained value of the quasi-static component significantly reduces the residual resource of the turbine.

Keywords: steam turbine, shutdown, unsteady process, thermal state, stress state, Larson-Miller parameter, cyclic damage, quasi-static damage.

Оцінка міцності на розтяг склопластиків із шаруватою структурою

О. В. Дроздов[1], Ю. М. Волков, А. В. Богомолов

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] drozdov@ipp.kiev.ua

Ключові слова: склопластик, міцність, основа, уток, анізотропія

Склопластики є одними з найбільш поширених полімерних композиційних матеріалів, які з успіхом використовуються в електронній, авіаційній, ракетно-космічній техніці завдяки їх високій питомій міцності, хімічної стійкості, добрим електрофізичним властивостям. Об'єктом дослідження були дві окремі поставки листового склопластику марки СТЕФ-1 завтовшки 2,0 мм і 3,0 мм, які умовно позначені СТЕФ-1/2 і СТЕФ-1/3 відповідно. Структура обох матеріалів представлена окремими шарами склотканини полотняного плетіння з'єднаних разом прошарками епоксидної і фенолформальдегідної смоли. Перший матеріал СТЕФ-1/2 був повністю незбалансованим і всі 5 шарів склотканини викладені в одному напрямку, а другий матеріал СТЕФ-1/3 був частково збалансованим шари 1,3,5,7 викладені в одному напрямку, а 2,4,6 в іншому. Границю міцності і модуль пружності склопластиків в напрямках основи: σ_1; E_1 і утка: σ_2: E_2 визначали при розтягу звичайних зразків. Для частково збалансованого склопластику напрям вибирали по орієнтації поверхневих шарів 1 і 7. Крім того були виконані випробування на розтяг зразків з отвором (Open Hole Tensile – ОНТ) при співвідношенні ширини зразка до діаметра отвору W/D=6 відповідно стандарту ASTM D5766/D5766M [1].

Результати визначення границь міцності і модуля пружності склопластиків представлено в табл.1. Міцність склопластику СТЕФ-1/2 в напрямку утка на 17% нижче відповідної по основі, а для СТЕФ-1/3 анізотропія величин σ і E практично відсутня. Зареєстровано незначний розкид механічних характеристик, а саме низькі значення стандартного відхилення *SD* і коефіцієнта варіації *CV*, особливо для склопластику СТЕФ-1/3, що може свідчити щодо повторюваності міцності і пружності для випробуваних зразків, а також незначних випадкових похибках.

Таблиця 1.

Характеристики склопластику при випробуванні суцільних зразків

Параметр	СТЕФ-1/2				СТЕФ-1/3			
	σ_1, МПа	E_1, ГПа	σ_2, МПа	E_2, ГПа	σ_1, МПа	E_1, ГПа	σ_2, МПа	E_2, ГПа
Середнє	141,6	26,7	121,4	25,1	140,1	24,4	139,0	24,6
SD	12,4	3,13	5,94	1,43	3,08	1,37	5,01	1,48
CV,%	8,5	11,7	4,9	5,7	2,2	5,6	3,6	6,0

Результати визначення границі міцності $\sigma^{\text{ОНТ}}$ для зразків склопластиків з отвором представлено в табл.2. Для обох матеріалів СТЕФ-1/2 і СТЕФ-1/3 значення $\sigma_2^{ОНТ}$ на 21% і 19% нижче відповідних значень $\sigma_1^{ОНТ}$ в напрямку основи.

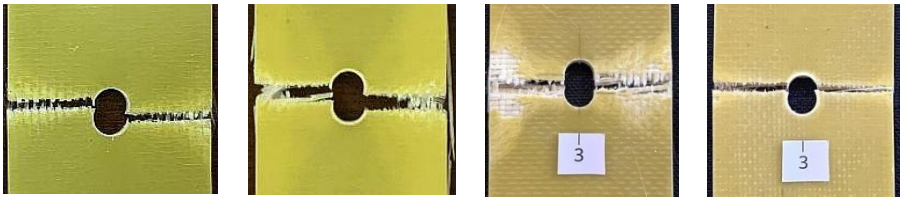
Характерні зони руйнування зразків ОНТ склопластиків приведено на рис.1. При випробуваннях зразків в напрямку основи на поверхневих шарах зразків діють

максимальні напруження і тому руйнування склотканини цих шарів є чітко вираженим і більш помітним в порівнянні зі зразками, які були випробувані в напрямку утка.

Таблиця 2.

Міцність склопластику при випробуванні зразків ОНТ з отвором

Параметр	СТЕФ-1/2		СТЕФ-1/3	
	σ_1^{OHT}	σ_2^{OHT}	σ_1^{OHT}	σ_2^{OHT}
середнє	90,8	71,5	95,5	77,4
SD	7,6	3,0	2,47	1,54
CV,%	8,4	4,2	2,6	2,0



а *б* *в* *г*

Рис.1 Зони руйнування зразків ОНТ: СТЕФ-1/2 в напрямку основи (*а*) і утка (*б*); СТЕФ-1/3 в напрямку основи (*в*) і утка (*г*)

Одержані результати свідчать, що випробування на розтяг зразків з отвором за стандартом ASTM D5766/D5766M дозволяють виявити анізотропію склопластиків із як повністю незбалансованою так і частково збалансованою шаруватою структурою.

1. ASTM D 5766/D 5766M–23 Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International, West Conshohocken, PA (2023), https://doi.org/10.1520/D5766_D5766M-23

Assessment of tensile strength of fiberglass with a layered structure

O. Drozdov[1], Yu. Volkov, A. Bogomolov

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] drozdov@ipp.kiev.ua

The tensile strength of two deliveries of fiberglass with a layered structure STEF-1/2 and STEF-1/3 was tested and estimated, respectively, from sheets with a thickness of 2 and 3 mm. The first material STEF-1/2 was completely unbalanced and all 5 layers of fiberglass were laid in one direction, the second material STEF-1/3 was partially balanced, layers 1,3,5,7 were laid in one direction, and 2,4,6 in the other. Both simple specimens and ones with a hole (Open Hole Tensile – OHT) were tested . As a result, anisotropy of the strength of STEF-1/2 was established when testing both simple specimens and ones with a hole. For partially balanced fiberglass STEF-1/3, anisotropy of its strength was found only when testing OHT specimens.

Keywords: fiberglass, strength, warp, weft, anisotropy.

Прогнозування границі міцності пластиків, виготовлених адитивним методом, за допомогою алгоритмів машинного навчання

О. І. Моргун[1], П.В. Яковчук, С. М. Шукаєв

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

[1] o.morhun-km@lll.kpi.ua

Ключові слова: 3-Д друк, механічні властивості, параметри друку, машинне навчання

Поширення адитивного виробництва потребує ефективних методів прогнозування міцності 3-Д друкованих деталей залежно від параметрів друку [1]. Оскільки традиційні підходи до побудови відповідних регресійних моделей потребують значної кількості випробувань [2], то зростає актуальність застосування альтернативних підходів, зокрема методів машинного навчання, які здатні враховувати складні нелінійні залежності між параметрами друку та механічними характеристиками.

У роботі порівняно чотири моделі: регресію гауссівського процесу, нейронну мережу, метод опорних векторів та ансамблеву модель. Ці моделі було натреновано на результатах експериментальних досліджень границі міцності, для двох матеріалів (PLA та ABS). Загальний датасет налічував 506 експериментальних значень і був розділений на тренувальний (425 значень) та тестовий датасет (81 значення). В якості факторів було обрано густину, модуль Юнга, границю міцності та максимальне відносне видовження філаментів, кут прикладання навантаження до площини друку та параметри процесу друку (растрові кути, товщина периметрів, температура сопла, щільність заповнення, швидкість друку, висота шару та ширина екструзії), а функцією відгуку – границю міцності. Результати обчислень порівнювалися за допомогою таких статистичних показників, як коефіцієнт детермінації (R^2) та середньоквадратична похибка (RMSE) (Таблиця 1).

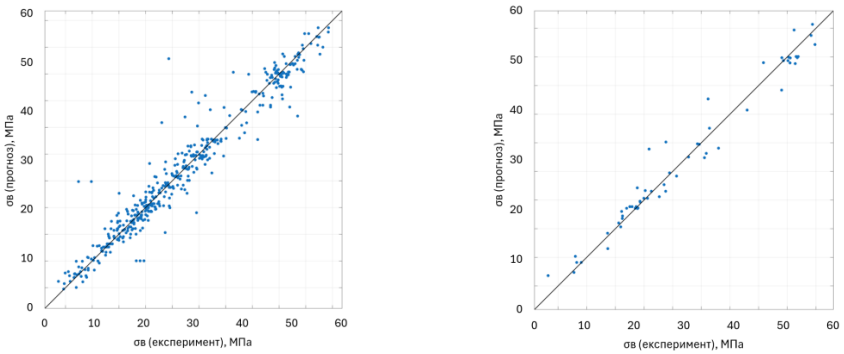
Таблиця 1.

Порівняння середньоквадратичних похибок та коефіцієнтів детермінації для тренувальних та тестових вибірок

Модель	RMSE (тренувальна вибірка)	RMSE (тестова вибірка)	R^2 (тренувальна вибірка)	R^2 (тестова вибірка)
Регресія гауссівського процесу	3,0295	2,348	0,94113	0,968
Нейронна мережа	3,6205	2,6697	0,91592	0,95862
Ансамблева модель	3,9959	3,1773	0,89759	0,9414
Метод опорних векторів	3,4885	3,4521	0,92194	0,93082

Усі розглянуті алгоритми машинного навчання продемонстрували достатню точність прогнозування границі міцності 3D-друкованих пластиків, що підтверджується високими значеннями R^2 як на тренувальній, так і на тестовій вибірках. Метод регресії гауссівського процесу виявився найбільш точним серед

досліджених моделей (Рисунок 1), показавши найменшу середньоквадратичну похибку на тестовій вибірці та найвищий коефіцієнт детермінації. Протестовані моделі можна ранжувати за точністю так: регресія гауссівського процесу > нейронна мережа > ансамблева модель > метод опорних векторів.



а *б*

Рис. 1. Результати прогнозування границі міцності методом регресії гауссівського процесу: *а* – порівняння прогнозованих і експериментальних значень на тренувальній вибірці; *б* – порівняння прогнозованих і експериментальних значень на тестовій вибірці.

Таким чином використання методів машинного навчання є перспективним підходом для прогнозування механічних характеристик 3-Д друкованих елементів конструкцій. Це дозволяє суттєво скоротити кількість необхідних натурних випробувань при оптимізації параметрів адитивного виробництва.

1. Aktepe, E.; Ergün, U. Machine Learning Approaches for FDM-Based 3D Printing: A Literature Review. Appl. Sci. 2025, 15, 10001. https://doi.org/10.3390/app151810001
2. Panico, A., Corvi, A., Collini, L. et al. Multi objective optimization of FDM 3D printing parameters set via design of experiments and machine learning algorithms. Sci Rep 15, 16753 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-01016-z

Predicting the ultimate strength of additively manufactured plastics using machine learning algorithms

O. I. Morhun[a1], P.V. Yakovchuk[a], S. M. Shukayev[a]

[a]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

[1] o.morhun-km@lll.kpi.ua

To overcome the time and resource constraints of traditional testing, this study evaluates four machine learning models (Gaussian Process Regression, Neural Network, SVM and Ensemble) for predicting the ultimate strength of 3D-printed PLA and ABS plastics. Trained on a dataset of 506 experimental values, all models demonstrated high adequacy. Notable, Gaussian Process Regression achieved the lowest root-mean-square error on the test dataset and the highest coefficient of determination.

Keywords: 3D-printing, mechanical properties, printing parameters, machine learning.

Експериментально-розрахункове визначення аеродинамічних навантажень для оцінки стійкості лопаток до флатера

С. М. Кабанник[1], А. Ж. Мейріс

[a]Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] kabannyk@ipp.kiev.ua

Ключові слова: флатер, компресорна решітка, аеродинамічні навантаження, числове моделювання, кут атаки.

Створення сучасних високоефективних газотурбінних двигунів характеризується прагненням до зниження маси конструкції та підвищення її аеродинамічної ефективності. Це досягається шляхом проєктування високонавантажених ступенів, які оснащуються тонкими та легкими лопатками зі складною просторовою геометрією. Проте при їх експлуатації виникає ризик виникнення аеропружної нестійкості (флатеру). Для надійного прогнозування границь його виникнення вже на стадії проєктування необхідно визначати аеродинамічні навантаження на лопаткових профілях [1]. Сучасним інструментом для вирішення таких задач є обчислювальні методи гідрогазодинаміки. Однак використання напівемпіричних моделей турбулентності може призводити до похибок, особливо при розрахунках режимів із відривом потоку [2]. Метою даної роботи є розробка числової моделі для визначення аеродинамічних навантажень на лопаткових профілях та їх верифікація з результатами попередньо проведених експериментально-розрахункових досліджень [3].

Об’єктом дослідження є плоска компресорна решітка в дозвуковому потоці. Для оптимізації обчислювальних ресурсів математичну модель було реалізовано у двовимірній постановці, а її достовірність було верифіковано експериментальною базою з [1].

Проведений числовий аналіз решітки дозволив дослідити тонку структуру потоку в міжлопатковому каналі. Встановлено, що при обтіканні профілів на нульових кутах атаки примежовий шар залишається приєднаним на більшій частині поверхні лопатки. Аеродинамічні сліди, що формуються за вихідними кромками внаслідок в'язкої взаємодії цих примежових шарів, залишаються вузькими, стабільними та не мають ознак суттєвого розмиву, як показано на рис. 1.

Із поступовим збільшенням кута набігаючого потоку спостерігається інтенсивне потовщення примежового шару на спинці профілю, що призводить до розширення аеродинамічного сліду та виникненням локального відриву потоку, який швидко прогресує і охоплює значну частину міжлопаткового каналу. Моделювання відривної зони є важливим для відтворення механізму збудження флатера в лопаткових вінцях. Верифікація моделі проведена шляхом зіставлення розрахованих профілів динамічного тиску у сліді за решіткою з експериментальними даними [3], отриманими за допомогою трубки Піто (рис. 1,б). Крім того, дослідження аеродинамічних сил показало їх квадратичну залежність від швидкості потоку та нелінійне зростання при збільшенні кута атаки, що узгоджується з фундаментальними законами аеродинаміки.



а *б*

Рис. 1. Поле динамічного тиску в міжлопатковому каналі при обтіканні решітки зі швидкістю 100 м/с для кута атаки 0°. *а* – результати числового моделювання; *б* – сліди в потоці.

В рамках даного дослідження розроблено та реалізовано числову модель для визначення аеродинамічних навантажень, що діють на лопаткові профілі решітки при дозвуковому обтіканні. Верифікація результатів на базі експериментальних даних підтвердила адекватність числової моделі, яка достовірно відтворює фізику течії, включаючи розвиток примежового шару, формування сліду та зон відриву. Отримані результати є основою для визначення границь виникнення дозвукового флатера.

1. A.L. Stel'makh, A.P. Zinkovskii, S.N. Kabannik, Rapid Method of Predicting the Subsonic Flutter Stability of AGTE Axial-Flow Compressor Blade Cascades. Part 1. Physical Backgrounds of the Method. *Strength Mater*, 51, 175-182 (2019). https://doi.org/10.1007/s11223-019-00063-y
2. Pajak, R. Rzadkowski, *Influence of Mesh Density and Turbulence Models on 2D Viscous Flutter in 11th Standard Configuration*. Proc. of ASME Turbo Expo 2012, 1431 – 1439 (2012). https://doi.org/10.1115/GT2012-68393
3. S.N. Kabannik, A.P. Zinkovskii, A.L. Stel'makh, Determination of the subsonic flutter stability boundary of blade rows at large angles of attack. *Strength Mater*, 254–263 (2018). https://doi.org/10.1007/s11223-018-9966-9

Experimental and Numerical Determination of Aerodynamic Loads for Blade Flutter Stability Assessment

S. M. Kabannyk[1], A. Zh. Meiris

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] kabannyk@ipp.kiev.ua

This work develops and verifies a numerical model for aerodynamic loads on compressor cascade blade profiles under subsonic flow. The research addresses the need for accurate aeroelastic stability predictions in modern gas turbine engine design. Model validity was confirmed by comparing calculated data with experimental results. Detailed investigation of the inter-blade flow structure examined aerodynamic wake formation and separation zone development at various angles of attack. The verified model serves as a reliable tool for analyzing flutter onset conditions.

Keywords: flutter, compressor cascade, aerodynamic loads, numerical simulation, angle of attack.

Композитні листові сталеві конструкції захисних споруд стійкі до пробиття уламками

М. К. Дауров[a1], С.І. Білик[a], А.С. Білик[б]

[a] Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
[б] Науково-дослідний інститут воєнної розвідки Головного управління розвідки Міністерства оборони України, Київ, Україна

[1] mk19daurov@gmail.com

Ключові слова: композитні конструкції, сталеві листові конструкції, захисні споруди, динамічний розрахунок, проникнення, броньована сталь, низьколегована сталь.

В сучасних умовах війни різні військові та цивільні об’єкти України потребують інженерного захисту, зокрема об’єкти критичної інфраструктури [1]. Теоретичні основи розрахунку матеріалів на проникнення та робота конструкцій під час влучання стрілецькою зброєю раніше були проаналізовані в наукових працях [2-5].

Листові сталеві конструкції із броньованої сталі ефективні в захисті об’єктів від уламків ракет та БПлА. Проте застосування захисних конструкцій із броньованої сталі значно збільшує кошторисну вартість будівництва. Проведені числові дослідження роботи листових конструкцій із броньованих та низьколегованих сталей, де змодельовано влучання уламків БПлА. Метою досліджень була визначення ефективності та економічної доцільності використання листових конструкцій із низьколегованих сталей або багатошарових композитних конструкцій із одночасним використанням броньованих та низьколегованих сталей. Розрахунок виконано методом скінченних елементів в програмному комплексі ANSYS.

Модель Джонсона-Кука як фізико-механічна модель роботи сталі та металевих уламків описується за наступним рівнянням:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + \mathrm{C}\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

Результат розрахунку для листових конструкцій для низьколегованої сталі показано на рис. 1.

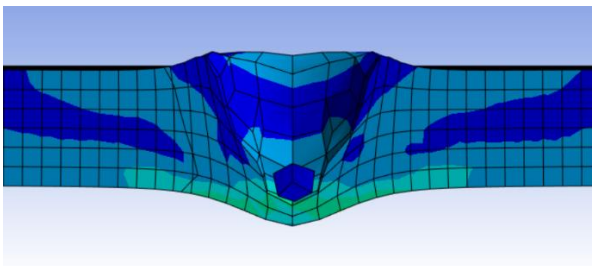


Рис. 1. Результат розрахунку влучання уламка в лист із максимальною товщиною в сортаменті.

Результати розрахунків показали, що використання листових конструкцій із низьколегований сталей комбіновано із броньованими може значно зменшити вартість будівництва захисних споруд зі сталевих конструкцій.

1. Білик А. С., Михайловський Д. В. Реалізація державної концепції України із захисту критичної інфраструктури – «Країна-фортеця» // Military Strategy and Technology. – 2025. – № 2(2). – С. 18–29. – DOI: 10.63978/3083-6476.2025.2.2.02.
2. Oucif C., Kalyana Rama J. S., Shankar Ram K., Abed F. Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities // Defence Technology. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 89–98. – DOI: 10.1016/j.dt.2020.03.013.
3. Pu B., Wang X., Li W., Feng J. Analytical Model Formulation of Steel Plate Reinforced Concrete Walls against Hard Projectile Impact // Applied Sciences. – 2022. – Т. 12, № 1. – Ст. 518. – DOI: 10.3390/app12010518.
4. Mykhailovskyi D. V., Skliarov I. O., Khomik M. M., Vavilova N. V., Skliarova T. S. Analysis of methods for calculating the penetrating effect of the main types of missiles and fragmentation damage to the structures of protective constructions // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2024. – № 113. – С. 171–182. – DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.171-182.
5. Бісик С. П., Наконечний О. В. Дослідження пробиття сердечником 7,62-мм кулі Б-32 багатошарового захисного елемента // Social Development and Security. – 2025. – Т. 15, № 6. – С. 323–335. – DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.28

Composite steel plate structures of protective shelters resistant to fragment penetration

M. Daurov[a1], S. Bilyk[a] , A.Bilyk[b]

[a]Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, Ukraine
[b]Research Institute of Military Intelligence of the Main Directorate of Intelligence of the Ministry of Defence of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] mk19daurov@gmail.com

Studies were conducted on the behavior of protective shelters steel plate structures under fragment impact. Structural configurations made of different steels and varying thicknesses were considered. The economic feasibility of using structures made of low-alloy steels or composite systems in combination with armored steels was assessed. It was found that structures made of low-alloy steels are effective in protection against fragment penetration and can significantly reduce the estimated construction cost compared to structures made of armored steels.

Keywords: composite structures, steel plate structures, protective shelters, dynamic analysis, penetration, armored steel, low-alloy steel.

Визначення комплексу механічних властивостей тканого вуглепластику за підвищених температур

О. В. Дроздов[а1], Ю. М. Волков[а], М. П. Рудницький[а], О. П. Роменська[б2], І. І. Деревянко[б3]

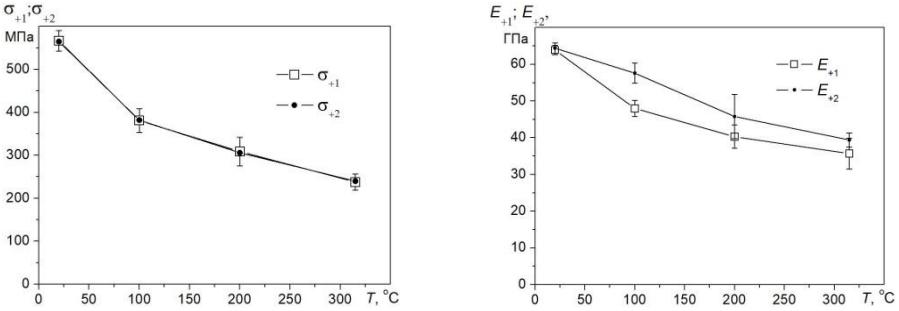
[а]Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]ДП "Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля", Дніпро, Україна

[1] drozdov@ipp.kiev.ua
[2]RomenskaOP@science.yuzhnoye.com
[3]DereviankoII@science.yuzhnoye.com

Ключові слова: вуглепластик, міцність, розтяг, стиск, основа, уток, анізотропія

Особливе значення і широке використання мають вуглепластики завдяки їх високій міцності при мінімальній вазі, хімічній стійкості, незначному термічному розширенню. Вуглепластики, що мають в якості армуючого компонента вуглецеві тканини з успіхом застосовуються при створенні елементів різної, іноді складної форми конструкцій авіаційної і ракетно-космічної техніки.

Об'єктом дослідження був тканий вуглепластик сформований із шарів вуглецевої тканини полотняного плетіння марки 3752 і епоксидної смоли в якості сполучного. Тканина 3752 по даним виробника є збалансованою в напрямках основи і утка з однаковою кількістю джгутів (6/см), кожний з яких налічує 3К вуглецевих волокон. Для даного композита виконано комплекс механічних випробувань в діапазоні температур 20..315°С з метою визначення температурних залежностей його границь міцності: σ_{+1}; σ_{+2}; σ_{-1}; σ_{-2} і модулів пружності: E_{+1}; E_{+2}; E_{-1}; E_{-2}, де нижні індекси +, – означають розтяг і стиск відповідно, а 1 і 2 напрямок по основі і утку. Результати визначення механічних властивостей вуглепластику при розтягу в діапазоні температур 20..315°С представлено на рис.1.



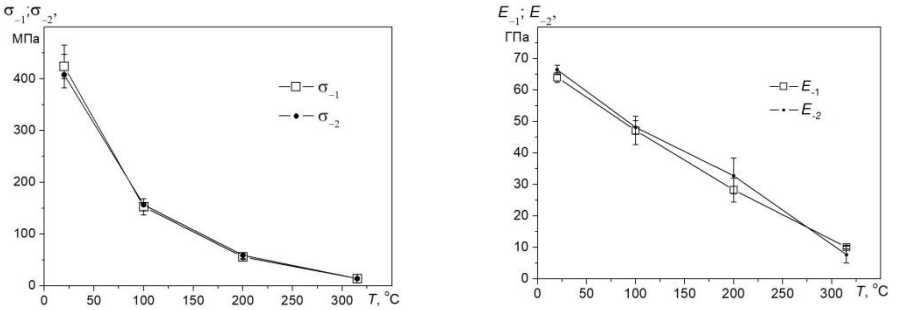
а б

Рис.1 Температурні залежності: σ_{+1}, σ_{+2} (а); E_{+1}, E_{+2} (б) при розтягу.

За кімнатної температури σ_{+1} і σ_{+2} відповідно складають 567 МПа і 565 МПа з коефіцієнтами варіації 2,6% і 4,2%. Зі збільшенням температури відбувається поступове падіння цих величин і за температури 315ºС вони сягають значень 238 МПа і 240 МПа відповідно. Видно, що температурні залежності границі міцності вуглепластику σ_{+1} і σ_{+2} фактично співпадають (рис.1а). Значення модулів пружності за кімнатної температури також майже співпадають: 63,9 ГПа і 64,3 ГПа, а з підвищенням температури їхні середні значення несуттєво відрізняються.

Температурні залежності механічних властивостей при стиску: σ_{-1}; σ_{-2}; E_{-1}; E_{-2} показано на рис.2. Ці залежності, як границь міцності так і модулів пружності практично, накладаються одна на одну в усьому діапазоні температур випробувань. Середні значення границь міцності для напрямку по основі і утку за кімнатної температури складають 424 МПа і 408 МПа відповідно.

Зі зростанням температури відбувається значне монотонне падіння величин σ_{-1}, σ_{-2} більш стрімке ніж відповідні границі міцності при розтягу. Це може бути наслідком того, що температура склування (вітрифікації) епоксидної матриці T_G є на рівні 100°C.



а б

Рис.2 Температурні залежності: σ_{-1}, σ_{-2} (а); E_{-1}, E_{-2} (б) при стиску.

Таким чином всі механічні характеристики вуглепластику зазнають суттєвої деградації з підвищенням температури. Значення σ_{+1}, σ_{+2}, σ_{-1}, σ_{-2} за температури T=315°C складають: 42,0%; 42,5%; 3,4%; 3,5% відповідних значень за T=20ºC. Майже цілковите збігання всіх механічних характеристик в напрямку основи і утка в діапазоні температур 20..315°C свідчить при відсутність анізотропії тобто рівноміцності тканого вуглепластику з шарами збалансованої тканини 3752.

Determination of the complex of mechanical properties of woven carbon fiber at elevated temperatures

O. Drozdov[a1], Yu. Volkov[a], M. Rudnytskyi[a], O. Romenska[b2], I. Derevianko[b3]

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine

[1] drozdov@ipp.kiev.ua
[2]RomenskaOP@science.yuzhnoye.com
[3]DereviankoII@science.yuzhnoye.com

Keywords: Carbon fiber plastic, strength, tension, compression, warp, weft, anisotropy.

A set of mechanical tests of carbon fiber plastic based on balanced fabric 3752 was performed to assess its tensile and compressive strengths in the warp and weft directions: σ_{+1}, σ_{+2}, σ_{-1}, σ_{-2} respectively in the temperature range of 20..315°C. The corresponding temperature dependences of the elastic moduli of this material: E_{+1}; E_{+2}; E_{-1}; E_{-2} were also determined. All mechanical characteristics undergo significant degradation with increasing temperature. The almost full coincidence of mechanical characteristics in the warp and weft directions in the operating temperature range indicates the absence of anisotropy of carbon fiber plastic with fabric 3752.

Розрахунково-аналітичне обґрунтування критеріїв граничного стану деталей авіаційних ГТД методом моніторингу накопиченої циклічної пошкодженості

І. О. Буліч , О. Г. Карасьов, Г. О. Шумілін ,В. О. Харченко[1]

[a]Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

[1]dndia.ndv13@gmail.com

Ключові слова: авіаційний газотурбінний двигун, граничний стан, циклічна довговічність, малоциклова втома, накопичена пошкодженість, параметр TAC.

В умовах інтенсивного застосування тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України під час дії правового режиму воєнного стану (ПРВС) профілі польотів винищувачів Су-27 зазнали суттєвих змін [1]. Традиційний облік вичерпання ресурсу газотурбінних двигунів (ГТД) АЛ-31Ф у годинах нальоту призводить до похибок в оцінці фактичної малоциклової втоми матеріалу особливо відповідальних деталей, зокрема дисків роторів компресора та турбіни. Для обґрунтованого індивідуального продовження міжремонтного ресурсу доцільно застосовувати параметр сумарної накопиченої пошкодженості – Total Accumulated Cycle (TAC) [2-4].

Математична модель розрахунку еквівалентної пошкодженості базується на гіпотезі лінійного підсумовування втомних пошкоджень. Базова формула (1) для визначення параметра TAC за k польотів має вигляд:

$$TAC = \sum_{j=1}^{k} (N_{1j} + K_2 N_{2j} + K_3 N_{3j}) \quad (1)$$

де N_{1j} – кількість повних циклів навантаження (запуск – вихід на максимальний/форсований режим – зупинка) у j-му польоті;

N_{2j}, N_{3j} – кількість елементарних циклів навантаження (зміна режимів роботи двигуна в польоті);

K_2, K_3 – коефіцієнти еквівалентності пошкоджуючої дії відповідних елементарних циклів по відношенню до повного циклу.

Практична реалізація запропонованої математичної моделі для парку авіаційної техніки потребує обробки величезних масивів параметричної інформації з бортових реєстраторів (типу “Тестер” та “БУР”). Для виключення суб’єктивних похибок людського фактору, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, яке реалізоване на мові програмування VBA в середовищі MS Excel. Розроблений алгоритм дозволяє в автоматичному режимі аналізувати дані об’єктивного контролю та ідентифікувати режими роботи двигуна.

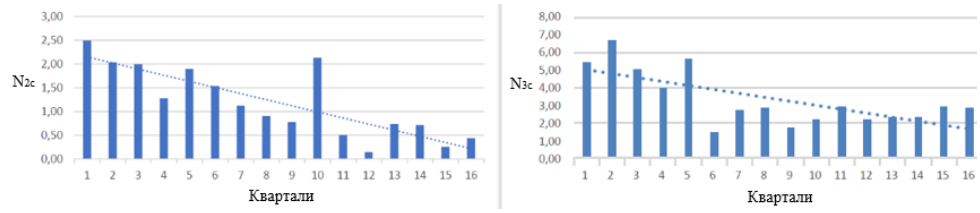
Отриманий за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення масив об’єктивних даних є підґрунтям для дослідження трансформації тактики бойового застосування винищувачів Су-27. З метою виявлення закономірностей у масивах польотної інформації було застосовано методи кластерного аналізу. Розподіл

накопиченої вибірки польотів на відносно однорідні групи (кластери) дозволив математично обґрунтовано сформувати узагальнені типові польотні цикли (УТПЦ) [5].

Результати кластерного аналізу масиву з понад 1000 записів польотної інформації дозволили виділити три характерні етапи еволюції бойового застосування літаків Су-27. Перший етап (лютий – червень 2022 року) відзначався надвисокою інтенсивністю маневрених повітряних боїв, що призвело до зростання кількості циклів N_3 (включення форсажних режимів) у 3–4 рази порівняно з нормами мирного часу. Другий етап (друга половина 2022 – 2023 років) характеризувався переходом до тривалого чергування в повітрі, що зумовило суттєве збільшення середньої тривалості польоту при зниженні циклічності. На третьому етапі (з 2024 року) інтеграція нових зразків авіаційних засобів ураження сформувала нові профілі польоту з різкими сплесками термомеханічних напружень під час прихованого виходу в зону застосування.

Застосування розробленої методики довело, що вичерпання ресурсу основних деталей відбувається нерівномірно і не має прямої лінійної залежності виключно від годин нальоту. Використання параметра ТАС дозволяє об’єктивно оцінити залишкову довговічність критичних деталей [6] та обґрунтовано приймати рішення щодо індивідуального допуску авіаційних двигунів АЛ-31Ф до подальшої експлуатації в умовах дії ПРВС (наприклад, на черговий етап понад встановлений міжремонтний ресурс 300 годин).

Динаміку зміни інтенсивності бойового застосування наочно ілюструє поквартальний розподіл середніх значень кількості елементарних циклів навантаження N_{2c} та N_{3c} (рис. 1), де N_{ic} позначає кількість відповідних елементарних циклів на одну годину нальоту. Як видно з діаграми, на першому етапі відбиття збройної агресії (перший – другий квартали 2022 року) спостерігався різкий стрибок середньої кількості елементарних циклів N_{3c}, що відповідає тактиці високо маневрених повітряних боїв та протиракетних маневрів. З переходом до другого етапу (третій квартал 2022 року – 4 квартал 2023 року) ці показники дещо знизилися внаслідок збільшення кількості місій з патрулювання повітряного простору, проте на третьому етапі (починаючи з першого кварталу 2024 року) знову набули специфічних змін через адаптацію профілів польоту під застосування закордонних авіаційних засобів ураження.



а *б*

Рис. 1. Поквартальна динаміка зміни середніх значень кількості елементарних циклів навантаження двигунів АЛ-31Ф в умовах дії ПРВС: *а* – розподіл N_{2c}; *б* – розподіл N_{3c}.

Встановлено, що перехід від календарного та годинного обліку до оцінки фактичного технічного стану за параметром ТАС є єдиним науково обґрунтованим шляхом збереження боєздатності парку винищувальної авіації. Розроблений науково-методичний апарат та впровадження спеціалізованого програмного забезпечення дозволяють формувати індивідуальні критерії граничного стану для дисків роторів. Це

дає змогу обгрунтовано допускати авіаційні двигуни АЛ-31Ф до подальшої експлуатації в умовах дії ПРВС на черговий етап понад встановлений нормативний міжремонтний ресурс (300 годин).

1. В.Г. Шостак, А.А. Шульгін, В.В. Самулєєв, та ін., Звіт про науково-дослідну роботу Шифр “Моніторинг-АЛ”, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ (2023).
2. А.А. Шульгін, *Науково-технічні аспекти створення методики моніторингу циклічної пошкодженості основних деталей авіаційного двигуна військового призначення*, Озброєння та військова техніка № 2 (9), 82-92 (2016).
3. В.В, Самулєєв, *Методика продовження ресурсу дисків роторів ТРДДФ,* Збірник наукових праць ДНДІА, 118–122 (2020).
4. О.В. Бармин, В.А. Брусков, И.Н. Тюльпаков, *Методический подход к индивидуальному исчислению фактического ресурса авиационных ГТД*, Проблемы безопасности полетов, № 3, 30-38 (2001).
5. В.В. Самулєєв, А.А. Шульгін, Г.О. Шумілін, та ін., Типові польотні цикли, типові цикли технічного обслуговування та узагальнені типові польотні цикли роботи двигунів АЛ-31Ф у складі силових установок винищувачів Су-27 при виконанні польотів згідно з Курсом бойової підготовки винищувальної авіації та під час їх технічного обслуговування. Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ 14 (2017).
6. Engine structural integrity program (ENSIP), MIL-HDBK-1783B, w/Change 2, Department of defense handbook, 188 (2004).

Calculational and analytical justification of limit state criteria for aircraft gas turbine engine components using the method of monitoring accumulated cyclic damage

I. Bulich[a] , O. Karasov[a], H. Shumilin[a], V. Kharchenko[a1]

[a]State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine

[1]dndia.ndv13@gmail.com

This paper presents a computational and analytical approach to determining the failure criteria for particularly critical components of aircraft gas turbine engines (using the AL-31F rotor discs as an example). Under conditions of intensive combat use, traditional tracking of operating hours does not reflect the actual depletion of their cyclic life. It is proposed to use the Total Accumulated Cycle (TAC) parameter, which is calculated based on the automated processing of parametric flight data. This approach allows for the justification of a safe, individual extension of the engines' service life beyond the established regulatory limits.

Keywords: aircraft gas turbine engine, limit state, cyclic durability, low-cycle fatigue, accumulated damage, TAS parameter.

Аналіз термодеформаційного профілю багатошарового наплавленого металу Inconel 718

О. Яровицин[a] , М. Черв'яков[a1], І. Волосатов[a], Г. Хрущов[a], В. Пєстов[a], О. Завгородній[b]

[a]Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна
[b]ТОВ «МУЛЬТІФЛЕКС», м. Запоріжжя, Україна

cherviakov@paton.kiev.ua

Ключові слова: наплавлений метал, повздовжній статичний розтяг, температура, величина критичної деформації руйнування, схильність до утворення гарячих тріщин

Вступ. Сплав Inconel 718 має задовільну зварюваність та вважається придатним для адитивних технологій [1]. Розвиваються високопродуктивні адитивні технології на основі дугового багатошарового наплавлення 3D-об'єктів з товщиною стінки 10-20 мм [2]. З огляду на високу ймовірність виникнення значних напружень і деформацій в процесі перебігу зварювальних термодеформаційних циклів при багатошаровому наплавленні інтерес представляє аналіз залежності пластичності наплавленого металу Inconel 718 від температури з позицій оцінки ймовірності утворення в ньому гарячих тріщин за механізмом "solid state cracking" [1,3].

Методологія досліджень. Мікроплазмовим порошковим наплавленням (МПН) та аргонодуговим наплавленням (АДН) підготовлено зварні заготовки типу «вертикальна стінка». МПН виконувалося на зварювальному струмі 25-35 А при швидкості наплавлення ~1,2 м/год; АДН – на зварювальному струмі 80-115 А при ~7,5 м/год. Для МПН застосовувалися присадні порошки двох різних виробників. Від BIBUS Holding порошок виготовлений за процесом Argon Gas Atomization; від ТОВ «Мультіфлекс» – за процесом Plasma Rotating Electrode Process. При АДН використовувався присадний дріт Ø1,6 мм виробництва BIBUS Holding**.** З отриманих заготовок після наступного шліфування та капілярного контролю їх бокових поверхонь в повздовжньому напрямку електроерозійною різкою виготовлялися мініатюрні плоскі пропорційні зразки з перерізом робочої частини 2,5×3,0 мм. Після їх доопрацювання чистовим шліфуванням та капілярного контролю вони випробовувалися на статичний розтяг на сервогідравлічній машині MTS 810.50 при T =20-1100ºC. Структурний стан випробуваних зразків – без термічної обробки. Для інтерпретації отриманих результатів у присадних матеріалах методом відновного плавлення в потоці газу-носія оцінювався вміст домішок кисню та азоту.

Основні результати: Встановлено, що наплавлений метал сплаву Inconel 718 у структурному стані, отриманий МПН, має 2 температурних інтервали зниженої пластичності: в околі 1100ºC з величиною критичної деформації руйнування $\varepsilon_{кр}$ ~ 15%; при 750-800ºC з $\varepsilon_{кр}$ ~3,5-6,5 %. Розглянуті присадні матеріали зі сплаву Inconel 718 за вмістом кисню та азоту відповідають сучасному рівню вимог [O, N] <0,015 мас. %. Уточнено, що зменшення вмісту азоту на 0,002-0,007 мас. % у присадному матеріалі сплаву Inconel 718, що застосовується при МПН або АДН, в околі 1100ºC у 3-4 рази підвищує пластичність відповідного наплавленого металу. Другий інтервал зниженої пластичності при 750-800ºC спостерігається тільки при МПН. Дослідження

мікроструктури наплавленого металу сплаву Inconel 718 растровою електронною мікроскопією та EDX-аналізом показали, що наявність зниженої пластичності при 750-800ºС пов'язується зі збільшеною присутністю в його міждендритних проміжках карбідних фаз на основі Nb порівняно з фазами Лавеса. З огляду на найнижчу величину $\varepsilon_{кр}$ ~3,5-6,5 % в цьому температурному інтервалі при підвищеній жорсткості 3D-об'єкта при багатошаровому мікроплазмовому порошковому наплавленні ймовірне утворення гарячих тріщин за механізмом "solid state cracking".

1 K. Balushok, S. Chygileichyk, I. Petryk at al, Developing technology of directed energy deposition of workpieces of parts of aircraft engines from heat-resistant nickel alloys by means of using layer-by-layer microplasma surfacing method, Mech. Adv. Technol., Vol. 8, No. 2, pp. 121–129 (2024) https://doi.org: 10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).296932

2 Ghoussoub J.N., Tang Y.T., Dick-Cleland W.J.B. at al, On the influence of alloy composition on the additive manufacturability of Ni-based superalloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 53A, 962–983 (2022) https://doi.org/10.1007/s11661-021-06568-z

3 DuPont J.N., Lippold J.C., Kiser S.D., Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys, John Wiley & Sons (2009).

Analysis of the thermal deformation profile of multilayered Inconel 718 deposited metal

O. Yarovytsyn[a], M. Cherviakov[a1], I. Volosatov[a], H. Khrushchov[a], V. Pestov[a], O. Zavgorodniy[b]

[a]Paton Welding Institute of NAS of Ukraine, *Kyiv, Ukraine*
[b]"MULTIFLEX" LTD, Zaporizhia, *Ukraine*

[1]cherviakov@paton.kiev.ua

By tensile testing of miniature flat proportional test pieces of several types of Inconel 718 superalloy deposited metal, obtained from "vertical wall" workpieces of multilayer deposited metal without subsequent heat treatment, the presence of temperature intervals of ductility reduction was established. They has been estimated the probability of hot cracking by the "solid state cracking" mechanism. The indicated intervals of ductility reduction are associated with an increase in nitrogen content (around 1100ºC) and with the predominant content of carbide phases in the interdendritic spaces compared to Laves phases (750ºC-800ºC). It is shown that for high-quality filler materials in terms of the content of oxygen and nitrogen impurities, the greatest potential danger in terms of the formation of hot cracks is represented by the temperature interval 750ºC-800ºC, where the lowest values of the critical fracture strain ε_{cr} ~3.5-6.5% are recorded.

Keywords: deposited metal, longitudinal tensile test, temperature, critical fracture strain, hot cracking susceptibility

Modeling of an aircraft wing for studying aeroelastic vibrations

S. V. Filipkovskij[1], E. Polyakov,

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

[1] s.filipkovskij@khai.edu

Keywords: wing, elastic-mass model, finite element method, vibration mode, natural frequency.

To study flutter, an elastic-mass model is constructed with two degrees of freedom (DOF), representing the lower modes of the wing's bending and torsional vibrations. A third DOF can be added – the angle of rotation of the aileron or elevator. The eigenmode or function satisfying the boundary conditions is used as the oscillation form [1].

Modern studies also use two- or three-DOF models. In [2] the instability mechanism of a flexible plate in three-dimensional uniform flow is investigated in terms of the energy transfer between the plate motion and fluid flow. In [3] closed form analytical criteria for flutter onset are developed including a new necessary dynamic divergence criterion, the results based on a bilinear lift coefficient model.

The objective of the research is to develop a model with more than three degrees of freedom that will take into account the interaction of aerodynamic forces with the wing structure throughout its entire span. For this work, an example of a transport aircraft wing with a half-span of 16.0 m, a root chord length of 4.85 m, a tip chord length of 1.45 m, and a distance from the nose to the elastic axis of 0.37 chords was taken.

A finite element model of the wing was constructed in ANSYS. Beam finite elements were used along the elastic axis. To account for the offset of the center-of-mass line relative to the elastic axis, additional masses on short beams were attached to the finite element nodes. These beams are directed along the chords and have high rigidity to prevent deformation of the wing in this direction. The mass and moments of inertia of the fuselage and empennage were added to the root section of the model. Calculations of the frequencies and modes of natural vibrations using this model yielded significant discrepancies with the experimental results. This is explained by the inappropriate nature of the interpolation polynomials for this problem.

A finite element model of a wing made of beam elements with cubic shape functions for bending [4] and linear shape functions for torsion have been developed. The displacement of the centers of mass relative to the elastic axis is taken into account by adding inertial elements to the mass matrix, which connect the degrees of freedom of bending and torsion of the beam. Natural vibration calculations using this model yielded a discrepancy with experimental data acceptable for engineering calculations. However, this model uses finite elements of constant cross-section, which is a disadvantage compared to ANSYS finite elements, which can have variable cross-sections.

Finite elements with cubic shape functions have been improved. Linear variations in the moments of inertia and mass per unit length along the element are programmed. Calculation of the oscillation frequencies of this wing model yielded results that are quite close to experimental data.

The results of calculations and experiments are summarized in Table 1, where f_{b1} and f_{b2} are the frequencies of the first and second bending vibration modes, f_{t1} is the frequency of the first torsional vibration mode.

Table 1.

Frequencies of free oscillations of the wing model (Hz)

Wing model	f_{b1}	f_{b2}	f_{t1}
FEM ANSYS	5.24	21.8	79.06
FEM Segerlind [5]	2.67	9.39	21.50
FEM developed	2.71	9.41	21.12
Natural experiment	2.9	9.5	19.0

This model allows us to take into account the distribution of elastic inertial and aerodynamic forces along the wing span.

1. R. L. Bisplinghoff, H. Ashley, R. L. Halfman, *Aeroelasticity*, Addison-Wesley publishing Company, Inc. Cambridge 42, Mass (1955).
2. K. Hiroaki, M. Watanabe, Theoretical study on the instability mechanism of flutter generated on a cantilevered flexible plate in three-dimensional uniform flow. *Acta Mech*, **232**, 2897–2917 (2021). https://doi.org/10.1007/s00707-021-02979-6
3. P. A. Meehan, Flutter prediction of its occurrence, amplitude and nonlinear behaviour, *Journal of Sound and Vibration*, **535**, 2022, 117117. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117117
4. L. J. Segerlind, *Applied Finite Element Analysis,* 2nd Edn, John Wiley and Sons, Inc. NY (1984).

Моделювання крила літака для дослідження аеропружних коливань

С. В. Філіпковський[1], Є. Поляков

Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харків, Україна.

[1] s.filipkovskij@khai.edu

Розроблено скінченоелементну модель крила з балкових елементів з кубічними функціями форми для вигину та лінійними функціями форми для кручення. Зміщення центрів мас щодо осі жорсткості враховано добавкою інерційних елементів у матриці мас, що зв'язують ступеня свободи вигину та крутіння балки. Запрограмовано лінійну зміну погонних моментів інерції та маси за довжиною елементів. Розрахунок частот коливань цієї моделі крила дав результати, які досить близькі до експериментальних даних.

Ключові слова: крило, пружно-масова модель, метод скінчених елементів, форма коливань, власна частота

Пошкоджуваність та несуча здатність зварних з'єднань із композитних матеріалів

Ю.В. Воронін[1]

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

[1] yurii.voronin-mp41f@lll.kpi.ua

Ключові слова: композитні матеріали, термопластична матриця, зварні з'єднання, пошкоджуваність, несуча здатність, напружено-деформований стан.

Розглядаються зварні з'єднання композитних матеріалів із термопластичною матрицею. Механічна поведінка базового матеріалу характеризується в'язкопластичною відповіддю з вираженою чутливістю до температури та швидкості деформування, асиметрією «розтяг–стиск», самонагрівом та еволюцією пошкоджень. Для зварних з'єднань ці особливості слід розглядати з урахуванням зміни морфології матеріалу, залишкових напружень і мікродефектів у зоні термічного впливу, а для композитних систем також перерозподілу та переорієнтації армуючої фази.

Оскільки стадія розсіяного руйнування є основною й найбільш тривалою в життєвому циклі конструкції, несучу здатність слід розглядати як експлуатаційну характеристику, що визначається накопиченням пошкоджень за циклічної дії механічних і температурних навантажень. Це зумовлює необхідність застосування конститутивних моделей, здатних одночасно відтворювати нелінійну механічну відповідь матеріалу та розвиток пошкоджуваності.

Для опису напружено-деформованого стану до руйнування застосовують моделі, орієнтовані на відтворення нелінійної залежності від температури та швидкості деформування, деформаційного розм'якшення і зміцнення, чутливості до гідростатичного тиску, релаксації, повзучості та гістерезисних ефектів. До них належать підходи на основі декомпозиції градієнта деформації з уведенням проміжних конфігурацій і реологічним представленням опору деформуванню через паралельні гілки Максвелла і Кельвіна-Фойгта [1], термодинамічно узгоджені в'язкопластичні формулювання з енергетично спряженими внутрішніми змінними [2], феноменологічні моделі з розділенням напруження на рівноважну складову та перенапруження [3], а також багатомеханізмові формулювання з сумісним внеском аморфної та кристалічної або жорсткодоменної складових [4].

Попри те, що циклічна поведінка може описуватися і в межах базових конститутивних моделей через закони деградації матеріальних параметрів, повноцінне моделювання потребує явного введення змінних пошкодження. У цьому контексті використовують два основні підходи: моделювання матеріалу як пористого середовища [5] та підхід у межах континуальної механіки пошкоджень [6]. Вплив зварного з'єднання доцільно моделювати із застосуванням чисельних методів, що дають змогу задавати просторово неоднорідний розподіл властивостей матеріалу. Перспективним є прогнозування несучої здатності на основі поєднання конститутивного опису механічної поведінки базового матеріалу, явного врахування накопичення пошкоджень і просторово неоднорідного розподілу матеріальних параметрів, сформованого процесом зварювання.

1. A. Almomani, S. Deveci, A.-H. I. Mourad, and I. Barsoum, Constitutive model calibration for the thermal viscoelastic-viscoplastic behavior of high density polyethylene under monotonic and cyclic loading, Polymer Testing, 118, 107911 (2023). https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107911
2. V. Srivastava, S. A. Chester, N. M. Ames, and L. Anand, A thermo-mechanically-coupled large-deformation theory for amorphous polymers in a temperature range which spans their glass transition, International Journal of Plasticity, 26, No. 8, 1138–1182 (2010). https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.01.004
3. M. Kästner, M. Obst, J. Brummund, K. Thielsch, and V. Ulbricht, Inelastic material behavior of polymers – Experimental characterization, formulation and implementation of a material model, Mechanics of Materials, 52, 40–57 (2012). https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.04.011
4. M.-C. Reuvers, S. Kulkarni, B. Boes et al., A thermo-mechanically coupled constitutive model for semi-crystalline polymers at finite strains: Mechanical and thermal characterization of polyamide 6 blends, Continuum Mechanics and Thermodynamics, 36, 1–42 (2024). https://doi.org/10.1007/s00161-024-01288-2
5. M. Jeridi, L. Laiarinandrasana, and K. Saï, Comparative study of continuum damage mechanics and Mechanics of Porous Media based on multi-mechanism model on Polyamide 6 semi-crystalline polymer, International Journal of Solids and Structures, 53, 12–27 (2015). https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.10.031
6. J. Lemaitre and R. Desmorat, Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2005). https://doi.org/10.1007/b138882

Damage Evolution and Load-Carrying Capacity of Welded Composite Joints

Y.V. Voronin[1]

Igor Sikorsky KPI, Kyiv, Ukraine

[1] yurii.voronin-mp41f@lll.kpi.ua

The paper addresses approaches to predicting the load-carrying capacity of welded joints in composite materials with thermoplastic matrices. The mechanical behavior of the base material is governed by a viscoplastic response sensitive to temperature and strain rate and accompanied by damage evolution. In welded joints, this behavior is additionally influenced by welding-induced changes in morphology, residual stresses, and microdefects in the heat-affected zone. For composite systems, the redistribution and reorientation of the reinforcing phase must also be considered. The load-carrying capacity is treated as an operational characteristic controlled by damage accumulation under cyclic mechanical and thermal loading. A promising direction is the combination of constitutive modeling, explicit damage evolution, and spatially nonuniform material properties induced by welding.

Keywords: *composite materials, thermoplastic matrix, welded joints, damage evolution, load-carrying capacity, stress–strain state*

Особливості напружено-деформованого стану ресурсолімітуючих елементів авіаційної техніки ПС ЗС України

Б.Карпінос[a1], В. Шостак[б], А.Шульгін[б], П.Ковель[б], В.Самулеєв[б]

[a]Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б] Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

[1] karpinosl@ipp.kiev.ua

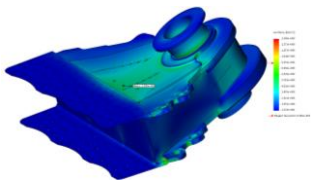
Ключові слова: експлуатація за технічним станом, концентрація напружень, чисельне моделювання, прогнозування граничного стану і ресурсу

Перехід авіаційної техніки (АТ) ПС ЗС України на експлуатацію за технічним станом обумовлює підвищення уваги до впровадження методів контролю технічного стану її компонентів, фізичного та математичного моделювання теплового, напружено-деформованого станів (ТНДС) та накопиченні пошкоджень в умовах дії експлуатаційних чинників. На сьогодні переважна частина парку АТ перебуває в умовах експлуатації понад 30, а деякі екземпляри іноді і 40 років. У багатьох випадках призначений ресурс АТ та її окремих елементів та вузлів вичерпано, а авторський нагляд в процесі її експлуатації та ремонту відсутні. Тому висновки, щодо подовження або припинення подальшої експлуатації зразків АТ, ґрунтуються на багаторічному і всебічному досвіді інженерних служб, залученні результатів комп'ютерного моделювання.

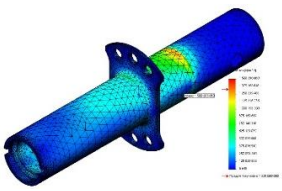
При розв'язку задач математичного моделювання ТНДС компонентів АТ виникають об'єктивні труднощі, пов'язані з некоректністю постановки крайових задач рухомого середовища і механіки твердого тіла, з відсутністю достовірної і перевіреної інформації про властивості середовища і конструкційних матеріалів. Труднощі долаються завдяки використанню розроблених узагальнених методів прогнозування фізичних і механічних характеристик [1] матеріалів, а також застосуванню сучасних потужних комп'ютерних технологій (ANSYS, SOLIDWORKS). Це надає можливість розв'язувати мультифізичні задачі газодинаміки, теплообміну, теплопровідності, пружності і пластичності для елементів планера літаків, гелікоптерів та авіаційних двигунів. З'ясовано вплив різноманітних експлуатаційних та функціональних пошкоджень на загальний і локальний напружено-деформовані стани елементів. Аналіз результатів моделювання станів ресурсолімітуючих елементів засвідчує багато спільних особливостей, які використовувалися при прогнозуванні їхньої довговічності і несівної здатності. Для планера літака це стулки входів повітрозабірників, силові елементи конструкції крил, фітингові з'єднання та інші. Для гелікоптера – лонжерони лопатей, силові елементи кріплення головного редуктора та інші. Для двигуна – робочі лопатки і диски компресорів і турбін, жарові труби камер згоряння, стулки регульованих реактивних сопел та інші.

Відпрацьовані алгоритми моделювання дозволяють готувати обґрунтовані рішення по кожному випадку характерного пошкодження елемента конструкцій, особливо після дії екстремальних умов навантаження літака або гелікоптера, а також після їхніх уражень. Використання методології механіки руйнування засвідчило її

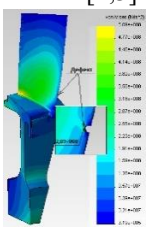
ефективність при визначенні наслідків впливу об'ємних і поверхневих пошкоджень на настання граничного стану деталей й показники їхньої несівної здатності [2,3].



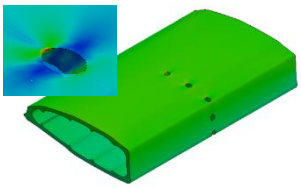
поворотний вузол крила



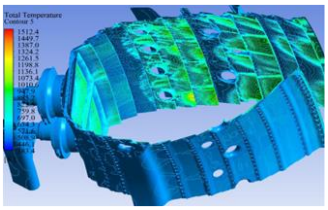
вісь колеса стояка шасі



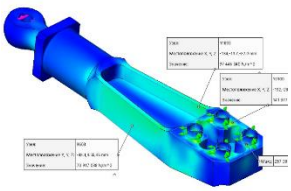
лопатка компресора



лонжерон лопаті



жарова труба камери згоряння



важель повороту лопаті

Результати моделювання напруженого стану елементів, які мали пошкодження .

1. Karpinos, B.S. Generalized Characteristics of the Physical-Mechanical State of Materials. Strength Mater 55, 309–325 (2023). https://doi.org/10.1007/s11223-023-0052
2. Б.С.Карпінос, П.П.Ковель, В.М.Куліш, А.С.Бологін. Моделювання напружених станів лопатей вертольотів при наявності небезпечних дефектів. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2015. Вип. № 11(18)
3. Б.С.КАРПІНОС, О.П.ЛОБУНЬКО, О.В.Коровін, С.М. Кузьмін. Залишковий ресурс пошкоджуваних лопаток компресорів авіаційних двигунів. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2012.Вип.№15

FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF RESOURCE-RESOLVING ELEMENTS OF AVIATION EQUIPMENT OF THE AIR FORCE OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE

B.Karpinos[a], V.Shostak[b], A. Shulhin[b] , P.Kovel[b], V.Samuleev[b]

[a]G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine,

[b]State Research Institute of Aviation

The developed modeling algorithm made it possible to quickly prepare a solution for each case of damage, especially after extreme loading conditions of an aircraft or helicopter, as well as after their damage. The use of the methodology of fracture mechanics has shown its effectiveness in determining the consequences of the impact of volumetric and surface damage on the onset of the critical state.

Плоскі задачі механіки термодеструктивних матеріалів за високих температур

М. К. Кучер[1], Д.С. Авраменко

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] kucher@ipp.kiev.ua

Ключові слова: тканий композит, ефективні характеристики матеріалів, деформування міцність, високі температури, нерівномірне нагрівання композита.

За високих температур в композиті відбувається незворотна зміна всіх тепломеханічних і теплофізичних характеристик матеріалу, яка має нелінійний характер і залежить від тривалості витримки при високій температурі.

Плоска задача термомеханіки може бути описана рівняннями, що враховують тепломасоперенесення складових композита [1].

Орієнтуємо осі Ox_k декартової системи координат таким чином, щоб вони були перпендикулярним до початкових ниток основи і утка. Тоді для випадку плоскої деформації:

$$u_3 = 0;\ \ u_1 = u_1(x_1, x_2);\ \ u_2 = u_2(x_1, x_2)$$
$$\theta = \theta(x_1, x_2);\ \ \rho_g = \rho_g(x_1, x_2);\ \ \varphi_b = \varphi_b(x_1, x_2), \tag{1}$$

тут u_k – компоненти вектора переміщень u.

Тоді рівняння тепломасоперенесення волокон в системі координат Ox_k набувають вигляду:

– зміни маси полімерної фази матриці: $\rho_b \frac{\partial \varphi_b}{\partial t} = -J$; (2)

– фільтрації газової фази в порах композиційного матеріалу:

$$\frac{\partial \rho_g \varphi_g}{\partial t} = \sum_{n=1}^{2} \frac{\partial}{\partial x_n}\left(RK_{nn} \frac{\partial p_g \theta}{\partial x_n}\right) + J\Gamma; \tag{3}$$

– теплоперенесення в аблюючому матеріалі:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum_{n=1}^{2} \frac{\partial}{\partial x_n}\left(k_n \frac{\partial \theta}{\partial x_n}\right) + Rc_g \sum_{n=1}^{2} K_{nn} \frac{\partial \theta}{\partial x_n} \frac{\partial p_g \theta}{\partial x_n} - J\Delta\, e^0. \tag{4}$$

Рівняння рівноваги $\nabla_x \cdot \sigma - \nabla_x \varphi_g p = 0$, $\mathrm{x} \in V$, співвідношення Коші $\varepsilon = {}^1\!/_2\,(\nabla_x \otimes \mathrm{u} + (\nabla_x \otimes \mathrm{u})^T)$, $\mathrm{x} \in V$ і рівняння сумісності деформацій $\epsilon_{pqs}\epsilon_{nkl} \frac{\partial \varepsilon_{sk}}{\partial x_q \partial x_l} = 0$, де ϵ_{pqs} та ϵ_{nkl} – символи Леві-Чівіти, записуються так:

$$\sum_{l=1}^{2} \frac{\partial \sigma_{nl}}{\partial x_l} - \frac{\partial \varphi_g p}{\partial x_n} = 0;\ \ \frac{\partial \sigma_{33} - \varphi_g p}{\partial x_3} = 0; \tag{5}$$

$$\varepsilon_{nl} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_n}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_n}\right); \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2} - 2\frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 x_2} = 0;\ \ \mathrm{n, l} = 1, 2. \tag{7}$$

Рівняння стану для типового ортотропного термодеструктивного композита у випадку плоскої задачі в обраній системі координат *Ox*k мають вигляд:

$$\varepsilon_{nn} = \overset{o}{\mathcal{E}}_n + \frac{1}{E_n}\left(\sigma_n + \tilde{f}_n p - \nu_{nl}\left(\sigma_l + \tilde{f}_l p\right) - \nu_{nk}\left(\sigma_k + \tilde{f}_k p\right)\right); \tag{8}$$

n = 1, 2; l, k = 1, 2, 3; n ≠ l ≠ k; $\varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{2G_{12}}$,

Пружні характеристики E_n, ν_{nl} і G_{12} залежать від температури θ і часу нагрівання t і визначаються за формулами:

$$E_2 = E_f^0(1-\zeta)a_{\theta 1}; \quad E_3 = E_f^0\zeta a_{\theta 1};$$
$$E_1 = E_b^0 a_{\theta 2}; \quad G_{12} = G_b^0 a_{\theta 1}; \nu 23 = \text{const}; \ \nu 13 = \text{const}; \ \nu 12 = \text{const}. \tag{9}$$

Функція $a_{\theta 1}$ описує зміну пружних властивостей композиту в разі розтягування і зсуву в площині тканини під час нагрівання, а $a_{\theta 2}$ – під час розтягування в трансверсальному напрямі та міжшарових зсувах. Із (8) з урахуванням узагальненого вектора H_ζ находимо вираз для напруження σ_{33}:

$$\sigma_{33} = p\,\tilde{f}_3 - \frac{\nu_{23}E_3}{E_2}\left(\sigma_{22} + \tilde{f}_2 p\right) - \frac{\nu_{13}E_3}{E_1}\left(\sigma_{11} + \tilde{f}_1 p\right) + E_3\overset{\circ}{\varepsilon}_3 \tag{10}$$

Теплові деформації тканого аблюючого композита розраховуються за формулою:

$$\overset{\circ}{\varepsilon}_k = \left(\alpha_f\varphi_f A_k + \alpha_b\varphi_b\Omega_k\right)\cdot(\theta-\theta_0) + \alpha_p\Omega_k\int_0^t(\theta(t)-\theta(\tau))\dot{\varphi}_p\,d\tau - \beta_p\Omega_k\varphi_p \tag{11}$$

$k = 1, 2, 3,$

де $A_1 = 1 - \frac{\vartheta_m^2}{2} + \frac{\vartheta_m^2\tilde{a}_f}{2\varphi_f\tilde{a}_2}$; $A_2 = \frac{\vartheta_m^2}{2} + \left(1 - \frac{\vartheta_m^2}{2}\right)\frac{\tilde{a}_f}{\varphi_f\tilde{a}_2} + \left(\frac{\zeta}{1-\zeta}\right)\frac{m_E\tilde{a}_5}{a_{\theta 1}}$;

$A_3 = \frac{\vartheta_m^2}{2} + \left(1 - \frac{\vartheta_m^2}{2}\right)\frac{\tilde{a}_f}{\varphi_f\tilde{a}_2} + \left(\frac{\zeta}{1-\zeta}\right)\frac{m_E\tilde{a}_5}{a_{\theta 1}}$; $\Omega_1 = 1 - \frac{\vartheta_m^2}{2} + \frac{\vartheta_m^2}{2}\frac{m_E\tilde{a}_1}{\varphi_f\tilde{a}_2}$;

$\Omega_2 = \frac{\vartheta_m^2}{2} + \left(1 - \frac{\vartheta_m^2}{2}\right)\frac{m_E\tilde{a}_1}{\varphi_f\tilde{a}_2} + \left(\frac{\zeta}{1-\zeta}\right)\frac{m_E\tilde{a}_5}{a_{\theta 1}}$; $\Omega_3 = \frac{\vartheta_m^2}{2} + \left(1 - \frac{\vartheta_m^2}{2}\right)\frac{m_E\tilde{a}_1}{\varphi_f\tilde{a}_2} + \left(\frac{\zeta}{1-\zeta}\right)\frac{m_E\tilde{a}_5}{a_{\theta 1}}$.

У підсумку отримаємо

$$\overset{o}{\mathcal{E}}_n = \left(\alpha_f\varphi_f A_n + \alpha_b\varphi_b\Omega_n\right)(\theta-\theta_0) + \alpha_p\Omega_n\int_0^t\left(\theta(t) - \theta(\tau)\right)\dot{\varphi}_p d\tau - \beta_p\Omega_n\varphi_p, \tag{12}$$
$$n = 1, 2, 3.$$

Для розрахунків теплового розширення й усадки односпрямованого композита за фіксованих швидкостях нагрівання в умовах високих температур необхідно вирахувати концентрації фаз: матриці і волокон. Всі вони визначаються за допомогою інтегралів, що описують зміну густини матриці і волокон.

Коефіцієнти міжфазної взаємодії f_k для тканих композитів приведені на рис. 1. В нашому випадку $f_k = f_m\Omega_k$, $k = 1, 2, 3$.

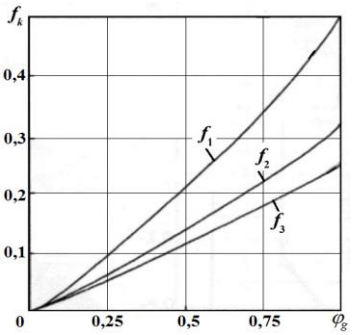


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів міжфазної взаємодії f_k від пористості φ_g тканого композита.

Процес об’ємної абляції полімерної матриці призводить до утворення великої кількості газоподібних продуктів в порах. За певних умов тиск газів в порах може сягати 20 МПа.

Внесок порогового тиску в загальну деформацію визначається функцією f_k, яка суттєво залежить від пористості композита (рис. 1).

Розв’язок систем рівнянь внутрішнього тепломасоперенесення проводили чисельно. При цьому були вибрані константи, що відповідають епоксидному вуглепластику. Розрахунки виконували при наступних значеннях параметрів: φ_g = 0,06; ρ_b = 1200 кг/м^3; ρ_p = 2000 кг/м^3; E_{am}/R = 7500 K; Γ_m = 0,97; J_m^0 =3,3·10^{-5} кг/(м^3·с); σ_T^0 = 74 МПа; σ_C^0 = 80 МПа; σ_S^0 = 48 МПа; E_b^0 = 3,2 ГПа; m_p = 0,3; n_p = 1,3; ν_m = 0,37. Також було прийнято: φ_f = 0,6; ζ = 0,5; Ф = 1°; $\vartheta_{\max}$ = 10°. Тиск потоку на поверхні композита p_e = 0,1 МПа; (a/c_p) = 0,72 кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$ – параметр опромінення (ентальпія газу), ε_w = 0,8. Температуру потоку θ_e, що набігає на пластину варіювали в діапазоні 300…1200°C.

1. Ю.І. Dimitrienko, Termomechanics of Composite Structures under High Temperatures, Springer (2015).

Flat problems in the mechanics of thermally degradable materials at high temperatures

M. K. Kucher[a,1], D. S. Avramenko[a]

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] kucher@ipp.kiev.ua

The effectiveness of predicting elastic properties, taking into account ablation and thermal degradation processes, is analyzed. The relationships characterizing changes in the relative density of the composite at high temperatures are described by thermogravimetric analysis equations obtained at a constant heating rate. Under the influence of high temperatures, two additional phases - pyrolytic and gaseous - emerge in the matrix alongside the polymeric matrix phase and the fibers reinforcing the composite. The proposed scheme of structure formation is based on the hypothesis that all phases coexist simultaneously at any given moment in every volume element of the composite. At high temperatures, an irreversible change in all thermomechanical and thermophysical characteristics of the material occurs in the composite; this change is nonlinear in nature and depends on the duration of exposure to high temperature.

Keywords: woven composite, material performance, deformation strength, high temperatures, non-uniform heating of the composite.

Microstructure and mechanical properties of Cu-Al-Mn-Ni shape memory melt spun ribbons subjected to cycling heat treatment

G. Chyzhyk[a,b], Ł. Rogal[a], T. Warski[c], Ł. Hawełek[c], J. Kasprzycki[a], R. Chulist[d], M. Godlewski[d], W. Maziarz[a]

[a]Institute of Metallurgy and Materials Science, the Polish Academy of Sciences, Krakow, Poland.
[b]G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[c]Łukasiewicz Research Network – Institute of Non-Ferrous Metals, Gliwice, Poland.
[d]Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, AGH University of Krakow, Krakow, Poland.

Keywords: melt-spun ribbons, cycling heat treatment, shape-memory alloy, tensile tests, pseudoelastic effects

The implementation of advanced functional materials, in particular alloys exhibiting magnetic shape memory and pseudoelastic effects, as elements of cooling devices whose operating principle is based on the elastocaloric effect represents a promising alternative to conventional vapor-compression technologies used in air-conditioning and refrigeration systems [1]. Such materials should be characterized by relatively low stresses required to induce the reverse martensitic transformation, stability under repeated loading cycles, minimal defect accumulation without significant structural degradation, and high cyclic durability.

One of the approaches to improving the efficiency of the elastocaloric effect is to reduce the required mechanical loads and energy consumption during the working loading cycle. Accordingly, stress-induced martensite formation occurs at lower operational stresses. This tendency is observed in polycrystalline materials with increasing average grain size and is most pronounced in single-crystal alloys [2, 3].

For shape memory alloys, cyclic heat treatment (CHT) is most commonly used to obtain a microstructure with a controlled increase in grain size [3]; however, information on the application of such treatment to melt-spun copper-based ribbons is still limited in the literature.

The subject of this study was to evaluate the influence of CHT on the microstructure and mechanical properties of melt-spun Cu–11,85Al–4,0Ni–3,0Mn shape memory alloy ribbons (wt.%). Thermal treatment was carried out in a protective atmosphere and consisted of heating to 500 °C with a holding time of 30 min, followed by four successive cycles including heating and holding in the single-phase state (900 °C) and subsequent cooling and holding in the two-phase state (500 °C). The total duration of the CHT exceeded 14 h and was completed by water quenching of the ribbons.

Microstructural investigations were performed using optical, scanning (SEM) and transmission electron microscopy, as well as synchrotron radiation diffraction techniques and differential scanning calorimetry (DSC). To evaluate the effect of CHT on the strength characteristics of the shape memory alloy, uniaxial tensile tests at room temperature were carried out for both the as-spun ribbons and those subjected to cyclic heat treatment.

As shown in Fig. 1, the proposed CHT results in an increase in the average grain size from 3 μm to approximately 100 μm. The experimental results indicate that after cyclic heat

treatment the ultimate tensile strength measured at room temperature (Fig. 1b) decreases by nearly 50 % (from 333 MPa to 164 MPa). At the same time, the maximum engineering strain to fracture increases from 4,8 % to 5,2 %.

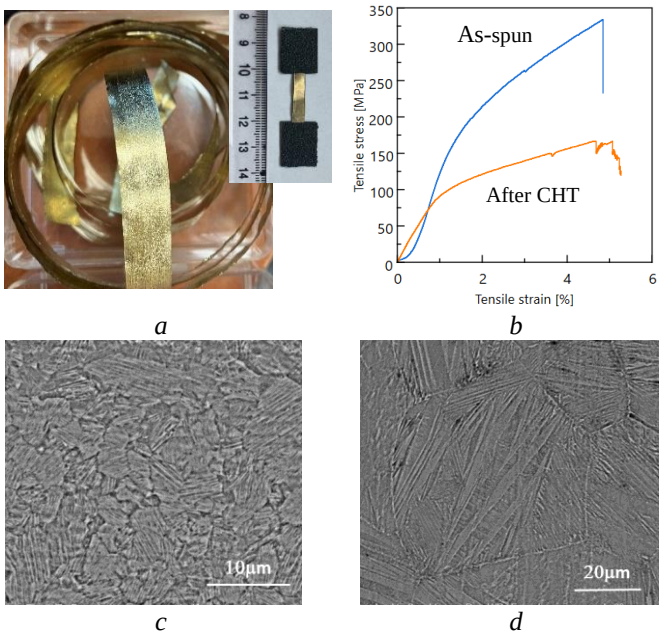


Fig. 1. Images showing: *a* – melt-spun Cu–Al–Ni–Mn ribbon and tensile test specimen; *b* – engineering tensile stress–strain curves of the ribbons tested at room temperature in the as-spun state and after cyclic heat treatment; *c* – SEM-BSE microstructure of the ribbon in the as-spun state; *d* – SEM-BSE microstructure of the ribbon after cyclic heat treatment.

These changes in mechanical properties may be associated with grain coarsening as well as with a variations in the volume fractions of the different martensite types and in the characteristics of their phase transformations. This interpretation is consistent with the results of DSC analysis and synchrotron radiation diffraction, which indicate the formation of a multiphase structure in the ribbons. In the as-spun state, the material is characterized by the stability range of the multiphase $D0_3$ + 2H + 18R structure, where the fraction of the $D0_3$ austenite does not exceed 2,1 %, whereas after cyclic heat treatment the ribbons exhibit the stability range of the 2H + 18R martensitic structure.

Thus, grain coarsening and the change in the martensitic phase balance induced by the proposed CHT lead to a reduction in the stresses required for phase transformations and to an improvement in the pseudoelastic behavior of the melt-spun ribbons.

Acknowledgement. The work was financed by the Institute of Metallurgy and Materials Science of the Polish Academy of Sciences within the statutory work z-12/2025

1. K. Engelbrecht, Future prospects for elastocaloric devices, *J. Phys. Energy*, **1,** 021001 (2019). https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab1573
2. Y. Sutou, T. Omori, R. Kainuma and K. Ishida, Grain size dependence of pseudoelasticity in polycrystalline Cu–Al–Mn-based shape memory sheets, *Acta Mater.*, **61**, 3842–3850 (2013). https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.022
3. T. Kusama, T. Omori, T. Saito, S. Kise, T. Tanaka, Y. Araki and R. Kainuma, Ultra-large single crystals by abnormal grain growth, *Nat. Commun.*, **8**, 354 (2017) https://doi.org/10.1038/s41467-017-00383-0

In-situ formation and tribological properties of friction-induced amorphous carbon films

Zichun Wang[a], Ruoxuan Huang[a1], Jiujun Xu[a], Jingsi Wang[a]

[a]Dalian Maritime University, Dalian, China.

[1] rxhuang@dlmu.edu.cn

Amorphous carbon films exhibit significant potential for interfacial protection owing to their excellent friction-reducing and wear-resistant properties. Hence, this study proposes an innovative strategy: the in-situ formation of amorphous carbon films at interfaces via friction-induced method. Meanwhile, the friction-induced carbon film formation behavior and tribological properties were compared under different carbon source conditions. The results showed that highly concentrated and well-dispersed graphene can effectively enhanced the local order of amorphous carbon films and improved their tribological properties. The amorphous carbon film was produced by the dehydrogenation and carbonization of the lubricating oil catalyzed with Mo nanoparticles added to the oil. A mixed layer with high load-carrying capacity and catalytic activity was formed beneath the carbon film. The consumption and deposition of the amorphous carbon film was dynamically balanced during the wear process. This friction-induced in situ amorphous carbon film formation strategy provides a new approach to mitigating structural degradation and wear failure of material surfaces under friction.

Keywords: friction-induced, in-situ formation, amorphous carbon films.

Удосконалення моделювання прогресуючого обвалення об’єкта будівництва на прикладі реального аварійного впливу

І. К. Фесун[1], М. О. Вабіщевич[2]

Київський національний університет будівництва і архітектури

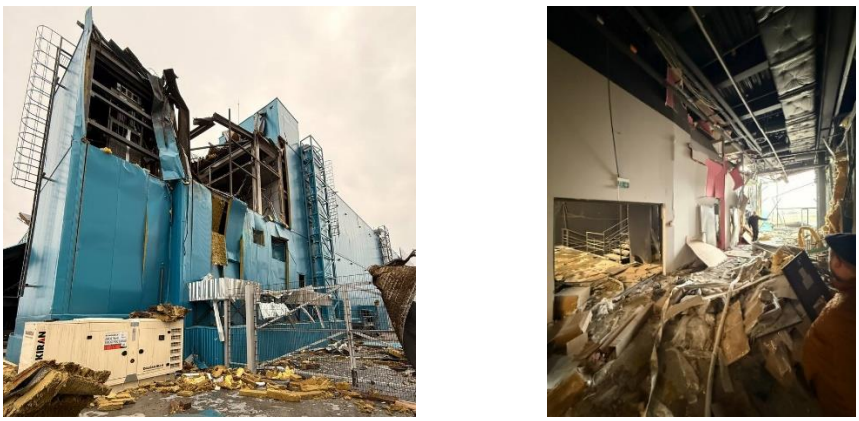
[1] fesuni99@gmail.com

[2] vabix@ukr.net

Ключові слова: моделювання, прогресуюче обвалення, раптове видалення, динамічний метод, пошкодження, руйнування.

Чинні нормативні підходи визначення стійкості до прогресуючого обвалення, регламентовані вітчизняними [1] та закордонними стандартами [2, 3], зазвичай базуються на принципі незалежності від типу загрози. Це відбувається шляхом моделювання раптового видалення однієї колони або іншої вертикальної несучої конструкції з розрахункової схеми [5]. Згідно із даними статистичних досліджень випадків прогресуючого обвалення [4], такий підхід є вірогідним, однак, не повною мірою відображає реальні сценарії обвалення, зокрема не враховує характер причини аварії конструкції та її вплив на сусідні елементи. На основі результатів серії верифікаційних чисельних розрахунків [6], сформовано ефективну методику розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого обвалення, що базується на динамічному методі (пряме інтегрування рівнянь руху за часом).

Для апробації методики виконано чисельне моделювання реального обвалення конструкцій, що виникло внаслідок аварійного впливу на громадську будівлю каркасного типу У березні 2025 року будівля зазнала уражаючої дії БпЛА, а саме дрону-камікадзе типу «Shahed». Влучання відбулося у верхній кут будівлі, що призвело до локального руйнування ділянки головної балки покриття, на яку спирається прогін. На рис. 1 представлено руйнування та пошкодження, що виникли внаслідок аварійного впливу.



а *б*

Рис. 1. Пошкодження будівлі внаслідок аварійного впливу: *а* – вид ззовні; *б* – вид зсередини.

Виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку за традиційною нормативною методикою раптового видалення одного елемента та за уточненим підходом, що базується на відтворенні фактичної картини руйнувань. Основну увагу приділено дослідженню ефекту динамічного розвантаження конструктивної системи, спричиненого миттєвим руйнуванням легких огороджувальних елементів та покрівлі вибуховою хвилею. Отримані дані підтверджують високу збіжність уточненої моделі з реальним станом об’єкта та дозволяють зважено оцінити залишковий ресурс пошкоджених конструкцій для прийняття рішень щодо їх подальшого відновлення.

1. ДСТУ 9294:2024. Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. Чинний від 2025-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2025. 45 с.
2. General services administration. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. Official edition. 2016. 203 p.
3. UFC 4-023-03. Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. Official edition. Department of Defense (DoD), 2009. 244 p.
4. Fesun I. K., Vabishchevich M. O., Lukashevych D. Y. Analysis of foreign experience in research cases of progressive collapse of buildings and structures. *Modern construction and architecture*. 2024. No. 10. P. 45–53.
5. Вабіщевич М.О., Фесун І.К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи // *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 256-263.
6. Фесун І. К. Верифікація чисельних моделей прогресуючого обвалення сталевих рам за даними експериментального дослідження. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 113. С. 176–186

Improving the modeling of progressive collapse of a building structure using the example of a real emergency impact

I. Fesun[a1], M. Vabishchevich[a2]

[a]Kyiv National University of Construction and Architecture

[1] fesuni99@gmail.com

[2] vabix@ukr.net

A comparative analysis was performed of the results of stability calculations against progressive collapse using the traditional standard method of sudden removal of a single element and a refined approach based on recreating the actual damage pattern. The main focus was on investigating the effect of dynamic unloading of the structural system caused by the instantaneous failure of lightweight enclosure elements and the roof due to the blast wave. The obtained data confirm the high consistency of the refined model with the actual condition of the structure and allow for an objective assessment of the remaining service life of the damaged structures to inform decisions regarding their further restoration.

Keywords: modeling, progressive collapse, sudden removal, dynamic method, damage, failure.

Оцінювання похибки вимірювань під час визначення рівня дефектності флоат-скла

М. О. Цисар[1], В. В. Хворостяний, М. А. Долгов, Р. С. Старинко, В. Є. Бодунов

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] ts_maxim@ukr.net

Розглянуто комбінований підхід до дефектоскопії поверхні флоат-скла. Зазначено ряд труднощів, що виникають під час дослідження поверхневих дефектів прозорих матеріалів. Відмічено, що класичний підхід оптичної мікроскопії, який є непрямим методом, визначає відносну величину лінійних розмірів дефектів. Похибка оптичного методу складає до 5% від лінійних розмірів дефектів, а саме: довжини та ширини. Використання комбінованого підходу, в якому поряд з оптичним мікроскопом використовується профілометр, дозоляє вводити коригувальний коефіцієнт. В цьому випадку відхилення буде складати 17% від розміру пікселя, а саме 0,27 мкм. Даний підхід дозволив зменшити відносну похибку вимірювань до 1%.

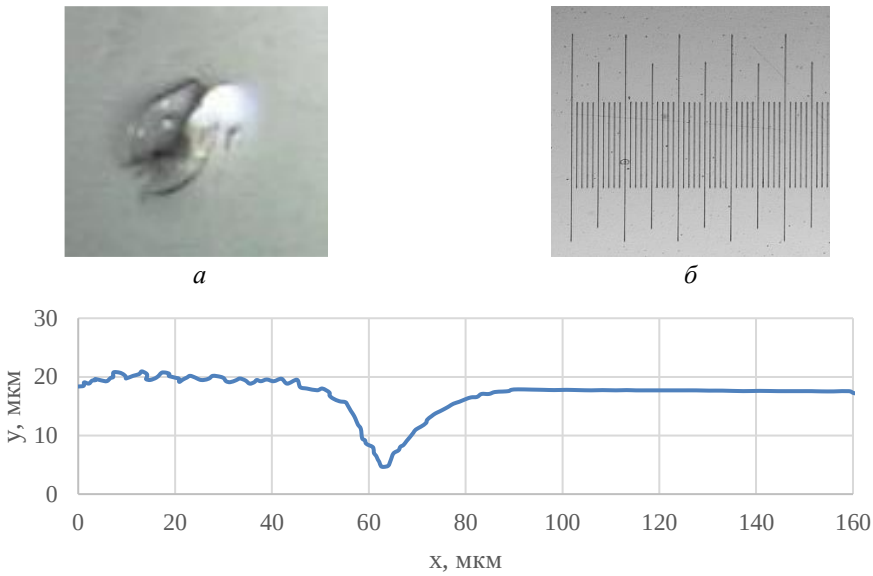
Ключові слова: дефектність, похибка, прямий метод вимірювання, флоат-скло.

Візуальний контроль – це єдиний тип неруйнівного контролю, що є обов'язковим для всіх типів виробництв та об'єктів експлуатації. Перевагою цього типу контролю є доступність та простота методів вимірювання. Метою даного контролю є виявлення дефектів поверхневих тріщин, наявність розшарувань, забоїн, раковин, включень, підрізів тощо. Невід'ємною частиною візуального контролю є вимірювальний контроль. Вимірювальний контроль – перевірка відповідності об'єктів дослідження нормативній документації. Метрологічними показниками є ціна поділок, діапазон вимірювання, межа допустимої похибки вимірювань, допустима похибка засобів вимірювальної техніки та межа вимірювань.

Вимірювання за способом отримання результатів можна розділити на прямі, непрямі, абсолютні та відносні. Прямі, це такі, де досліджувана величина отримується безпосередньо з експерименту. Відносні, це такі, де досліджувана величина x визначається за допомогою технічних засобів, числове значення яких визначається згідно з співвідношенням її до величини X, яка приймається за одиницю вимірювання (масштаб m) [1]:

$$x=X\cdot m. \tag{1}$$

Більшість конструкційних матеріалів є непрозорими, що спрощує використання оптичних методів вимірювання та дозволяє обмежуватись виключно ними, наприклад, методом оптичної мікроскопії. Флоат-скло є прозорим, тому під час досліджень мікро дефектів є ризик некоректного визначення їх меж внаслідок виникнення вздовж периметра так званої хмари світіння, що може інтерпретуватись експериментатором як частина дефекту, так і навпаки, відповідно збільшуючи чи зменшуючи його розмір. Для уникнення фактору спостерігача рекомендується використовувати декілька методів вимірювання, що дозволять зменшити ризик викривлення експериментальних даних. Тому було запропоновано поряд з оптичними методами (рис. 1, *а*, *б*), використовувати метод поверхневої профілометрії (рис. 1, *в*).



а *б* *в*

Рис. 1. Аналіз дефекту на поверхні флоат-скла: *а* – оптичне зображення дефекту; *б* – зображення контрольного об'єкт-мікрометра; *в* – профіль поверхні з наявним дефектом.

Абсолютна похибка вимірювання для вимірюваної величини $x_{вим}$ визначається за формулою [1]:

$$\Delta x = x_{вим} - x. \quad (2)$$

Так похибка оптичного вимірювання складає ±1 пікс, що відповідає 1,62 мкм, а похибка для методу профілометрії складає кратності кроку сканування, тобто 0,12 мкм.

Відносну похибку визначають за співвідношенням абсолютної похибки до істинного значення величини відтворюваної міри [1]:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} 100\%. \quad (3)$$

Так використовуючи виключно оптичний метод для дефекту на рис. 1, *а* максимальним розміром 30 мкм, величина δ буде складати 5%. Введення коригувального коефіцієнту відповідно до отриманого профілю дефекту дозволяє зменшити відхилення з 1,62 до 0,27 мкм, а відносну похибку вимірювання – до 1%.

1. Стухляк П. Д., Іванченко О. В., Букетов А. В., Долгов М. А. *Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація)*, Херсон: Айлант (2011).

Evaluation of measurement errors during the determining the level of float glass defects

M. Tsysar[a1], V. Khvorostianyi[a], M. Dolgov[a], R. Starynko[a], V. Bodunov[a]

[a] G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] ts_maxim@ukr.net

A combined approach to the surface defectoscopy of float glass is described. A number of difficulties arising during the study of surface defects in transparent materials are highlighted. It is noted that the classical approach of optical microscopy, which is an indirect technique, determines the relative magnitude of the linear dimensions of defects. The error of the optical technique is up to 5% of the linear dimensions of defects, namely: length and width. The combined approach, which uses a profilometer together with an optical microscope, allows for the addition of a correction factor. In this case, the deviation will be 17% of the pixel size, namely 0.27 μm. This approach has allowed the relative measurement error to be reduced to 1%.

Keywords: defectiveness, *error*, direct measurement *technique*, float glass.

Опір руйнуванню крихких матеріалів при мікродряпанні зі сколюванням кромки

В. В. Хворостяний[а1], В. І. Закієв[б], Ю. І. Смірнов[б], М. А. Долгов[а], Є. Г. Гогоці[в], М. О. Цисар[а], А. В. Кравчук[а]

[а] Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б] Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
[в] Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

[1] plt2002@ukr.net

Ключові слова: крихкі матеріали, скло, кераміка, скрейч-тестер, дряпання до сколювання кромки, опір руйнуванню, пошкоджуваність, мікро- та макродіапазон навантаження.

Наведено реалізацію експериментального методу дослідження механічної поведінки крихких матеріалів в умовах локального крайового сколювання в мікродіапазоні прикладеного навантаження. Описано методологічні аспекти проведення випробувань та вказані основні переваги, що пов'язані з суттєвим підвищенням точності вимірювань та визначення шуканих механічних характеристик таких як пошкоджуваність поверхні та кромки, а також її опір руйнуванню. Виконано якісне порівняння результатів експериментальних досліджень у мікро- та макродіапазонах навантаження, що при їх сумісному розгляді дає змогу точніше та інформативніше визначати особливості руйнування крихких матеріалів.

Крихкі неметалеві матеріали такі як конструкційна кераміка та силікатне скло знаходять широке застосування в різних галузях промисловості завдяки своїм особливим фізичним та хімічним властивостям. Попри притаманний крихкий характер руйнування, такі матеріали все частіше розглядаються як незамінні та вкрай важливі складові технічних виробів не лише функціонального, але й конструкційного призначення. Вдосконалення та розробка нових більш технологічних пристроїв мікроелектроніки, телекомунікаційного обладнання, сучасних елементів у приладобудуванні та медицині не можливо уявити без використання різноманітної технічної кераміки та оптичного скла. Спектр їх застосування включає виготовлення різних радіокомпонентів, тензоперетворювачів, МЕМС-датчиків, захисного та оптичного скла фотоніки, реставраційних елементів стоматологічного протезування та ортопедичного відновлення, зносостійких деталей машинобудування та різального інструменту тощо.

Визначення фізико-механічних характеристик крихких матеріалів таких як мікротвердість, повзучість, модуль пружності та стійкість до дряпання зазвичай відбувається за допомогою методів мікроіндентування та склерометрії з використанням сучасного експериментального устаткування – харднес/скрейч-тестерів, що можуть бути як великогабаритних, так й порівняно компактних розмірів. Одним із перспективних та ефективних методів дослідження пошкоджуваності та опору руйнуванню крихких матеріалів при локальних навантаженнях може вважатися метод крайового сколювання (Edge Fracture method або EF метод) [1]. Його суть полягає у визначенні опору сколюванню за даними прикладеного до індентора нормального зусилля на деякій відстані від кромки зразка, що призводило до її

руйнування з утворенням сколу. Модифікація цього експериментального підходу зумовила появу методу дряпання індентором поверхні зразка до моменту сколювання краю, що отримав назву Scratch + Edge Fracture method або ж S+EF метод [2]. Загалом ці методи випробувань достатньо прості та зручні у практичному їх використанні. В них уникають похибок, пов'язаних з оперуванням спрощених чи модельних уявлень дійсної механічної поведінки крихких матеріалів при руйнуванні. Усі методичні аспекти виконання експериментальних досліджень методами крайового сколювання в макродіапазоні навантаження викладено в міжнародному нормативному документі CEN/TS 834-9:2010(E). Слід зазначити, що залежно від матеріалу та типу застосованого індентора розмір пошкодження кромок внаслідок сколювання (параметр відстані руйнування) варіювався від 10…20 мкм до 0,5…0,6 мм (для «гострих» інденторів Віккерса, Кнуппа, Берковича чи конічного скрайбера) або ж від 0,1…0,2 мм до 0,5…1,0 мм (для «тупих» інденторів Роквелла та сферичних наконечників з вершиною радіусом від декількох сотень мікрон до декількох міліметрів) [3]. Проте технічні вироби мікроелектроніки чи приладобудування, що виготовлені з крихких матеріалів та мають мініатюрні розміри, достатньо часто зазнають мікроруйнувань з типовими площами контакту у декілька одиниць чи десятків мікрон. Саме це зумовлює актуальність науково-дослідних робіт із використанням методів мікросколювання кромок зразків крихких матеріалів, що варто розглядати як логічний крок перенесення методики на інший масштабний рівень для можливості вивчення закономірностей їх локального руйнування.

Реалізація запропонованого експериментального підходу здійснювалася на універсальному мікрохарднес/скрейч тестері «Micron-gamma» [4]. Ця методика відрізнялася від «класичної» для випадку макронавантаження кромки тим, що для визначення опору руйнуванню використовували склерограми, які реєструвалися в процесі дряпання з наступним сколюванням кромки. Водночас зникала необхідність в мікрофотографуванні випробуваної кромки зразка. Схематичне зображення виконання випробування S+EF методом у мікродіапазоні прикладеного до індентора навантаження наведено на рис. 1.

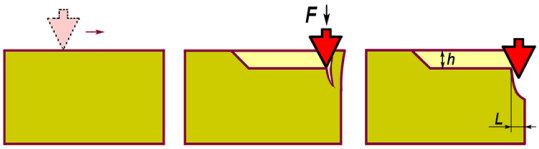
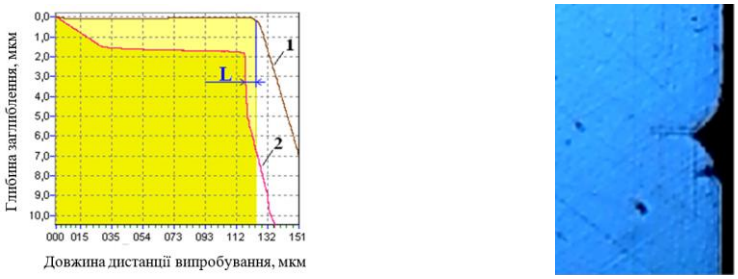


Рис. 1. Модель проведення експерименту S+EF методом у мікродіапазоні навантаження:
F – прикладене зусилля при дряпанні індентором (в грамах); *h* – глибина подряпини (в мкм);
L – відстань сколювання кромки (в мкм).

Безпосереднє дослідження крихких матеріалів проводилося у два етапи. Спочатку встановлювали індентор на відстані 100…300 мкм від кромки зразка і сканували ним поверхню в напрямку перпендикулярному кромці без прикладення зусилля для реєстрації профілю кромки (рис. 2, *а*, крива 1). Потім повертались назад у початкове положення та з нього починали дряпання індентором з постійним зусиллям *F* з одночасною реєстрацією нормальних переміщень індентора (рис. 2, *а*, крива 2). Величина *L* визначалася як різниця між кромками профілограми та склерограми і була шуканим параметром випробування S+EF методом у мікрорежимі навантаження. Порівнюючи вимірювання відстані сколювання кромки *L* за мікрофотографією та

вище вказаним способом можна пересвідчитися в тому, що в останньому випадку не враховувалися додаткові її пошкодження внаслідок падіння індентора після того як відбувався скол. Слід відзначити, що такий підхід дозволяє визначати ключовий емпіричний параметр сколу кромки за діаграмами, одержаними при дряпанні поверхні зразка крихкого матеріалу до та після процесу сколювання. Таким чином можна значно підвищити точність визначень зі спрощенням виконання процедур вимірювання величини L.



а *б*

Рис. 2. Профілограма вихідної кромки (крива 1 – без навантаження) та склерограма при дряпанні індентором Берковича поверхні зразка полікристалічного кремнію (крива 2 – прикладене навантаження 40 г) (*а*); мікрофотографія крайового сколу з відстанню руйнуванню L=7 мкм (*б*).

За експериментальними результатами обчислювали характеристику опору руйнуванню матеріалу F_{RS} як середнє значення відношення руйнівного навантаження F до відстані руйнування L для всього масиву вимірювань [1, 2]. Особливий інтерес становило порівняння даних за двома режимами навантаження індентором у мікро- та макродіапазонах зусилля. Якісна оцінка такого зіставлення результатів випробувань різної кераміки та оптичного скла була виконана використовуючи дані роботи [2] для S+EF методу в макродіапазоні навантаження (табл. 1). Спостерігалися однакові закономірності при розгляді співвідношень значень опору руйнуванню досліджуваних матеріалів, що засвідчувало правомірність використання цих характеристик.

Таблиця 1.

Результати визначення опору руйнуванню F_{RS} крихких матеріалів в експериментах S+EF методом в макро- та мікродіапазоні навантаження

Режим навантаження	Скло оптичне	Діоксид цирконієва кераміка Y-TZP та Mg-PSZ		Полікристалічний кремній
	(ТФ2/ЛК5)	(Y-TZP-1/Y-TZP-2)	(TS/TS-grade)	Si
Макро	109±21 (49)*	331±26 (60)	316±29 (42)	106±16 (84)
Мікро	57±21 (10)	126±14 (10)	91±12 (8)	57±8 (8)

*Примітка. В дужках вказана кількість проведених випробувань.

Очевидно, що сумісний аналіз таких результатів, одержаних на різномасштабних рівнях експлуатаційного впливу може слугувати важливим підґрунтям для прогнозування працездатності, несівної здатності та ресурсу відповідальних елементів конструкцій з крихких матеріалів.

Застосування методу дряпання індентором поверхні до сколювання кромки зразка крихкого матеріалу в мікродіапазоні навантаження на спеціалізованому

експериментальному устаткуванні дає змогу з'ясовувати дійсні положення точок прикладення навантаження при сколюванні кромок з точністю до 1 мкм, визначати зусилля сколювання з точністю до 0,1 г, реєструвати глибину заглиблення індентора в момент сколювання кромки з точністю до 5 нм, вимірювати пластичне зміщення краю до крихкого його руйнування завдяки запису діаграми заглиблення індентора, підвищувати продуктивність експериментальних досліджень, в тому числі використовуючи значно меншу кількість зразків та об'ємів матеріалу. Поєднуючи результати випробувань у мікро- та макромасштабі навантаження можна одержувати більш цілісну картину механічної поведінки крихких матеріалів в умовах локального крайового руйнування.

1. G. A. Gogotsi, V. I. Galenko, S. P. Mudrik et al., Glass fracture in edge flaking, Strength Mater, 39, 639 – 645 (2007). https://doi.org/10.1007/s11223-007-0072-7
2. V. V. Khvorostyanyi, Fracture resistance of brittle materials under local loading by scratching to edge chipping. Part. 2. The S+EF relation for linear elastic ceramics, Strength Mater, 53, 449 – 457 (2021). https://doi.org/10.1007/s11223-021-00305-y
3. V. Y. Galenko, V. V. Khvorostyanyi, Estimation technique for the edge chipping resistance of brittle materials, Strength Mater, 55, 302 – 308 (2023). https://doi.org/10.1007/s11223-023-00525-4
4. I. Zakiev, M. Storchak, G. A. Gogotsi et al., Instrumented indentation study of materials edge chipping, Ceram Int, 47, 29638 – 29645 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.133

Fracture resistance of brittle materials during micro-scratching with edge chipping

V. Khvorostianyi[a1], V. Zakiev[b], Y. Smirnov[b], M. Dolgov[a], H. Gogotsi[c], M. Tsysar[a], A. Kravchuk[a]

[a] G. S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b] State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine.
[c] Institute for Problems of Materials Science National Academy of Sciences in Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] plt2002@ukr.net

An experimental method for studying the mechanical behavior of brittle materials under conditions of local edge chipping at the micro-level of applied load is presented. The methodological aspects of the proposed tests are described, and the main advantages, including a significant increase in measurement accuracy and the determination of desired mechanical characteristics, such as surface and edge damageability and resistance to fracture, are highlighted. A qualitative comparison of the results of experimental studies in the micro- and macro-loading ranges is performed, which, when considered together, allows for a more accurate and informative determination of the fracture features of brittle materials.

Keywords: brittle materials, glass, ceramics, scratch tester, scratching to chipping edge, fracture resistance, damage, micro- and macro- loading range

Корекція діаграми індентування з урахуванням притуплення індентору та початкового контакту

В. І. Закієв[а1], В. В. Хворостяний[б], І. М. Закієв[а], С. В. Ковальов[в], Д. В. Попов[а]

[а]Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
[б]Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[в]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1] zakiev@ukr.net

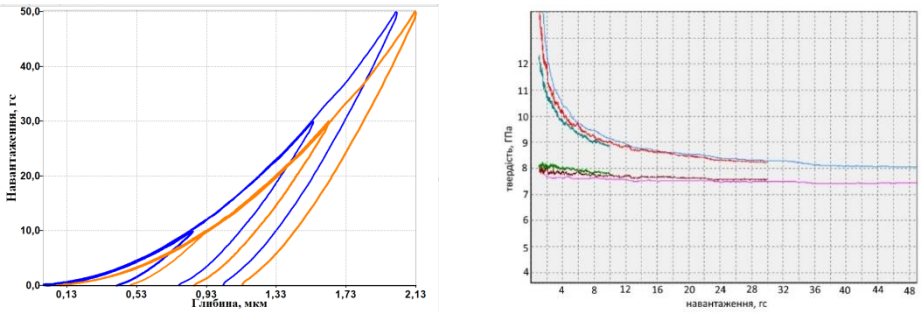
Ключові слова: діаграма індентування, твердість, крихкі матеріали, скло, розмірний ефект

Методи вимірювання твердості знайшли широке застосування в інженерній практиці та при наукових дослідженнях, оскільки за допомогою швидкого тесту можна оцінити матеріал. Методика інструментального індентування, запропонована в подальшому, суттєво розширила можливості вимірювань. Експериментальні результати представляються у вигляді діаграми індентування, обробка якої значно розширює можливості методу та дозволяє визначити твердість, модуль пружності, характеристику пластичності, параметри повзучості та інші властивості матеріалів.

Незважаючи на те, що сучасні прилади оснащені датчиками, що дозволяють реєструвати переміщення індентора з нанометровою роздільною здатністю при переході від макро- до мікро/наноіндентування виникає низка специфічних фізичних та інструментальних проблем, які суттєво впливають на результати вимірювань: пружна деформація приладу, форма індентору, шорсткість поверхні, напливи та прогини навколо відбитку, тепловий дрейф та визначення початкової точки контакту.

Узагальнено, масштабний ефект при мікро/наноіндентуванні проявляється як суттєве підвищення виміряної твердості при зменшенні глибини. В результаті порушується інваріантність показника твердості матеріалу, що ускладнює порівняння результатів вимірювань, отриманих при різних навантаженнях. В роботі [1] запропонована методика коригування діаграми індентування з урахуванням специфічних особливостей початкового контакту індентора та його затупленості.

Експериментально показана ефективність методики корекції для визначення твердості крихких матеріалів при малих навантаженнях. Методом інструментального індентування при різних навантаженнях проведені вимірювання твердості зразка оптичного скла на приладі «Micron-gamma» [2] індентором Берковича. На рис. 1, *а* представлені діаграми, зареєстровані при різних навантаженнях до (сині) та після коригування (оранжеві). Криві індентування мають гарну повторюваність, що є ознакою структурної гомогенності та відсутності локальних дефектів. Незважаючи на це, розраховані значення твердості збільшуються при зменшенні навантаження. На рис. 2, *б* наведені графіки залежності твердості за Меєром ($H=P/24{,}5\cdot h^2$) від навантаження до та після коригування, глибина (h) визначається з кривої навантаження. З отриманих даних видно, що після коригування криві зміщуються, збільшуючи глибину проникнення індентора, обумовлену неідеальною геометрією індентора і похибками визначення початкового моменту контакту.



а *б*

Рис. 1. Результати вимірювань зразка оптичного скла при різних навантаженнях до та після корегування: *а* – діаграми індентування; *б* – залежність твердості від навантаження.

Залежності твердості від навантаження для вихідних діаграм (верхня група кривих) стрімко збільшуються при малих навантаженнях, тоді як для коригованих діаграм (нижня група кривих) збільшення незначне. Застосування методики, суть якої полягає в побудові теоретичної кривої, що базується на ідеалізованій геометрії індентора, дозволяє змоделювати плавний характер проникнення індентора на початковому етапі і забезпечує постійність значень твердості при різних навантаженнях.

1. S. A. Firstov, S. R. Ignatovich, I. M. Zakiev, Size effect in the micro- and nanoindentation and its compensation with regard for the specific features of initial contact, *Strength Mater*, **41**, 147–155 (2009). https://doi.org/10.1007/s11223-009-9116-5
2. I. Zakiev, M. Storchak, G. A. Gogotsi, V. Zakiev, Y. Kokoieva, Instrumented indentation study of materials edge chipping, *Ceram Int*, **47**, 29638 – 29645 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.133

Indentation diagram correction taking into account tip bluntness and initial contact

V. Zakiev[a1], V. Khvorostianyi[b], I. Zakiev[a], S. Kovalyov[c], D. Popov[a]

[a]State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine
[b]G. S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the NASU, Kyiv, Ukraine
[c]Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

[1] zakiev@ukr.net

Keywords: indentation diagram, hardness, brittle materials, glass, size effect

The effectiveness of the indentation diagram correction method, taking into account the initial contact and indenter geometry, for measuring the hardness of brittle materials by instrumented indentation at low loads, is confirmed. The use of the correction method ensures consistency in hardness values across different loads, allowing comparison of measurement results obtained at different loads.

Оцінка границі витривалості металевого матеріалу за його характеристиками пружно-пластичних властивостей і мікроструктури

О. М. Герасимчук

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

o.gerasimus@gmail.com

Ключові слова: границя витривалості, мікроструктурно коротка тріщина, критична відстань, розтяг-стиск, циклічний згин, асиметрія циклу навантаження.

Для оцінки границі витривалості гладких зразків із металевого матеріалу, які знаходяться в умовах багато-циклової втоми під дією одновісного змінного (циклічного) напруження розтягу-стиску, використовується факт наявності на рівні границі витривалості поверхневої плоскої напівкруглої *непоширювальної* мікроструктурно короткої тріщини глибиною в одне зерно. На цій основі, застосовуючи критерії лінійно-пружної (коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) і пружно-пластичної (розкриття вістря тріщини) механік руйнування, запропоновано систему з трьох рівнянь, з якої розраховується границя витривалості. Для симетричного циклу ($R = -1$) маємо:

$$\sigma_{-1} = \frac{E\sqrt{b}}{\sqrt{2\pi F r_e} + Y\sqrt{\pi F d}}, \tag{1}$$

$$F = \frac{1}{2}\left[sec\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_Y}\right) + 1\right], \tag{2}$$

$$r_e = \frac{6\pi(1-\nu)^2\sigma_Y\left[\left(\sqrt{2\pi F r_e} + Y\sqrt{\pi F d}\right)^2 - d\right]}{16E}\left(\frac{\sqrt{2F r_e} + Y\sqrt{Fd}}{Y\sqrt{d}}\right)^2 sec^4(\theta/2), \tag{3}$$

де E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона, $\sigma_Y = \sigma_{0,2}$ – напруження текучості (характеристики пружно-пластичних властивостей, визначаються з випробувань на монотонний розтяг); d – розмір зерна, b – величина вектора Бюргера, θ – кут розорієнтування зерен (характеристики мікроструктури, визначаються з її аналізу); σ_{-1} – границя витривалості за симетричного циклу у термінах максимального напруження циклу σ_{max}; F – поправка Даґдейла на пластичність; Y – геометричний фактор для найглибшої точки фронту поверхневої плоскої напівкруглої тріщини, розраховується залежно від фактору Тейлора M (для зерна, найсприятливіше орієнтованого для зсуву $M = 2$ і $Y = 0{,}67$); $16r_e$ – розкриття вістря короткої тріщини.

Для розрахунку границі витривалості за додатних асиметрій циклу ($R \geq 0$) можна скористатися аналогічною системою рівнянь, але з коригуваннями відповідно до відмінностей пружно-пластичного деформування попереду вістря втомної тріщини за $R = -1$ і $R \geq 0$, а саме, що розмір циклічної пластичної зони попереду вістря тріщини за симетричного циклу у чотири рази менший, ніж за додатних асиметрій, під час однакового рівня рушійної сили тріщини $E\sqrt{b}$.

Для циклічного згину границя витривалості $\sigma_{max,R}^{bend}$ розраховується наступним чином:

$$\sigma_{max,R}^{bend} = \sigma_{max,R}^{tens}/\left(1 - 2l_{c,R}/t\right), \tag{4}$$

де $\sigma_{max,R}^{tens}$ – границя витривалості за циклічного розтягу з асиметрією R; t – товщина зразка; $l_{c,R}$ – «критична відстань», $l_{c,R} = E^2 b/\left(\sigma_{max,R}^{tens}\right)^2$.

Для підтвердження достовірності оцінки за розробленою моделлю було розраховано границю витривалості гладких зразків із конструкційних сплавів різних класів і проведено порівняння з відомими експериментальними даними (рис. 1).

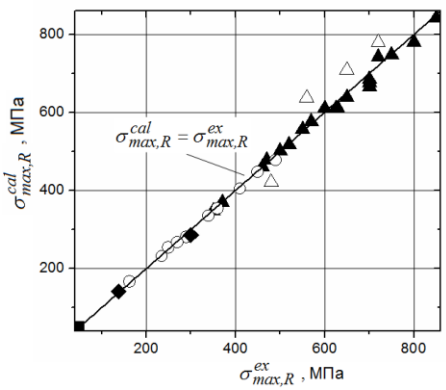


Рис. 1. Порівняння розрахованих границь витривалості з експериментальними даними: ○ – сталі; ◆ – алюмінієві сплави; ■ – магнієві сплави; ▲ – титанові сплави; Δ – титановий сплав Ti-6-4 за додатних асиметрій циклу. Видно добрий збіг розрахунку з експериментом.

Assessment of the endurance limit of a metallic material based on its elastic-plastic properties and microstructure

O. Herasymchuk

G. S. Pysarenko Institute on Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

o.gerasimus@gmail.com

To assess the endurance limit of smooth metal specimens subjected to high-cycle fatigue under uniaxial cyclic tensile-compressive stress, the fact is utilised that, at the endurance limit, a surface-level, plane, semi-circular, non-propagating, microstructurally short crack with a depth of one grain is present. On this basis, applying the criteria of linear-elastic (stress intensity factor (SIF)) and elastic-plastic (crack tip opening displacement (CTOD)) fracture mechanics, a system of three equations is proposed, from which the endurance limit is calculated.

Keywords: endurance limit, microstructurally short crack, critical distance, tension-compression, cyclic bending, load ratio.

Оцінка концентрації напружень в композитній пластині з отвором.

С.О.Тарасовська [a1], С.І.Трубачев [б], О.С.Яковлева [a]

[a]Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

[1] tsa@ipp.kiev.ua

Ключові слова: композитний матеріал, пружні характеристики, концентрація напружень, схема укладки шарів

Композитні матеріали в авіаційних конструкціях набувають все більшої популярності через їх меншу вагу та більшу міцність, що є перспективним для застосування в конструкціях сучасних літаків для забезпечення міцності їх з'єднань. Найбільш вживаними є композити з жорсткими, просторово-орієнтованими волоками чи включеннями. Їх міцність характеризується кутом армування та порядком викладки шарів або кута намотки волокон, об'ємного вмісту волокон та матриці.

Будь-яка конструкція з композитного матеріалу утворюється певною кількістю шарів, що з'єднані між собою, де окремий моношар складається з однонаправлених волокон, орієнтація яких визначає кут армування та матриці. Він має дві перпендикулярні осі симетрії, вздовж яких властивості однакові, тобто моношар є ортотропним. Для дослідження пружних характеристик було вирішено обрати вуглепластик з типовими значеннями характеристик [1]. Проаналізуємо зміну характеристик для ортотропної пари шарів з перехресною структурою армування $[\pm\varphi]$ від кута викладки, 0≤φ≤90°. Розглянемо шаруватий матеріал, що має товщину t та складається з n кількості моношарів, викладених під певними кутами. Закон Гука, що зв'язує напруження і деформації при плоскому напружено-деформованому стані можна записати у вигляді матриці [2]:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & 0\\ A_{12} & A_{22} & 0\\ 0 & 0 & A_{66}\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix} \quad (1)$$

де

$$A_{ij}=\sum_{k=1}^{n}\left(Q_{ij}\right)_k\cdot(h_k-h_{k-1}) \quad (2)$$

k – номер моношару; n – кількість моношарів в пакеті; h_k – векторна відстань від середньої площини пакету (z = 0) до верхньої площини k-го моношару.

Максимальні значення механічних характеристик даного шаруватого композиту спостерігаються для кутів φ=0° та φ=90° для модулів E_x та E_y і при φ=45° для $G_{xy.}$.

Далі в роботі виконана оцінка концентрації напружень в композитній пластині з отвором, зі схемою укладки шарів: [90/-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45]. Використання отворів та болтових з'єднань потребує обчислення діючих в елементах конструкції напружень та оцінку концентрації напружень і режимів руйнування [3, 4]. Досліджується вплив співвідношення $\alpha=\frac{D}{W}$ діаметру до ширини пластини (0,1≤α≤0,6) на значення концентрації напружень в пласкій та об'ємній постановці. Розрахунки проводилися за допомогою пакету ANSYS.

Чисельний розрахунок вказує на значно більшу концентрацію напружень отвору багатошарової композитної пластини, ніж ортотропної пластини з приведеними характеристиками.

1. Kollár L. P., Springer G. S., Mechanics of Composite Structures. Cambridge: Cambridge University Press480 p., ISBN 978-0-521-81410-8 (2003).
2.M. C. Y. Niu**.** *Composite Airframe Structures: Practical Design Information and Data*, Hong Kong: Conmilit Press Ltd., (1992)
3.Song Zhou, Jinhua Zhang, Yi Sun, Kun Tian, Experimental and numerical investigation of open hole carbon fiber composite laminates under compression with three different stacking sequences. *J Mater Res Technol*, 8(3), 2957–2968 (2019).
4. Di Zhang, Xitao Zheng, Tianchi Wu, Damage characteristics of open-hole laminated composites subjected to longitudinal loads. *Composite Structures* 230 111474 (2019).

Estimation of stress concentration in a composite plate with a hole.

S.O.Tarasovska [a1], S.I.Trubachev [б], O.S.Yakovleva[a]

[a]G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[б]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

[1] tsa@ipp.kiev.ua

Composite materials in aircraft structures are becoming increasingly popular due to their lower weight and higher strength, which is promising for use in the structures of modern aircraft to ensure the strength of their connections. The most widely used are composites with rigid, spatially oriented filaments or inclusions. Their strength is characterized by the angle of reinforcement and the order of the layers or the angle of fiber winding, the volume content of fibers and the matrix. The elastic characteristics of carbon tape and carbon fabric are studied. The change in characteristics for an orthotropic pair of layers with a cross-structure of reinforcement [±φ] from the angle of the layout, $0 \le \varphi \le 90°$, is analyzed. An assessment of stress concentration in a composite plate with a hole was performed depending on the ratio of the hole diameter to the plate width.

Keywords: composite material, elastic characteristics, stress concentration, layer arrangement scheme

Обмеження деяких критеріїв міцності анізотропних матеріалів

В. А. Ромащенко, С. О. Тарасовська[1], П. П. Лепіхін, О. С. Бейнер

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] tsa@ipp.kiev.ua

Ключові слова: критерій міцності, анізотропний матеріал.

Дослідженню динамічного напружено-деформованого стану (НДС) і міцності багатошарових намотувальних металокомпозитних (МК) оболонок обертання при внутрішньому вибуху сферичного заряду вибухової речовини (ВР) в повітряному середовищі присвячена незначна кількість теоретичних і експериментальних робіт. Велику актуальність набуває питання вибору критерія міцності, оскільки композитні матеріали (КМ) в більшості випадків суттєво анізотропні, класичні теорії міцності ізотропного тіла стають неприйнятними, а відомі критерії міцності анізотропного середовища як правило суттєво відрізняються між собою і для одного й того ж НДС можуть приводити до суттєво різних результатів не тільки кількісно але і якісно. На сьогодні ця проблема вивчена недостатньо.

Проведено порівняльний аналіз трьох широко відомих критеріїв міцності ортотропного тіла (Хофмана (КХ), узагальненого Мізеса (УКМ) і максимальних напружень (КМН)) відносно можливості їхнього застосування для оцінки міцності композитних циліндрів під внутрішнім тиском. Розглядались нерівноміцні на розтяг-стиск циліндрично трансторопні КМ з коловим армуванням в умовах плоского деформованого стану (ПДС), тому завжди будемо мати лише три компоненти тензора напружень (σ_x , σ_r і σ_φ) які одночасно будуть і головними, і співпадаючими (σ_φ) з кутовим напрямком φ єдиної осі анізотропії. Всі дотичні напруження і деформації тотожно дорівнюють нулю, площини *xr* (φ = const) будуть площинами ізотропії.

Для таких випадків КМН записується так:

$$\Phi = \max\left(\frac{\sigma_x}{Y_T};\frac{\sigma_r}{Y_T};\ -\frac{\sigma_x}{Y_C};\ -\frac{\sigma_r}{Y_C};\frac{\sigma_\varphi}{Y_{\varphi T}};\ -\frac{\sigma_\varphi}{Y_{\varphi C}}\right) < 1 \qquad (1)$$

де $Y\varphi_T$ і $Y\varphi_C$ – границі міцності в коловому напрямку армування при розтягу і стиску відповідно; Y_T і Y_C – те ж саме в площині ізотропії *xr* (φ = const); Φ – функція міцності.

Критерій Хофмана (КХ) і УКМ являються частковими найбільш відомими випадками квадратичного критерія міцності ортотропного матеріалу Цая-Ву і для наших задач вони мають вигляд:

$$\Phi = (\sigma_x + \sigma_r)\left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right) + \sigma_\varphi\left(\frac{1}{Y_{\varphi T}} - \frac{1}{Y_{\varphi C}}\right) + \\ + \frac{\sigma_x^2 + \sigma_r^2}{Y_T Y_C} + \frac{\sigma_\varphi^2}{Y_{\varphi T} Y_{\varphi C}} - B\sigma_x\sigma_r - A(\sigma_x + \sigma_r)\sigma_\varphi < 1 \qquad (2)$$

де для КХ:

$$A = \frac{1}{Y_{\varphi T} Y_{\varphi C}};\ B = \frac{2}{Y_T Y_C} - \frac{1}{Y_{\varphi T} Y_{\varphi C}} \tag{3}$$

і для УКМ:

$$A = \frac{1}{\sqrt{Y_T Y_C Y_{\varphi T} Y_{\varphi C}}};\ B = \frac{1}{Y_T Y_C} \tag{4}$$

Якщо (1) або (2) і (3) або (2) і (4) в залежності від використовуємого критерія виконано, то міцність дотримана. В іншому випадку ($\Phi \geq 1$) обраний критерій міцності не задовольняється і в даній точці відбувається руйнування матеріалу.

Щоб спростити і зробити більш наочним подальший порівняльний аналіз вище обраних трьох критеріїв міцності (1)-(4) розглянемо два транстропних матеріала. Матеріал М1 який має таку міцність: $Y_T = 50$ МПа; $Y_C = 200$ МПа; $Y\varphi_T = Y\varphi_C = 1000$ МПа і матеріал М2 для якого: $Y_T = Y_C = 50$ МПа; $Y\varphi_T = 1000$ МПа; $Y\varphi_C = 250$ МПа. Всі границі на розтяг у М1 і М2 однакові, а відповідні границі на стиск у М2 вчетверо нижчі ніж ті ж самі у М1. Цілком логічно припускати що для довільного НДС М1 має бути або міцнішим за М2 або в крайньому разі не слабше ніж М2 яким би критерієм міцності ми не користувались.

Для М1 і М2 розглянемо такий напружений стан (двовісний нерівносторонній розтяг): $\sigma_r = 0$; $\sigma_\varphi = 800$ МПа а σ_x будемо змінювати від 0 до 100 МПа. Підставляючи $\sigma_r = 0$; $\sigma_\varphi = 800$ МПа в (1)-(4) отримуємо залежність $\Phi(\sigma_x)$ для всіх трьох обраних критеріїв міцності. Цілком очевидно що КМН для М1 і М2 показав співпадаючі результати: запас міцності ($\Phi < 1$) при $\sigma_x < 50$ МПа і перевантаження ($\Phi > 1$) при $\sigma_x > 50$ МПа. Це легко бачити з його математичного визначення (1): обидва матеріали М1 і М2 мають однакові границі міцності на розтяг і при цьому обидва напруження (σ_φ і σ_x) також розтягуючі. Для М1 найбільш консервативним виявився КХ (міцність порушувалась вже при $\sigma_x > 22$ МПа), УКМ давав дані ближчі до КМН (для УКМ міцність порушувалась при $\sigma_x > 34{,}5$ МПа) і також дещо більш консервативні. Для М2 КХ і КМН практично співпадають а результати УКМ алогічні і парадоксальні: запас міцності ($\Phi < 1$) в усьому інтервалі зміни σ_x (від 0 до 100 МПа) не дивлячись на те що М2 слабше ніж М1, більше того – поява від'ємних значень $\Phi < 0$ для УКМ. Треба сказати що і КХ фізично не досить коректний: міцніший М1 руйнується вже починаючи з $\sigma_x > 22$ МПа а слабший М2 тільки при $\sigma_x > 50$ МПа.

Щоб завершити аналіз придатності критеріїв (1)-(4) для розрахунків міцності односпрямовано армованих композитів розглянемо ще один матеріал М3 з такими даними: $Y_T = Y_C = Y\varphi_C = 50$ МПа; $Y\varphi_T = 1000$ МПа. З трьох досліджуваних М3 самий слабкий, М1 – самий міцний, при цьому відповідні границі міцності на розтяг у всіх трьох композитів однакові. Для того ж напруженого стану залежності $\Phi(\sigma_x)$ для трьох критеріїв у випадку матеріалу М3 представлені в табл.1. Для більшої наочності результатів інтервал зміни σ_x розглянуто вдвічі більший: від 0 до 200 МПа.

З табл.1 видно що УКМ взагалі непридатний для подібних композитів: в усьому діапазоні зміни σ_x він демонструє навіть не $\Phi < 1$ а взагалі $\Phi < 0$. Ситуація з КХ трохи краща але теж погана: при $\sigma_x < 100$ МПа маємо від'ємні значення Ф, далі при зростанні σ_x маємо вже також зростаючі $\Phi > 0$ і тільки при $\sigma_x \geq 114$ МПа маємо руйнування, але ж $Y_T = 50$ МПа більше ніж вдвічі менше цього значення. На відміну від УКМ і КХ

КМН показав ті ж самі фізично очікувані результати що і раніше для М1 і М2: запас міцності при $\sigma_x < Y_T$ і перевантаження при $\sigma_x > Y_T$.

Таблиця 1.

Значення Ф(σ_x) для різних критеріїв міцності для матеріалу М3

σ_x, МПа	0	25	50	75	100	125	150	175	200
УКМ	-2,4	-3,94	-4,98	-5,52	-5,56	-5,1	-4,14	-2,68	-0,72
КХ	-2,4	-2,55	-2,2	-1,35	0	1,85	4,2	7,05	10,4
КМН	0,8	0,8	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4

Обчислимо ще для даного НДС згідно (1)-(4) критичне напруження $(\sigma_x)_{кр}$ по досягненні якого матеріали руйнуються. Згідно КМН (1) для всіх трьох композитів (М1, М2 і М3) воно однакове: $(\sigma_x)_{кр} = Y_T = 50$ МПа. Згідно КХ (2), (3) маємо 22 МПа для найміцнішого (М1), 50 МПа для слабшого (М2) і 114 МПа для найслабшого (М3). Згідно УКМ (2), (4) маємо 34,5 МПа для М1, 101 МПа для М2 і 218 МПа для М3. Бачимо що і КХ і УКМ призводять до фізично неправильних результатів: зі зменшенням границь міцності матеріалу критичні напруження зростають, хоча мали б зменшуватись або в крайньому випадку залишатись незмінними. Результати ж КМН цілком очікувані: критичні напруження залишаються незмінними тому що Y_T також для всіх матеріалів однакове.

Висновок: застосування КХ і УКМ (2)-(4) для транстропних композитів розглянутого типу неприйнятне. Ці критерії призводять до кількісно і якісно неправильних розрахунків і застосовувати їх навіть в оболонкових наближеннях ($\sigma_r = 0$) неможна. Для суттєво більш загальних випадків НДС – тривісні динамічні хвильові стани – похибки КХ і УКМ будуть тільки зростати. КМН (1) також є узагальнення класичної першої теорії міцності, для циліндрів з коловим армуванням під внутрішнім тиском він математично коректний і, як показав вищенаведений аналіз, не призводить до парадоксальних або фізично неочікуваних результатів. Тому в подальших розрахунках подібних конструктивних елементів в якості критерія міцності рекомендується використовувати КМН (1).

Limitations of some strength criteria for anisotropic materials

V. Romashchenko, S. Tarasovska[1], P. Lepikhin, O. Beiner

[a]G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] tsa@ipp.kiev.ua

A comparative analysis of three widely known strength criteria for an orthotropic body (Hoffmann, generalized Mises, and maximum stresses) has been conducted with respect to the possibility of their application to assess the strength of composite cylinders under internal pressure. A conclusion has been made about the possibility of applying the considered criteria to certain types of materials.

Keywords: strength criterion, anisotropic material.

Пружно-пластичний скінчено-елементний аналіз напруженого-деформованого стану зразка для дослідження тріщиностійкості при змішаних (I+II+III) модах деформування.

В.Г.Сидяченко[а1], С.О.Пискунов[б], Д.Устенко[б]

[а] Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» , Київ, Україна

[1] Sydiachenko@ukr.net

Ключові слова: змішані моди деформування, тріщиностійкість, пружно-пластична механіка руйнування.

Відомо, що площина тріщиноподібних дефектів, не виявлених засобами дефектоскопічного контролю в конструкційних елементах машин, може мати довільну орієнтацію відносно прикладених зусиль, що призводить до навантаження берегів тріщини за змішаними I+II+III модами деформування. Теорія оцінювання несівної здатності конструкцій для цього випадку достатньо розроблена в межах лінійно-пружної механіки руйнування [1]. Водночас експериментальні дослідження тріщиностійкості та розробка відповідних критеріїв механіки руйнування в пружно-пластичній постановці залишаються актуальною задачею [1, 2]. Раніше були виконані експериментальні дослідження статичної тріщиностійкості за змішаних мод деформування [3] із застосуванням зразка типу *all fracture mode* (AFM) [4] (рис. 1). Однак, зі збільшенням при навантаженні компонент поперечного і поздовжнього зсуву спостерігалась нелінійність діаграм «навантаження – переміщення» і зміна характеру руйнування за макрозламами зразків, що спонукає до уточнення отриманих експериментальних даних на основі параметрів нелінійної механіки руйнування.

У загальному вигляді J-інтеграл в пружно-пластичній постановці при I+II+III модах деформування визначається як [2]:

$$J = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} + \eta_{pl}\frac{U_{pl}}{B(W-a)} \tag{1}$$

де U_{pl} – площа під діаграмою «навантаження – переміщення характерної точки зразка», $E' = E(1-\nu^2)$.

Для визначення J-інтегралу побудована скінченно-елементна (СЕ) модель зразка (рис. 2) та виконано аналіз напружено-деформованого стану в пружно-пластичній постановці при його навантаженні за різними комбінаціями I+II+III мод деформування. Порівняння результатів тестових розрахунків J-інтегралу в пружній постановці з відомими даними [4] показало задовільний збіг результатів, що свідчить про адекватність побудованої СЕ моделі. В результаті подальшого виконання серії пружно-пластичних розрахунків J-інтегралу для різного співвідношення мод деформування (I+II+III) побудовано залежність коефіцієнта η_{pl} від змішаності мод, що дозволяє експериментальне визначення пружно-пластичного J-інтегралу.

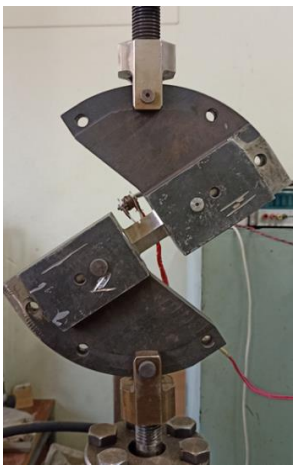


Рис.1. Випробування AFM зразка при змішаних (I+II+III) модах деформування

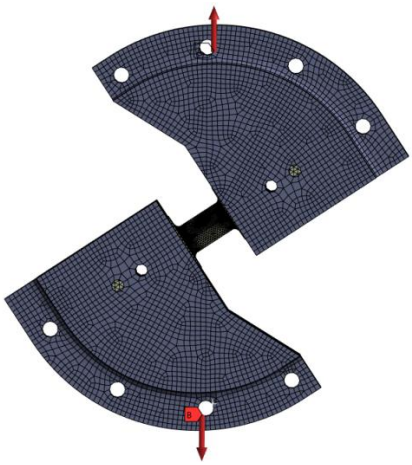


Рис.2. Скінчено-елементна модель AFM зразка при змішаних (I+II+III) модах деформування

1. 1.V. Panasyuk, Development of investigations on fracture mechanics of materials and structural integrity: achievements and perspectives (review), *Procedia Struct Integr*, **16**, 3-10, (2019). https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2019.07.015

2. Y. Wang, W. Wang, B. Zhang, C.-Q. Li, A review on mixed mode fracture of metals, *Eng Fract Mech*, **235**, 107126, (2020). https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107126

3. Сидяченко В. Дослідження впливу попереднього термомеханічного навантаження на тріщиностійкість реакторної сталі при змішаних модах деформування. *Механіка: сучасність і перспективи – 2024* : матеріали міжнар. наук. конф. (м. Київ, 7-11 жовтня, 2024). Київ, 2024. С. 271–273. https://conf2024.inmech.kyiv.ua/files/proceedings2.pdf

4. H.A. Richard, M. Kuna, Theoretical and experimental study of superimposed fracture modes I, II and III, *Eng Fract Mech*, **35**(6), 949-960, (1990). https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90124-Y

Elastic–plastic finite element analysis of the stress–strain state of a specimen for fracture toughness investigation under mixed-mode (I+II+III) loading

V. Sidyachenko [a1], S.Pyskunov[b], D.Ustenko[b]

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[b] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

[1] Sydiachenko@ukr.net

An elastic–plastic finite element analysis of the stress–strain state and fracture toughness parameters of an all-fracture-mode (Richard-type) specimen has been performed. The dependence of the geometric plastic factor on the mode mixity has been obtained for the experimental evaluation of the J-integral.

Keywords: mixed-mode deformation, fracture toughness, elastic–plastic fracture mechanics.

Удосконалення методики визначення твердості титанових сплавів на основі параметра локального опору пластичній деформації

О.А.Каток[a, б], Р.В.Кравчук[a1], А.В.Середа[a], В.В.Харченко[a], М.П.Рудницький[a], С.І.Мотруніч[б], І.М.Клочков[б], М.О.Цисар[б].

[a]Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б] Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

[1] kravchuk.r@ipp.kiev.ua

У роботі проаналізовано шляхи підвищення точності вимірювання твердості титанових сплавів шляхом переходу від геометричного критерію (діаметра відбитка) до параметра a, що характеризує локальний опір пластичній деформації. Показано, що результати вимірювання твердості за класичною методикою Брінелля виявляють чутливість до режиму навантаження (параметра K). Встановлено, що застосування методу інструментованого індентування дозволяє нівелювати цей вплив, а саме отримані значення твердості HBW_{ind} демонструють високу збіжність із результатами стаціонарних випробувань у межах допустимої метрологічної похибки.

Ключові слова: твердість за Брінеллем, метод інструментованого індентування, діаграма індентування, титанові сплави

Визначення твердості титанових сплавів методом Брінелля супроводжується низкою методичних ускладнень, зумовлених специфікою їхніх фізико-механічних властивостей. Поєднання високої міцності з відносно низьким модулем пружності ($E \approx 105–115$ ГПа) призводить до значної частки пружної деформації у зоні контакту індентора з матеріалом. Внаслідок чого після зняття навантаження відбувається суттєве пружне відновлення, яке зменшує вимірюваний діаметр відбитка порівняно з його реальною площею під навантаженням.

Це явище безпосередньо впливає на точність результатів, оскільки класичний метод Брінелля базується на оптичному вимірюванні діаметра відбитка. Відтак принципово важливим стає вибір таких умов навантаження, за яких пластична складова деформації була б домінуючою. Це питання стає особливо актуальним при аналізі вимог нормативних документів, що регламентують режими випробувань титанових сплавів.

Зокрема, недіючий стандарт ГОСТ 9012 для титанових сплавів чітко встановлював коефіцієнт навантаження $K = 15$ Н/мм². Натомість чинний ДСТУ EN ISO 6506-1 рекомендує перехід до вищих питомих навантажень із коефіцієнтом $K = 30$ Н/мм², наголошуючи, що для коректного вимірювання параметр навантаження має забезпечувати геометричне співвідношення у межах $0{,}24 < d/D < 0{,}60$.

Об’єктами дослідження слугували чотири титанові системи: технічно чистий титан (*Ti* Grade 2), два варіанти двофазного сплаву *Ti*–6*Al*–4*V* та високолегований сплав системи *Ti–Al–Zr–Mo–V* (тип VT20).

Проаналізувавши отримані експериментально залежності $HBW = f(F/D2)$ було встановлено, що зменшення коефіцієнта навантаження супроводжується систематичним зниженням значень твердості для всіх досліджених матеріалів. Найбільш суттєве зменшення спостерігається для високоміцного титанового сплаву системи *Ti–Al–Zr–Mo–V*: при переході від $K = 30$ до $K = 15$ значення d/D знаходяться на нижній межі допустимого, за ДСТУ EN ISO 6506-1, інтервалу. Це свідчить про недостатній розвиток пластичної деформації та критичний вплив пружної складової, що призводить до систематичного заниження значень твердості до 11,5%. Виявлена залежність підтверджує обмеженість класичного підходу, що ґрунтується на

вимірюванні залишкових розмірів відбитка лише після завершення процесу деформування та повного розвантаження зразка.

Метою роботи є підвищення точності визначення твердості шляхом переходу від геометричного критерію *d/D* до параметра, що характеризує локальний опір пластичній деформації *a*. Даний параметр визначається за результатами інструментованого індентування на основі аналізу повної діаграми навантаження–розвантаження (*F*–*h*), що дозволяє розділити пружну та пластичну складові глибини вдавлювання індентора [1].

Застосування методики [1] до досліджених титанових сплавів показало, що значення твердості, визначені через параметр локального опору пластичній деформації *a*, є інваріантними до умов навантаження. На відміну від класичного методу Брінелля, де результати при $K = 15$ та $K = 30$ суттєво різняться, інструментоване індентування нівелює вплив пружної релаксації. Відхилення значень HBW_{ind}, від результатів стандартних випробувань не виходить за межі допустимої метрологічної похибки, встановленої для непрямих методів визначення твердості. Це підтверджує фізичну обґрунтованість параметра *a* - як інтегральної характеристики опору пластичній деформації.

Таким чином, методика [1] не лише узгоджується з вимогами ДСТУ EN ISO 6506-1:2019, а й усуває проблему «пружної нестабільності», характерну для титанових сплавів. Її впровадження дозволяє забезпечити високу достовірність результатів незалежно від обраного коефіцієнта *K*, що робить оцінювання твердості більш універсальним.

1.O.A. Katok, R.V. Kravchuk, A.V. Sereda et al., Improvement of a Procedure for Determining the Brinell Hardness of Structural Steels Based on the Results of Instrumented Indentation, *Strength Mater*, **56**, 208–304 (2024). https://doi.org/10.1007/s11223-024-00649-1

Improving the brinell hardness testing methodology for titanium alloys based on the local plastic deformation resistance parameter

O.A.Katok[a,b], R.V.Kravchuk[a], A.V.Sereda[a],V.V.Kharchenko[a], M.P.Rudnytskyi[a], S.I.Motrunich[b], I.M.Klochkov[b], M.O.Tsysar[b].

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] kravchuk.r@ipp.kiev.ua

The paper analyzes ways to improve the accuracy of hardness measurements for titanium alloys by transitioning from a geometric criterion (imprint diameter) to the parameter *a*, which characterizes the local resistance to plastic deformation is shown. It is demonstrated that hardness values obtained via the classical Brinell method exhibit sensitivity to the loading mode (parameter *K*). Defined that the use of instrumented indentation exclude this effect: the resulting HBW_{ind} hardness values demonstrate high convergence with stationary test results according to acceptable limits of metrological tolerance.

Keywords: Brinell hardness, instrumented indentation method, indentation diagram, titanium alloys.

Поетапне відпрацювання режимів комплексної технологічної обробки на зразках зі сплаву ЕП 962

В.С.Майборода[а], Ю.С.Налімов[1б], А.В.Рутковський[б]

[а] Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна
[б] Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] ppo@ipp.kiev.ua

Ключові слова: опір утоми, сплав ЕП962, комплексна технологія обробки, магнітно-абразивна обробка, іонно-плазмове азотування, твердість, шорсткість

Підвищення довговічності виробів, що експлуатуються в умовах знакозмінних навантажень є актуальною проблемою. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є формування специфічних властивостей поверхневого шару деталей, тому що саме у поверхневих шарах деталей при їх експлуатації, як правило, має місце зародження тріщин утоми. Негативними факторами, що впливають на опір утоми є мікроконцентратори напружень у вигляді підвищеної шорсткості поверхні, наявність мікроподряпин, позитивні внутрішні напруження як першого, так і другого роду, які пов'язані з технологічною спадковістю виготовлення виробів, мікротріщини та інші можливі дефекти поверхні.

Тому при виготовленні відповідальних деталей особливу увагу приділяють методам фінішної обробки з метою формування особливих властивостей поверхневих шарів виробів. Саме методи фінішної поверхневої обробки дозволяють, у більшості випадків, забезпечити формування властивостей поверхневих шарів виробів, які позитивно впливають на гальмування процесів, пов'язаних із зародженням тріщин утоми та їх розвинення.

Традиційно до таких методів можна віднести методи поверхневого пластичного деформування з одночасним додатковим поліруванням і дифузійним насиченням поверхневого шару.

Одним із перспективних підходів, що використовуються, є комплексна обробка, яка складається із комбінування процесів субструктурного зміцнення поверхневого шару в процесі магнітно-абразивної обробки (МАО) порошками різного розміру і форми та іонно-плазмовим термоциклічним азотуванням (ІПТА).

Досвід використання комплексної магнітно-абразивності обробки поверхні виробів у комбінації з хіміко-термічним її насичення (азот, вуглець тощо) показав її ефективність, що забезпечує можливість утворення дифузійного поверхневого шару певної глибини та якості формування в ньому стискальних залишкових напружень та підвищення характери стик опору втоми [1]. Подібні дослідження раніше було виконано на зразках зі сплаву ВТ9 [1], ЧС70ВІ [2], ЕК 61[3] та лопатках компресора зі сплаву ВТ8 [4], проте застосування ІПТА в комплексі з МАО не досліджувалось.

Експериментальні дослідження на багатоциклову втому виконували на корсетних зразках зі сплаву ЕП962 з круглим поперечним перерізом, які мають діаметр робочої частини 6 мм та довжину 140 мм.

Для визначення раціонального режиму комплексної (МАО+ІПТА) обробки проводили поетапне відпрацювання режимів магнітно-абразивної обробки (сім

варіантів) та режимів комплексної обробки (ефективний режим МАО+ІПТА), всього шість варіантів). МАО для зниження шорсткості робочих поверхонь виконували оскольчатими порошками Фероман з розміром частинок 200/100 і 315/200 мкм, а з метою пластичного деформування поверхневого шару порошком з округлою формою частинок – дріб чавуна (ДЧ) з розмір частинок 1400/1000 мкм. При відпрацювання режимів ІПТА проводили варіації при зміні температури обробки, елементів насичення та часу обробки. Ефективність режимів тієї чи іншої обробки оцінювали тестовими випробуваннями зразків на багато циклову втому. Випробування проводили при симетричному циклі навантаження зразків на електродинамічному вібраторі при рівні навантаження в робочій частині зразків σ_a =500 МПа , на базі N = 10^7 циклів.

Число циклів до руйнування N було критерієм ефективності відповідного режиму обробки.

Додатково для оцінки стану поверхні визначали параметр шорсткості R_a робочої частини і поверхневу твердість HV поверхневого шару зразків.

Експериментальні результати представлені в таблиці.

Результати поетапних випробувань на втому зразків при різних режимах технологічних обробок МАО показали, що раціональною комбінацією етапів оброблення є подвійна МАО – Фероман (315/200) + ДЧ (1400/1000).

Треба відзначити, що існує безпосередній зв'язок між поверхневою твердістю зразків після комплексної обробки і довговічністю зразків при циклічному навантаженні. Показано, що при поверхневій твердості, яка знаходиться в межах 7,6….8 ГПа отримано найкращі результати по довговічності зразків на базі N = 10^7 циклів.

Таблиця.

Порядкові номера технологічної обробки	σ_a , МПа	N = 10^{-6} циклів	HV, ГПа	R_a , мкм
Початковий стан	400	10,0^o→	5,8	0,32
1	500	1,9		0,18
2	500	4,57		
3	500	1,9	12	0,15
4	500	0,72		
5	500	11,3 →	7,7	0,29
6	500	9,2	8,1	0,4
7	500	10,5→	7,6	0,3
8	500	10,15→	7,6	0,29
9	500	2,7	12,7	0,3
10	500	2,85	12,7	0,3
11	500	4	9	
12	500	2,7	12,7	0,3
13	500	10,0→	7,6	0,27

Примітка: → - зразок не зруйнований на базі N = 10^7 циклів.

Перевищення зазначених меж поверхневої твердості призводить до суттєвого зменшення числа циклів до руйнування, що свідчить про формування в поверхневих шарах зразків несприятливого напруженого стану.

1. В.С. Майборода, Ю.С. Налимов, А.Н. Соловар и др. «Влияние комплексной магнитно-абразивной и химико-термической обработки на сопротивление усталости сплава ВТ9». *Пробл. прочности*. – № 5, 138-147 (2016).
2. Ю.С. Налимов, А.В. Рутковский, С.Г. Киселевская и др. «Влияние ионно-плазменного термоциклического азотирования на сопротивление усталости сплава ЧС70ВИ», *Пробл. прочности*. № 2, 95-101 (2020).
3. Ю.С. Налімов, В.С. Майборода, А.В. Рутковський “Вплив комплексного іонно-плазмового термоциклічного азотування та магнітно-образивної обробки на опір утоми сплаву ЕК-61”. *Пробл. прочности*. – № 5, С. 114-118 (2022).
4. Ю.С. Налімов, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій та ін. «Вплив комплексної магнітно-абразивної та хіміко-термічної обробки на опір утомі лопаток компресора зі сплаву ВТ8», *Пробл. прочности*, № 6, С. 144-150 (2020).

Аналіз метрологічного забезпечення вимірювання геометрії внутрішньої поверхні вигородки активної зони реактора ВВЕР-1000

С. Романов[1]

[a]Акціонерне товариство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», Київ, Україна

[1] s.romanov@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: ВВЕР-1000, вигородка активної зони, радіаційне розпухання, геометричний інваріант, флюєнс нейтронів, геодезичний базис, еталон довжини, невизначеність вимірювання

Головними цілями натурних вимірювань геометричних розмірів внутрішньої поверхні вигородки активної зони (ВАЗ) реакторів ВВЕР-1000 є оцінка поточних значень, а також кінетики зміни зазорів між ВАЗ та тепловиділяючими збірками під час обґрунтувань безпеки та управління старінням в період довгострокової експлуатації енергоблока. Результати експериментальних вимірювань дають потенційну можливість зменшення надлишкового консерватизму результатів розрахунків формозміни ВАЗ шляхом коригування коефіцієнта C_D у теоретичній формулі вільного розпухання внаслідок радіаційних навантажень, яка є основою для подальших оцінок зазначеного механізму деградації [1]:

$$S_0 = C_D \cdot F^n \cdot exp\,(-r \cdot (T_{irr} - T_{max})^2) \quad (1)$$

де F-доза нейтронного опромінення, з.н.а.; n=1,88; r = $1{,}825 \cdot 10^{-4}$ $^oC^{-2}$; T_{irr} – температура опромінення, ^oC; T_{max}=470 ^oC; $C_D = 1{,}035 \cdot 10^{-4}$.

Водночас, ефектам старіння, пов’язаним з радіаційним розпуханням та радіаційною повзучістю притаманна низька інтенсивність, що висуває високі вимоги щодо технічних та метрологічних характеристик засобів вимірювань, зокрема, роздільної здатності, чутливості, точності (невизначеності результатів) тощо.

Під час розробки засобів вимірювання геометрії ВАЗ оцінка необхідної точності виконувалася з урахуванням обмежень, пов’язаних зі швидкістю набору флюєнсу нейтронів разом з доступним часовим інтервалом між вимірюваннями з одного боку та метрологічними можливостями сучасних вимірювальних систем, здатних працювати під дією інтенсивних радіаційних впливів, з іншого (див. Таблицю 1).

Для забезпечення відповідності засобів вимірювання цільовим критеріям точності побудовано математичну модель вимірювань та проведено комплексну оцінку впливу параметрів, що дають найбільш вагомий внесок у значення меж діапазону розширеної невизначеності вимірювань.

На основі виконаного аналізу сформовано методичні рекомендації щодо вдосконалення технології та процедур оцінки технічного стану та можливості продовження строку експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв, зокрема ВАЗ, реакторів типу ВВЕР-1000 [2, 3].

Таблиця 1.

Характеристики засобів вимірювання внутрішньої геометрії ВАЗ реакторів ВВЕР-1000

Назва характеристики	СТС-К-ВКУ АО "Діаконт", РФ, м. Санкт - Петербург	ССІ ВКУ ООО "ІК "АМЕ" Україна, м. Київ	Система NRI-Rez Чехія, м. Ржеж	Комплекс ВК-5 філія "ВП Атоменергомаш" Україна, м. Київ
Принцип вимірювань	Телевізійне оптичне сканування	Ультразвуковий датчик відстані	Контактний	Лазерний триангуляційний
Вимірюваний параметр	Внутрішні радіуси	Внутрішні діаметри	Відстань між паралельними симетричними гранями	Відстань між паралельними симетричними гранями
Діапазон вимірювання системи	1500 мм – 1700 мм	2985 мм – 3385 мм	(2602 ± 10) мм (3310 ± 10) мм	(2602 ± 10) мм (3074 ± 10) мм (3310 ± 10) мм
Похибка вимірювання системи	± 0,5 мм	± 0,3 мм	≤ |±0.15|	≤ |±0.25|
Діапазон вимірювання перетворювача	200 мм	200 мм	15 мм	20 мм
Похибка перетворювача	± 0,5 мм	± 0,01 мм [4]	± 0,003 мм	± 0,03 мм

1. ПМ-Т.0.03.333-23 Типова програма оцінки технічного стану та продовження строку експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000, АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ (2023).
1. 2.ЕЕ 058.00.00.00.00.000 Д. Комплекс вимірювання внутрішніх розмірів вигородки реакторних установок ВВЕР-1000. Методика проведення вимірювань.
2. 3.СОУ НАЕК 262:2022 Інженерна, наукова і технічна підтримка. Методика обробки вимірів геометричних розмірів вигородки реакторів ВВЕР-1000.

Analysis of the metrological support of the methodology for measuring core baffle geometry of WWER-1000 reactor

S. Romanov[a1]

[a]JSC «National Nuclear Electric Generating Company «Energoatom», Kyiv, Ukraine.

[1] s.romanov@direkcy.atom.gov.ua

Analysis was conducted of the metrological parameters of a number of methods and corresponding specialized equipment designed for measuring the inner surface of the VVER-1000 reactor core barrel in order to assess the intensity of the impact of radiation swelling and radiation creep processes of the barrel metal on its performance during operation. Based on the analysis, recommendations have been formulated and the feasibility of their implementation during the development/improvement of methods for assessing the technical condition and extending the service life of the WWER-1000 internals has been substantiated.

Keywords: WWER-1000, reactor core baffle, radiation swelling, geometric invariant, neutron fluence, geodetic base, length reference, measurements uncertainty

Нейромережеві сурогатні моделі для оперативного прогнозування напруженого стану та оцінки цілісності патрубків ВВЕР-1000

Я. Дубик[а,в1] , В. Антонченко [а,б], В. Ясній[б]

[а]ТОВ «ІПП-ЦЕНТР», Київ, Україна
[б]Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна
[в]Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

[1] dubyk-yr@ipp-centre.com.ua
Ключові слова: штучні нейронні мережі, сурогатне модель, патрубок ВВЕР-1000, напружено-деформований стан, крихка міцність

Робота присвячена розробці методу швидкого аналізу цілісності обладнання АЕС за допомогою технологій машинного навчання. Основним об’єктом дослідження є патрубкова зона реактора ВВЕР-1000. Відповідно до вимог галузевого стандарту СОУ НАЕК 177:2023[1], для обладнання першого контуру АЕС, що належить до 1-го класу безпеки, обов’язковим є проведення розрахункового аналізу на опір крихкому руйнуванню при реалізації перехідних аварійних сценаріїв.

Для підвищення швидкості розрахунків та охоплення більшого масиву режимів експлуатації, замість трудомісткого МСЕ-аналізу впроваджено сурогатне моделювання на основі штучних нейронних мереж[2]. Архітектура моделі (рис.1) включає вхідний шар із 7 параметрів, що характеризують граничні умови та теплову інерційність системи, та два приховані шари (45 та 25 нейронів). Такий підхід дозволяє коректно апроксимувати нелінійні температурні градієнти та стрибки напружень на межі розподілу наплавлення – основний метал.

Запропонована модель забезпечує високу точність прогнозування температурного поля та поля напружень при суттєвому скороченні часу обчислень, що робить її ефективним інструментом для систем моніторингу залишкового ресурсу корпусу реактора в режимі реального часу.



Рис. 1. Архітектура нейронної мережі

5. СОУ 177:2023, Розрахунки на міцність та ресурс елементів обладнання і трубопроводів атомних станцій. Загальні вимоги, ДП «НАЕК «Енергоатом», Київ (2023).
6. Deep Learning Toolbox User's Guide (R2023b). — Natick, Massachusetts : The MathWorks, Inc., 2023. — 2154 p. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/

Application of machine learning and artificial neural networks as surrogate models for predicting the stress-strain state and evaluating the brittle strength of VVER-1000 nozzle

Y. Dubyk[a,c1], V. Antonchenko[a,b], V.Iasnii[b]

[a] *IPP-CENTRE, 5B, Budindustrii Str. Kyiv 01013, Ukraine*

[b] *Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 56, Ruska Str., Ternopil, 46001, Ukraine*

[c] *Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine*

[1] dubyk-yr@ipp-centre.com.ua

Assessing the integrity of the VVER-1000 reactor nozzle zone requires a large number of stress-strain state calculations for emergency cooldown scenarios. The high computational complexity of the finite element method on models with embedded cracks limits the possibility of rapid analysis. This paper proposes an alternative approach using artificial neural networks as surrogate models for rapid prediction of temperature gradients and stress fields in the reactor vessel nozzle wall. The use of artificial neural networks significantly reduces computation time, allowing for the analysis of a wide range of operating modes in near real time. The high accuracy of determining local FEM parameters provides a reliable basis for further calculation of stress intensity factors and assessment of resistance to brittle fracture in accordance with SOU 177:2023.

Keywords: artificial neural networks, surrogate model, VVER-1000 nozzle, stress-strain state, brittle strength

Analytical Investigation of Stress Distribution in a Semi-Infinite Elastic Medium Containing a Circular Cavity

S. Takada[a1], Y. Mori[b], R. Suzuki[a]

[a]Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan.
[b]Department of Industrial Technology and Innovation, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan.

[1] Corresponding author, takada@go.tuat.ac.jp

Keywords: Airy stress function, bipolar coordinates, principal stress difference

Determining the stress distribution inside the ground induced by external loads acting on the surface is of fundamental importance in various applied fields, including civil engineering. For a homogeneous semi-infinite medium, analytical solutions based on classical elasticity theory are well established and are commonly presented in textbooks on civil engineering and solid mechanics [1]. In reality, however, subsurface environments in urban areas are far from homogeneous, as they contain underground infrastructures such as subway tunnels, water pipelines, and gas conduits. Clarifying how such embedded structures affect the stress distribution within the ground is of considerable importance from the viewpoint of urban development and infrastructure safety, yet the number of analytical studies addressing this issue remains limited.

In this study, we consider a two-dimensional semi-infinite elastic body containing a single circular cavity of radius R, whose center is located at a depth H from the ground surface. We analytically evaluate the stress distribution inside the medium when a concentrated load is applied at the surface. In our previous work [2], we analyzed the case where the concentrated load was restricted to the normal direction only. In the present study, we extend that formulation to include more general loading conditions. To this end, we construct an Airy stress function in bipolar coordinates (α, β) of the form

$$-\frac{\pi}{a\sigma_0}\frac{\mathcal{F}}{J} = B_0\alpha(\cosh\alpha - \cos\beta) + \sum_{n=1}^{\infty}[\mathcal{C}_n(\alpha)\cos n\beta + \mathcal{S}_n(\alpha)\sin n\beta]\,, \qquad (1)$$

where

$$\mathcal{C}_n(\alpha) \equiv A_n\cosh(n+1)\alpha + B_n\cosh(n-1)\alpha + C_n\sinh(n+1)\alpha + D_n\sinh(n-1)\alpha\,, \quad (2a)$$

$$\mathcal{S}_n(\alpha) \equiv E_n\cosh(n+1)\alpha + F_n\cosh(n-1)\alpha + G_n\sinh(n+1)\alpha + H_n\sinh(n-1)\alpha\,. \quad (2b)$$

Here, A_n through H_n are coefficients determined from the boundary conditions, and J is the Jacobian (scale factor) of the conformal mapping from Cartesian coordinates to bipolar coordinates.

Once the Airy stress function is specified, the components of the stress tensor are obtained as

$$a\sigma_{\alpha\alpha} = \left[(\cosh\alpha - \cos\beta)\frac{\partial^2}{\partial\beta^2} - \sinh\alpha\frac{\partial}{\partial\alpha} - \sin\beta\frac{\partial}{\partial\beta} + \cosh\alpha\right]\frac{\mathcal{F}}{J}\,, \qquad (3a)$$

$$a\sigma_{\beta\beta} = \left[(\cosh\alpha - \cos\beta)\frac{\partial^2}{\partial\alpha^2} - \sinh\alpha\frac{\partial}{\partial\alpha} - \sin\beta\frac{\partial}{\partial\beta} + \cos\beta\right]\frac{\mathcal{F}}{J}, \tag{3b}$$

$$a\sigma_{\alpha\beta} = -(\cosh\alpha - \cos\beta)\frac{\partial^2}{\partial\alpha\partial\beta}\frac{\mathcal{F}}{J}. \tag{3c}$$

In this abstract, due to space limitations, we present the results for the case where the concentrated load acts only in the normal direction. For comparison with photoelastic experiments [3], it is more convenient to plot the principal stress difference rather than the individual stress components. The principal stress difference is defined as

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\sigma_{\alpha\alpha} - \sigma_{\beta\beta}\right)^2 + 4\sigma_{\alpha\beta}^2}. \tag{4}$$

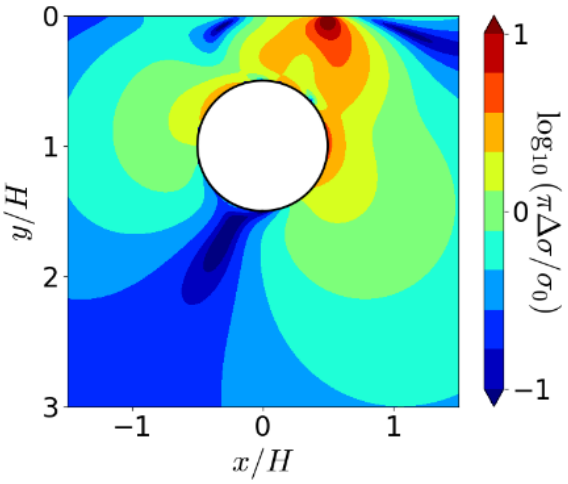


Fig. 1. Principal stress difference when a vertically applied concentrated load acts on the ground surface at a position slightly offset from directly above the cavity. The color scale represents contour levels of the principal stress difference.

Figure 1 shows a typical distribution of the principal stress difference. As in the case without a cavity, the principal stress difference is dominant in the vicinity of the load application point. However, clear deviations caused by the presence of the cavity appear in the region surrounding the cavity.

In the presentation, we will discuss these features in detail and also report results for the case where a concentrated load with a tangential component is applied at the surface.

1. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, *Theory of Elasticity, 3rd edn.*, McGraw-Hill, New York (1970).
2. S. Takada and R. Suzuki, Analysis of the effect of subsurface cavities on stress distribution in soil (*in Japanese*), *Terramech.* (in press).
3. E.G. Coker and L.N.G. Filon, *A Treatise on Photo-Elasticity, 2nd edn.*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1957).

A micropolar theory of curved beams with application to the mems/nems simulations

V.V. Zozulya[1,2], A. Saez[1], F. Garcia-Sanchez[3],

[1]Departamento de Mecanica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092-Sevilla, Spain, e-mail: andres@us.es
[2]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, P. Nesterov Str., 3, 03057, Kyiv, Ukraine; e-mail: vzozulyas@hotmail.com
[3]Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación, Universidad de Málaga, Plaza El Ejido S/N 29013, Málaga, Spain, e-mail : fgsanchez@uma.es

We consider an elastic curved beam of arbitrary geometry in a 2-D Euclidian space, which occupies the domain $V = \Omega \times [-h, h]$ with a smooth boundary∂V. Here $2h$ is thickness, $\Omega = [0, L]$ is the middle line of the beam, with length L. The boundary of the beam ∂V is presented as points 0,L and lines Ω^+ and Ω^-which are the upper and lower sides and S denotes lateral sides.

According to the theory of micropolar elasticity, the main equations for linear, homogeneous, isotropic, micropolar elastic solid are given in the form of the following system of differential equations. For details refer to [1, 2]

$$\begin{aligned}&(\mu_e + \mu_c)\Delta\boldsymbol{u} + (\lambda_e + \mu_e - \mu_c)\nabla(\nabla\cdot\boldsymbol{u}) + 2\mu_c\nabla\times\boldsymbol{e}_3\omega_3 + \boldsymbol{b} = \rho\ddot{\boldsymbol{u}}\\&\mu_c\Delta\omega_3 - 4\mu_c\omega_3 + 2\mu_c(\nabla\times\boldsymbol{u})_3 + M_3 = j\ddot{\omega}_3\end{aligned} \tag{1}$$

The Laplacian and gradient of divergence operators of the displacements vector in the orthogonal curvilinear system of coordinates have the form

$$\begin{aligned}\nabla^2\boldsymbol{u} &= \left(\frac{1}{H_i}\frac{\partial\nabla\cdot\boldsymbol{u}|_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\nabla\cdot\boldsymbol{u}|_{ij}}{H_k}\Gamma^i_{kk} + \frac{\nabla\cdot\boldsymbol{u}|_{ik}}{H_i}\Gamma^j_{ki}\right)\boldsymbol{e}_j\\\nabla\nabla\cdot\boldsymbol{u} &= \nabla_i\nabla_j u_j\boldsymbol{e}_i = \frac{1}{H_i}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{1}{H_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{u_k}{H_j}\Gamma^j_{kj}\right)\boldsymbol{e}_i\end{aligned} \tag{2}$$

where $\nabla\boldsymbol{u}$ and $\nabla\cdot\boldsymbol{u}$are defined by the equations

$$\nabla\boldsymbol{u} = \boldsymbol{e}_i\otimes\boldsymbol{e}_j\left(\frac{1}{H_i}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{u_k}{H_i}\Gamma^j_{ki}\right),\quad \nabla\cdot\boldsymbol{u} = \nabla_i u_i = \frac{1}{H_i}\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{u_k}{H_i}\Gamma^i_{ki} \tag{3}$$

In order to reduce the 3-D problem for the micropolar theory of elastic beams to a 2-D one, we expand the physical parameters, that describe the stress-strain state of the beam into the Legendre polynomials series along the coordinatex_2. All the parameters that describe the stress-strain of the beam in the Legendre polynomials series along the coordinate

$$u_\alpha(x_1, x_2) = \sum_{k=0}^{\infty} u^k_\alpha(x_1)P_k(\varpi),\quad \omega_3(x_1, x_2) = \sum_{k=0}^{\infty}\omega^k_3(x_1)P_k(\varpi), \tag{4}$$

where $\varpi = x_2/h \in [-1,1]$ is a normalized variable and the coefficients of expansion have the form

$$\begin{aligned}u^k_\alpha(x_1) &= \frac{2k+1}{2h}\int_{-h}^{h} u_\alpha(x_1, x_2)P_k(\varpi)dx_2,\quad \omega^k_3(x_1)\\&= \frac{2k+1}{2h}\int_{-h}^{h}\omega_3(x_1, x_2)P_k(\varpi)dx_2\end{aligned} \tag{5}$$

By expanding all functions contained in the equations in the Legendre's polynomial series one can obtain differential equations of motion for Legendre's polynomial series coefficients of the displacements in the form For details refer to [3]

Electrostatically controlled electromechanical systems, such as MEM/NEM, play a crucial role in various applications, including sensors, actuators, and resonators. MEM/NEM devices operate at the micro- and nanoscale, where scaling effects become significant. Understanding and accounting these effects is critical for reliable device operation. In electrostatically actuated MEM/NEM devices, mechanical motion is induced by electrostatic forces. These devices typically consist of micro- and nanoscale components, such as beams, membranes, or cantilevers, that are suspended or fixed within the device structure. When a voltage is applied between these components and a neighboring electrode, electrostatic forces come into play. The electrostatic force arises from the attraction or repulsion of charges in response to the applied voltage. As the voltage increases, the electrostatic force between charged components increases. The relationship between applied voltage and the resulting displacement is crucial for the characterization of electrostatic control. This relationship is nonlinear and understanding it is important for predicting the behavior of a MEM/NEMS device.

Pull-in instability is a critical phenomenon in electrostatically actuated MEM/NEMS. It refers to the point at which the electrostatic force becomes so strong that it overcomes the restoring forces in the mechanical structure, causing the components to collapse or adhere to each other. The concept of pull-in instability is particularly important in understanding the behavior of these systems. This phenomenon defines an operational limit for the device.

Let us consider an elastic beam of the length L, width $b$and thickness $2h$ above the rigid foundation with an initial gap$h_0$in the electromagnetic field, as shown in Fig. 1.

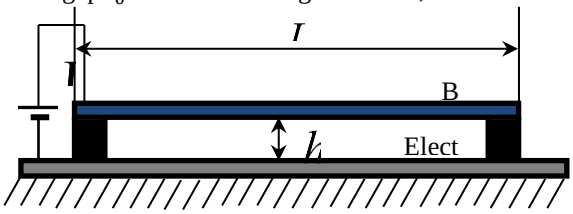


Fig. 1. Microbeam settles above the rigid foundation.

Additional information related to theoretical aspects of the MEM/NEMS mathematical modeling and examples of numerical modeling can be found in [4, 5].

KEYWORDS: micropolar beam theory, MEMS, NEMS, actuators

1 Ghiba I.-D., Rizzi G., Madeo A., Neff P. Cosserat Micropolar Elasticity: Classical Eringen vs. Dislocation Form. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2023, 18(1), 93–123.

2 Zozulya V.V. Micropolar curved rods. 2-D, high order, Timoshenko's and Euler-Bernoulli models. *Curved and Layered Structures*, 2017, 4, 104-118.

3 Pelex Б.Л. Сухорольский М.А. Контактные задачи теории упругих анизотропных оболочек. Киев, Наукова думка, 1980, 216 с.

4 Zozulya V.V., Saez A. A High order theory for arched Structures and its application for study of the electrostatically actuated MEMS devices. *Archive of Applied Mechanics*, 2014, **84**(7), 1037–1055,

5 Zozulya V.V., Saez A., Garcia-Sanchez F. High order theory for nonlocal beams and its application for study of pull-in instability of the electrostatically actuated NEM devices. *International Applied Mechanics*, 2025, **61**(3), 842-854

Моделювання напруженого стану нетонких неоднорідних уздовж товщини еліптичних циліндричних оболонок різної довжини

О. Я. Григоренко[а1], Л. С. Рожок[аб], Н.П. Борейко[а], Л.А. Крук[б], Л.В. Харитонова[аб]

[а]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[б]Національний транспортний університет, Київ, Україна

[1] ayagrigorenko1991@gmail.com

Ключові слова: двокомпонентний неперевно-неоднорідний матеріал, дискретні ряди Фур'є, напружений стан, циліндричні еліптичні оболонки, просторова модель.

Впровадження новітніх технологій у матеріалознавство спричинило появу нових матеріалів із прогнозованими властивостями, до яких можна віднести і неперервно-неоднорідні матеріали. Перевага таких матеріалів полягає у тому, що вони мають механічні властивості, які плавно змінюються уздовж конкретного напрямку без використання шарів чи границь розділу і можуть бути створені на основі композиції двох матеріалів [1].

Дану роботу присвячено розв'язанню просторової задачі лінійної теорії пружності про напружений стан нетонких еліптичних циліндричних оболонок різної довжини, що виготовлені з двокомпонентного неперервно-неоднорідного матеріалу, для якого пружні властивості, що характеризують модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона, можуть бути визначені за допомогою концентрації матеріалів композиції. Зв'язок між модулем пружності E та коефіцієнтом Пуассона ν з відповідними параметрами матеріалів, що входять в композицію визначаються формулами [2]

$$E = (E_2 - E_1)V + E_1;\ \nu = (\nu_2 - \nu_1)V + \nu_1,$$

де E_1, E_2, ν_1, ν_2– механічні параметри першого та другого матеріалів, V – концентрація другого матеріалу, в залежності від координати товщини. При розрахунках прийнято степеневий закон зміни пружних властивостей $V = (\frac{\gamma}{\mathrm{h}} + 0{,}5)^{\mathrm{m}}$. Композиція складається з алюмінію (Al) та карбіду кремнію (SiC) з відповідними механічними параметрами [2]. Для параметру степеня m обрано значення $m = 0{,}5;\ 1;\ 5$. Оболонки знаходяться під дією внутрішнього рівномірного вздовж напрямної тиску, за умов простого обпирання торців.

Задачу розв'язано на основі одного із варіантів методу апроксимації функцій дискретними рядами Фур'є. На відміну від підходу, описаному в роботах [3, 4], у даному випадку дискретними рядами Фур'є апроксимуються не окремі доповняльні функції, що введені до розв'язувальної системи диференціальних рівнянь в частинних похідних зі змінними коефіцієнтами, а функції, що являють собою праві частини цієї розв'язувальної системи.

Для геометричних параметрів оболонок обрано: довжина $L = 40l_0; 120\, l_0$, товщина $h = 4l_0$, радіус вихідного одноперіметричного кола $R = 40l_0$, степінь еліптичності $\Delta = 0{,}05; 0{,}1$. У випадку $L = 40l_0$ оболонки належать до класу коротких, у випадку $L = 120l_0$ – довгих оболонок.

Унаслідок проведеного чисельного аналізу отриманого розв'язку задачі було встановлено, що збільшення довжини оболонки призводить як до якісної, так і до

кількісної зміни розподілу поздовжніх та колових напружень, незалежно від степеня зміни пружних властивостей матеріалу. При цьому, максимальна величина як колових, так і поздовжніх напружень стрімко зростає зі збільшенням степеня еліптичності оболонок та степеня закону розподілу механічних властивостей матеріалу.

Отримані у роботі результати можуть бути корисними при проектному моделюванні конструктивних елементів подібного класу з метою вибору їх оптимальних параметрів для забезпечення міцності конструкцій та як фундаментальні дослідження механіки деформівного твердого тіла.

1. M. Mohammadi , M. Rajabi, M. Ghadiri, Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*, **15** (4), 319–343 (2021) https://doi.org/10.2298/PAC2104319M.
2. A. Ja., Grigorenko, T. L., Efimova, Ju. A Korotkikh, Free axisymmetric vibrations of hollow finite-length cylinder from functionally graded material. *Mathematical methods and physicomechanical fields*, **58** (2), 64–75 (2015). http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000563560 [In Russian].
3. O.Ya. Grygorenko, L.S. Rozhok, N.P. Boreiko, L.V. Kharytonova, Numerical Analysis of Stress State of Non-Thin Elliptical Cylindrical Shells Made of Continuously Inhomogeneous Materials, *Int. App. Mech*., **60 (**6), 653–664 (2024) https://doi.org/10.1007/s10778-025-01317-w
4. L.S. Rozhok, L.A. Kruk, H.L. Isaienko, L.O. Shevchuk, Stress state modeling of non-circular orthotropic hollow cylinders under different types of loading, *Mathematical Modeling and Computing*, **11(**2), 583–592 (2024). https://doi.org/10.23939/mmc2024.02

Modeling the stress state of non-thin, inhomogeneous, along the thickness of elliptical cylindrical shells of various lengths

O.Ya.Grygorenko [a1], L.S.Rozhok[ab], N.P. Boreiko[a], L.A. Kruk[b], L.V. Kharytonova[ab]

[a]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]National Transport University, Kyiv, Ukraine.

[1] e-mail: ayagrigorenko1991@gmail.com

The problems of the theory of elasticity on the stress state of non-thin elliptical cylindrical shells of different lengths are considered. Numerical analysis was carried out based on a variant of the method of approximating functions by discrete Fourier series. The results of calculations of cylindrical shells made of a two-component continuously inhomogeneous material are presented. The given results can be used in the strength calculations of the cylindrical elements of modern structures.

Keywords: two-component continuous-inhomogeneous material, discrete Fourier series, stressed state, cylindrical elliptical shells, spatial model.

Оцінка застосовності моделі напівобмеженої підкладки при визначенні критичних параметрів зморщування неогуківського бішару

О. Кіпніс[a1], О. Синявський[a2]

[a] Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1] a.l.kipnis@gmail.com

[2] sinyavskiy1987@gmail.com

Ключові слова: бішарова система, тонке покриття, неогуківський матеріал, критичні деформації, тривимірна лінеаризована теорія стійкості

У межах тривимірної лінеаризованої теорії стійкості [1] досліджено плоску задачу про стиск вздовж межі поділу гіперпружної бішарової системи, що складається з напівобмеженої підкладки, вкритої тонким шаром покриття. У випадку ідеальної адгезії між компонентами втрата стійкості відбувається за механізмом зморщування і характеризується такими критичними параметрами, як деформація стиску та довжина хвилі періодичного рельєфу, що утворюється на поверхні.

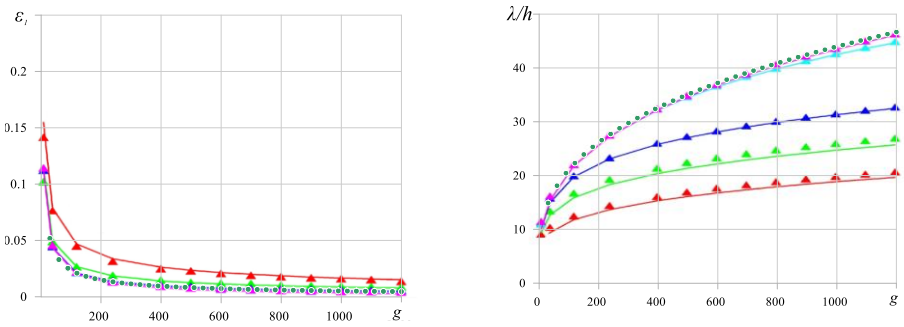
Запропонований напіваналітичний метод базується на використанні загальних представлень розв'язків лінеаризованих рівнянь рівноваги [1]. Відповідну граничну задачу, сформульовану в термінах потенціальних гармонічних функцій, зведено до трансцендентного рівняння для визначення критичної деформації [2]. Вказане рівняння одержано у загальній формі для комбінації двох стисливих або нестисливих гіперпружних матеріалів із *довільною* структурою пружних потенціалів.

Для низки конкретних конститутивних моделей вивчено характер залежності критичних параметрів навантаження від механічних характеристик бішару та досліджено вплив структури пружних потенціалів на ці значення.

В частинному випадку, коли компоненти бішарової системи є *нестисливими неогуківськими матеріалами*, проведено порівняння отриманих результатів із даними роботи [3]. У зазначеній праці для цієї ж конститутивної моделі автори використовували наближений балковий підхід та скінченно-елементне моделювання в межах моделі з підкладкою скінченної товщини.

На рис. 1 *а, б* трикутними маркерами позначено результати числової симуляції [3], лініями того ж кольору — результати балкового наближення. Червоний, зелений, синій, блакитний та рожевий кольори відповідають випадкам, коли підкладка товща за плівку у 2, 5, 10, 30 та 50 разів відповідно. Круглими маркерами побудовано значення, що відповідають розв'язку [2] отриманого трансцендентного рівняння.

Проведене порівняння засвідчило, що модель напівобмеженої підкладки для неогуківського бішару є застосовною для визначення критичних деформацій у разі, коли підкладка товща за плівку мінімум у 10 разів, а для визначення критичної довжини хвилі — мінімум у 30 разів.



а *б*

Рис. 1. Залежність критичних деформацій зморщування ε_1^r (*а*) та критичних довжин хвиль, нормованих на товщину покриття, λ/h (*б*) від відношення модулів Юнга покриття та підкладки $g = E_2/E_1$

1. A. N. Guz, V.L. Bogdanov, V.M. Nazarenko *Fracture of materials under compression along cracks.* In: Advanced Structured Materials, **138**,1–490. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-51814-1
2. A. L. Kipnis Wrinkling of hyperelastic thin film on hyperelastic semibounded substrate in cases of rigid connection and frictionless sliding of components. *J. Elast.* **157**, 40 (2025). https://doi.org/10.1007/s10659-025-10130-y
3. M. Li, B. Sun Post-buckling behaviors of thin-film soft-substrate bilayers with finite-thickness substrate. *Sci. Rep.* **12**, 4074 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-08136-w

Applicability of the semi-infinite substrate model for determining the critical wrinkling parameters of a neo-Hookean bilayer

O. Kipnis[a1], O. Syniavskyi[a2]

[a] S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] a.l.kipnis@gmail.com

[2] sinyavskiy1987@gmail.com

The paper investigates the compression of a hyperelastic bilayer system consisting of a semi-infinite substrate and a thin film coating within the framework of the three-dimensional linearized theory of stability. A semi-analytical method based on general solutions of linearized equilibrium equations is applied to determine the critical wrinkling parameters. A transcendental equation for determining the critical strain is derived in a general form, applicable to a combination of two compressible or incompressible hyperelastic materials with an arbitrary structure of elastic potentials. For incompressible neo-Hookean components, the accuracy of the semi-infinite substrate model is evaluated by comparing the obtained results with numerical data and beam-theory approximations for substrates of finite thickness. The limits of the model's applicability for determining critical strains and surface relief wavelengths are established.

Keywords: bilayer system, thin coating, neo-Hookean material, critical strains, three-dimensional linearized theory of stability.

Поширення осесиметричних електропружних хвиль у порожнистому п’єзокерамічному циліндрі з урахуванням градієнту та квадруполя електричного поля

О.Я. Григоренко[а1], І.А. Лоза[б2], І.Л. Соловйов[б3], С.М. Худолій [б4], С.О. Сперкач[в5]

[а]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[б]Національний транспортний університет Київ, Україна
[в]Технічний центр НАН України

[1]ayagrigorenko1991@gmail.com; [2]lozaigor1956@gmail.com; [3]SolovjovIL68@gmail.com; [4]snhoodoliy@gmail.com; [5]svetlana@nasu.kiev.ua

Ключові слова: п’єзокерамічні циліндри, осесиметричні хвилі, теорія електропружності з електричними квадруполями, перший градієнт вектору електричного поля.

Останнім часом в науковій літературі з механіки суцільного середовища та зв'язаних полів можна побачити значну кількість публікацій присвячених різним аспектам застосування градієнтної моделі.

В представленій роботі розглядається побудова варіанту градієнтної моделі для пружних діелектриків, яка базується на наступних двох підходах. Перший використовує вектор електричної поляризації як незалежну електричну конститутивну змінну [1]. Інший –використовує вектор електричного поля [2, 3]. В роботах Кафадара [4] показано, що градієнт електричного поля є термодинамічним сполученням електричного квадруполя. Теорії пружних діелектриків з електричними квадруполями були розроблені Деміраєм і Ерінгеном [5], Прехтлем [6], Нельсоном [7] і Калпакідесом [8, 9 – 11]. Зв’язок між теорією градієнта електричного поля або квадруполя та теорією градієнта поляризації обговорюється в [12].

Функція енергії W для даної задчі буде мати вигляд

$$W(S_{ij}, E_i, E_{i,j}) = H(S_{ij}, E_i) - \varepsilon_0 \gamma_{ijk} E_i E_{j,k} - \frac{1}{2}\varepsilon_0 \alpha_{ijkl} E_{i,j} E_{k,l}, \qquad (1)$$

де H – звичайна функція електричної ентальпії п’єзоелектричних матеріалів, E_i – компоненти вектора електричних напружень, $E_{i,j}$, – компоненти градієнта вектора електричних напружень, S_{ij} – компоненти тензора деформацій. Матеріальні співвідношення отримуємо взявши частинні похідні від функції W (1)

$$T_{ij} = \frac{\partial W}{\partial S_{ij}} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k, \qquad \Pi_i = -\frac{\partial W}{\partial E_i} = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_0 \chi_{ij} E_j + \varepsilon_0 \gamma_{ijk} E_{j,k};,$$
$$\Pi_{ij} = -\frac{\partial W}{\partial E_{i,j}} = \varepsilon_0 \gamma_{kij} E_k + \varepsilon_0 \alpha_{ijkl} E_{k,l} \qquad (2)$$

Π_i та Π_{ij} пов’язані з електричними дипольними та квадрупольними густинами [11].

На відміну від представлених вище робіт де розв’язуючі рівняння зводяться до системи диференціальних рівнянь четвертого порядку у нашому випадку крайова задача зведена до нормального виду звичайних диференціальних рівнянь першого порядку і може бути легко проінтегрована, скажімо, методом дискретної ортогоналізації. Цей метод авторами статті ефективно використовувався для дослідження динамічних процесів в неоднорідних п’єзокерамічних циліндрах та шарах на основі моделі суцільного середовища електропружних тіл [13].

1. Toupin R.A. The Elastic Dielectric // Arch. Ration. Mech. Anal. – 1956. – **5**. – P. 849 – 915.
2. Tiersten H.F. Electroelastic Interactions and the Piezoelectric Equations // J. Acoust. Soc. Am. – 1981. – **70,** – P.1567 – 1576.
3. Yang J. A Review of a Few Topics in Piezoelectricity // Appl. Mech. Rev. – 2006. – **59**. – P. 335 – 345.
4. Kafadar C.B. Theory of Multipoles in Classical Electromagnetism // Int. J. Engng. Sci. – 1971. – **9**. – P. 831 – 853.
5. Demiray H., Eringen C.A. On the Constitutive Relations of Polar Elastic Dielectrics // Lett. Appl. Engng. Sci. – 1973. – **1**. – P. 517 – 527.
6. Prechtl A. Deformable Bodies with Electric and Magnetic Quadrupoles // Int. J. Eng. Sci. – 1980. – **18**. – P. 665 – 680.
7. Nelson D.F. Electric, Optic, and Acoustic Interactions in Dielectrics. – New York: Wiley, 1979. – 539 p.
8. *Hadjigeorgiou E.P., Kalpakides V.K., Massalas C.V.* A General Theory for Elastic Dielectrics. II. The Variational Approach // J. Non-Linear Mech. – 1999. – **34**. – P. 967 – 980.
9. *Kalpakides V.K., Agiasofitou E.K.* On Material Equations in Second Order Gradient Electroelasticity // J. Elast. – 2002. – **67**. – P. 205 – 227.
10. *Kalpakides V.K., Massalas C.V.* Tiersten's Theory of Thermoelectroelasticity: An Extension // Int. J. Eng. Sci. – 1993. – **31**. – P. 157 – 164.
11. *Kalpakides V.K., Hadjigeorgiou E.P., Massalas C.V.* A Variational Principle for Elastic Dielectrics with Quadruple Polarization // Int. J. Engng. Sci. – 1995. – **33**. – P. 793 – 801.
12. *Maugin G.A.* The Principle of Virtual Power: Application to Coupled Fields // Acta Mech. – 1980. – **35**. – P. 1 – 70
13. *Grigorenko A.Ya., Müller, W.H., Loza, I.A.* Selected Problems in the Elastodynamics of Piezoceramic Bodies. – Cham: Springer, 2021. – 227 p.

Propagation of axisymmetric waves in a hollow piezoceramic cylinder taking with the gradient and quadrupole of the electric field.

A. Grigorenko [a], I. Loza [b], I. Solov'ev [b], S. Khudolii [b], S. Sperkach [c]

[a] S. P. Tymoshenko Institute of Mechanics, NAS of Ukraine,
[b] National Transport University Kyiv, Ukraine
[c] Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine

Authors use the theory of elastic dielectrics with electric quadrupoles to describe the piezoceramic medium and present equations of motion, kinematic and material equations in a cylindrical coordinate system, and corresponding boundary conditions based on this model. We can study the propagation of electroelastic axial waves in an infinite piezoceramic cylinder. The mechanical boundary condition is that the side surfaces are free of mechanical loads. The electric boundary condition is that the side surfaces are covered with infinitely thin, short-circuited electrodes. The component of the electric field normal to the side surface is zero. After a series of transformations, we obtain a system of ordinary differential equations in normal form with corresponding boundary conditions. This system is solved based on the stable numerical discrete-orthogonalization method in combination with the incremental search method.

Keywords: piezoceramic cylinders, axisymmetric waves, theory of electroelasticity with electric quadrupoles, first gradient of the electric field vector.

Застосування комбінованого методу до визначення частот вільних коливань шестикутних пластин з отвором

О. Я. Григоренко[a1], М. Ю. Борисенко[a2], Н.П. Борейко[a], А.Д. Безугла [б]

[a]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[б]Технічний центр НАН України, Київ, Україна

[1] ayagrigorenko1991@gmail.com; [2] mechanics530@gmail.com

Ключові слова: шестикутна пластина, частота вільних коливань, комбінований метод, метод скінченних елементів, резонансний метод, верифікація.

У багатьох галузях сучасної техніки, машинобудування, будівництва, а також у ракетно-космічній та оборонній галузях широко застосовуються пластинчасті елементи складної, зокрема багатокутної, форми. Залежно від функціонального призначення такі елементи можуть мати різну товщину, варіанти закріплення та з'єднання, технологічні отвори, складні контури й інші конструктивні неоднорідності, які істотно впливають на їхні динамічні характеристики. Саме тому дослідження вільних коливань багатокутних пластин є фундаментальною складовою аналізу динамічної поведінки конструкцій. Актуальною є задача створення ефективних інженерних методів, придатних для практичного використання на етапах попереднього проєктування. У цьому контексті перспективним є комбінований підхід [1], який поєднує результати, отримані чисельними або експериментальними методами, з аналітичним виразом і дозволяє представити вплив форм коливань і граничних умов у вигляді узагальнених числових коефіцієнтів. Розрахунок цих коефіцієнтів можна проводити методом скінченних елементів, реалізованим у програмному забезпеченні для інженерного аналізу [2]. Комбінований метод відрізняється від відомих аналогів можливістю розширення таблиць коефіцієнтів для визначення більшої кількості частот та застосуванням до пластин із більшою кількістю кутів та з отворами без зміни базової методики.

Разом із тим комбінований підхід потребує експериментальної верифікації. Експериментальні дослідження частот і форм вільних коливань пластин можна проводити резонансним методом [3]. Комбінований метод застосовувався до визначення частот вільних коливань шестикутних пластин без отвору [4] без експериментальної перевірки. Частоти, обчислені методом скінченних елементів, порівнювалися з частотами, отриманими за зведеною формулою комбінованого методу, що дозволило оцінити точність розрахунків. У роботах [3, 5, 6] проведено експериментальну верифікацію результатів, отриманих методом скінченних елементів, для трикутних, чотирикутних і п'ятикутних пластин за допомогою результатів отриманих резонансним методом.

Таким чином, розвиток комбінованого методу з використанням методу скінченних елементів та його експериментальною верифікацією є актуальною науково-прикладною задачею сучасної прикладної механіки щодо визначення частот вільних коливань шестикутних пластин з отворами. Отримані результати дозволили сформувати цілісну та методично узгоджену систему аналізу динамічних характеристик пластинчастих елементів, яка може бути використана для дослідження широкого класу інженерних конструкцій сучасної техніки та машинобудування.

1. O.Y. Grigorenko, M.Y. Borisenko, N.P. Boreiko, V.V. Baburov, Numerical analysis of frequencies of free vibrations of pentagonal plates with one edge rigidly fixed, Int Appl Mech, 61(1), 31-41 (2025). https://doi.org/10.1007/s10778-025-01330-z
2. O.Y. Grigorenko, M.Y. Borysenko, O.V. Boychuk, Numerical evaluation of frequencies and modes of free vibrations of isosceles triangular plates with free edges, J Math Sci, 273, 27-43 (2023). https://doi.org/10.1007/s10958-023-06481-3
3. A.Ya. Grigorenko, M.Yu. Borisenko, E.V. Boichuk, L.Ya. Vasil'eva, Free vibrations of triangular plates with a hole, Int Appl Mech, 57(5), 534-542 (2021). https://doi.org/10.1007/s10778-021-01104-3
4. Grigorenko, M. Borysenko, O. Boychuk, N. Boreiko, Numerical analysis of free vibration frequencies of a hexagonal plate, in: H. Altenbach, V. Bogdanov, A.Y. Grigorenko, R.M. Kushnir, V.M. Nazarenko, V.A. Eremeyev (eds), Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods, Adv Struct Mater, 204, 201-220 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_15
5. О.Я. Григоренко, М.Ю. Борисенко, О.В. Бойчук, В.С. Новицький, Застосування експериментального і чисельного методів до дослідження вільних коливань прямокутних пластин, Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій, Вип. 29, 103-112 (2019). https://doi.org/10.15421/4219009
6. О.Я. Григоренко, М.Ю. Борисенко, О.В. Бойчук, С.О. Сперкач, А.Д. Безугла, Вільні коливання п'ятикутних пластин з отвором, Доповіді Національної академії наук України, № 1, 24-31 (2023). https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.01.024

Application of the Combined Method to Determining the Frequencies of Free Vibration of Hexagonal Plates with a Hole

O. Ya. Grigorenko[a1], M. Yu. Borysenko[a2], N.P. Boreiko[a], A.D. Bezugla[b]

[a]S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]Technical center of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] ayagrigorenko1991@gmail.com
[2] mechanics530@gmail.com

An investigation of the application of the combined method to the determination of the free vibration frequencies of hexagonal plates with a hole. The method integrates results from finite-element numerical analysis, a reduced analytical formula, and experimental verification using the resonance method. Established generalized coefficients representing the influence of vibration forms and boundary conditions. The proposed approach enables efficient determination of frequencies without performing full-scale numerical simulations. At the preliminary design stage, plate elements of complex shape can apply the obtained result

Keywords: hexagonal plate, free vibration frequency, combined method, finite element method, resonance method, verification

Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень прямим методом при використанні ПК ЛІРА-САПР

О. О. Шкриль[a1], В.Б. Долгошей[б2]

[a]Київский національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
[б]Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

[1] alexniism@ukr.net ; [2] vbdolgoshey@gmail.com

Ключові слова: пружна задача, тріщина, метод скінченних елементів, коефіцієнт інтенсивності напружень, прямий метод

На сьогоднішній день питання визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень реалізовано в багатьох програмних комплексах, таких як Abaqus, Ansys, Nastran тощо. Проте вартість ліцензій не дозволяє більшості дослідників в повній мірі користуватися такими програмами. Тому актуальним є дослідження можливості застосування підходів механіки руйнування в програмних комплексах, користування якими є безкоштовним. У даній публікації досліджено можливість визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) на основі результатів визначеного напружено-деформованого стану (НДС), отриманих за допомогою програмного комплексу «ПК ЛІРА-САПР 2016 R5 (некомерційна)».

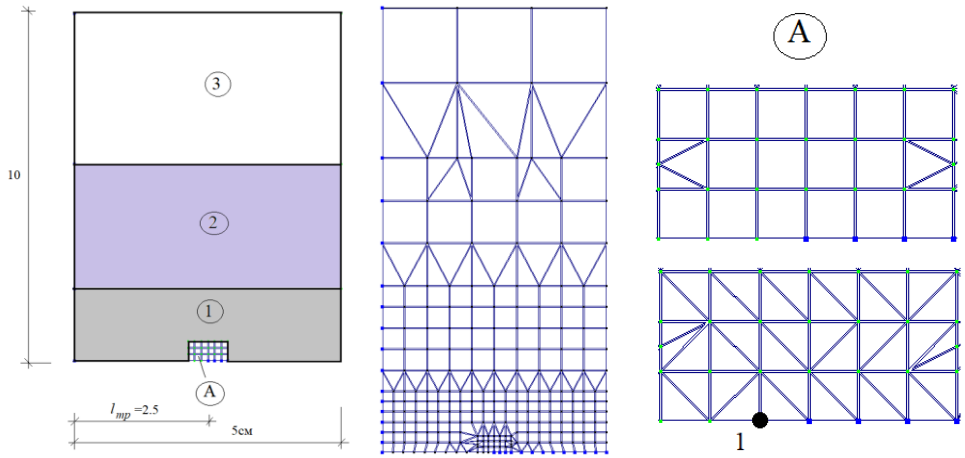
Визначення КІН прямим методом для тріщин нормального відриву обчислюються на основі визначеного розподілу переміщень в околі вершини тріщини [1]

$$K_I = \frac{u_y \mu}{sin\frac{\theta}{2}\left(2 - 2\nu - cos^2\frac{\theta}{2}\right)}\sqrt{\frac{2\pi}{r}}, \qquad (1)$$

де r, θ – полярні координати з початком в вершині тріщини ; μ – модуль зсуву; ν – коефіцієнт Пуассона.

Для симетричних задач моделювання тріщини може відбуватися за допомогою задання відповідних граничних умов. Навколо вершини тріщини виділяється привершинна область розмірністю 3 на 6 елементів. (рис. 1,в).

Реалізація прямого методу визначення КІН була здійснена на тестовій задачі про розтяг пластини з центральною тріщиною. Фізико-механічні характеристики: E=1кг/см^2, ν=0.3. Зовнішнє навантаження q=1кг/см^2. Розміри b=10 см, h=20 см, $2l_{mp}$=5см. Враховуючи симетрію, на рис.1а,б показано чверть пластини та її дискретна модель. Від зони А, де знаходиться вершина тріщини, дискретизація відбувається з поступовим збільшенням СЕ в 2 рази до зони 3. Визначення КІН за формулою (1) виконується у незакріпленому вузлі 1, який є найближчим до вершини тріщини (рис.1,в). Розрахунки показали, що збіжність КІН досягається, якщо розмір квадратного СЕ в зоні А буде в 20 разів меншим за розмір тріщини. В такому випадку похибка визначеного $К_I = 3.24\ \frac{кг}{см^2}\sqrt{см}$ становить 2.6%, порівняно з еталонним значенням [2]



а *б* *в*

Рис. 1. Чверть пластини з центральною тріщиною: *а* – зони розбивки; *б* – дискретна модель, *в*- привершинна область А.

Розбивка в зонах 1,2,3 на трикутні або чотирикутні СЕ впливає на результат в межах 1%. Використання трикутних СЕ в привершиннній області А (рис.1,в) погіршує точність результатів на 14%.

1. Anderson T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications.* / [T.L. Anderson]. – CRC press, 2017. – 688 p.
2. Stress Intensity Factors Handbook: in 2 vol. / Ed. Y. Murakami. Oxford; New York: Pergamon Press, 1987.

Determination of stress intensity factors by direct method using LIRA-CAD software

O.Shkryl [a1], V. Dolgoshey[b2]

[a] Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.
[b]National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’, Kyiv, Ukraine.

[1] alexniism@ukr.net

[2] vbdolgoshey@gmail.com

This publication explores the possibility of determining stress intensity factors using a direct method based on displacements determined using the LIRA-CAD software package. As an example, a test problem involving the tension of a rectangular plate with a central crack is considered. Requirements for the discretization of the plate within the crack tip zone and beyond it are established in order to obtain reliable results.

Keywords: elastic problem, crack, finite element method, stress intensity factor, direct method.

Мікрохвильові технології контролю надійності колійної структури магнітолевітуючого транспорту

Ю.М. Лаврич[1] **, С.В. Плаксін , Л.М. Погоріла**

Інститут транспортних систем і технологій НАН України

[1]email lavrich@ westa-inter.com

Ключові слова: контроль**,** шляхова структура, електромагнітне випромінювання, тріщино утворення

Існуючий на сьогоднішній день досвід розвитку техносфери показує, що відмови, аварії і катастрофи завжди були невід'ємною частиною життєвого циклу всіх без винятку технічних систем. Залізниці є складними інженерно-технічними об'єктами з підвищеної відповідальністю за безпеку перевезень. Більшість відомих на сьогодні високошвидкісних транспортних засобів (ВМТЗ) виконана на базі магнітолевітаційних технологій транспортних засобів. Сучасний магнітолевітуючий транспорт позбавлений традиційної пари колесо-рейка і представляє дві взаємозалежні системи – нерухому активну шляхову структуру (ШС) з набором закріплених на ній електротехнічних пристроїв і рухливий екіпаж (РЕ).
Здійснювати безперервний або звичайний періодичний контроль стану конструктивних матеріалів ШС високошвидкісного магнітолевітуючого транспортного засобу за допомогою традиційних методів досить складно або просто неможливо, оскільки для проведення контролю вимагають припинення застосування за призначенням (функціонування) . Результати контролю в даному випадку не є функцією часу. Оскільки активна ШС ВМТЗ є найважливішою системою, що значно впливає на безпеку і надійність транспортного засобу в цілому, і з огляду на високу швидкість переміщення, відсутність контакту з поверхнею ШС, необхідний ступінь безпеки – то побудова пристрою контролю, що забезпечує контроль ШС в реальному масштабі часу, є суттєво необхідною.

Серед фізичних явищ, придатних для вирішення задачі динамічного контролю конструктивної міцності елементів і процесів їх руйнування, найбільш перспективним е явище механоелектричного перетворення, що має дві складові компоненти – електромагнітну і акустичну [8].

Утворення тріщин супроводжується виникненням на її краях поверхневих і об'ємних зарядів, рух яких викликає появу електромагнітного випромінювання. Відомо, що АЕ розвивається з наростанням інтенсивності руйнування і досягає свого максимального значення під час макроруйнування.

Оскільки ближня зона випромінювання тріщин простягається аж до області частот 10^6-10^7 Гц, в якій загасання імпульсу електромагнітного випромінювання мінімально, а за границями ближньої зоні випромінювання практично відсутнє внаслідок його експоненціального затухання, то при розробці пристрою для реєстрації ЕМЕ необхідно використовувати спектри електромагнітної емісії тріщин тільки в ближній зоні. Оскільки для магнітолевітуючого транспорту зазор між активною шляховою структурою і транспортним засобом становить 10-15 мм, то виникає

можливість прийому електромагнітного сигналу в цьому діапазоні. Виходячи з механізмів виникнення сигналів ЕМЕ і АЕ, концепція побудови пристрою динамічного контролю міцності шляховий структури може бути реалізована на основі пасивної радіолокації, оскільки фізичні поля ЕМЕ і АЕ випромінюються самими дефектами контрольованої шляхової структури. Структурна схема пристрою динамічного контролю (ПДКП) приведена на рис.1.

Система моніторингу 2-х канальна, забезпечує прийом інформаційних ознак у вигляді ЕМЕ і АЕ сигналів, збір, обробку, аналіз, зберігання та передачу інформації про узагальнені параметри стану ШС.

де: АПЕ, АПА - антенні пристрої електромагнітних і акустичних хвиль відповідно; КЕА, КАА - канали аналізу електромагнітних і акустичних хвиль відповідно; МПП - мікропроцесорний пристрій; ПАО - пристрій аналізу та обробки; ПВП - пристрій відображення і передачі; ПСУ - пристрій синхронізації та узгодження. Весь спектр випромінювань ШС, що виникає при утворенні процесу руйнування на початковій та наступних стадіях, приймається на приймальний пристрій, розташованим на ТЗ. Застосування двох каналів обумовлено труднощами виділення сигналів АЕ з перешкод. так як сигнали АЕ є шумоподібними, При розвитку дефекту, коли його розміри наближаються до критичного значення, амплітуда сигналів АЕ і темп їх генерації різко збільшується, що призводить до значного зростання ймовірності виявлення такого джерела АЕ.

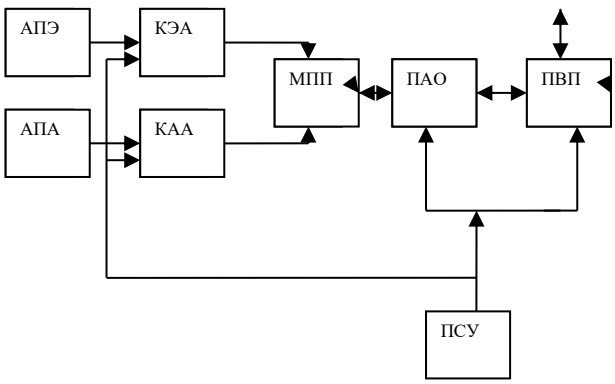


Рис. 1. Структурна схема пристрою ПДКП .

Сигнали ЕМЕ і АЕ, що випромінюються ШС транспортного засобу, приймаються приймальними антенами відповідних каналів. Для забезпечення неспотвореної передачі по тракту, прийняті антенними пристроями АПЕ і АПА електромагнітні та акустичні сигнали, попередньо посилюються і фільтруються кожного з каналів, а аналогові сигнали надходять для оцифрування на входи аналогових цифрових перетворювачів перетворювачами відповідних каналів. Цифрові сигнали відповідних каналів надходять на схеми рахунку сигналів ЕМЕ і АЕ, У моменти виникнення випромінювань, запускається лічильник, код лічильника починає зростати, а в момент припинення випромінювання тріщиною, лічильник імпульсів зупиняється і відображає число імпульсів. Результати рахунки надходять в пам'ять МПП та обнулюють лічильник імпульсів. Пристрій ПАО призначено для побудови на основі результатів динамічного контролю S подібної кривої, яка порівнюється з еталонною у МПП.

Поточна інформація про стан шляхової структури бездротовими засобами передається диспетчеру, але, може передаватися черговому (наступному) транспортному засобу, переміщуваного по ШС, що дозволить проведення поточного порівняльного аналізу в режимі реального часу як диспетчером, так і екіпажем наступних транспортних засобів.

Так як пристрій контролю розміщується на транспортному засобі, то поточні параметри руху транспортного засобу визначаються і фіксуються бортовим позиціонером, інформація з якого потім записується на носій, та передається в режимі реального часу по радіоканалу, накопичується на інформаціонному сервері.

Пристрій синхронізації ПСУ призначене для забезпечення прив'язки поточних координат джерел випромінювання на ШС до поточних координат місця розташування ТС.

В даний час технології супутникового позиціонування знаходять все більш широке застосування на залізницях розвинених в технічному відношенні країн, забезпечують необхідну точність.

Пристрій контролю ПДКП, заснований на застосуванні електромагнітних випромінювань, забезпечує можливість прямого безконтактного динамічного контролю в умовах реальної експлуатації і реальному масштабі часу.

1. Назарчук З.Т., Скальский В.Р., Почапський Є.П. Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. К:Наукова Думка. 2014. 303с.

Microwave technologies for reliability control of the track structure of magnetic levitation transport

Lavrych Y.N., Plaksin S.V., Pogorelaya L.M.

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

It is quite difficult or simply impossible to continuously monitor the condition of a high-speed magnetic levitation vehicle using traditional methods, and the monitoring results in this case are not a function of time. High speed of movement, lack of contact with the surface, high requirements for the degree of safety, require the construction of a monitoring device that provides real-time monitoring of the track structure.

Considering the features of the construction of a magnetic levitation transport system, the most informative control signal is electromagnetic radiation signals during destruction.

[1]email lavrich@ westa-inter.com

Keywords: control, track structure, electromagnetic radiation, crack formation.

Фізико-інформовані нейронні мережі в задачах механіки деформівного твердого тіла

О.Є. Кучеренко[1]

[1]Інститут технічної механіки НАН України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

[1]ak_sci@proton.me

Ключові слова: фізико-інформована нейронна мережа, функція втрат, диференціальне рівняння, пластина.

Розв'язування багатьох задач механіки деформівного твердого тіла зводиться до використання чисельних методів, зокрема метода скінченних елементів (МСЕ). Альтернативний підхід пов'язаний із застосуванням фізико-інформованих нейронних мереж (PINN), які безпосередньо інтегрують фізичні закони у свою структуру, що дає можливість отримувати **апроксимації гладких розв'язків диференціальних рівнянь у всій області визначення задачі без необхідності побудови дискретної сітки [1, 2].** Для ілюстрації методології застосування PINN розв'язується задача визначення напружено-деформованого стану прямокутної пластини з дюралюмінію розміром 150 мм х 100 мм х 1 мм. Розглядаються такі граничні умови: а) дві довгі паралельні сторони пластини жорстко закріплено, при цьому поперечне навантаження рівномірно розподілено за площиною і дорівнює q = $5\cdot10^4$ Па; б) тільки одну — коротку — сторону жорстко закріплено, а поперечне навантаження змінюється вздовж довгої сторони за еліптичним законом $q = 10^4\sqrt{0.15^2 - x^2}$ Па, що можна розглядати як дію піднімальної сили на крило. Основне рівняння з граничними умовами у знерозміреній формі має наступний вигляд:

$$\bar{\nabla}^4\bar{w}=1,\ \bar{w}=0,\ \frac{\partial\bar{w}}{\partial\bar{x}}=0, \tag{1}$$

де $\bar{\nabla}^4=(\frac{\partial^2}{\partial\bar{x}^2}+\frac{\partial^2}{\partial\bar{y}^2})^2$, $\bar{w}$ — поперечне зміщення. Для (1) можна записати таку апроксимацію:

$$\hat{w}(\bar{x},\bar{y})=NN(\bar{x},\bar{y};\boldsymbol{\theta}), \tag{2}$$

де $NN(\bar{x},\bar{y};\boldsymbol{\theta})$ — фізико-інформована нейронна мережа з параметрами **θ,** для якої функція втрат з урахуванням (1) може бути записана наступним чином:

$$\begin{gathered} L=L_{PDE}+\lambda\cdot L_{BC}, \\ L_{PDE}=\sum_i F\left(\bar{\nabla}^4\hat{w}(\bar{x}_i,\bar{y}_i)-1,\ 0\right),\ \{(\bar{x}_i,\bar{y}_i)\}_{i\in N}\in\bar{\Omega}, \\ L_{BC}=\sum_i F\left(\hat{w}(\bar{x}_i,\bar{y}_i),\bar{w}_{BC}(\bar{x}_i,\bar{y}_i)\right),\ \{(\bar{x}_i,\bar{y}_i)\}_{i\in N}\in\partial\bar{\Omega}, \end{gathered} \tag{3}$$

де $\bar{\Omega}$ — область визначення на площині із границею $\partial\bar{\Omega}$; F — функція, що вимірює розбіжність між її аргументами (зазвичай квадратична функція); λ — ваговий фактор; $\bar{w}_{BC}$ — зміщення на границі $\partial\bar{\Omega}$. В процесі дослідження виявилося, що мережа з 1 прихованим шаром з 5 нейронами та активаційною функцією (LeakyReLU)[5] з достатньою точністю апроксимує розв'язок рівняння (1). На рис. 1 і 2 зображено поле переміщень для варіантів граничних умов (а) і (б). Розбіжність між результатами при обчисленні максимальних переміщень при порівнянні PINN і МСЕ не перевищує 2%.

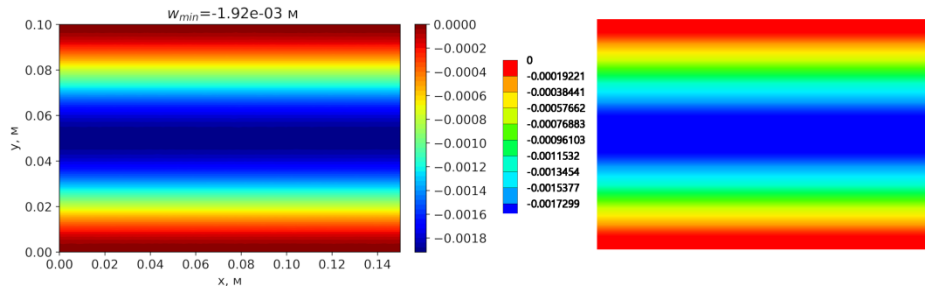


Рис. 1. Поле переміщень (в м) за дії рівномірного навантаження — PINN (ліворуч) та МСЕ (праворуч).

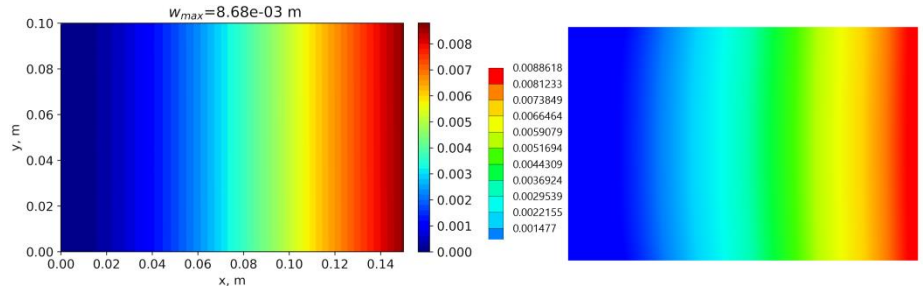


Рис. 2. Поле переміщень (в м) за дії піднімальної сили — PINN (ліворуч) та МСЕ (праворуч).

1. H. Li, Y. Miao, Z.S. Khodaei, M.H. Aliabadi, Finite-PINN: A physics-informed neural network with finite geometric encoding for solid mechanics, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **203**, 106222 (2025). https://doi.org/10.1016/j.jmps.2025.106222
2. C. Zhao, F. Zhang, W. Lou, X. Wang, J. Yang, A comprehensive review of advances in physics-informed neural networks and their applications in complex fluid dynamics, *Physics of Fluids*, **36**(10), 101301 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0226562

Physics-Informed Neural Networks for Problems in Solid Mechanics

O. Kucherenko[1]

[1]The Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] ak_sci@proton.me

The study regards the application of physics-informed neural networks (PINNs) to problems of solid mechanics. As an example, it considers the solution of a partial differential equation that describes the deformation of a thin rectangular plate subjected to transverse loading. The analysis includes two types of boundary conditions: one corresponding to a constant load and another in which the load varies according to an elliptical distribution along the longer side of the plate. The study determines a PINN architecture that provides sufficient accuracy for the problem. The work reports numerical results for the stress–strain state of the rectangular plate for each type of boundary condition and compares these results with solutions obtained using FEM.

Keywords: physics-informed neural network, loss function, differential equation, plate.

Взаємодія крайової та внутрішньої тріщин у пружному клині

В. І. Острик

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

v.i.ostryk@gmail.com

Ключові слова: пружний клин, тріщина, напруження, метод Вінера – Гопфа, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Задачам про рівновагу пружного клина з крайовою, внутрішньою або напівнескінченною тріщиною присвячено багато робіт різних авторів (див. огляди в [1, 2]). Нижче розглянуто взаємодію двох тріщин на осі симетрії пружного клина.

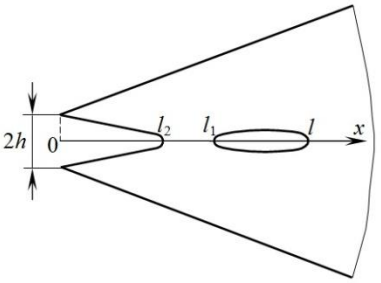
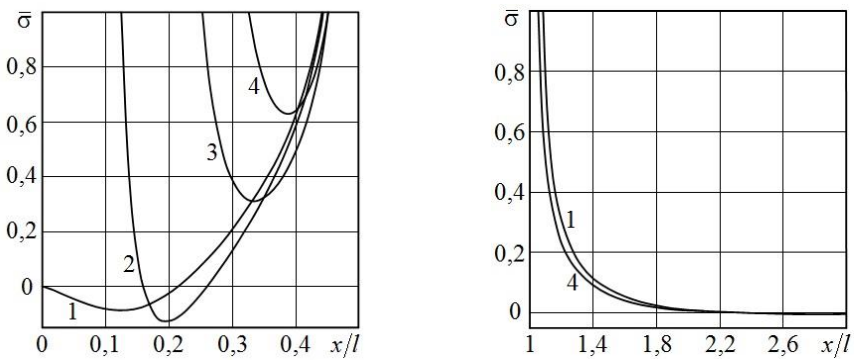


Рис. 1. Пружний клин із двома тріщинами.

Пружний клин із кутом розхилу α, модулем зсуву G і числом Пуассона m на своїй осі симетрії має дві тріщини: крайову ($0 < x < l_2$) і внутрішню ($l_1 < x < l$), береги яких знаходяться під сталим тиском p (рис. 1). Грані клина вільні. Під навантаженням тріщини розкриваються. Максимальне розкриття $2h$ крайової тріщини разом із розподілом нормальних напружень на осі симетрії клина поза тріщинами потребує визначення.

За допомогою інтегрального перетворення Мелліна за радіальною координатою отримано інтегральне рівняння з різницевим ядром на системі скінченного та напівнескінченного інтервалів. Із застосуванням узагальненої схеми [3] методу Вінера – Гопфа [4] інтегральне рівняння задачі зведено до нескінченної системи алгебричних рівнянь з експоненціально спадними коефіцієнтами, яку розв'язано в рядах за степенями малого параметра. Отримано розподіли напружень на лінії продовження тріщин, нормальні переміщення берегів тріщин і коефіцієнти інтенсивності напружень у вершинах тріщин.



а *б*

Рис. 2. Розподіли нормальних напружень на продовженні тріщин: *а* – між тріщинами, *б* – поза тріщинами.

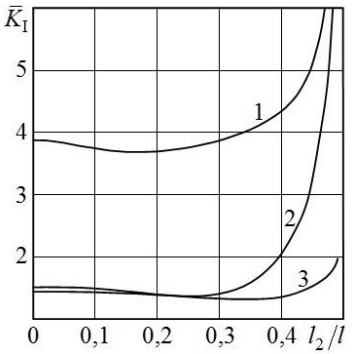


Рис. 3. Коефіцієнти інтенсивності напружень.

На рис. 2 для клина з кутом $\alpha = \pi/2$ зображено розподіли безрозмірних нормальних напружень $\bar{\sigma} = p^{-1}\sigma_y$ на лінії симетрії клина між тріщинами (*а*) та на продовженні внутрішньої тріщини за її праву вершину (*б*) для відносної довжини внутрішньої тріщини $l_1/l = 0{,}5$ і крайової тріщини $l_2/l = 0$; 0,1; 0,2; 0,25 (криві 1–4).

Залежності нормалізованих коефіцієнтів інтенсивності напружень $\bar{K}_I = p^{-1}l_2^{-\frac{1}{2}} \times \times K_I(l_2)$, $p^{-1}(l-l_1)^{-\frac{1}{2}}K_I(l_1)$, $p^{-1}(l-l_1)^{-\frac{1}{2}}K_I(l)$ (криві 1–3) від відносної довжини крайової тріщини l_2/l у випадку $\alpha = \pi/2$, $l_1/l = 0{,}5$ показано на рис. 3. Зі зменшенням відстані між тріщинами коефіцієнти інтенсивності напружень суттєво зростають.

1. М. П. Саврук, *Механика разрушения и прочность материалов, под ред. В. В. Панасюка, Т. 2, Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами*, Наук думка, Киев (1988).
2. K. M. Nekislykh, and V. I. Ostrik, Problems on elastic equilibrium of a wedge with cracks on the axis of symmetry, *Mech Solids*, **45**(5), 743–756 (2010).
3. Ю. А. Антипов, Точное решение задачи о вдавливании кольцевого штампа в полупространство, *Докл АН УССР, Сер А: Физ-мат и техн науки*, 7, 29–33 (1987).
4. B. Noble, *Methods Based on the Wiener–Hopf Technique for the Solution of Partial Differential Equations*, Pergamon Press, London (1958).

Interaction of edge and internal cracks in an elastic wedge

V. I. Ostryk

Institute of Applied Physics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine.

v.i.ostryk@gmail.com

The interaction of the edge and internal cracks on the axis of symmetry of the elastic wedge is considered. Using the Mellin integral transformation in the radial coordinate, an integral equation with a difference kernel on a system of finite and semi-infinite intervals is obtained. Using the generalized scheme of the Wiener–Hopf method, the integral equation of the problem is reduced to an infinite system of algebraic equations with exponentially decreasing coefficients, which is solved in series in powers of a small parameter. The stress distributions on the crack extension line, the normal displacements of the crack faces, and the stress intensity factors at the crack tips are obtained.

Keywords: elastic wedge, crack, stress, Wiener–Hopf method, stress intensity factor.

Еволюція поодинокого профілю типу «kink» викликана генерацією другої гармоніки

С.В. Сінчило, В.М. Юрчук[1]

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1]yurchuk@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: поодинокі хвилі, профіль типу «kink», генерація другої гармоніки

Генерація другої гармоніки і аналіз спотворення початкового профіля типу «kink» розглядається на прикладі розповсюдження повздовжньої хвилі, коли на вході в середовище задана тільки ця хвиля.

Розглянемо рівняння другого наближення

$$u_{tt}^{**} - (\lambda + 2\mu)u_{xx}^{**} = N_1 u_{xx}^{*} u_{x}^{*} \tag{1}$$

Розглянемо початковий профіль у вигляді поодинокої хвилі типу «kink» подібний до розв'язків нелінійного рівняння Клейна-Гордона [2, 3] та модифікованого покращеного рівняння Буссінеска [2, 4] типу:

$$u^{*} = u_0 \ \mathrm{sech}(tw - kx) \tag{2}$$

Рівняння (1) розв'яжемо методом послідовних наближень, тобто знайдемо друге наближення за відомим першим, яке буде мати вигляд:

$$u^{**} = \frac{1}{6} {u_0}^2 k \cdot F \cdot \left(3 + 2\frac{(A + 3B + C)}{(\lambda + 2\mu)}\right) \tanh(tw - kx)^3 \tag{3}$$

де λ, μ - пружні константи Ляме (постійні другого порядку); A, B, C - пружні постійні Мернагана (постійні третього порядку)).

Характерні графіки початкового профілю u^{*} (симетричний профіль) та $u^{*} + u^{**}$(генерація другої гармоніки) що показують еволюційні зміни наведені на Рис.1

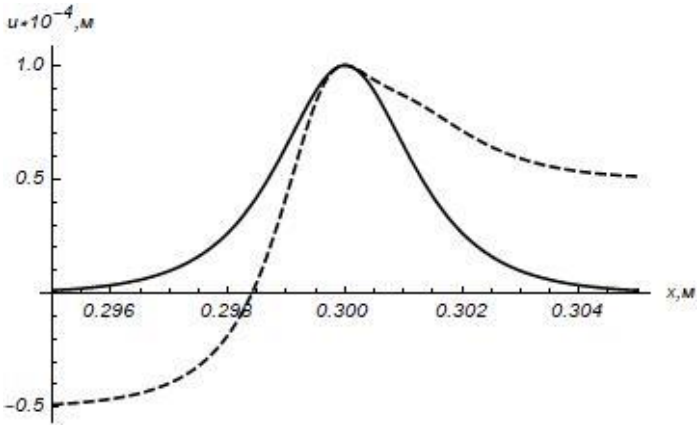


Рис. 1. Початковий профіль u^{*} (симетричний профіль відносно x=0,3 м); спотворений профіль $u^{*} + u^{**}$(генерація другої гармоніки).

На основі чисельного моделювання та порівнянні з початковим профілем, основні хвильові ефекти в поодинокій хвилі виявляються в початковому суттєвому впливі

другої гармоніки до та після так званого різкого вигину або переходу на графіку функції маючи стрибок «kink» для першого наближення. До та після різкого вигину початковий профіль наближається до вигляду другого наближення.

1. Rushchitsky J.J., *Nonlinear Elastic Waves in Materials.* – Heidelberg: Springer, 2014. – 455 p.
2. А. Корпел, П.П. Банерджи, *Эвристический подход к нелинейным волновым уравнениям с дисперсией и к решениям солитонного типа*, ТИИЭР. − 1984. − 72, № 9. −С. 6−30.
3. Karpman V.I., *Soliton evolution in the presence of perturbation,* Physica Scripta. – 1979. – 20, N 314. –P. 462−478.
4. Hereman W., Banerjee P.P., Korpel A. etc. *Exact solitary wave solution of nonlinear evolution and wave equations using a direct algebraic method,* Idid. – 1986. − N 19. –P. 607−628.

Evolution of a solitary «kink»-type profile induced by the generation of the second harmonic.

S.V. Sinchilo[a], V. M. Yurchuk [a1]

[a]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine

[1]yurchuk@inmech.kyiv.ua

An initial solitary profile of the «kink» type, similar to the solutions of the nonlinear Klein–Gordon equation and the modified improved Boussinesq equation, is considered. Numerical modeling of the influence of the second harmonic on the distortion of the initial profile is carried out. Representations of the solutions of the equation in the first two approximations are obtained for computer analysis of the evolution of a solitary wave.

Keywords: solitary waves, kink-type profile, second-harmonic generation.

Еволюція циліндричної радіальної хвилі з поодиноким профілем Макдональда викликана нелінійністю матеріалу

В.М. Юрчук[1], С.В. Сінчило

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1]yurchuk@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: поодинокі хвилі, профіль у вигляді функції Макдональда, спотворення початкового профілю

Циліндричною радіальною хвилею зміщення називають хвилю, яка розповсюджується в нескінченному просторі з циліндричною круговою поверхнею, до граничної поверхні якої прикладається імпульс, що збуджує рух в радіальному напрямку. У найпростішому випадку імпульс гармонічний в часі. Циліндрична система координат $Or\vartheta z$ вибирається таким чином, щоб вісь Oz збігалася з віссю порожнини і рух хвилі стає осесиметричним і залежним лише від радіуса r і часу t. Ненульовими є тільки радіальний зсув u_r і три компонента тензора напружень $\sigma_{rr}, \sigma_{\vartheta\vartheta}, \sigma_{zz}$. Відповідне нелінійне рівняння в рамках моделі Мурнагана є таким [1,2]

$$(c_L)^2\left(1-\tilde{N}_1 u_{r,r}\right)\left(u_{r,rr}+\frac{1}{r}u_{r,r}-\frac{u_r}{r^2}\right)-u_{r,tt}=0, \qquad (1)$$

де $\tilde{N}_1 = 3+\frac{2(A+3B+C)}{(\lambda+2\mu)}$, λ, μ - пружні константи Ляме (постійні другого порядку); A, B, C - пружні постійні Мернагана (постійні третього порядку)).

Лінійний розв'язок рівняння (1) з початковим профілем у вигляді хвилі Макдональда має вигляд

$$u_r^{(1)}(r,t)=u_0 K_0(\sigma), \qquad (2)$$

де u_0-початкова амплітуда хвилі,$\sigma = a(r-c_L t)$- фаза хвилі з постійною швидкістю.

Розв'язок рівняння (1), використовуючи метод обмеження на градієнт зміщення з заданим початковим профілем у вигляді функції Макдональда для перших двох наближень матиме вигляд [2,3]

$$u_r^{(1+2)}(r,t)\approx u_0 K_0(\sigma)-\left(\frac{1}{2}\right)(u_0)^2 a^2 c_L \tilde{N}_1 t\left[K_0{}'(\sigma)\right]^2, \qquad (3)$$

де $u_r^{(2)}(r,t)\approx -\left(\frac{1}{2}\right)(u_0)^2 a^2 c_L \tilde{N}_1 t\left[K_0{}'(\sigma)\right]^2$ - друге наближення, спотворює початковий профіль циліндричної хвилі через пряму залежність нелінійної складової від часу поширення початкового профілю.

Далі розглянуто двовимірний графік, на якому порівнюється перше наближення$u_r^{(1)}(r,t)$ з першим та другим $u_r^{(1+2)}(r,t)$ (система CI).

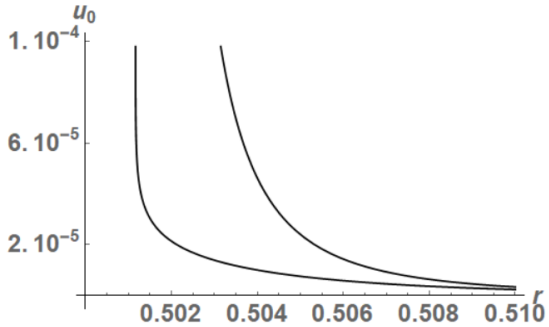


Рис. 1. Тривалий етап руху хвилі (приблизно на відстані 50 повторень довжини підошви хвилі), верхній графік відповідає розв'язку (3) (1-ше + 2-ге наближення) а нижній - розв'язку (2) (1-ше наближення)

Отже з рис.1, на основі чисельного моделювання, спостережено спотворення початкового профілю при поширенні хвилі в нелінійно пружному матеріалі. Несиметричний профіль першого та другого наближення стає більш пологим та відхиляється вправо відносно першого наближення. Значення максимальної амплітуди при цьому залишається незмінним.

1. Rushchitsky J.J., *Nonlinear Elastic Waves in Materials.* – Heidelberg: Springer, 2014. – 455 p.
2. *Rushchitsky, J., Yurchuk*, V. Comparison of Evolution of Five Types of Elastic Waves (Harmonic, Gauss, Whittaker, MacDonald, and Friedlander Initial Profiles). Chapter 25 in: Guz, A.N., Altenbach, H., Bogdanov, V., Nazarenko, V.M. (eds) Advances in Mechanics.– 2023. – P. 435-468. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8_25
3. *Rushchitsky J.J., Yurchuk V.N.,* Hryhorchuk O. M., Symchuk Ya. V. Noncharacteristic Evolution of a Nonlinear Elastic Single Cylindrical Wave //Int.Appl.Mech. – 2021. – 57, N6. – P. 619 – 634 https://doi.org/10.1007/s10778-022-01112-x

Evolution of a cylindrical radial wave with a solitary Macdonald-function profile is induced by the material nonlinearity.

V. M. Yurchuk [a1], S.V. Sinchilo[a]

[a]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine

[1]yurchuk@inmech.kyiv.ua

The obtained results of both theoretical and numerical analysis of the cylindrical radial Macdonald wave (as an example of a wave with an asymmetric profile) indicate that, according to the obtained scenarios of wave evolution, the nonlinear wave effect consists in a rightward shift of the graph as well as in a change in its curvature, making the graph less convex.

Keywords: *cylindrical radial Macdonald wave, wave evolution, nonlinear wave effect*

Деякі підходи до розв'язання задач термопластичності для тіл з функціонально-градієнтних матеріалів

М.Бабешко, В.Савченко, П.Стеблянко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ, Україна
caf-vmi@ukr.net

Ключові слова: теорія термопластичності, функціонально-градієнтний матеріал, діаграма деформування, крайова задача

Пропонуються різні способи моделювання властивостей матеріалів та деформаційних процесів в елементах конструкцій у вигляді просторових тіл та тонких оболонок з двокомпонентних функціонально-градієнтних матеріалів в процесах їх непружного деформування під дією неізотермічного навантаження.

Розглянемо один з них стосовно ізотропного матеріалу, створеного з двох складових в результаті певного технологічного процесу, виходячи з уявлень механіки суцільного середовища, прийнятих при дослідженні деформівних твердих тіл. Будемо вважати, що властивості матеріалу можуть неперервно змінюватися по об'єму, аналогічно тому, як змінюються властивості початково однорідного тіла при нерівномірному нагріванні. Припустимо, що фізико-механічні властивості створеного матеріалу змінюються вздовж одної координати ξ, як в більшості опублікованих робіт, присвячених чисельному аналізу поведінки елементів конструкцій з таких матеріалів. Закон зміни відносного об'ємного вмісту одного з складових матеріалів в залежності від координати ξ вважаємо заданим. Припускаємо, що як пружні, так і пластичні характеристики визначаються відносним об'ємним вмістом складових. Це є логічним поширенням підходу, прийнятому при моделюванні властивостей функціонально-градієнтного матеріалу в задачах теорії пологих гнучких оболонок [2], на крайові задачі термопластичності.

Для розв'язання задачі сформулюємо визначальні рівняння термопластичного деформування ізотропного матеріалу вздовж траєкторій малої кривизни, властивості якого неперервно змінюються в залежності від координати. В основу цих рівнянь покладемо такі основні припущення: тензори напружень і деформацій є сумами девіаторів та кульових тензорів; компоненти тензора деформації складаються з пружних, пластичних та теплових складових; направляючі тензори девіаторів диференціалів пластичних складових та напружень збігаються; пружні складові деформації пов'язані з напруженнями узагальненим законом Гука. На основі цих припущень зв'язок між компонентами тензорів напружень і деформацій записуємо у вигляді закону Гука з додатковими напруженнями, які містять теплову та пластичні складові деформації. При використанні цих припущень одержуємо класичні рівняння теорії процесів деформування вздовж траєкторій малої кривизни [1], які містять функціональну залежність між другими інваріантами девіаторів напружень і деформацій. В класичній теорії процесів малої кривизни вона вважається незалежною від виду напруженого стану і визначається за результатами експериментів на розтяг циліндричних зразків з матеріалу досліджуваного тіла з використанням формул переходу від одновісного напружено-деформованого стану до загального. В даному

випадку функціонально-градієнтного матеріалу зв'язок між другими інваріантами тензорів напружень і деформацій для кожного елемента досліджуваного тіла при поточному значенні температури будується з використанням діаграм деформування складових матеріалів і заданого закону співвідношення відносних об'ємних вмістів складових матеріалів в залежності від координати ξ. Одержавши залежність між другими інваріантами тензорів напружень і деформацій, використовуємо її для визначення приростів інтенсивності пластичної деформації зсуву на кожному етапі навантаження в кожному наближенні як при розв'язуванні задачі на основі класичних рівнянь. Такий спосіб визначення приростів має місце при активному процесі, тобто коли на даному етапі прирости інтенсивності накопиченої пластичної деформації позитивні; в іншому випадку ці прирости покладаємо рівними нулю, що відповідає пружному розвантаженню.

При запропонованому підході визначальні рівняння для функціонально-градієнтного матеріалу мають той же вигляд, що і рівняння класичної теорії процесів малої кривизни, але відрізняються способом конкретизації зв'язку між другими інваріантами девіаторів напружень і деформацій. Це означає, що можна використовувати розроблені раніше методи і програмні засоби числового дослідження напружено-деформованого стану тіл та оболонок обертання, зробивши відповідні зміни в алгоритмах.

Наскільки адекватно одержані таким способом рівняння для функціонально-градієнтних матеріалів будуть описували їх реальну поведінку можна оцінити шляхом порівняння результатів, одержаних з використанням запропонованих рівнянь, з експериментальними даними.

При іншому підході процес створення функціонально-градієнтних матеріалів моделюється трьохшаровим матеріалом, в якому зовнішні шари мають властивості складових матеріалів, а середній шар -властивості функціональнл-градієнтного матеріалу.

Узагальнено визначальні співвідношеня нелінійного деформування (нелінійна пружність, пластичність) придатих для застосування при розв'язанні задач міцності тіл складених з функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ), матеріалів з ефектом пам'яті форми та традиційних композитних матеріалів зернистої та волокнистої структури.

Для коефіцієнтів визначальних співвідношень, що описують залежність характеристик ФГМ від виду навантаження при деформуванні за межами пружності, і проведено верифікацію параметрів матеріалу на базі відомих експериментальних даних для функціональних матеріалів. Для запису визначальних рівнянь тензор деформацій представляється у вигляді суми тензорів пружної і пластичної деформації.

Фізичні рівняння при розвязанні задач термопластичності оболонок вводимо так

$$\sigma_{ij} = a_{ijkl}\varepsilon_{ij} + b_{ij},$$

де a_{ijkl}- const в пружному випадку або залежать від параметрів процесу попереднього термопластичного деформування, які для ФГМ та функціональних матеріалів відомим чином може залежати від матеріальних координат тіла і часу.

Для метало-керамічних ФГМ фізико-механічні властивості матеріалу є функціями від об'ємної частки складових матеріалів і можуть бути виражені як [3]

$$P = P_m V_m + P_c V_c,\ V_m + V_c = 1,$$

де $V_m,\ V_c$ - об'ємні частки кераміки $^{(1)}$ та металу $^{(2)}$. Тоді

$$a_{ijkl}(x,y,z) = a^{(1)}_{ijkl} V_c(x,y,z) + a^{(2)}_{ijkl} V_m(x,y,z);$$

$$b_{ij}(x,y,z) = b_{ij}^{(1)} V_c(x,y,z) + b_{ij}^{(2)} V_m(x,y,z).$$

Таким чином, узагальнено визначальні співвідношення, що описують залежність характеристик матеріалу від виду навантаження при деформуванні за межами пружності, і проведено верифікацію параметрів матеріалу на базі відомих експериментальних даних для функціональних матеріалів.

Розроблено метод розв'язання стаціонарних задач деформування тіл обертання із матеріалів з ефектом пам'яті форми на основі застосування сплайн-функцій для підвищення точності.

1. Sklepus S.M. Method of Solving Geometrically Nonlinear Bending Problems of Functionally Graded Shallow Shells of Complex Shape// Int. Appl. Mech. – 2023. – **59,** N 6. – P. 725– 733.

2. Shevchenko Yu.N., Savchenko V.G. Three-Dimensional Problems of Thermoviscoplasticity: Focus on Ukrainian Research (Review) // Int. Appl. Mech.- 2016. – **52,** N 3. – P. 217 –271

3.Boggarapu V., Gujjala R., Ojha S., Acharya Sk., Venkateswara P., Chowdary S., Gara D. State of the art in functionally graded materials // Composite Structures. – 2021. – **262**. – P. 113596.
doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113596.

Some approaches solving thermoplasticity problem for bodies made of functionally gradient materials

M.Babeshko, V.Savchenko, P.Steblyanko

S.P.Timoshenko Institute of Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Uraine
caf-vmi@ukr.net

Two variants for modeling the properties of a two-component functional-gradient material and the stress-strain state of spatial bodies and thin shells made of such materials under the non-isothermal deformation processes beyond the elastic limit are considered. In the first of them, it is proposed to determine the relationship between the second invariants of stress and strain deviators based on diagrams of component materials and a given law of change in their volume content, and using it to solve the boundary value problem.

Keywords: thermoplasticity theory, functional-gradient material, deformation diagram, boundary value problem

Визначення деформацій осьової повзучості в тонкостінних трубчастих елементах із лінійно-в'язкопружних матеріалів за умов складного напруженого стану

Я.В. Павлюк

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

email: creep@inmech.kiev.ua

Ключові слова: тонкостінні трубчасті елементи, лінійні в'язкопружні матеріали, одновісний розтяг, розтяг із крученням

Розглядається задача із розрахунку деформацій повзучості тонкостінних трубчастих елементів круглого поперечного перерізу із ізотропних однорідних і нестаріючих лінійно-в'язкопружних матеріалів. Трубчасті елементи навантажуються постійним за часом осьовим розтягуючим зусиллям та крутильним моментом.

Визначальні рівняння лінійної теорії в'язкопружності за умов складного напруженого стану, що задає залежність між компонентами тензорів деформацій, тензорів напружень та часом t, записується виходячи з гіпотези пропорційності девіаторів у вигляді[1]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij}(t) = \dfrac{\varepsilon_i(t,\sigma_i)}{\sigma_i(t)}\Big(\sigma_{ij}(t) - \delta_{ij}\sigma_0(t)\Big) + \dfrac{1}{3}\delta_{ij}\varepsilon_v(t); \;\; (i,j = 1{,}3); \\ \varepsilon_i(\sigma_i,t) = \dfrac{2(1+v_0)}{3E}\left(\sigma_i(t) + \lambda_i\displaystyle\int_0^t K_i(t-\tau)\sigma_i(\tau)d\tau\right); \\ \varepsilon_v(\sigma_0,t) = \dfrac{3(1-2v_0)}{E}\left(\sigma_0(t) + \lambda_v\displaystyle\int_0^t K_v(t-\tau)\sigma_0(\tau)d\tau\right); \end{cases} \tag{1}$$

де $\varepsilon_v(t)$ і $\varepsilon_i(t,\sigma_i)$ – об'ємна деформація та інтенсивність деформацій повзучості; $\sigma_0(t)$ і $\sigma_i(t)$ – середнє напруження та інтенсивність напружень; $K_i(t-\tau)$ та $K_v(t-\tau)$ – ядра інтенсивності деформацій повзучості та об'ємної повзучості, що задаються дробово-експоненційними функціями; E – модуль пружності; ν_0 – коефіцієнт Пуассона; λ_i, λ_v – реологічні параметри; δ_{ij} – одинична функція Кронекера, що дозволяє розраховувати значення деформацій повзучості при різних комбінаціях нормальних та дотичних напружень.

В роботі розв'язано задачу із визначення деформацій повздовжньої (осьової) $\varepsilon_{11}(t)$ повзучості тонкостінних трубчастих елементів із „полиэтилена высокой плотности ПЭВП" [2] за умов одновісного розтягу та комбінованої дії постійних нормальних напружень розтягу (σ_{11}=*const*) та постійних дотичних напружень кручення (τ_{21}=*const*). Експериментальні дані запозичені відповідно з [2]. На мал.1 співставлено результати розрахунків (лінії) з експериментальними даними (точки). За умов одновісного розтягу при напруженнях σ_{11}=2,5 (○), 5,0 (●) МПа та складного напруженого стану σ_{11} = 5,31 та τ_{21}= 0 (○) МПа; σ_{11}= 5,31 та τ_{21} = 2,49 (●) МПа.

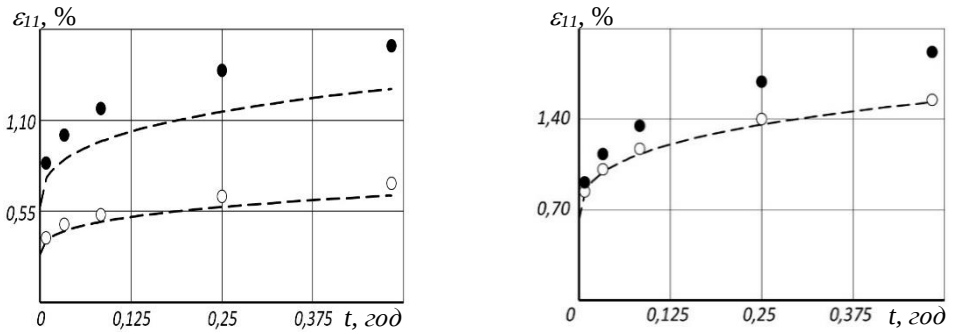


Рис.1 Результати розрахунків (лінії) з експериментальними даними (точки) деформацій осьової повзучості тонкостінних трубчастих зразків за умов: *а* - одновісного розтягу та *б* - складного напруженого стану.

Як видно з рис. 1, отримано задовільне узгодження експериментальних і розрахункових даних. У роботі для розв'язання задач повзучості трубчастих елементів із лінійно-в'язкопружних матеріалів за умов складного напруженого стану як вихідне розв'язкове рівняння використано співвідношення, побудоване на основі гіпотези пропорційності девіаторів.

1. Golub, V.P., Maslov, B.P. & Fernati, P.V. Identification of the Hereditary Kernels of Isotropic Linear Viscoelastic Materials in Combined Stress State. 2. Proportional deviators. *Int Appl Mech* 52, 648–660 (2016). https://doi.org/10.1007/s10778-016-0786-y
2. Крегерс А.Ф., Килевич М.Р. Комплексное исследование полиэтилена высокой плотности в условиях нелинейной ползучести и релаксации напряжений, *Механика композитных материалов,* 2, 195-201 (1985).

Determination of Axial Creep Strains in Thin-Walled Tubular Elements Made of Linear Viscoelastic Materials under Complex Stress State

Y. Pavlyuk

S.P.Timoshenko Institute of Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

email: creep@inmech.kiev.ua

The problem of calculating axial creep strains in thin-walled tubular elements made of linear viscoelastic materials under a complex stress state is solved and experimentally verified. The solution is based on a viscoelastic model formulated according to the deviatoric proportionality hypothesis. The creep kernels are represented by fractional-exponential functions. Longitudinal creep strains are determined.

Keywords: thin-walled tubular elements, linear viscoelastic materials, uniaxial tension, combined tension and torsion.

Динамічна поведінка оболонки резервуару з реальними недосконалостями форми при зовнішньому поверхневому тиску

О.О. Лук'янченко[1], О.В. Геращенко, О.В. Костіна

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
[1]lukianchenko.oo@knuba.edu.ua

Ключові слова: динамічний аналіз, геометрична і фізична нелінійність, метод скінченних елементів, оболонка резервуару, недосконалість форми.

Проблема надійної безаварійної експлуатації сталевих нафтоналивних резервуарів потребує розвитку існуючих та створення нових ефективних підходів до проектування оболонкових конструкцій з урахуванням можливих дефектів, що виникають на стадії їх виготовлення, транспортування і експлуатації [1-5]. Одним з основних дефектів резервуарів вважається геометрична недосконалість їх стінок, яка значно впливає на їх міцність і стійкість. У вітчизняній та міжнародній практиці для проектування і дослідження несучої здатності оболонкових конструкцій широко застосовуються програмні комплекси скінченно-елементного аналізу SCAD, LYRA, ANSYS, NASTRAN та інші.

В роботі досліджена динамічна поведінка сталевої оболонки резервуару змінної товщини з реальними недосконалостями форми при зовнішньому поверхневому тиску в геометрично і фізично нелінійній постановці. Скінченно-елементне моделювання недосконалої оболонки виконано в програмному комплексі NASTRAN [6]. Матеріал задано ізотропним пружно-пластичним з білінійною залежністю напруження від деформації за критерієм Мізеса. Модальний аналіз оболонки резервуару виконано методом Ланцоша. Досліджено усталені періодичні коливання оболонки резервуару в частотній області перших десяти частот її власних коливань. Досліджена динамічна стійкість оболонки при послідовному збільшенні збурення методом прямого чисельного інтегрування Н'юмарка. Виконано порівняння отриманих результатів з результатами дослідження динамічної поведінки оболонки з ідеальною поверхнею. Дослідження виявили, що недосконалість стінки оболонки призвела до: розщеплення і зменшення частот власних коливань та зміни відповідних форм; збільшення кількості резонансів і зменшення резонансної частоти із суттєвим збільшенням амплітуди усталених періодичних коливань оболонки. За рахунок наявності реальних недосконалостей стінки оболонки зменшилось граничне (критичне) значення збурення на 27 %. При втраті стійкості збільшились: сумарні максимальні вузлові переміщення на 64 %, максимальні еквівалентні напруження на 41 % і максимальні загальні деформації на 85 %. Спостерігався вплив пластичних деформацій на динамічну поведінку оболонки. Вважаємо, що представлені результати є актуальними для розробки нових підходів щодо проектування нафтоналивних резервуарів та оцінки їх експлуатаційної надійності.

1. G.M. Hunt, Imperfection and near-coincidence for symmetric bifurcations, New York Academy of Sciences. Bifurcation theory and applications in scientific disciplines. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 316, 572-589 (1977).
2. В.С. Гудрамович, Особенности нелинейного деформирования и критические состояния оболочечных систем с геометрическими несовершенствами, *Прикладная механика*, 42(12), 32-47 (2006).
3. Г.Д. Гавриленко, *Несущая способность несовершенных оболочек,* Ин-т механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины, 294 (2007).
4. V.A. Bazhenov, O.A. Lukianchenko,Yu.V. Vorona, M.O. Vabyshchevych, The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells, *Strengh of Materials*, 53(6), 842-850 (2021). https://doi.org/10.1007/s11223-022-00351-0
5. О.О. Лук'янченко, О.В. Геращенко, О.М. Палій, Нелінійний динамічний аналіз оболонки резервуара зі змодельованими недосконалостями форми, *Опір матеріалів і теорія споруд*, К.: КНУБА, 109, 128-140 (2022). https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.129-140
6. Jaecheol Koh, *Siemens NX Nastran: Tutorials for Beginners and Advanced Users.* ASIN: B0B19ZBZCM, 566 (2022).

DYNAMIC BEHAVIOR OF RESERVOIR SHELL WITH REAL IMPERFECTIONS UNDER EXTERNAL SURFACE PRESSURE

O. Lukianchenko[a1], O. Geraschenko[a], O. Kostina[a]

[a]Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

[1]lukianchenko.oo@knuba.edu.ua

We investigated the dynamic behavior of steel reservoir shell of variable thickness with real imperfections under external surface pressure in a geometrically and physically nonlinear formulation. The finite element modeling was performed in the software complex NASTRAN. We considered the bilinear model with the Mises criterion of the isotropic elastic-plastic material. The modal analysis of reservoir shell was executed by the Lanczos method. The steady-state periodic vibrations of shell were researched in the frequency range of its natural frequencies. We investigated dynamic stability of imperfect shell by the Newmark method. The obtained results were compared with the results of dynamic analysis of perfect shell. The influence of real imperfections and plastic deformations on dynamic behavior of reservoir shell was observed.

Keywords: dynamic analysis, geometric and physical nonlinearity, finite element method, reservoir shell, shape imperfection.

Взаємодії ударної хвилі з складними комбінованими оболонками.

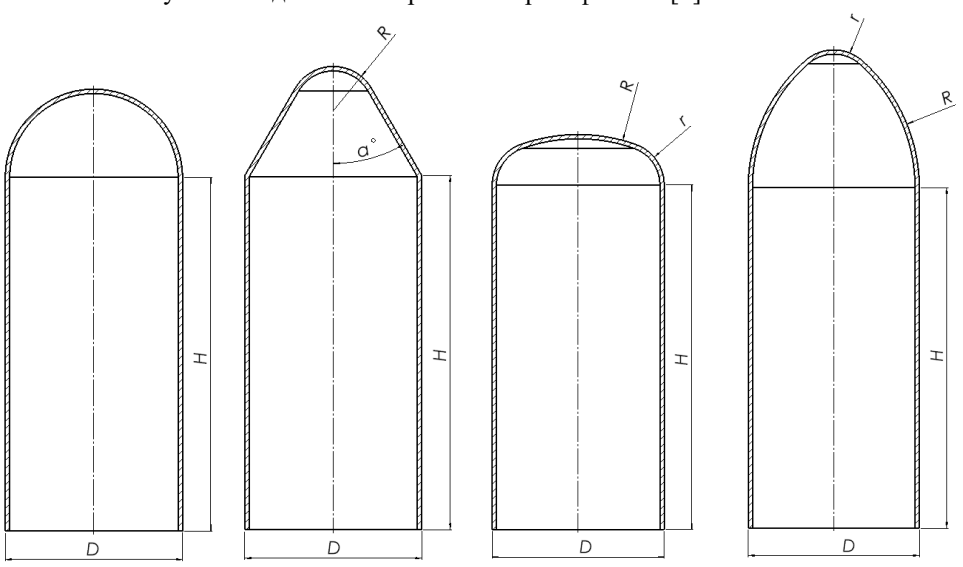
А. С. Колядюк

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ, Україна

duk86@outlook.com

Ключові слова: комбінована оболонка, ударне навантаження, обчислювальна гідродинаміка, пов'язана задача, в'язке середовище, Нав'є-Стокс, Рейнольдс

Вирішується задача набігання ступінчастої ударної хвилі з крутим фронтом та стрибком тиску $\Delta P=1\times10^6$Па на різні варіанти складних сталевих комбінованих оболонок (рис. 1). Геометричні параметри оболонок приймалися: D=200; H=400; R=200; r=50; a°=30°. Середовище моделювалося як ідеальний газ, в даному випадку повітря, без врахування в'язкості. Поведінка середовища при розповсюдженні хвилі моделювалася за допомогою рівнянь Навье-Стокса усереднених по Рейнольдсу, які в даному випадку спрощуються до рівнянь Ейлера[1]. При цьому поведінка газу моделювалася як суцільна ламінарна течія(без врахування ефектів турбулентності та кавітації) яка для випадку двовимірної осесиметричної задачі описується рівняннями збереження маси, збереження імпульсу та збереження енергії. Для моделювання нормальної ударної хвилі для початкового часу (t=0) в розрахункової моделі задавалися швидкість, тиск та температура повітря отриманні з рівнянь термодинамічного стану ударної хвилі[2]. Динамічна поведінка оболонки товщиною 4мм розглядалася як рішення задачі вимушених коливань в явній постановці. При цьому не враховувалося демпфування системи. Деформований стан циліндричної оболонки описується за допомогою рівнянь Кірхгофа-Лява[3].



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Варіанти комбінованих оболонок: *а* – циліндр-сфера; *б* – циліндр-конус-сфера; *в, г* - циліндр-тор-сфера.

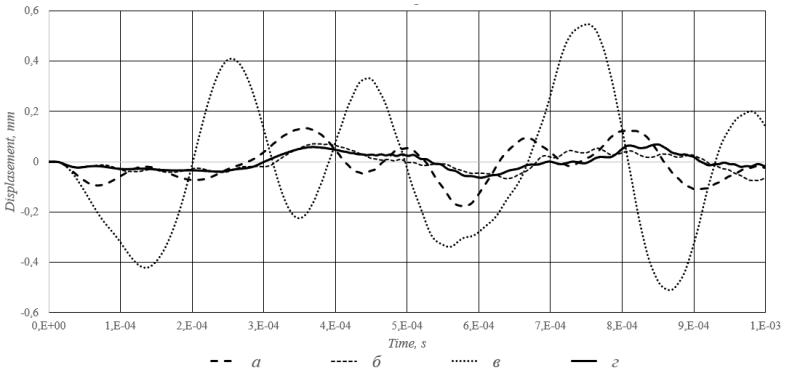


Рис. 2. Вертикальні переміщення в вершині комбінованої оболонки.

Проведено дослідження взаємодії ступінчастої ударної хвилі з крутим фронтом для різних варіантів складних комбінованих оболонок. Визначені параметри навантаження(у вигляді дифракційного тиску) при набіганні ударної хвилі. Проведений аналіз коливальних процесів комбінованих оболонок складної формі при динамічному навантаженні. На рис.2 для чотирьох різних варіантів представлені вертикальні переміщення в вершині комбінованої оболонки. Як видно з отриманих результатів максимальні амплітуди коливань спостерігаються для комбінованої оболонки циліндр-тор-сфера з плоскою сферичною областю (варіант - *в*). Амплітуда коливань для такого випадку складає 0,5мм. Для оболонки циліндр-сфера (*а)* амплітуда коливань значно зменшується до величин – 0,18мм. Для комбінованих оболонок з малою сферичною частиною в вершині конструкції (*б, г*) характер коливань схожі а амплітуда має найменші значення – 0,1мм.

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978, 736 с
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит. 1963, 632 с.
3. Timoshenko S.P., Gere J.M. Mechanics of Materials. – New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972. – 670 с.

Shock wave interaction with complex combined shells.

A.S. Koliadiuk

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine.

duk86@outlook.com

The interaction of a stepped shock wave with a steep front with various variants of complex combined shells was investigated. The load parameters (in the form of diffraction pressure) during the impact of the wave on the shell structure were determined. The behavior of the medium during wave propagation was modeled using the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The deformed state of the cylindrical shell was described using the Kirchhoff-Liew equations.

Keywords: combined shell, shock load, computational fluid dynamics, coupled problem, viscous medium, Navier-Stokes, Reynolds

Гармонічні коливання пружної сферичної оболонки в податливій циліндричній трубці з ідеальними стисливими рідинами

І. В. Янчевський[а], О. Х. Остос[б1]

[а]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна
[б]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1]ostos.alexander1994@gmail.com

Ключові слова: нескінченна податлива циліндрична порожнина, ідеальна стислива рідина, пружна сферична оболонка, гармонічні коливання, плоска хвиля.

Взаємодія пружних конструкцій з рідинним середовищем є ключовим напрямом досліджень гідропружності. Значна частина задач, які виникають в рамках цих досліджень, пов'язана з аналізом роботи різноманітних технічних систем, зокрема акустичних перетворювачів, елементів гідроакустичних установок, оболонкових конструкцій, у рідких середовищах [1]. Особливий інтерес при цьому становлять задачі про коливання заповнених рідиною оболонок і які занурені у рідке середовище, коли враховується взаємний вплив зовнішньої та внутрішньої рідин на динаміку оболонки [2, 3]. Одне з прикладних значень отриманих в рамках цих досліджень результатів пов'язано з визначенням резонансних частот, за яких амплітуди динамічних характеристик суттєво зростають.

У даній роботі розглянуто задачу про гармонічні коливання заповненої стисливою рідиною пружної сферичної оболонки, яка розташована на осі нескінченної кругової циліндричної порожнини з іншою рідиною. Передбачається, що динамічні процеси у рідинах збуджуються плоскою хвилею, яка поширюється уздовж осі порожнини, стінки якої є також деформівними. Метою дослідження є визначення динамічних характеристик досліджуваної механічної системи та встановлення особливостей взаємодії коливних сферичної оболонки та циліндричної трубки з рідинними середовищами.

Для розв'язання задачі потенціали швидкостей рідин подано у вигляді суперпозиції частинних розв'язків рівняння Гельмгольца в сферичній та циліндричній системах координат. Коливання сферичної оболонки описуються лінійними рівняннями деформування тонких пружних оболонок. Побудова розв'язку базується на застосуванні методу розділення змінних, використанні трансляційних теорем додавання для сферичних і циліндричних хвильових функцій. Після задоволення граничних умов на поверхні оболонки та на стінках циліндричної порожнини задача зведена до нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів розвинення шуканих величин, яка розв'язується чисельно методом усічення.

В результаті отримано вирази для потенціалів швидкостей рідин, які дозволяють визначати розподіли гідродинамічних параметрів рідин. Проведено числові експерименти для випадку, коли стінка циліндричної порожнини є стальною, а сферична оболонка виготовлена з поліетилену високого тиску. При цьому порожнина вважається заповненою водою, а внутрішній об'єм сферичної оболонки – гліцерином.

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільші значення тиску та швидкості мають місце в околі поверхні циліндричної порожнини. Виявлено, що за різних геометричних розмірів сферичної оболонки значення гідродинамічних параметрів суттєво відрізняються, особливо це помітно вздовж осі симетрії задачі в порівнянні з відповідними обчисленнями на поверхні порожнини. Також для розглянутих механічних систем визначені умовно резонансні частоти, які є важливими для оцінки резонансних режимів роботи конструкцій.

Використовуючи отримані результати, можуть бути також досліджені характеристики акустичної радіаційної сили [2, 3] на сферичне включення в залежності від частоти первинної хвилі, геометричних параметрів, властивостей матеріалів оболонок та заповнюючих їх рідин.

1. A.N. Guz, A.P. Zhuk, A.M. Bagno. Dynamic of elastic bodies, solid particles, and fluid parcels in a compressible viscous fluid (review), *Int. Appl. Mech.*, **52**, 449–507 (2016). https://doi.org/10.1007/s10778-016-0770-6
2. В.Д. Кубенко, І.В. Янчевський, *Дифракція акустичних хвиль на системах неоднотипних тіл*, Політехніка, Київ (2024).
3. O.P. Zhuk, V.D. Kubenko, Y.O. Zhuk, I.V. Yanchevskyi, Acoustic radiation pressure on a solid sphere in a compliant cylindrical tube filled with a fluid, *Int. Appl. Mech.*, **58**, 30–42 (2022). https://doi.org/10.1007/s10778-022-01132-7

Harmonic oscillations of elastic spherical shell in deformable cylindrical tube with ideal compressible fluids

I. V. Yanchevskyi[a], O. Kh. Ostos[b1]

[a]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
[b]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1]ostos.alexander1994@gmail.com

We consider a problem of determining the dynamic characteristics of an elastic spherical shell that performs harmonic oscillations in an infinite circular compliant cylindrical cavity filled with a ideal compressible fluid. An analytical solution is constructed based on the representation of the velocity potential as a superposition of partial solutions of the Helmholtz equation and using linear equations of axisymmetric deformation of a thin elastic spherical shell. After satisfying the boundary conditions on the surface of the shell and on the walls of the cavity, the problem was reduced to an infinite system of linear algebraic equations with respect to unknown coefficients. The result is the determination of the pressure and velocity distributions in the fluid, that describe the interaction of an oscillating body with a compressible fluid.

Keywords: infinite deformable cylindrical cavity, ideal compressible fluid, elastic spherical shell, harmonic oscillations, plane wave.

The solution of fatigue problems under combined loading by static torsion and symmetrical cyclic bending

V. M. Pelikh

S.P. Tymoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Nesterova St. 3, Kyiv, Ukraine

ut4ura@ukr.net

A problem of analysis of fatigue lifetime and ultimate state is solved for prismatic specimens under the united action of static torsion and symmetric cyclic bending. The solution is built on the basis of model of failure that sets dependence between the maximum values of amplitudes of asymmetric cycle of loading in the form of exponential transcendent function, and the conception of equivalent stresses. The stress of symmetric cycle is chosen as equivalent stress, which reduces the asymmetric cycle of loading to the symmetric cycle at the fixed number of cycles to failure. The results of calculations are experimentally approved for the specimens from alloyed steels and aluminum alloy.

Keywords: *multi-cycle fatigue, prismatic specimen, fatigue lifetime, ultimate state, asymmetric loading, combined loading, cyclic bending, static torsion, equivalent stress.*

The problem of fatigue failure of materials and structural elements, despite the huge amount of work done in this area, still remains relevant from both theoretical and applied points of view [1, 2, 3, 4]. Particularly relevant are the problems of fatigue failure during the interaction of various types of combined loading with static and cyclic loads.

One of the types of combined loading is combined loading by static torsion and symmetrical cyclic bending [5, 6, 7]. Evaluation of fatigue resistance under conditions of this type of loading is usually carried out using limit stress diagrams, establishing the dependence of the cyclic component of stress on the static one.

The fatigue failure of solid cylindrical specimens subjected to combined loading of static torque and symmetric cyclic bending moment is considered.

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_a^b g(n), \;\; \sigma_y = \sigma_z = 0; \\ \tau = \tau_m. \end{cases} \tag{1}$$

where σ_a^b – amplitude of the cyclic component during bending; τ_m – static tangential component of the stress cycle; $g(n)$ – periodic function defining the law of change of stress σ_a^b to failure time; $n = ft$ – number of cycles of change of stress σ_a^b.

The model of the limit state for asymmetric bending is given by the relation [10]

$$\frac{\sigma_a^b}{\sigma_n^b} = \left[\cos\left(\frac{\pi\sigma_m^b}{2\sigma_B^b}\right)\right]^{\lambda_1} \tag{2}$$

and in the case of asymmetric torsion – by the ratio [10]

$$\frac{\tau_a}{\tau_n} = \left[\cos\left(\frac{\pi\tau_m}{2\tau_B}\right)\right]^{\lambda_2} \tag{3}$$

where σ_a^b, τ_a – amplitudes of cyclic stress during bending and torsion; σ_n^b, τ_n – limits of limited fatigue in symmetrical bending and torsion; σ_m^b, τ_m – static normal and shear stresses of the cycle; σ_B^b, τ_B – short-term strength of the material under bending and torsion; λ_1, λ_2 – sensitivity coefficient of material's to the asymmetry of the cycle during bending and torsion,

Limit state model for convergence local impact of static torsion and symmetric cyclic bending in a normalized coordinate system is constructed by analogy with (2) and (3) in the form

$$\frac{\sigma_a^b}{\sigma_n^b} = \left[\cos\left(\frac{\pi\tau_m}{2\tau_B}\right)\right]^{\chi} \tag{4}$$

where χ – coefficient of sensitivity of the material to the combined effect of normal and shear stresses. The remaining designations correspond to those given in (2) and (3). In the limit state model (4), as in models (2) and (3), the boundary conditions are satisfied exactly for each of the stress cycle components.

A fatigue failure model is constructed, establishing the relationship between the number of cycles before failure n_R in function cyclic stress amplitudes σ_a^b by the mean tangent stress parameter τ_m, defined according to (1). The model is built on the basis of the concept equivalent stresses that allow the asymmetric loading cycle to be reduced to a symmetric one

$$(\sigma_a^b)_{eqv} = f(\tau_m, c_i)\sigma_a^b, \tag{5}$$

which define combinations of average shear stress τ_m and amplitudes cyclic stress σ_a^b afor the same number of cycles before failure n_R, and which corresponds to the fatigue limit die σ_n^b with symmetrical bending. Here c_i – experimentally determined coefficients.

Dependence of the number of cycles before failure n_R from equivalent stress $(\sigma_a^b)_{eqv}$ for a given type of loading is determined by the equation

$$n_R = \left[(1+q)D\left((\sigma_a^b)_{eqv}\right)^q\right]^{-1} \tag{6}$$

which is obtained from the fatigue curve at symmetrical cycle of change value σ_a on $(\sigma_a^b)_{eqv}$, where q and D – parameters of the fatigue curve at symmetric loading cycle. Function $f(\tau_m, c_i)$ on (5) is identified based on the analytical expression (4), which defines the diagram of limit stresses in a normalized coordinate system. Equivalent stresses $(\sigma_a^b)_{eqv}$ under combined static loading symmetric torsion and symmetric cyclic bending, are based on (4) taking into equation (5), are written in the form

$$(\sigma_a^b)_{eqv} = \left[cos\left(\frac{\pi\tau_m}{2\tau_B}\right)\right]^{-\chi}\sigma_a^b \tag{7}$$

The problem of calculating fatigue lifetime and the ultimate limit state under combined loading with static torsion and symmetrical cyclic bending is solved in the paper based on a ultimate limit state model that links the ultimate stresses of a loading cycle using a transcendental function and the concept of equivalent stresses, which makes it possible to reduce combined loading with cyclic bending and static torsion to symmetrical cyclic bending.

1. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneidorovich R.M. Load-bearing capacity and strength calculations of machine parts. Guide and reference manual / Ed. S.V. Serensen. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 488 p.
2. Collins J.A. Failure of materials in mechanical design. Analysis. Prediction. Prevention. – New York: John Wiley & Sons, 1981. – 624 p.
3. Golub V.P., Plashchinskaya A.V. On the Theory of Growth of Fatigue Mode I Cracks in Thin Isotropic Plates of Finite Size under Uniaxial Tension-Compression // Int. Appl. Mech. – 2018. – 54, N 2.– P. 188 – 206. https://doi.org/10.1007/s10778-018-0871-5.
4. Heywood R.B. Designing against fatigue. – London: Chapman and Hall Ltd., 1962. – 504 p.
5. Pochteniy E.K., Staychenko E.S. Study of cyclic strength of steels 45 and 40X under conditions of combined action of cyclic bending and static torsion // Problems of strength.– 1973. – No. 8. – P. 114 – 116. https://doi.org/10.1007/bf00770682.
6. Forrest P.G. Fatigue of Metals. – London-New York-Paris: Pergamon Press, 1962. – 425 p.
7. Kobzar Yu. M. Models of Long-Term Brittle Fracture of Rods in Tension and Compression under Creep Conditions // Int. Appl. Mech. – 2017. – 53, N 4. – P. 444 – 453. https://doi.org/10.1007/s10778-017-0828-0.

Вплив розсіяних пошкоджень на фізико-механічні характеристики теплостійких сталей при зміні виду навантаження

П.О. Булах[1], О.М. Масло, В.П. Швець

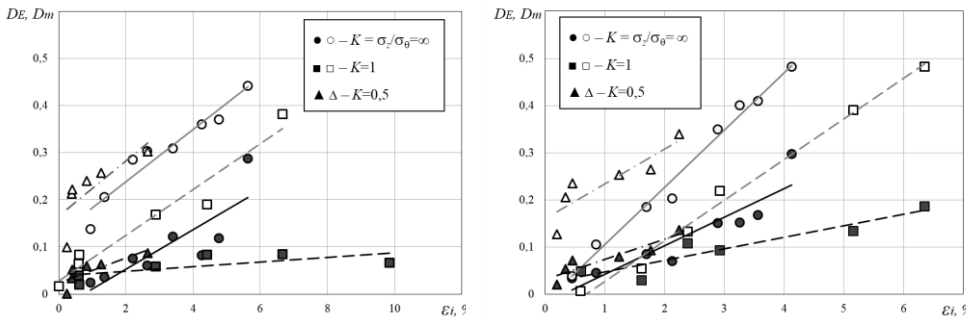
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] pavelbulakh@gmail.com

Ключові слова: пошкоджуваність металу, розсіяні пошкодження, метод LM-твердості, коефіцієнт гомогенності, малоциклова втома.

Представлені результати експериментальних досліджень кінетики накопичення розсіяних пошкоджень у теплостійких сталях під впливом експлуатаційних навантажень в умовах двовісного циклічного навантаження при різних співвідношеннях головних напружень. Досліджувались зразки сталі у вихідному стані та зразки з залишковими деформаціями після попереднього статичного розтягу.

Отримані експериментальні дані показують, що при нерівномірному двовісному розтязі величина пошкоджуваності сталі 10ГН2МФА, визначена за характеристиками гомогенності структури та пружності, дещо вища, ніж при рівномірному та при одновісному розтязі (рис. 1).



а *б*

Рис. 1 Залежність накопичення пошкоджень від деформації для сталі 10ГН2МФА від інтенсивності деформацій у вихідному стані (а) та після статичного розтягу (б) *:* темні точки - через зміну модуля пружності E; світлі точки - через зміну коефіцієнта гомогенності *m.*

Даний ефект ймовірно пов'язаний з меншою величиною граничної деформації втрати стійкості пластичного деформування в умовах $K=\sigma_z/\sigma_\theta=0,5$ у порівнянні із величинами граничної деформації при $K=1$ та $K=\infty$. При двовісному розтязі криві пошкоджуваності зміщуються в область більших значень, ніж при одновісному розтязі, що свідчить про зниження опору циклічній повзучості сталі 10ГН2МФА. В умовах циклічного навантаження про плоскому напруженому стані пошкоджуваність зразків із залишковою деформацією після попереднього статичного розтягу вища, ніж для зразків у вихідному стані.

Отримані результати свідчать про значну відмінність у кінетиці накопичення розсіяних пошкоджень для розглянутих випадків навантаження. Це підкреслює важливість врахування всієї історії навантаження при розрахунках на міцність та довговічність елементів конструкцій.

Influence of scattered damage on the physicomechanical properties of heat-resistant steels under changing loading modes

P. Bulakh[1], O. Maslo, V. Shvets

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] pavelbulakh@gmail.com

Keywords: metal damageability, scattered damage, LM-hardness method, homogeneity coefficient, low-cycle fatigue

The results of experimental studies on the kinetics of distributed damage accumulation in heat-resistant steels under the influence of service loads under biaxial cyclic loading at different ratios of principal stresses are presented. Steel specimens in the initial condition, as well as specimens with residual strains after preliminary static tension, were investigated.

Синтез, 3D-друк та експериментальні дослідження міцності анізотропних мультифракталів

І.Г.Грабар, О.В.Ксюковський, Д.А.Дубовик

Поліський національний університет, Житомир, Україна, ivan-grabar@ukr.net

Ключові слова: анізотропні мультифрактали; міцність та жорсткість; руйнування мультифракталів; броунівська динаміка точки; пружно-пластичне деформування.

Початок 21 століття ознаменувався подальшим зростанням інтересу до нових матеріалів з особливими, наперед заданими, властивостями. В доповіді показано, що важливе місце серед них займають мультифрактальні структури.

Розроблено теоретичні засади та реалізовані алгоритми синтезу мультифрактальних матеріалів з наперед заданими службово-корисними властивостями. Методологія синтезу мультифракталів, заснована на броунівській динаміці точки в анізотропному полі N сил притяжіння, наведена в [1-2].

На рис.1 наведено фрагмент 3D-друку анізотропних кососиметричних мультифракталів (МАКС-4), синтезованих методом БДТ в анізотропних полях 4-х сил притяжіння, розміщених в вершинах квадрата. Повний опис геометрії та властивостей даних мультифракталів можна звести лише до одного керуючого чинника – параметра анізотропії ε.

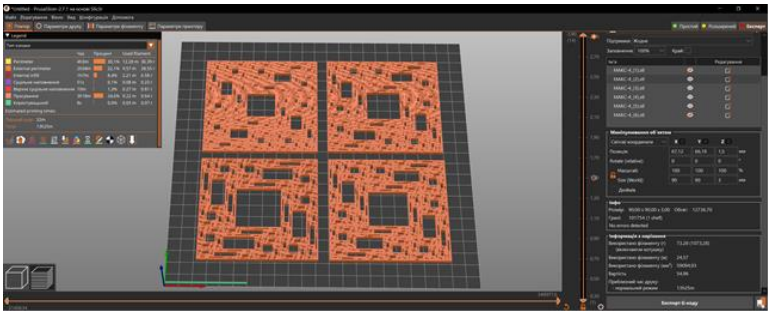


Рис.1.Фрагмент 3Д-друку анізотропних мультифракталів МАКС-4

На рис.2 наведено один із зразків анізотропного мультифрактала – до та після пружно-пластичного деформування.

В таблиці 1 наведено результати пружно-пластичного деформування 6-ти типів зразків мультифракталів:

Таблиця 1 .

Результати експериментальних досліджень мультифракталів

Тип	A	B	C	D	E	F
Параметр анізотропії ε	2,5	2,225	2	1,817	1,667	1,5
Щільність ρ, Г/см^3	0,526	0,616	0,742	0,814	0,909	0,972
Границя міцності σ_B, Н/мм^2	2,1	2,6	5,6	10,7	18,9	21,5

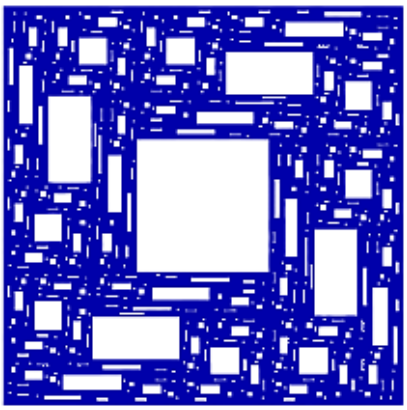
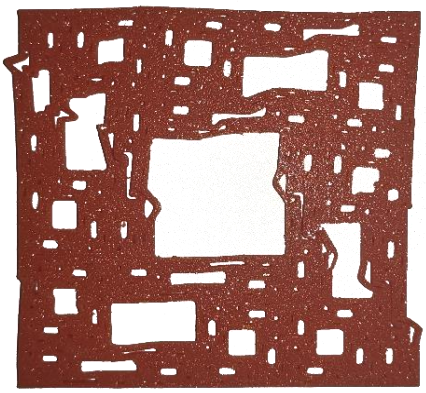

а)

б)

Рис.2.Анізотропний мультифрактал МАКС-4 з ε =2: а) - до та б) – після пружно-пластичного деформування.

При варіації щільності зразків від 0,526 да 0,972 Г/см3 границя міцності та модуль пружності даних зразків змінювався в 10 разів, що дає великі перспективи управляння службово-корисними властивостями мультифрактальних матеріалів.

Для наведених мультифракталів МАКС-4 геометричні параметри кожного із поколінь описуються тензорами, що залежать лише від параметра анізотропії ε.

Перше покоління підмножин мультифракталів описується тензорами:

$$T_1^X = \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)\begin{bmatrix}1 & \varepsilon\\ \varepsilon & 1\end{bmatrix} \qquad T_1^Y = \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)\begin{bmatrix}\varepsilon & 1\\ 1 & \varepsilon\end{bmatrix}$$

Друге покоління підмножин описується відповідно:

$$T_2^X = \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)^2\begin{bmatrix}1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon^2\\ \varepsilon & 1 & \varepsilon^2 & \varepsilon\\ \varepsilon & \varepsilon^2 & 1 & \varepsilon\\ \varepsilon^2 & \varepsilon & \varepsilon & 1\end{bmatrix} \qquad T_2^Y = \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)^2\begin{bmatrix}\varepsilon^2 & \varepsilon & \varepsilon & 1\\ \varepsilon & \varepsilon^2 & 1 & \varepsilon\\ \varepsilon & 1 & \varepsilon^2 & \varepsilon\\ 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon^2\end{bmatrix}$$

Тензори для задання наступних поколінь будуються аналогічно.

ВИСНОВКИ:

Синтезовані, виготовлені та випробувані твердотільні зразки мультифракталів анізотропних кососиметричних МАКС-4, що задаються лише параметром анізотропії ε. Показано, що змінюючи даний параметр в широкому діапазоні значень, є можливість змінювати характеристики міцності та жорсткості в межах 1-2 порядків, що відкриває широкі перспективи в виготовленні елементів конструкцій, максимально адаптованих під їх цільове призначення.

1. I. G. Grabar. Synthesis of multifractals, Zhytomyr/Scientific monograph. - Polissia National University, 2023, 200 pages. (in Ukrainian). Google Scholar
2. Grabar, I.G., Kubrak, Y.O. (2024). Synthesis of Multifractals by Brownian Dynamics of a Point in a Field of N Central Forces. In: Skiadas, C.H., Dimotikalis, Y. (eds) 16th Chaotic Modeling and Simulation International Conference. CHAOS 2023. Springer Proceedings in Complexity. Springer, Cham., pp. 157–174. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60907-7_13.

Моделювання методом скінченних елементів процесу втрати стійкості термопружних неоднорідних оболонок

О. П. Кривенко[а], П. П. Лізунов[а], О. Б. Калашніков[б1]

[а]Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
[б]Державний науково-технічний центр ядерної та радіаційної безпеки, Київ, Україна

[1]kalash2d@gmail.com

Ключові слова: геометрично нелінійне деформування, стійкість, універсальний тривимірний скінченний елемент, термомеханічне навантаження, моментна схема скінченних елементів

Пропонується метод аналізу геометрично нелінійного деформування, стійкості, закритичної поведінки та власних коливань оболонок під дією статичних термомеханічних навантажень [1 – 5]. Оболонки, що розглядаються, можуть поєднувати у собі такі конструктивні неоднорідності: ребра, накладки, отвори, канали, злами серединної поверхні, інші геометричні особливості за товщиною, а також багатошарову структуру матеріалу. Дослідження стійкості тонких оболонок є однією з ключових задач механіки деформівного твердого тіла, оскільки процес втрати стійкості часто визначає граничну несучу здатність конструкцій, особливо за наявності геометричних неоднорідностей та термомеханічних навантажень.

Вивчення поведінки оболонок базується на геометрично нелінійних співвідношеннях тривимірної теорії термопружності, принципах моментної схеми скінченних елементів та застосуванні універсального тривимірного скінченного елемента (СЕ). Універсальний СЕ розроблений на основі відомого ізопараметричного просторового СЕ з полілінійними функціями форми для координат і переміщень. За рахунок введених додаткових змінних параметрів "стандартний" СЕ перетворений на універсальний, що модифікується. У разі потреби, він може змінювати свої розміри за товщиною та ексцентрично зміщуватися щодо серединної поверхні обшивки (під обшивкою розуміється тіло оболонки без особливостей) для моделювання ділянок ступінчасто-змінної товщини. Такий уніфікований підхід дозволяє за єдиною методологію и одним універсальним СЕ, що модифікується, формувати скінченноелементну модель оболонки, що враховує різні типи конструктивних неоднорідностей.

Аналіз геометрично нелінійного деформування, стійкості та власних коливань оболонок, що піддаються статичним термомеханічним навантаженням, здійснюється кроковим методом на основі інтегрального підходу до розв’язання відповідних задач. Алгоритм розв’язування нелінійної задачі стійкості оболонки поєднує кроковий метод продовження розв’язку за параметром, ітераційну процедуру модифікованого методу Ньютона–Канторовича на кроці навантаження та методику корегування параметрів алгоритму [1]. Модальний аналіз оболонок виконується з урахуванням переднапруженого стану [2, 3]. Специфікою розробленого алгоритму є методологія задавання термомеханічного навантаження як функції, що дозволяє моделювати різні режими навантаження та складні комбіновані термомеханічні впливи.

Розроблений підхід дозволяє в рамках єдиної скінченноелементної моделі досліджувати як докритичний, так і закритичний стан деформування термопружних

неоднорідних оболонок, визначати можливу появу точок розгалуження розв'язку на діаграмі навантаження – прогин, а також аналізувати вплив різних конструктивних особливостей і термомеханічних навантажень на втрату стійкості та модальні характеристики оболонки. Особливості застосування розробленого методу продемонстровано на серії спеціально підібраних задач [1 – 5].

1. В.А. Баженов, О.П. Кривенко, М.О. Соловей, Нелінійне деформування та стійкість пружних оболонок неоднорідної структури, Київ: ЗАТ Віпол (2010).
2. Victor Bazhenov, Olga Krivenko, Buckling and Natural Vibrations of Thin Elastic Inhomogeneous Shells, LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbruken, Deutscland (2018).
3. О.П. Кривенко, П.П. Лізунов, О.Б. Калашніков, Моментна схема скінченних елементів у задачах термостійкості і власних коливань пружних неоднорідних оболонок, Київ: Каравела, (2024).
4. O.P. Kryvenko, P.P. Lizunov, Y.V. Vorona & O.B. Kalashnikov, Modeling of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibration Processes of Elastic Shells in Inhomogeneous Structure. Int Appl Mech, 60 (3), 464- 478. (2024). https://doi.org/10.1007/s10778-024-01298-2.
5. O.P. Krivenko, P.P. Lizunov, O.B. Kalashnikov, Buckling analysis of elastic thin shells with stepwise variable thickness under static thermomechanical effects, Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles, 115, 94-106. (2025). https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.94-106.

Finite element modeling for buckling of thermoelastic inhomogeneous shells

O. Krivenko[a], P. Lizunov[a], O. Kalashnikov[b1]

[a]Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
[b]State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, Ukraine

[1]kalash2d @gmail.com

The method of analysis of geometrically nonlinear deformation, buckling, post-buckling behavior, and natural vibrations of shells under static thermomechanical loads is considered. The studying the behavior of elastic inhomogeneous shells is based on geometrically nonlinear relationships of the three-dimensional theory of thermoelasticity, the principles of the finite element moment scheme, and the use of a modifiable universal 3d finite element with additional variable parameters. A comprehensive investigation of the buckling and natural vibrations of shells subjected to thermomechanical loads is used a step-by-step algorithm. The method is designed to analyze both subcritical and postcritical deformation states of shells of varying thicknesses, including those with ribs, channels, etc. The features of the method are demonstrated through a series of specially selected benchmark problems.

Keywords: geometrically nonlinear deformation, buckling, universal 3D finite element, thermomechanical loading, moment finite-element scheme

Контактна взаємодія кулі з тором: моделі, методи та результати досліджень

М. М. Ткачук[а,б1], Н. Б. Скріпченко[в], М. А. Ткачук[б]

[а]Карлстадський університет, Карлстад, Швеція , [б]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
[в] FEA Analytics Engineer, Silgan Dispensing, Валвейк, Нідерланди

[1] m.tkachuk@tmm-sapr.org

Ключові слова: контактний тиск; варіаційний принцип Калькера; метод граничних елементів; радіальна гідропередача; кульковий поршень; торовидна поверхня; контактна жорсткість

У багатьох сучасних конструкціях при передачі потужності між окремими елементами виникає проблема зниження рівня контактного тиску. Із цією метою контактуючі поверхні двох тіл виконуються близькими за формою. Такий варіант дає переваги при вирішенні технічних проблем. Проте виникають проблеми іншого, а саме - методологічного плану. Вони полягають, з одного боку, у незастосовності традиційних аналітичних моделей [1]. З іншого боку, пряме застосування сучасних чисельних методів [2, 3] може призвести до проявлення «нефізичних артефактів».

Для виходу із ситуації, що склалася, пропонується залучити варіаційний принцип Калькера [4, 5]. Будується модель, у яку закладено аналітичний зв’язок між переміщеннями точок поверхонь тіл та діючим контактним тиском [4-6]. Ці залежності містять два типи доданків. Перший тип описує загальну деформацію поверхні гладкого напівпростору (т. з. «глобальна» компонента). Другий тип описує місцеву деформацію поверхневих шарів шорсткості або покриття (т. з. «локальна» компонента). Такий підхід дає можливість урахувати вплив різних фізичних чинників у єдиній варіаційній постановці. Надалі для дискретизації задачі застосовується кусочно-лінійна апроксимація шуканих та відомих величин на мережі трикутних граничних елементів [4, 6]. Зокрема, для апроксимації контактного тиску та розподілу початкового зазору між тілами можуть застосовуватися різні апроксимуючі функції.

У кінцевому результаті задача зводиться до задачі опуклого програмування: мінімізується опукла функція невід’ємних вузлових значень контактного тиску. Відповідно, створена аналітично-чисельна модель є вільною від багатьох обмежень традиційних підходів [7, 8]. Із використанням розробленого засобу здійснено аналіз контактної взаємодії елементів радіальної гідропередачі перспективної трансмісії для важких транспортних засобів. Установлені закономірності впливу варіювання геометричної форми бігової торовидної доріжки на контактну взаємодію із кульковим поршнем. Також визначено вплив контактної жорсткості поверхневих шарів цих тіл на розподіл контактного тиску.

1. Popov, V.L., Heß, M., Willert, E.: Handbook of Contact Mechanics: Exact Solutions of Axisymmetric Contact Problems. Springer, Heidelberg (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-662-58709-6

2. Martynyak, R.M., Prokopyshyn, I.A., Prokopyshyn, I.I.: Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. J. Math. Sci. **205**(4), 535–553 (2015). https://doi.org/10.1007/s10958-015-2265-0
3. Dyyak, I.I., Prokopyshyn, I.I., Prokopyshyn, I.A., Styahar, A.O.: Numerical analysis of contact between elastic bodies in the presence of thin coating and nonlinear Winkler surface layers. In: Altenbach, H., Bogdanov, V., Grigorenko, A.Y., Kushnir, R.M., Nazarenko, V.M., Eremeyev, V.A. (eds.) Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials, vol. 204, pp. 125–142. Springer, Cham (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_9
4. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Hrechka, I., Tkachuk, H. (2025). Contact Interaction of a Ball with a Toroidal Running Track with a Closely Shaped Power Law Profile. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_56
5. Tkachuk M (2018) A numerical method for axisymmetric adhesive contact based on Kalker's variational principle. East-Eur J Enterp Technol 3(7)(93):34–41 DOI: 10.15587/1729-4061.2018.132076
6. Li, J., Berger, E. A semi-analytical approach to three-dimensional normal contact problems with friction. *Computational Mechanics* **30**, 310–322 (2003). https://doi.org/10.1007/s00466-002-0407-y
7. Johnson, K.L. (1985) Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge. https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731
8. Barber, J.R.: Contact Mechanics. Springer, Cham (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-70939-0

Contact interaction of a sphere with a torus: models, methods and research results

M. M. Tkachuk[a,b1], N. Skripchenko[c], M. A. Tkachuk[b]

[a] Karlstad University, Karlstad, Sweden, [b] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[c] FEA Analytics Engineer, Silgan Dispensing, Waalwijk, The Netherlands

[1] m.tkachuk@tmm-sapr.org

The study addresses challenges in analyzing contact pressure between surfaces with closely matched geometries, where traditional analytical models fail and direct numerical methods may produce non-physical artifacts. A variational formulation based on Kalker's principle is developed, incorporating both global and local deformation components within a unified analytical–numerical framework. The resulting convex optimization model is applied to evaluate the contact interaction in a radial hydromechanical transmission, revealing how toroidal raceway geometry and surface-layer stiffness influence contact pressure distribution.

Keywords: contact pressure; Kalker's variational principle; boundary element method; radial hydraulic transmission; ball piston; toroidal surface; contact stiffness.

Моделювання станів вигинання та прихоплення бурильних колон у глибоких криволінійних свердловинах

О. М. Андрусенко[1]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

[1] a.andrusenko@gmail.com

Ключові слова: канал свердловини, пружна бурильна колона, контактні сили, сили опору, критичне вигинання

Освоєння технології буріння глибоких нафтових і газових свердловин залишається одним із ключових завдань сучасної гірничодобувної промисловості. Провідну роль відіграє роторний спосіб буріння, за допомогою якого реалізовано промислове буріння свердловин глибиною до 6 км і ставляться завдання досягнення глибин 7 км і більше [1, 2].

Умови роботи бурильних колон, включаючи заклинювання [2, 3, 4, 6,], можуть супроводжуватися біфуркаційною втратою стійкості [5, 7, 8] та самозбудженими коливаннями долота. Проте надійні методи їх фізичного і математичного моделювання досі відсутні, що робить задачі теоретичного аналізу особливо актуальними.

Сучасні свердловини (вертикальні, похилі та горизонтальні) буряться з урахуванням економічних і технологічних вимог. При цьому ефективність буріння на великих глибинах пов’язана з ризиком аварійних режимів, таких як зростання сил тертя, втрата рухливості та вигин бурильної колони. Через значну довжину колона є гнучкою системою і за несприятливих умов може переходити в режим заклинювання.

Ці процеси описуються як рух нелінійних гнучких стержнів під дією різних сил. Ключову роль відіграє контактно-фрикційна взаємодія, що призводить до порушення рівноваги між пружними, гравітаційними та контактними силами. Рівняння, які описують такі явища, належать до класу сингулярно збурених і мають розв’язки у вигляді локалізованих хвильових шарів, що суттєво ускладнює моделювання.

Незважаючи на це, проведені дослідження дозволили виявити закономірності втрати стійкості бурильної колони в каналах різної геометрії. Показано, що критичні режими значною мірою визначаються геометрією свердловини, особливо при сталому радіусі кривизни. Для свердловин зі змінною кривизною та з урахуванням тертя процеси стають значно складнішими. Суттєвий вплив мають і геометричні недосконалості, які посилюють сили тертя та змінюють кривизну.

У роботі запропоновано підхід до комп’ютерного моделювання та запобігання аварійним станам під час буріння криволінійних свердловин. Розроблено модель типу «жорсткої колони», засновану на теорії криволінійних гнучких стержнів, що дозволяє враховувати реальні недосконалості геометрії. Створене програмне забезпечення може використовуватися для прогнозування аварійних режимів, оцінки вимог до геометрії свердловини та моделювання процесів звільнення бурильної колони. Порівняно з моделями «гнучкої колони», запропонований підхід забезпечує вищу точність і надійність.

1. Samuel R., Friction factors: *What are they for torque, drag, vibration, bottom hole assembly and transient surge/swab analyses?*, Journal of Petroleum Science and Engineering, 73, 258–266 (2010).
2. R. F. Mitchell, *Tubing buckling – The state of art*, SPE Drilling and Completion, 23(4), 361–370 (2008).
3. G. Gao, S. Miska, *Dynamic buckling and snaking motion of rotating drilling pipe in a horizontal well*, SPE Journal, September, 867–877 (2010).
4. V. I. Gulyaev and E. N. Andrusenko, *Sensitivity of Drill String Drag Forces to Geometrical Imperfections of Curvilinear Well Bore Trajectory*, Strength of Materials, 43, No. 3, 247–258 (2011).
5. V. I. Gulyaev, P. Z. Lugovoi, and E. N. Andrusenko, *Mechanical Behavior of Drillstrings in Curved Boreholes with Local Geometrical Imperfections*, International Applied Mechanics, 47, No. 1, 88–97 (2011).
6. V.I. Gulyayev, S.N. Glazunov, E.N. Andrusenko, *Optimal control of deep petroleum borehole trajectory tracking*, Upstream Oil and Gas Technology, 7, 100049 (2021). https://doi.org/10.1016/j.upstre.2021.100049
7. O. Andrusenko, V. Gaidaichuk, K. Kotenko, M. Lazareva, *Nonlinear optimal control of the construction trajectory of a deep well*, Strength of Materials and Theory of Structures, 114, 145–154 (2025).
8. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.145-154
9. V. I. Gulyayev, V. V. Gaidaichuk, E. N. Andrusenko, N. V. Shlyun, *Modeling the energy-saving regimes of curvilinear bore-hole drivage*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1 (2015).

Simulation of Bending and Sticking States of Drill Strings in Deep Curvilinear Wells

O. Andrusenko[a1]

[a]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

[1] a.andrusenko@gmail.com

Modern wells (vertical, inclined, and horizontal) are drilled with consideration of economic and technological requirements. At the same time, drilling efficiency at great depths is associated with the risk of hazardous conditions, such as increased friction forces, loss of mobility, and bending of the drill string. Due to its considerable length, the drill string behaves as a flexible system and, under unfavorable conditions, can enter a stuck mode. The study proposes an approach for computer modeling and prevention of hazardous conditions during the drilling of curvilinear wells. A "rigid column" type model was developed, based on the theory of curvilinear flexible rods, which allows for consideration of real geometric imperfections. The created software can be used to predict emergency modes, assess wellbore geometry requirements, and simulate drill string freeing processes. Compared to "flexible column" models, the proposed approach provides higher accuracy and reliability.

Keywords: bore-hole channel, elastic drill string, contact forces, resistance forces, critical buckling.

Визначення впливу складу та властивостей компонентів композитних структур на характеристики корпусних елементів

А. В. Грабовський[a1], М. М. Ткачук[a,б], А. Ю. Васильєв[a], М. А. Ткачук[a]

[a]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
[б]Карлстадський університет, Карлстад, Швеція

[1] Andrey.Grabovskiy@khpi.edu.ua

Ключові слова: корпусні елементи транспортних засобів; композитні структури; гомогенні матеріали; новітні матеріали; кераміка; мережеві волоконні матеріали; композити; полімери

Сучасні транспортні засоби виготовляються із матеріалів, які дають можливість підвищувати різні їхні службові характеристики. Наприклад, для вантажних вагонів та автомобілів це навантажувальна здатність, для літаків – маса, для двигунів – довговічність тощо. При цьому від різних елементів таких конструкцій вимагається задоволення різним критеріям. Разом із тим існує клас конструкцій, до яких пред'являються одночасно декілька типів критеріїв. Виконання таких критеріальних вимог, як правило, призводить до протиріч при пошуку прийнятних технічних рішень.

До прикладу, це корпуси транспортних засобів спеціального призначення (бронетранспортери, бойові машини піхоти, багатоцільові тягачі тощо) [1, 2]. У цих машин корпус виконує різні функції: компонувальну, силову, захисну тощо. Усі ці функції вимагають дотримання певних характеристик [3, 4]. Так, захист від кінетичних та інших боєприпасів передбачає установку елементів пасивного захисту. Збільшення динамічних навантажень та маси систем і агрегатів тягнуть за собою підвищені вимоги за міцністю. Установка систем озброєнь підвищених калібрів та темпу стрільби вимагає дотримання певної жорсткості корпусу як елемента, на якому ці системи озброєнь установлюються.

Уже перший погляд на зазначений спектр вимог дає підстави зазначити, що, з одного боку, традиційні технічні рішення таких корпусів у вигляді просторової конструкції із гомогенних матеріалів (броньова сталь, алюмінієві сплави) вичерпали резерви та перспективи застосування. З іншого боку, новітні матеріали (кераміка, полімери, піни, мережеві волоконні, композити) не мають усього комплексу властивостей, який би покривав увесь спектр вимог до проєктованих корпусів.

Таким чином, обставини, що об'єктивно склалися, вимагають застосування композитних структур, які містять різнотипні традиційні та нетрадиційні новітні матеріали, які у складі такого складного просторового об'єкта, як корпус транспортного засобу спеціального призначення, задовольнятимуть заданим вимогам.

Слід зазначити, що прямим механічним підсумовуванням властивостей різних компонентів такої сформованої композитної структури результуючі її властивості не отримати. Це пояснюється тим, що мова йде і не про матеріал (навіть, у традиційному розумінні, – композитний), і не про конструкцію, а про матеріал-структуру. У ній усі складові поєднані механічно, хімічно, технологічно. Вони впливають один на одного та сумісно протидіють навантаженню. Отже, їх реакцію на зовнішній вплив слід розглядати сумісно, у взаємовпливі, взаємозв'язку та взаємозалежності. При цьому традиційні моделі типу правила сумішей для формування моделей подібного типу

конструкцій непридатні. Застосування ж громіздких моделей, які описують у єдиному комплексі усі складові, за необхідності здійснення багатоваріантних розрахунків на початкових етапах проєктних досліджень, призводить до непомірних витрат обчислювальних ресурсів. Тому був розроблений змішаний підхід. До прикладу: на першому етапі розробляється детальна модель окремого зразка (панелі) корпусу. Визначаються певні «еквівалентні» характеристики гомогенного матеріалу. Із використанням цієї моделі здійснюються проєктні дослідження процесів та станів у корпусі для визначення загальних трендів та визначення пробного технічного рішення. А вже кінцеве рішення синтезується із використанням повної моделі. Це дає поєднання обґрунтованості більш досконалих остаточних рішень та економію термінів на початкових проєктних етапах.

1. М. А. Ткачук, А. Грабовський, О. Льозний, А. Васильєв, В. Карпов, М. М. Ткачук, В. Троценко, А. Коба, А. Набоков, А. Богач, В. Соловей, Обґрунтування проєктних параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин за комплексом складових тактико-технічних характеристик. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Серія: Машинознавство та САПР*, 2, 115–130 (2025). https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.2.14.
2. А. Грабовський, М. М. Ткачук, А. Васильєв, М. А. Ткачук, О. Льозний та ін., Забезпечення підвищених тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин на основі визначення динамічної міцності бронекорпусів із гомогенних та композиційних матеріалів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*, 1, 27–46 (2025). https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.1.04.
3. A. L. Maystrenko, V. I. Kushch, E. A. Pashchenko, V. G. Kulich, O. V. Neshpor, S. P. Bisyk. Ceramic armour for armoured vehicles against largecalibre bullets. *Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering*, **11(**1), 9–16. (2020). https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0279.
4. S. P. Bisyk, I. B. Chepkov, M. I. Vaskivskyy, L. S. Davydovskyi, O. A. Slyvinskyy, O. M. Aristarkhov. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. *Comparison and analysys*. *Weapons and Military Equipment*, **1**(21), 22–31 (2019). https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.

Determining the influence of the composition and properties of composite structure components on the characteristics of hulls elements

A. Grabovskiy[a1], M. M. Tkachuk[a,b], A. Yu. Vasiliev[a], M. A. Tkachuk[a]

[a] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[b] Karlstad University, Karlstad, Sweden

[1] Andrey.Grabovskiy@khpi.edu.ua

The hulls of special purpose vehicles (armored personnel carriers, infantry fighting vehicles, multi-purpose tractors) perform various functions: layout, power, protective, etc. However, the latest materials do not have the entire set of properties that would cover the entire range of requirements for designed hulls. Using a simplified model, design studies of processes and states in the hull are carried out to identify general trends and determine a trial technical solution. And the final solution is synthesized using the full model.

Keywords: structural elements of vehicles; composite structures; homogeneous materials; advanced materials; ceramics; network fibrous materials; composites; polymers.

Контактна взаємодія елементів конструкцій: побудова параметричних розрахункових моделей

І. П. Гречка[1], Г. В. Ткачук, В. І. Сєриков, О. С. Льозний

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

[1] girinap7@gmail.com

Ключові слова: теорія варіаційних нерівностей; контактна взаємодія; контактний тиск; узагальнене параметричне моделювання; куля; тор; гідропередача

Контактна взаємодія елементів конструкцій сучасних машин викликає низку проблем [1–3]. По-перше, це методологічні проблеми. Вони пов'язані, наприклад, із близькістю форм контактуючих поверхонь цих елементів [1–4]. У таких умовах починають діяти низка фізичних чинників, які суттєво ускладнюють математичну модель контактної взаємодії саме таких тіл близької форми. По-друге, це проблеми чисельної реалізації таких досліджень.

Своєю чергою, тут є дві сторони: 1) якщо у чисельну модель залучити якомога ширшу множину чинників, що враховуються, то їх простір стає занадто громіздкий і непридатний для досліджень контактної взаємодії таких тіл при варіюванні усіх цих чинників; 2) інша сторона проблеми – визначення значущих чинників у математичній та чисельних моделях, а також верифікація їхніх параметрів.

Таким чином, стає проблема невизначеності у всьому циклі досліджень. Із метою усунення цієї невизначеності розроблено метод узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних системах [1]. При цьому варійованими та шуканими є структура і параметри моделей, які будуються. А для верифікації їхніх параметрів застосовуються метод розрахунково-експериментальних досліджень.

Зокрема, для аналізу контактної взаємодії тіл складної форми важливими чинниками є метод урахування близької форми контактуючих поверхонь та жорсткісні властивості поверхневих шарів шорсткості або покриттів (чи технологічно зміцнених) [5, 6].

За цих обставин пропонується застосувати для аналізу контактної взаємодії таких тіл варіаційну постановку із урахуванням нелінійних пружних властивостей шарів контактуючих тіл [1]. Ці шари віртуально нарощені на контактуючі поверхні.

У результаті у енергетичному функціоналі, що формуються на основі залучення апарату теорії варіаційних нерівностей, присутні обидва значущі чинники.

Залишаються невизначеними пружні властивості поверхневих шарів. Задля їх визначення паралельно здійснюється низка чисельних та експериментальних досліджень. Шляхом порівняння розподілів контактного тиску за варійованих пружних характеристик цих шарів визначаються їхні параметри. А уже верифіковані таким чином параметри закладаються у чисельну модель для здійснення досліджень контактної взаємодії із уже варійованими на цьому етапі геометричними формами поверхонь контактуючих тіл.

Описаний підхід був застосований до аналізу контактної взаємодії та оптимізації форми кулькових поршнів і бігових доріжок статорних кілець радіальної гідрооб'ємної передачі перспективних танкових трансмісій.

1. М. М. Ткачук, Контактна механіка тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів: монографія. Дніпро: Видавець Обдимко Ольга Станіславівна, 255 (2022).
2. M. Tkachuk, A. Grabovskiy, M. Tkachuk, I. Hrechka, V. Sierykov, Contact interaction of a ball piston and a running track in a hydrovolumetric transmission. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 195–203 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_50.
3. Q. Li, R. Pohrt, I. A. Lyashenko, V. L. Popov, Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1350650119854250 (2018). https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01885.
4. Y. Streliaiev, R. Martynyak, K. Chumak, Thermomechanical slip in elastic contact between identical materials. *Acta mechanica et automatica*, **15**(4), 187–192 (2021). https://doi.org/10.2478/ama-2021-0024.
5. V. Subbotina, V. Bilozerov, O. Subbotin, Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation. *Physics and chemistry of solid statethis link is disabled*, **23**(2), 380–386 (2022). https://doi.org/10.15330/pcss.23.2.380-386.
6. J. T. Yao, S. Wang, Y. Zhou, H. Dong, Effects of the power supply mode and loading parameters on the characteristics of micro-arc oxidation coatings on Magnesium alloy, *Metals*, **10**, 1452 (2020). https://doi.org/10.3390/met10111452.

Contact interaction of structural elements: construction of parametric calculation models

I. Hrechka[1], H. Tkachuk, V. Sierykov, O. Loznyi

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

[1] girinap7@gmail.com

For the analysis of the contact interaction of bodies of complex shape, important factors are the method of taking into account the close shape of the contacting surfaces and the stiffness properties of the surface layers. Under these circumstances, it is proposed to apply a variational formulation for the analysis of the contact interaction of such bodies, taking into account the nonlinear elastic properties of the layers of the contacting bodies. These layers are virtually built up on the contacting surfaces. As a result, both significant factors are present in the energy functional, which is formed on the basis of the involvement of the apparatus of the theory of variational inequalities. The verified parameters are incorporated into a numerical model. Finally, the contact interaction with varied geometric shapes of the surfaces of the contacting bodies is investigated. This approach was applied to the analysis of contact interaction and optimization of the shape of the elements of tank transmissions.

Keywords: variational inequality theory; contact interaction; contact pressure; generalized parametric modeling; sphere; torus; hydraulic transmission.

Electrically Actuated Rectangular Plates

I. Andrianov[a], G. Starushenko[b1], S. Hapieiev[b]

[a]RWTH Aachen University, Aachen, Germany.
[b]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

[1] gs.gala.star@gmail.com

Keywords: MEMS, NEMS, AC voltage, DC voltage, nonlinearity, vibration, dynamic pull-in

MEMS and NEMS are now widespread in modern engineering. They combine such useful properties as small size, light weight, inexpensive operation, and low-power consumption. MEMS and NEMS are interesting and attractive systems that offer unique and intelligent technological solutions. In this regard, the accurate modelling of the mechanical behavior of such structures is of great importance. However, the following difficulties might arise. The electric forces are inherently strongly nonlinear. The micro- and nanoscale components undergo large deflections, that is why geometric nonlinearity is significant. Therefore, the mathematical models for MEMS and NEMS contain power and non-power nonlinearities and are difficult to analyze. One of the essentially nonlinear effects is the pull-in phenomenon, i.e., collapse of the system when values of applied DC or/and AC voltages overcome some threshold. If only DC voltage is applied and it increases monotonically, the stable equilibrium (node) and unstable equilibrium (saddle) coincide at a saddle-node bifurcation (static pull-in). Application of the AC voltage can lead to dynamic instabilities of various natures – parametric resonances, nonlinear resonance due to the forcing signal, bifurcations. Such phenomenon is called dynamic pull-in. In the papers [1 – 3] an effective algorithm was proposed to analyze the pull-in phenomenon for thin-walled MEMS/NEMS. In the present paper, this algorithm is used to analyze various mechanisms of the dynamic pull-in for electrically actuated rectangular micro/nanoplate.

We use Berger's approach for flexible plate. For approximation of distributed Coulomb force we apply a parallel capacitor formula and neglect fringe field effect and Casimir/van der Waals forces. It is assumed that the plate is clamped along the contour. To reduce the original PDE to an ODE, we apply the Kantorovich procedure and obtain a nonlinear ODE. A simple and physically justified algorithm for determining the voltage for which the system collapses is proposed. The algorithm is based on the detection of the voltage that leads to the merging of stable (center) and unstable (saddle) equilibrium points.

The model and algorithm were validated by comparing them with other existing results in the literature, which were obtained by using the Galerkin method and FEM. The closeness of these results confirmed the adequacy of the adopted model and the high accuracy of the algorithm used in this paper. The study was conducted for a wide range of frequency changes and amplitude ratios of DC and AC voltages. Along with the determination of the pull-in voltages, the change in displacements over time was also studied. A spectral analysis was performed, which allows us to analyze the relationships between the input frequencies and the response spectra.

The presence of the AC can lead to a dramatic decrease of the pull-in values. This is caused by resonances. The resonances arising in the system have a dual character. This can be either a nonlinear resonance caused by force excitation or a parametric resonance. A

separate study was conducted to determine the nature of the emerging resonances. This provides useful information in practical situations. Knowing the resonant frequencies allows us to avoid them in operating electromechanical systems. This can be done by changing the frequency of the alternating voltage or by changing the ratio of the parameters of the system itself. The amplitude of the nonlinear resonance caused by force excitation can be reduced by introducing linear or nonlinear damping. Knowledge of resonant frequencies allows us to design new more effective electromechanical systems.

This research was partly funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP 23490543) (for Andrianov, Khajiyeva) and was partly supported by a Simons Foundation International (SFI) grant (Record ID: SFI-PD-Ukraine-00014585, Project Title: Mathematical Methods and Models in Engineering and Social Sciences, Program: PD-Ukraine: President Directed - Ukraine Support Grants) (for Starushenko).

1. V. Andrianov, J. Awrejcewicz, S. G. Koblik, G. A. Starushenko, “Nonlinear oscillation of a microbeam due to an electric actuation – Comparison of approximate models”, ZAMM, 104(2), e202300091 (2024) https://doi.org/10.1002/zamm.202300091
2. V. Andrianov, S. G. Koblik, G. A. Starushenko, “Investigation of electrically actuated geometrically nonlinear clamped circular nanoplate”, Acta Mechanica, 235(2), 1015–1026 (2024) https://doi.org/10.1007/s00707-023-03783-0
3. V. Andrianov, W. T. van Horssen, S. G. Koblik, G. A. Starushenko, “On the influence of the AC voltage on the dynamics of electrically actuated geometrically nonlinear clamped rectangular micro- and nanoplates”, Nonlinear Dyn, 113, 22489–22506 (2025) https://doi.org/10.1007/s11071-025-11307-9.

Чисельне дослідження впливу локальних пошкоджень лопаток парової турбіни внаслідок ерозійного зносу на їх напружено-деформований стан

А. С. Ольховський[аб], О. Л. Деркач[а1], І. К. Сенченков[б]

[а]Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна
[б]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1] derkacholeh@gmail.com

Ключові слова: *парова турбіна, облопачений диск, ерозійне пошкодження, розлад частот, залишковий ресурс,, вимушені коливання, відновлювальний ремонт.*

Лопатки робочих коліс останніх ступенів парових турбін працюють у складних умовах підвищеної вологості, що зумовлює інтенсивний ерозійний знос. Локальні ерозійні пошкодження, які переважно формуються у верхній третині пера, змінюють масово-жорсткісні характеристики лопаток, порушують циклічну симетрію облопаченого диска та призводять до зміни вібраційної поведінки всієї системи.

У роботі виконано чисельне дослідження облопаченого диска останнього ступеня парової турбіни К-1000-60/3000 із урахуванням локальних ерозійних пошкоджень окремих лопаток. Сформовано скінченно-елементні моделі номінальної та пошкодженої системи, що дозволило проаналізувати статичний напружений стан, модальні характеристики та вимушені коливання за умов порушеної циклічної симетрії.

Статичний аналіз показав, що локальні пошкодження верхньої третини пера викликають істотне зростання напружень у зоні дефекту. Для ізольованої лопатки максимальні напруження можуть збільшуватись більш ніж у 2 рази, а в складі облопаченого диска коефіцієнти концентрації напружень досягають 1,3…1,4, що свідчить про перерозподіл навантаження між лопатками [1].

Модальний аналіз підтвердив, що низькочастотні форми коливань є малочутливими до локальних змін геометрії. Натомість у високочастотному діапазоні локальні пошкодження спричиняють розлад власних частот (до 0,6…0,8%) та появу локалізованих форм коливань, що є ключовим механізмом підвищення вібраційної небезпеки.

Динамічний аналіз виконано для гармонічного силового збудження від паропотоку. Амплітудно-частотні характеристики показали наявність домінуючих резонансних зон поблизу 115 Гц та 2250 Гц, при цьому напруження у високочастотних резонансах суттєво перевищують напруження на робочій частоті обертання 50 Гц. Зокрема, пік поблизу 2100 Гц створює напруження приблизно у 3,3 раза більші, ніж при 50 Гц [2].

Показано, що навіть невелике пошкодження трьох лопаток викликає суттєве зростання еквівалентних напружень у суміжних лопатках — у 2…2,5 раза порівняно з непошкодженою системою. Найбільші відмінності спостерігаються у діапазоні 2000…2450 Гц, де відбувається локалізація коливань, а амплітуди напружень у пошкоджених лопатках значно перевищують номінальні значення [2].

Відновлювальний ремонт суттєво знижує концентрацію напружень, що в свою чергу збільшує залишковий ресурс.

Отримані результати підтверджують, що ключовим фактором вібраційної надійності є порушення циклічної симетрії, яке активує локалізовані високочастотні режими коливань та різко підвищує втомну небезпеку. Встановлено, що критичними є не лише режими поблизу робочої частоти, а насамперед високочастотні резонансні зони, які визначають реальний залишковий ресурс лопаток під час тривалої експлуатації [2, 3].

1. OlkhovskyI A. S. and Derkach O. L. Vibration-Induced Stress State of Working Blades of the Last Stage of a Powerful Steam Turbine under Cyclic Stress Asymmetry. Part 1. Static Stress State and Free Vibrations, with Account of Centrifugal Forces // Problems of strength No. 1 – 2026.
2. OlkhovskyI A. S. and Derkach O. L. Vibration-Induced Stress State of Working Blades of the Last Stage of a Powerful Steam Turbine under Cyclic Stress Asymmetry. Part 2. Dynamic stress state and residual life assessment// Problems of strength (in print).
3. L. Afroz, S. B. Inverarity, M. Qian, et. al., Analysing the effect of defects on stress concentration and fatigue life of L-PBF AlSi10Mg alloy using finite element modelling. Prog Addit Manuf, 9, 341–359 (2024). https://doi.org/10.1007/s40964-023-00457-0

Numerical study of the effect of local steam turbine blade damage due to erosion wear on their stress-strain state

A. Olkhovskyi[ab], O. Derkach[a1], I. Senchenkov[b]

[a]G. S. Pysarenko Institute of Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] derkacholeh@gmail.com

Numerical research was conducted on the effect of local erosion wear on the stress-strain state of a bladed disk in the K-1000-60/3000 steam turbine. Damage in the upper third of the blade foil alters its mass and stiffness characteristics, disrupting the cyclic symmetry of the entire system. Static analysis revealed a stress increase in the defect zones by 1.3–1.4 times, while dynamic analysis confirmed the particular danger of high-frequency resonances. Specifically, in the 2000–2450 Hz range, vibration localization occurs, causing a 2–2.5 times increase in stresses in adjacent blades compared to nominal values. Low-frequency vibration modes are minimally sensitive to damage, whereas high-frequency mistuning of natural frequencies is the key mechanism for reducing vibration reliability. Restorative repair significantly reduces stress concentration and increases the residual life of the blades.
Keywords: *steam turbine, bladed disk, erosion damage, frequency mistuning, residual life, forced vibrations, restorative repair.*

Аналіз напруженого стану кусково-однорідної анізотропної пластини на основі методу сингулярних інтегральних рівнянь

В. С. Кравець [а], А. Казберук [б], А. Б. Чорненький [а1]

[а] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
[б] Факультет машинобудування, Білостоцька політехніка, Білосток, Польща

[1] a.b.chornenkyi@gmail.com

Ключові слова: анізотропна пластина, ортотропні включення, комплексні потенціали, метод сингулярних інтегральних рівнянь, концентрація напружень, напружено-деформованого стан

Проєктування сучасних елементів конструкцій у машинобудуванні з використанням композиційних матеріалів (які, в основному, описуються теорією пружності анізотропного тіла [1]) вимагає досліджень їхнього напруженого стану. Розглянуто плоску задачу теорії пружності для нескінченного анізотропного тіла (матриці) S_0 зі скінченною кількістю гладких криволінійних ортотропних включень S_j $(j = 1, \dots, J)$. На межах розділу матеріалів L_j включень та матриці контактні нормальні *N* та дотичні *T* напруження неперервні й задані похідні стрибків вектора переміщень (контакти із попередніми натягами). У декартовій системі координат *xOy* матриця навантажена на нескінченності напруженнями $\sigma_x^\infty = q, \sigma_y^\infty = p, \tau_{xy}^\infty = \tau$.

Сформульовану задачу теорії пружності (за умов узагальненого плоского напруженого стану) розв'язано методами комплексних потенціалів (КП) та сингулярних інтегральних рівнянь (СІР). КП напружень для анізотропних матриці S_0 та включень $S_j (j = \overline{1,J})$ шукали у вигляді аналітичних функцій у допоміжних математичних площинах $z_k^j = x + \mu_k^j y$ $(k = 1,2; j = \overline{0,J})$ [1,2], де $\mu_k^j = \alpha_k^j + i\gamma_k^j$ - два комплексні корені характеристичного рівняння плоскої задачі теорії пружності для відповідного анізотропного тіла S_j. Задовольнивши крайові умови на кожному з контурів включень L_j отримано систему $2J$ комплексних СІР 1-го та 2-го родів.

Числове розв'язування побудованої системи СІР виконано методом квадратур [2] за наявності у матриці одного включення S_1 та ідеального контакту на його межі. Визначено розподіли контурних ($\sigma_s^-(t)$ - зі сторони пластини, $\sigma_s^+(t)$ - з боку включення) та контактних нормальних *N*(*t*) і дотичних *T*(*t*) напружень на межі поділу ($t \in L, t = \omega(\eta), \eta \in [0; 2\pi]$) матеріалів включення та пластини для різних навантажень пластини на нескінченності, механічних і геометричних параметрів задачі.

Розподіли напружень $\sigma_s^+(t)$, $\sigma_s^-(t)$ за вертикального розтягу ($\sigma_y^\infty = p$) ортотропної пластини S_0 (S-Glass/Epo-xy: $E_x^0 = E_1^0 = 44.8GPa, E_y^0 = E_2^0 = 11.0GPa$, $G_{xy}^0 = 4.55Gpa$, $\nu_{xy}^0 = 0.29$) з ортотропним еліптичним (*b/a*=1/2) включенням S_1 із осями ортотропії, нахиленими до осі *Ox* під кутом φ_1 =α (Carbon/Epoxy: $E_1^1/E_1^0 = 4.26, E_2^0/E_1^0 = 0.222, G_{12}^1/E_1^0 = 0.174, \nu_{12}^1 = 0.35$) подано на рис. 1.

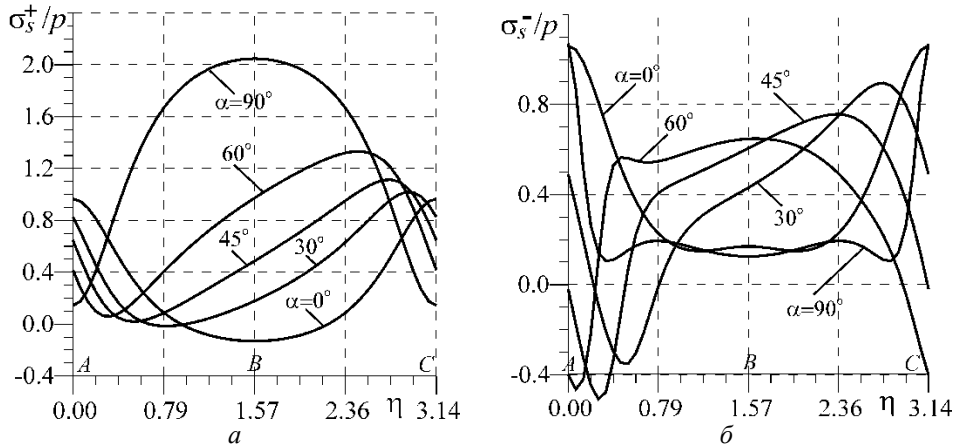


Рис. 1. Вплив кута нахилу α осі еліптичного ортотропного включення на розподіли відносних напружень: $а - \sigma_s^+(\eta)/p$, $б - \sigma_s^-(\eta)/p$.

Отримані результати щодо розподілів контактних та контурних напружень можуть бути використані для розрахунків на міцність та довговічність кусково-однорідних анізотропних конструкційних елементів у машинобудуванні.

1 . S.G. Lekhnitskii, *Anisotropic Plates*, 2nd ed. – New York: Gordon and Breach (1968).
2. M. P. Savruk, A. Kazberuk, *Stress Concentration at Notches*. – Cham: Springer (2017). https://doi.org/10.1007/978-3-319-44555-7

Analysis of the stress state of a piecewise homogeneous anisotropic plate based on the singular integral equations method

V. S. Kravets [a], A. Kazberuk [b], A. B. Chornenkyi [a1]

[a] Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
[b] Faculty of Mechanical Engineering, Bialystok University of Technology, Bialystok, Poland

[1] a.b.chornenkyi@gmail.com

The stress state of an infinite anisotropic plate with a smooth curvilinear is investigated. The plane boundary value problem of the theory of elasticity was solved using the methods of complex potentials and singular integral equations (SIE). Based on the conditions of continuity of stresses and given jumps of displacements on the contours of a finite number of inclusions the SIE systems of the first and second kinds are constructed. For one inclusion under conditions of ideal contact at its boundary the obtained SIEs were solved numerically by the quadrature method. The distributions of hoop and contact stresses at the interface of orthotropic inclusion materials and the plate for various loads at infinity, mechanical and geometric parameters of the problem are determined.

Keywords: anisotropic plate, orthotropic inclusions, complex potentials, singular integral equation method, stress concentration, stress–strain state.

Моделювання процесів повзучості та побудова еволюційних рівнянь для параметру пошкоджуваності

Д. В. Бреславський[а1], О. А. Татарінова[а], М. О. Грошевий[а], А. С. Хорошун[а], Х. Альтенбах[б]

[а]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
[б]Університет ім. Отто фон Геріке, Магдебург, Німеччина

[1] Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua

Ключові слова: повзучість, пошкоджуваність, еволюційне рівняння, початково-крайова задача, метод скінченних елементів, структура матеріалу, обробка зображень, база даних.

Розрахункове визначення напружено-деформованого стану та довготривалої міцності елементів, що працюють при підвищених температурах, є важливим завданням при проєктуванні конструкцій енергетичного та ракетно-космічного машинобудування. Доповідь присвячено представленню методу розв'язання початково-крайових задач повзучості, що супроводжується накопиченням прихованих пошкоджень різної природи, при складному напруженому стані. Початкова задача розв'язується різницевими методами з використанням методу скінченних елементів на кроці інтегрування за часом [1].

Моделювання процесів накопичення прихованих пошкоджень внаслідок повзучості проводиться із залученням еволюційних рівнянь для скалярного параметру пошкоджуваності ω, як класичних [2], так й розроблених [3]. Для загального випадку повзучості при складному напруженому стані, коли розподіл величин напружень у конструктивному елементі характеризується наявністю областей з різним їхнім рівнем, запропоновано формулювання структури еволюційних рівнянь. Внаслідок різних деградаційних процесів, що мають місце при підвищених температурах (старіння, корозія, окислення тощо) у зонах з малими рівнями напружень швидкість накопичення прихованих пошкоджень може збільшуватись. Такі процеси не описуються класичними формулюваннями механіки пошкоджуваності. Для моделювання накопичення пошкоджень з урахуванням деградаційних впливів розроблено еволюційні рівняння, в яких параметри є функціями величин напружень:

$$\dot{\omega} = D\big(\sigma_{vM}(t_*)\big)\frac{\sigma_{vM}^{m(\sigma_{vM}(t_*))}}{(1-\omega)^m}, \omega(0) = 0, \omega(t_*) = \omega_*. \qquad (1)$$

Тут, як й у [2], використано залежність ступеня – константи m від величини еквівалентного напруження σ_{vM} : $m = m(\sigma_{vM}(t_*))$, але також запропоновано врахування залежності константи D від еквівалентного напруження $D = D(\sigma_{vM}(t_*))$. ω_* є граничним значенням параметру пошкоджуваності, яким характеризується час t_*, $\omega_* \ll 1$. Обробка експериментальних характеристик, що зібрані у базу даних, виконується автоматично з визначенням впливу різних факторів, які обмежують довготривалу міцність матеріалу.

Іншим способом опису накопичення пошкоджень є використання даних, отриманих при дослідженні мікроскопічної структури матеріалу на різних етапах його навантаження. З цією метою розроблено метод комп'ютерного аналізу зображень,

який забезпечує автоматизоване визначення кількісних характеристик включень і дефектів структури деформованого матеріалу. Запропонований метод ґрунтується на варіаційному формулюванні функціоналу Мамфорда-Шаха для виділення меж характерних зон на зображеннях мікроструктури. Його реалізація базується на рівнево-множинному поданні та застосуванні алгоритмів дискретної апроксимації меж, трасування замкнених контурів, їх морфологічної стабілізації та подальшої фільтрації. Такий підхід забезпечує автоматизоване визначення параметрів, що входять до еволюційних рівнянь пошкоджуваності, та дозволяє суттєво скоротити тривалість експериментів з повзучості з подальшим руйнуванням зразків.

У випадку корозійного впливу на поверхні конструктивного елементу до еволюційного рівняння для параметру пошкоджуваності внаслідок повзучості додається додаткове рівняння. Загальний рівень накопиченої пошкоджуваності визначається за допомогою використання гіпотези Йокоборі щодо адитивності диференціалів функцій для всіх параметрів пошкоджуваності, що аналізуються.

Наводяться приклади розрахунків повзучості та накопичення пошкоджень, виконані з використанням запропонованих підходів та еволюційних рівнянь.

1.Д.В. Бреславський, *Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів*, МАДРИД, Харків (2020).
2.J. Lemaitre, J.L. Chaboche, *Mechanics of solid materials*, University press, Cambridge (1994).
3.Д.В. Бреславський, М.О. Грошевий, А.С. Хорошун, О.А. Татарінова, Моделювання процесів накопичення пошкоджень при плоскому напруженому стані, *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Серія: Динаміка та міцність машин*, **2**, 6-22 (2024). https://doi.org/10.20998/2078-9130.2024.2.316243

Modelling creep processes and constructing evolution equations for the damage parameter

D. Breslavsky[a1], O. Tatarinova[a], M. Hroshevyi[a], A. Khoroshun[a], H. Altenbach[b]

[a]National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine
[b]Otto von Guericke University, Magdeburg, Germany

[1] Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua

A method for solving boundary-initial value creep-damage problems at a complex stress state is considered. Evolution equations for the damage parameter, built on the basis of investigations of the material structure, analysis of long-term strength in the full range of stress varying and under degradation effects, are presented and used. The results of numerical modelling of creep-damage problems at complex stress state are discussed.

Keywords: creep, damage, evolution equation, boundary-initial value problem, finite element method, material structure, image processing, database.

Концентрація фазових мікронапружень та довготривала міцність метаматеріалів регулярної структури

Б. П. Маслов

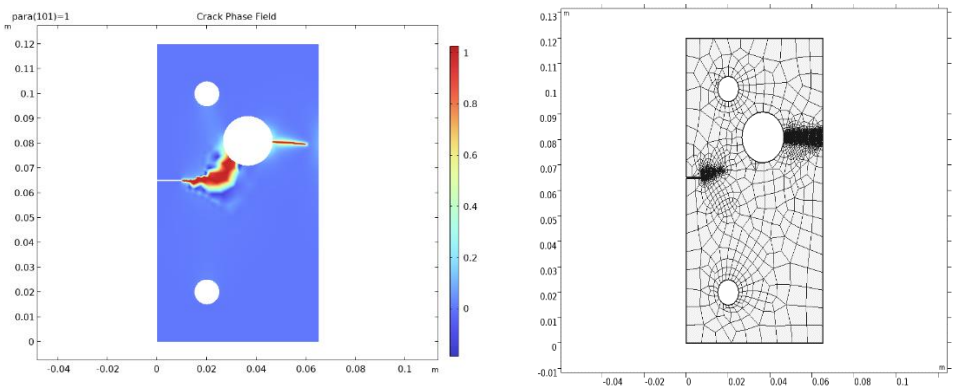
Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ, Україна

maslov@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: концентрація напружень, метаматеріал, квазілінійна динаміка, фазове поле, гранична задача, скінченні елементи, довготривала міцність.

Моделювання руйнування метаматеріалів знаходиться в центрі уваги інженерів-механіків в останні десятиріччя [2, 4, 5, 6]. Постановка задачі прогнозування довготривалої міцності із застосуваням фазового поля фізико-механічних властивостей композиту привертає увагу при чисельно-аналітичному дослідженні процесів втоми гетерогенних структур внаслідок складних навантажень.

Локальна задача для гармонічних навантажень багатокомпонентних еластомерів розв'язується за принципом відповідності перетвореннням задачі дробової в'язкопружності в задачу символічної пружності [1, 3]. Реакцію в'язкопружного неоднорідного середовища на синусоїдальне навантаження трансформуємо в спектральну область шляхом розгляду перетворення Лапласа–Карсона.



а *б*

Рис. 1. Мікронапруження: *а* – фазове поле, розрахунок [7]; *б* – рівномірна та перехідна сітка.

Припускаючи загальне деформаційне навантаження $\bar{e}(t) = LC(\bar{e}^A) * e^{i\omega t}$, локальна гранична задача, що відповідає стаціонарному режиму на кутовій частоті ω записується як

$$\boldsymbol{\sigma}^*(\boldsymbol{x}, i\omega) = \boldsymbol{R}^*(\boldsymbol{x}, i\omega)\ \mathbf{e}^*(\boldsymbol{x}, i\omega), \quad div\ \boldsymbol{\sigma}^*(\boldsymbol{x}, i\omega) = \mathbf{0},$$
$$curl(curl\ \boldsymbol{e}^*(\boldsymbol{x}, i\omega)) = \mathbf{0}, \quad \forall (\boldsymbol{x}, \omega) \in \Omega \times [0; +\infty] \qquad (1)$$

із заданими граничними умовами $\langle \boldsymbol{e}^* \rangle = \overline{\boldsymbol{e}}^*$. Визначальне рівняння в комплексній області записуємо

$$\langle \boldsymbol{\sigma}^* \rangle (i\omega) = \widetilde{\boldsymbol{R}}^*_{\mu}(i\omega) \langle \boldsymbol{e}^* \rangle (i\omega), \quad \forall \omega \in [0; +\infty[, \qquad (2)$$

тоді тензор релаксації представимо як суму

$$\widetilde{\boldsymbol{R}}_{\mu}^{*}(i\omega) = \widetilde{\boldsymbol{R}}_{\mu'}(\omega^{\mu}) + i\widetilde{\boldsymbol{R}}_{\mu''}(\omega^{\mu}). \quad (3)$$

Тут $\widetilde{\boldsymbol{R}}_{\mu'}(\omega^{\mu})$, $\widetilde{\boldsymbol{R}}_{\mu''}(\omega^{\mu})$ наведені модулі накопичення і розсіюння, пропорційні накопиченій та розсіяній енергії [1, 4,5]

1. А.Ф. Булат, В.И. Дырда, В.Г. Карнаухов, Термомеханическая теория вязкоупругих тел. *Киев: Наукова думка,* (2013).
2. B.P. Maslov, S.N. Bugai, Nonlinear deformation and strength of stochastic composites with a damaged matrix, *Mech Compos Mater* **27**, 509–515 (1992). https://doi.org/10.1007/BF00613474
3. B.P. Maslov, Nonlinear Hereditary Creep of Isotropic Composites of Random Structure, *Int. Appl. Mech., **58(1)**, 75–90*, (2022).
4. B.P. Maslov, Development of Criterion for Long-Term Failure Due to Creep of Thin-Walled Layered Structures. *Int Appl Mech* **60**, 525–535 (2024). https://doi.org/10.1007/s10778-025-01304-1
5. R.M. Christensen, The Theory of Materials Failure, *Oxford: University Press, 292 p.*, (2013).
6. О.Ю. Чирков, Вплив градієнта деформації на визначення коефіцієнта інтенсивності напружень в задачах механіки тріщин *Прикл. Мех., **62**, № 1,* (2026)
7. M. Metcalf, J. Reid, M. Cohen and R. Bader Modern Fortran Explained Incorporating Fortran 2023, *Oxford University Press,* (2023).https://doi/10.1093/oso/9780198876571.001.0001

Phase micro stress concentration and long-term strength of metamaterials of regular structure

B. Maslov

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

maslov@inmech.kyiv.ua

The problem of phase field high-cycle fatigue parameters determination and life-time prediction for regular structure metamaterials has been solved. Hereditary functionals of fractional degree are used to construct general determinative phase field stress equations. The principle of Schapery correspondence for quasilinear media under the conditions of hereditary cyclic and static creep has been generalized. The possibility of predicting the long-term strength of a composite plate with a hole is evaluated by finite element analysis. The Fortran2023 computer code is used for numerical analysis and illustration

Keywords: stress concentration, metamaterial, quasilinear dynamics, phase field, boundary value problem, finite element formulation, life time strength .

Контакт прорізної циліндричної оболонки з неоднорідним пружним заповнювачем

О. О. Бедзір[1], В. М. Шопа[2]

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] olbedzir@gmail.com, [2]vasylmsh@ukr.net

Ключові слова: оболонковий пружний елемент,неоднорідний заповнювач, прорізна оболонка, контактна задача, інтегральне рівняння.

Прорізні оболонкові пружні елементи є важливою складовою відомого класу віброзахисних пристроїв [1-3]. Моделювання роботи оболонкових пружних систем зводиться до постановки змішаних контактних задач про фрикційну взаємодію тонкостінних оболонок з деформівним заповнювачем. [4] Метою дослідження є визначення напружено-деформованого стану елементів оболонкової пружини та її жорсткості у випадку використання неоднорідного заповнювача. В роботі здійснено постановку та розв'язано контактну задачу, яка описує стиск неоднорідного заповнювача в прорізній циліндричній оболонці з врахуванням сухого тертя. Для моделювання прорізної оболонки використано одновимірну модель. Матеріал заповнювача характеризується різною здатністю до поперечних деформацій.

Постановка задачі. Розглянемо пружний циліндр радіуса R та довжини $2l$, який заповнює прорізну циліндричну оболонку завтовшки h . На торці пружного заповнювача через абсолютно жорсткі поршні передається зовнішнє навантаження F.

Для моделювання прорізної оболонки та заповнювача використовуємо рівняння, які представлені в [5,6]. Приймаємо, що прорізна оболонка складається з панелей, які зазнають плоского згину в радіальних площинах. Фрикційну взаємодію прорізної оболонки і заповнювача при монотонному зовнішньому навантаженні системи моделюємо співвідношеннями одностороннього нормального контакту. Коефіцієнт Пуасона матерілу заповнювача змінюється вздовж осі пружного циліндра $\nu = \nu(\varsigma), \quad \varsigma \in [-1;\ 1]$, де $\nu(\varsigma)$ є парною гладкою функцією.

Контактну задачу зведено до інтегрального рівняння відносно функції розподілу контактних напружень між заповнювачем та оболонкою

$$\sigma(\varsigma) + \sum_{i=1}^{2}\left[\int_{L_i} K_i(\xi,\varsigma)\sigma(\xi)d\xi\right] = -\frac{\nu(\varsigma)}{1-\nu(\varsigma)}\ P, \qquad \varsigma \in [-1;1]$$

Ядра інтегрального рівняння визначаються формулами

$$K_i(\xi,\varsigma) = -\frac{\nu}{1-\nu} l f_i\, sgn\,\varsigma\, sgn(\xi-\varsigma) + 4\mu^4 G(\xi,\varsigma), \quad i = 1,\ 2,$$

де $4\mu^4 = \dfrac{1}{1-\nu(\varsigma)}\dfrac{l^4\, b}{RI_x}\dfrac{E}{E_0}$, $b = 2R\,sin(\phi/2)$ – ширина панелі; $E_0 I_x = 0{,}5E_0 hR^3\,(\phi + sin(\phi) - 8\,sin^2(\phi/2)/\phi)$ – жорсткість панелі на згин; $\phi = 2\pi/N$, N – кількість розрізів; E_o, E, $\nu(\varsigma)$ – модулі Юнга та коефіцієнт Пуасона матеріалів оболонки та заповнювача, $G(\varsigma,\xi)$– функція Гріна крайової задачі [6].

Інтегральне рівняння розв'язано методом квадратур, з використанням формули трапецій з рівномірною сіткою вузлів. На основі чисельного розв'язку задач досліджено вплив геометричних розмірів та фізичних властивостей взаємодіючих тіл на жорсткість та міцність.

1. Шопа В. М. Оболонкові пружини / В. М. Шопа, А. С. Величкович, С. В. Величкович та ін. // Івано-Франківськ: Факел. – 2002. – 92 с.
3. Величкович А. С. Комплекс засобів віброзахисту та регулювання динамічного режиму бурильної колони / А. С. Величкович, С. В. Величкович, В. М. Шопа. – Івано-Франківськ: Сіверсія ЛТД, 2000. – 86 с.
1. Velychkovych A., Shatskyi I., Shopa V., Bedzir O. Slotted-shell friction damper for sucker-rod string suspension: analytical model and parametric study// *Archives of Materials Science and Engineering*. (2025);134(2):49-60. https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.4406
2. Попадюк І.Й., Шацький І.П., Шопа В.М. Механіка фрикційного контакту оболонок з деформівним заповнювачем: Івано-Франківськ, Факел, 2003. 180 с.
3. Шопа В.М., Шацький І.П., Бедзір О.О., Величкович А.С. Контактна взаємодія прорізаних оболонок з деформівними тілами. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. 208 с.
4. Бедзір О. О. Контактна взаємодія прорізної циліндричної оболонки та деформівного заповнювача з урахуванням сухого тертя / О. О. Бедзір, В. М. Шопа // *Мат. методи та фізико–механічні поля*. – 2009. – 52, № 1. – С. 132–137.

Contact is with friction of slotted cylindrical shell with a heterogeneous elastic filler

O. O. Bedzir[1], V.M. Shopa[2]

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] olbedzir@gmail.com, [2]vasylmsh@ukr.net

The statement of the mixed problem on frictional interaction in the system which con-sists of cylindrical slit shells, divided by a deformable filler, is realized. Using one-di-mensional shell and filler models, the integral equation for finding the contact is con-structed. On the basis of numerical solutions the effect of mechanical, geometric andtribologic parameters of contacting pairs on nature of distribution of contact pressure, rigidity and strength of the system is investigated.

Keywords: shell elastic element, inhomogeneous filler, slotted shell, contact problem, integral equation

Термомеханічна поведінка і втомна міцність в'язкопружних тіл з концентраторами напружень при гармонічному навантаженні

І. Сенченков[a1], О. Червінко[a], С. Якименко[б]

[a]Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна
[б]Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

[1]term@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: термов'язкопружність, зв'язана задача, вібророзігрів, концентрація напружень

На прикладі ракетного двигуна на твердому паливі (РДТП) досліджено особливості концентрації полів напружень, деформації і температури вібророзігріву при гармонічному навантаженні, яке моделює умови транспортування в горизонтальному положенні [1]. Нелінійна зв'язана задача термов'язкопружності розв'язувалась методом скінченних елементів.

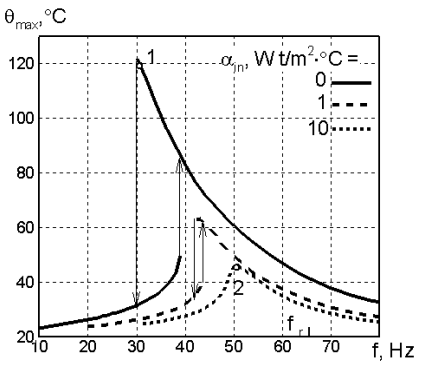
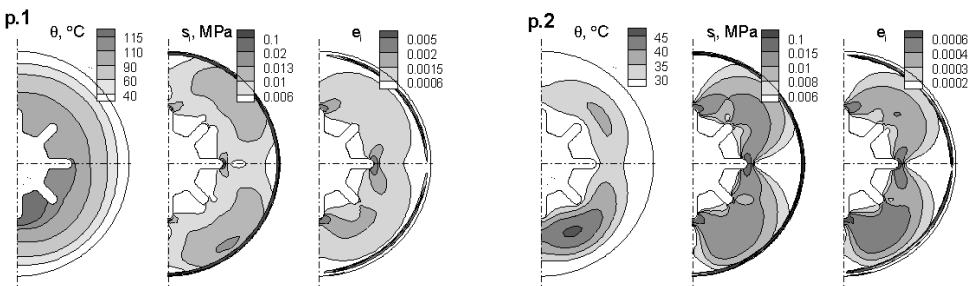


Рис. 1. Температурно-частотні характеристики для різних значень коефіцієнту тепловіддачі α_{in}

Криві температурно-частотної характеристики РДТП при амплітуді збудження σ_0=0,02МПа (рис. 1) для різних коефіцієнтів α_{in} конвективного теплообміну на поверхні зіркоподібної порожнини в паливі демонструють аномальну залежність максимальної за об'ємом стаціонарної температури вібророзігріву. Розподіли температури та інтенсивностей амплітуд напружень s_i і деформацій e_i (рис. 2 а) для точки 1 на кривій α_{in}=0 свідчать про концентрацію характеристик біля вершин западин.



а *б*

Рис. 2. Розподіли температури, інтенсивностей напружень і деформацій в точках 1 (а) і 2 (б)

На рис. 2 б для точки 2 на кривій α_{in}=10 Вт/м^2°С видно, що область концентрації температури зміщується вглиб тіла, при цьому концентрація механічних величин залишається в околі западин. Однак в інших випадках, наприклад при високочастотному збудженні елементів із жорстких аморфних полімерів, місце

концентрації напружень може теж зміщуватись вглиб тіла внаслідок ефекту термомеханічної зв'язаності [2].

Отримані результати дають можливість оцінити границі термомеханічної витривалості в'язкопружних елементів конструкцій і визначити місця їх локального механічного руйнування і термічної деградації матеріалу. Аналіз нестаціонарних процесів дозволяє визначити довговічність елемента при заданих параметрах транспортування РДТП, а також прогнозувати граничні значення параметрів навантаження, які забезпечують ресурс надійної експлуатації.

1. Senchenkov I.K., Maltseva N.M., Karnaukhov V.G., Chervinko O.P. Vibrations and Dissipative Heating of Solid-Propellant Rocket Engines During Transportation in Horizontal Position, *Int. Appl Mech*, 61, 63–70 (2025). https://doi.org/10.1007/s10778-025-01333-w

2. Сенченков И.К., Якименко Н.Н., Червинко О.П. Термомеханическое усталостное разрушение прямоугольной призмы с надрезом. Численное моделирование и эксперимент, *Теоретическая и прикладная механика*, 37, 42-47 (2004)

Thermomechanical Behavior and Fatigue Strength of Viscoelastic Bodies with Stress Concentrators Under Harmonic Loading

I. Senchenkov[a1], O. Chervinko[a], S. Yakimenko[b]

[a]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, NASU, Kyiv, Ukraine
[b]Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

[1]term@inmech.kyiv.ua

Within the framework of the coupled thermo-viscoelasticity problem, the vibrations and dissipative heating of viscoelastic bodies with stress concentrators under harmonic loading are examined. The amplitude and temperature-frequency characteristics, as well as the distributions of stresses, strains, and vibration-heating temperatures, are calculated for a load that simulates the conditions of transporting a solid-fuel rocket engine in a horizontal position. It has been established that, because of vibration heating and the dependence of physical and mechanical characteristics on temperature can cause the zone of concentration of field quantities to shift away from the stress concentrators deeper into the element, which contributes to the formation of internal cracks or thermal degradation of the material.

Keywords: thermoelasticity, coupled problem, vibration heating, stress concentration.

Моделювання швидкості росту втомних тріщин у пластинах 7075-Т6 при асиметричному навантаженні

А.В. Плащинська

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

plaschynska.alla@gmail.com

Ключові слова: втома, тонка пластина, швидкість росту тріщини, накопичення пошкоджень, асиметричний цикл, еквівалентні напруження, циклічна пластична зона.

Розглянуто задачу визначення швидкості розповсюдження тріщини втоми в тонкій прямокутній пластині при одновісному багатоцикловому асиметричному навантаженні. Розв'язання задачі побудовано в рамках двостадійної моделі розповсюдження тріщини втоми [1], що поєднує підходи механіки руйнування та механіки континуального пошкодження. Застосування концепції еквівалентних напружень дозволяє асиметричний цикл навантаження звести до еквівалентного за часом до руйнування симетричного циклу.

Рушійною силою втомного руйнування розглядається процес накопичення пошкоджень $\omega(x,n)$ в матеріалі пластини, який описується еволюційним рівнянням у вигляді

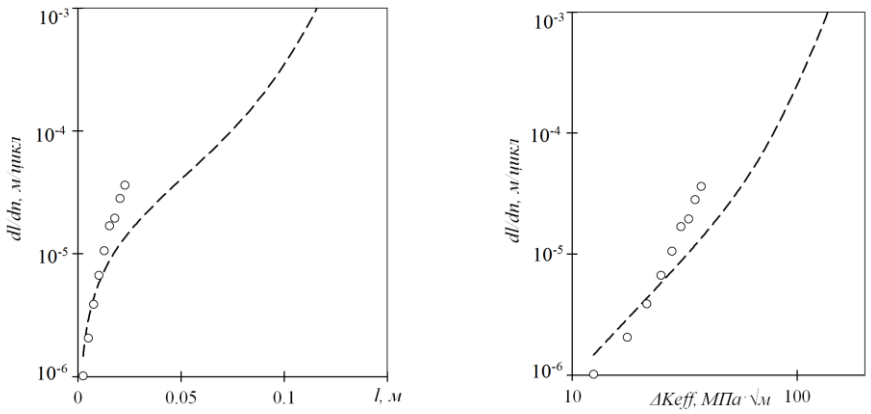
$$\frac{d\omega(x,n)}{dn} = D\left[\frac{\Delta\sigma_{eqv}(x,n)}{1-\omega(x,n)}\right]^q \tag{1.3}$$

де $(\sigma)_{eqv}$ - еквівалентне напруження в околі тріщини, константи матеріалу D та q. Для моделювання стрибкоподібного зростання тріщини та врахування історії накопичення пошкоджень початкові умови для $\omega(x,n)$ застосовуємо у вигляді

$$\omega(x,n) = \begin{cases} 0, & \forall x, \quad n = 0 & \text{(а)} \\ 1, & x = l_0 + \lambda(l_0), \quad n = n_* & (б) \\ \omega(x_j, n_i), & x = l(n_i) + \lambda(l(n_i)), \quad n = n_i & (в) \\ 1, & x = l(n_i) + \lambda(l(n_i)), \quad n = n_{R_i} & (г) \end{cases}, \tag{1.4}$$

де 1.4 (а, б) - умови для визначення тривалості інкубаційної стадії $0 \le n \le n_*$; умови 1.4 (в, г) - для стадії розповсюдження тріщини $n_* < n \le n_R$;$\lambda(l)$- довжина циклічної пластичної зони.

На рис.1 наведено отримані з (1.3) та (1.4) залежності швидкості розповсюдження тріщини втоми в тонкій ізотропній прямокутній пластині з 7075-Т6 при одновісному багатоцикловому розтягу-стиску σ_a =138 МПа, σ_m =17 МПа від довжини тріщини (рис.1а) та від ефективного коефіцієнту інтенсивності напружень ΔK_{eff} (рис.1 б) Результати розрахунків зображені лініями (– –), а експериментальні дані [2] позначені маркерами (○) .



а *б*

Рис.1 Залежності швидкості втомної тріщини dl/dn в пластині з 7075-Т6 при багатоцикліовому розтягу-стиску від а) довжини тріщини l ; б) ΔK_{eff} .

Результати числового моделювання розповсюдження тріщини втоми з урахуванням еволюції накопичення пошкоджень демонструють нелінійний характер зростання швидкості тріщини. Порівняння з експериментальними даними показало задовільну узгодженість результатів розрахунків по всьому досліджуваному діапазоні

1. Golub V, Plashchiskaya A On the Theory of Growth of Fatique Mode I Cracks in Thin Isotropic Plates of Finite Size Under Uniaxial Tension-Compression, Int Appl Mechanics, 54, pp 188–206 (2018). https://doi.org/10.1007/s10778-018-0871-5
2. C. M. Hudson, *Effect of Stress Ratio on Fatigue-Crack Growth in 7075-T6 and 2024-T3 Aluminium Alloy Specimens*, NASA TN D-5390 (1969).

Modeling of Fatigue Crack Growth Rate in 7075-T6 Plates under Asymmetric Loading

A. Plashchynska

S.P.Timoshenko Institute of Mechanics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

plaschynska.alla@gmail.com

A numerical model is developed to predict the fatigue crack growth rate in thin 7075-T6 aluminum alloy plates subjected to asymmetric cyclic loading. The proposed approach integrates the principles of fracture mechanics and continuum damage mechanics. The model takes into account the history of fatigue damage accumulation along the crack line. The asymmetric load cycle is reduced to a symmetric cycle equivalent in time to failure. Nonlinear relationships between the crack growth rate and loading parameters are derived. The results demonstrate close agreement between numerical predictions and experimental data.

Keywords:. fatigue, thin plate, crack growth rate, damage accumulation, asymmetric cycle, equivalent stresses, cyclic plastic zone

Вплив тертя на поширення крайової тріщини в круговому диску під рухомим контактним навантаженням

Г. П. Марченко[1], І. А. Рудавська

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

[1] h.p.marchenko@gmail.com

Ключові слова: круговий диск, крайова тріщина, контактне навантаження, кочення, тертя, сингулярне інтегральне рівняння, коефіцієнти інтенсивності напружень, залізничне колесо.

Нові розв'язки контактних задач про напружений стан або коефіцієнти інтенсивності напружень для кругових дисків з тріщинами під дією різних зовнішніх навантажень мають самодостатнє значення серед задач математичної теорії тріщин. Разом з тим вони корисні і для проведення теоретично обґрунтованих розрахунків на міцність та довговічність елементів машин, які перебувають в умовах контактної втоми кочення.

Запропоновано схему стискання диска з крайовою тріщиною, коли на ділянці його контуру L_0 діють нормальні $p(t_0)$ і дотичні $q(t_0)$ зусилля, які урівноважуються прикладеними у центрі диска зосередженими силами X_0 і Y_0 та моментом M_0. Причому за допомогою заданих за законом Амонтона дотичних зусиль змодельовано сили тертя ковзання між тілами пари кочення (рис. 1). Береги тріщини, вільні від зовнішніх зусиль, за певних розташувань контактного навантаження (за певних φ_0) можуть контактувати. Допускається загальний характер взаємодії берегів тріщини (не контактують, проковзують з тертям, зчеплені). Цикл навантаження кочення змодельовано пересуванням контактного навантаження вздовж контуру диска у напрямі, протилежному напряму кочення, коли одному оберту диска відповідає одне проходження навантаження над тріщиною.

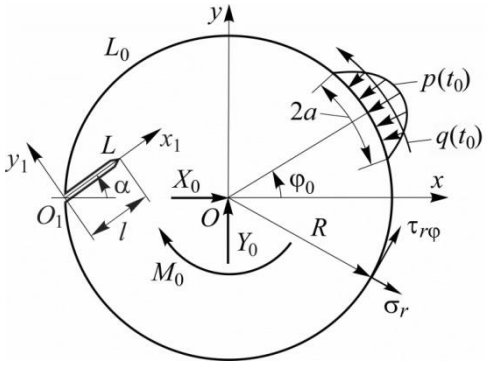


Рис. 1. Загальна схема задачі.

Вивчали напружений стан кругового ізотропного диска з похилою або радіальною крайовими тріщинами під дією модельного контактного навантаження. Задачу звели до системи сингулярних інтегральних рівнянь першого роду з ядром Коші відносно похідних від розривів переміщень берегів тріщини, розв'язок якої

шукали числовим методом механічних квадратур. Запропоновано методику визначення апріорі невідомих ділянок контакту берегів тріщин (в т.ч. зон проковзування з тертям та зчеплення) методом послідовних наближень.

На прикладах залізничних коліс проілюстровано трибологічний аспект пошкоджень поверхонь кочення. Встановлено, що діючі в контакті сили тертя ковзання є головним чинником формувань контактно-втомних пошкоджень поверхонь кочення. Доведено, що основний вплив модельного контактного навантаження на поверхневі тріщини реалізується, коли воно діє безпосередньо біля тріщин. А їх орієнтація відносно напряму дії сил тертя значною мірою визначає домінуючий механізм руйнування. Описано кінетику формування поверхневого пошкодження залізничних коліс типу вищербина через пітингоутворення та відшаровування.

Слід зауважити, що отримані результати якісно корелюють з класичними для контактної втоми кочення результатами Кіра і Брайанта [1, 2], які в рамках підходу Герца моделювали тіло кочення півплощиною (півпростором). Такий підхід (без врахування кругової геометрії тіла кочення) застосовувався нами раніше [3].

1. L. M. Keer and M. D. Bryant, A pitting model for rolling contact fatigue, *Trans. ASME: J. Lubric. Technol.*, **105**(2), 198–205 (1983). https://doi.org/10.1115/1.3254565
2. L. M. Keer, M. D. Bryant, and G. K. Haritos, Subsurface and surface cracking due to Hertzian contact, *Trans. ASME: J. Lubric. Technol.*, **104**(3), 347–351 (1982). https://doi.org/10.1115/1.3253217
3. O. Datsyshyn and V. Panasyuk, *Structural integrity assessment of engineering components under cyclic contact*, Cham (Switzerland), Springer, (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23069-2

The effect of friction on the propagation of an edge crack in a circular disk under moving contact load

H. P. Marchenko[1], I. A. Rudavska

Karpenko Physico-Mechanical Institute, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] h.p.marchenko@gmail.com

The method of singular integral equations has been used to obtain solution of the contact problem of the theory of elasticity for isotropic circular disk with an edge crack under the action of moving contact load. The kinetics of interaction (opening-closing) of the crack faces as the load bypasses the disk contour have been revealed. It has been proven that the main effect of contact load (especially friction forces) on the surface crack is realized when it acts directly near the crack. Under rolling contact fatigue, possible mechanisms of crack development and directions of its propagation have been investigated.

Keywords: circular disk, edge crack, contact load, rolling, friction, singular integral equation, stress intetsity factors, railway wheel.

Моделювання напружено-деформованого стану нетонких лінійно пружних пластин і пологих оболонок

А. Г. Зеленський[1]

Український державний університет науки і технологій ННІ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, Україна

[1] a.zelensky@ukr.net

Ключові слова: нетонка пластина, полога оболонка, моделювання, гранична задача, варіант математичної теорії, напруження, переміщення, система, диференціальні рівняння, метод.

Теорії лінійно пружних пластин і оболонок розроблялись в численних наукових працях**,** зокрема в [1 – 8]. Одні теорії базуються на модифікаціях теорії Тимошенка-Рейснера і використанні різних моделей деформування із залученням певних фізичних і кінематичних припущень. Інші основуються на математичних підходах без гіпотез [1, 3 – 5, 7, 8]. Огляди робіт обох напрямків наведені в [1 – 4, 6, 8].

В даній роботі аналізуються моделі напружено-деформованого стану (НДС) нетонких пластин і пологих оболонок, які випливають із розробленого варіанта математичної теорії [4]. На основі цього варіанта отримані двовимірні нескінченні системи диференціальних рівнянь рівноваги. Розв'язання граничних задач зводиться до використання частинних сум рядів для компонент НДС (1). Приймаючи для розрахунків певну кількість членів у частинних сумах для переміщень, отримаємо певні моделі НДС для вказаних елементів: класичної теорії, теорії типу Тимошенка-Рейснера, моделі вищих наближень. Порядок систем рівнянь рівноваги в моделях збільшується із зростанням кількості доданків у частинних сумах рядів для НДС, і в той же час підвищується точність. При використанні моделі M0-N переміщення і напруження отримані у формі:

$$U(x,y,z)=\sum_{n=0}^{N}P_n(2z/h)u_n(x,y)\,,(U,u\to V,v);W(x,y,z)=\sum_{n=1}^{N}P_{n-1}(2z/h)w_n(x,y)\,;$$
$$\sigma_{xz}(x,y,z)=\textstyle\sum_{n=0}^{N+1}P_n(2z/h)t_{xn}(x,y)\,,(x,y);\ \sigma_z(x,y,z)=\sum_{n=0}^{N+2}P_n(2z/h)s_{zn}(x,y)\,; \quad (1)$$
$$\sigma_x(x,y,z)=\textstyle\sum_{n=0}^{N+2}P_n(2z/h)s_{xn}(x,y),(x,y);\ \sigma_{xy}(x,y,z)=\sum_{n=0}^{N}P_n(2z/h)t_{yxn}(x,y),$$

де $P_n(2z/h)$ – поліноми Лежандра; функції від тангенціальних змінних у компонентах переміщень – шукані складові переміщень, у напруженнях – залежать від складових переміщень.

Система диференціальних рівнянь рівноваги має порядок $(6N+4)$. Для моделі M0-N система рівнянь має наступний вигляд:

$$\textstyle\sum_{j=0,1}^{N}(D_{iuj}u_j+D_{ivj}v_j)+\sum_{j=1,2}^{N}D_{iwj}w_j=D_{ipq}(x,y),(i=1,2,\ldots,(3N+2)), \quad (2)$$

де D_{iuj},D_{ivj},D_{iwj} – диференціальні оператори не вище 2-го порядку; D_{ipq} – функції поперечного навантаження.

Отримані загальні розв'язки систем високих порядків (2) за допомогою розробленого методу зведення їх до диференціальних рівнянь 2-го порядку, що значно спрощує розв'язання граничних задач.

Перевага вказаних моделей полягає в тому, що можна отримати розв'язки граничних задач з будь-якою високою точністю, розглянувши моделі більш високих порядків варіанта теорії, що неможливо для моделей, основаних на гіпотезах.

1. Я. Й. Буряк, Ю. К. Рудавський, М. А. Сухорольський, *Аналітична механіка локально навантажених оболонок,* Інтелект-Захід, Львів (2007).
2. А. Н. Гузь, О расчётных схемах в линеаризованной механике деформируемых тел, *Прикл. механика*, **40**, №5, 30–47 (2004).
3. В. И. Гуляев, В. А. Баженов, П. П. Лизунов, *Неклассическая теория оболочек и ее приложение к решению инженерных задач*, Львовский ун-т, Львов (1978).
4. А. Г. Зеленський, Монографія, *Варіант математичної теорії трансверсально-ізотропних пластин довільної товщини,* ПДАБА, Дніпро (2022).
5. Н. А. Кильчевский, *Основы аналитической механики оболочек,* АН УССР, Киев (1963).
6. Ю. Н. Немиш, И. Ю. Хома, Напряженно-деформированное состояние нетонких оболочек и пластин. Обобщенная теория (Обзор), *Прикл. механика,* 29, № 11, 3–32 (1993).
7. А. В. Плеханов, А. П. Прусаков, Об одном асимптотическом методе построения теории изгиба пластин средней толщины, *Механика тв. тела,* № 3, 84–90 (1976).
8. И. Ю. Хома, *Обобщенная теория анизотропных оболочек,* Наук. думка, Киев (1986).

Modeling the stress-strain state of non-thin linearly elastic plates and shallow shells

A. Zelensky[1]

Ukrainian State University of Science and Technology NNI Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

[1] a.zelensky@ukr.net

In this work, models of the stress-strain state of linearly elastic non-thin plates and shallow shells are constructed, which follow from the developed variant of the mathematical theory, according to which all components of the stress-strain state are functions of three spatial coordinates and are represented as infinite series in the transverse coordinate using Legendre polynomials.By the variational method, infinite systems of two-dimensional differential equations of equilibrium are obtained, which are reduced to 2nd-order differential equations by the developed method. General solutions are found. The advantage of these models is the possibility of obtaining solutions to boundary value problems with any high accuracy, considering models of higher orders of the variant of the theory, which is impossible for models based on hypotheses.

Keywords: non-thin plate, shallow shell, modeling, boundary value problem, variant of mathematical theory, stress, displacement, system, differential equations, method.

Вимушені коливання та дисипативний розігрів порожнистої електров'язкопружної шаруватої півсфери з концентратором напружень

В. І. Козлов, Ю. І. Лелюх[1], Л. П. Зінчук

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ, Україна

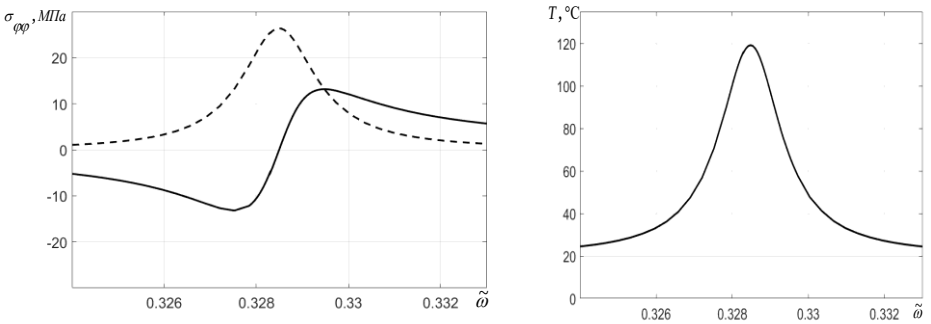
[1] yult84@ukr.net

Ключові слова: п'єзоелектрична порожниста півсфера, метод скінченних елементів, резонансні коливання, дисипативний розігрів, концентратор напружень.

Сферичні елементи конструкцій з п'єзоелектричними шарами знаходять широке застосування в акустичних та гідроакустичних приладах в якості резонаторів та детекторів високочастотних коливань. Однак властиві практично всім матеріалам гістерезисні втрати, внаслідок яких електромеханічна енергія перетворюється на теплову, призводять до інтенсивного дисипативного розігріву таких конструктивних елементів, що має істотній вплив на механічний та тепловий стан конструкцій.

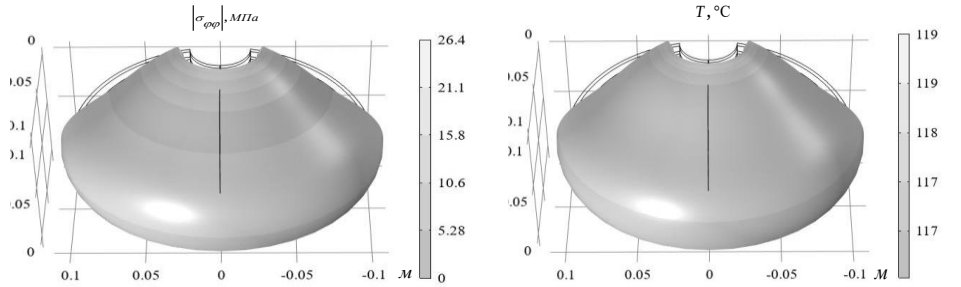
У роботі представлено чисельну методику розв'язання крайових задач термоелектромеханіки просторових тіл обертання із в'язкопружних п'єзоелектричних матеріалів при моногармонічному механічному навантаженні, яка ґрунтується на методі скінченних елементів у варіаційній постановці [1] та концепції комплексних характеристик [2]. У випадку незалежності фізико-механічних властивостей матеріалів від температури, який представлено у цій роботі, знаходження розв'язку зв'язаної задачі зводиться до розв'язування лінійної задачі електров'язкопружності з комплексними електромеханічними характеристикамита та лінійної задачі теплопровідності з відомим джерелом тепла [1].

Було проведено чисельне моделювання термоелектромеханічної поведінки тришарової шарнірно опертої по екваторіальному перерізу порожнистої півсфери з радіусом серединної поверхні 0,1 м. Приповерхневі шари півсфери виготовлено із п'єзокераміки PZT (ЕС-65) [1] з радіальною поляризацією, кожний товщиною 0,0025 м, середній пасивний шар товщиною 0,005 м представлений алюмінієм, а на електродованих зовнішніх поверхнях п'єзошарів та в металевому шарі задано нульовий потенціал. На полюсі півсфери знаходиться концентратор напружень у вигляді кругового отвору радіусом 0,02 м. Виходячи з симетрії задачі, розрахунки проводились для половини порожнистої півсфери.



а *б*

Рис. 1. Амплітудно- та температурно-частотні характеристики в околі концентратора напружень: *а* – дійсної (суцільна крива) та уявної (штрихова крива) складової окружного напруження; *б* – температури дисипативного розігріву порожнистої півсфери.



а *б*

Рис. 2. Просторовий розподіл у порожнистій напівсфері на частоті резонансу: *а* – модуля комплексного окружного напруження, *б* – температури дисипативного розігріву.

На рис. 1*а* представлена амплітудно-частотна характеристика дійсної (суцільна крива) та уявної (штрихова крива) складової окружного напруження $\sigma_{\phi\phi}$ в околі резонансної частоти $\omega = 0{,}3285 \times 10^5$рад/с ($\tilde{\omega} = \omega \times 10^{-5}$рад/с) на верхній поверхні півсфери та границі концентратора напружень. На рис. 1*б* зображена температурно-частотна характеристика порожнистої півсфери у тій же точці. На рис. 2 представлені розподіли модуля комплексного окружного напруження $\sigma_{\phi\phi}$ (рис. 2*а*) та температури вібророзігріву (рис. 2б) в об'ємі порожнистої півсфери на частоті резонансу $\omega = 0{,}3285 \times 10^5$рад/с.

1. V.G. Karnaukhov, V.I. Kozlov, A.V. Zavgorodnii *et al.*, Forced resonant vibrations and self-heating of solids of revolution made of a viscoelastic piezoelectric material, *Int Appl Mech*, **51**, 614–622 (2015). https://doi.org/10.1007/s10778-015-0718-2
2. В.Г. Карнаухов, В.В Михайленко, *Нелинейные одночастотные колебания и диссипативный разогрев неупругих пьезоэлектрических тел*, ЖГТУ, Житомир (2005).

Forced vibrations and dissipative heating of hollow electroviscoelastic layered hemisphere with stress concentrator

V. Kozlov, Yu. Leliukh[1], L. Zinchuk

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] yult84l@ukr.net

Keywords: piezoelectric hollow hemisphere, finite element method, resonant vibrations, dissipative heating, stress concentrator

The numerical simulation results of the thermoelectromechanical behavior of a three-layer viscoelastic piezoelectric hollow hemisphere with stress concentrator under forced vibrations and dissipative heating are presented. The electromechanical characteristics were calculated and the dissipative heating temperature was determined in the vicinity of resonance frequency.

Розрахунки тришарової циліндричної оболонки з круговим отвором за 2D і 3D моделями

Р. В. Серафимович, Є. А. Сторожук [1]

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1] stevan@ukr.net

Ключові слова: тришарова циліндрична оболонка, круговий отвір, модель Тимошенка, тривимірна теорія, метод скінченних елементів, осьовий розтяг.

Тришарові оболонкові конструкції широко застосовуються в авіаційній, ракетно-космічній та машинобудівній техніці завдяки високому відношенню жорсткості до маси. Наявність отворів у таких конструкціях призводить до значної концентрації напружень.

Розглядається пружна конструкція, яка складається з двох тонких обшивок і легкого заповнювача та ослаблена круговим отвором. Обшивки виконано з алюмінієвого сплаву АМг6, а заповнювач – з полімерного матеріалу PVC Foam. Один з торців оболонки жорстко закріплений, а інший – навантажений розтягувальною силою величиною 0,4 МН, яка рівномірно розподілена на краях обшивок.

Розрахунки тришарової оболонки виконано методом скінченних елементів з використанням чотирикутних оболонкових (модель Тимошенка) і тетраедральних (тривимірна модель) скінченних елементів [1].

На рис. 1 (модель Тимошенка) і рис. 2 (тривимірна модель) наведено розподіл еквівалентних за Мізесом напружень в оболонці з такими параметрами: радіус серединної поверхні заповнювача – 0,5 м; товщина обшивок – 0,005 м; товщина шару заповнювача – 0,05 м; радіус отвору – 0,1 м; довжина оболонки – 1,4 м; модуль Юнга обшивок – 70 ГПа, заповнювача – 0,102 ГПа; коефіцієнт Пуассона обшивок – 0,33, заповнювача – 0,3.

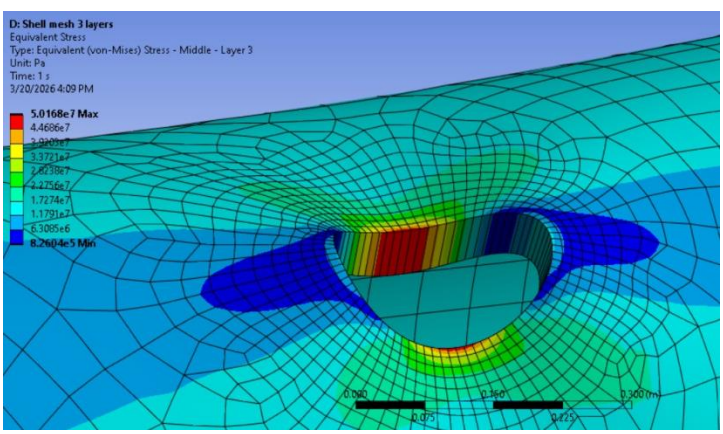


Рис. 1. Розподіл еквівалентних напружень у тришаровій циліндричній оболонці з круговим отвором (модель Тимошенка).

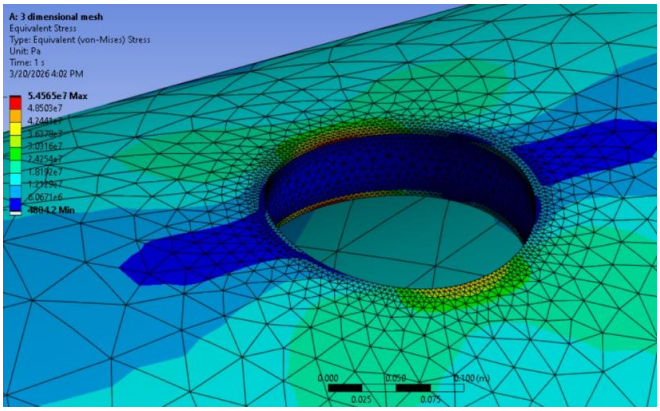


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень у тришаровій циліндричній оболонці з круговим отвором (тривимірна теорія).

З представлених на рис. 1, 2 даних випливає, що у випадку використання моделі Тимошенка максимальні напруження складають 50,2 МПа, а у випадку тривимірної теорії – 54,6 МПа.

Порівняння отриманих результатів показало, що оболонкова модель на основі гіпотези Тимошенка забезпечує прийнятну точність визначення напружено-деформованого стану для інженерних розрахунків за істотно меншої обчислювальної складності. Водночас тривимірна модель дає змогу детальніше дослідити просторовий розподіл напружень у шарах конструкції та оцінити локальні ефекти в області отвору.

1. 1.О. В. Кудін, Є. А. Сторожук, С. В. Чопоров, Наближені аналітичні та чисельні методи аналізу міцності тришарових тонкостінних конструкцій, Видавничий дім «Гельветика», Херсон (2019).

Calculations of a three-layer cylindrical shell with a circular opening using 2D and 3D models

R. V. Serafymovych, Ye. A. Storozhuk [1]

S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] stevan@ukr.net

In this work, a three-layer cylindrical shell with a circular hole is calculated using the finite element method using the Timoshenko shell model and the three-dimensional model. A comparison of the obtained results shows that the Timoshenko model provides sufficient accuracy for engineering estimates at significantly lower computational costs, while the three-dimensional model allows for a more detailed assessment of the stress distribution along the thickness and local effects near the hole.

Keywords: three-layer cylindrical shell, circular opening, Timoshenko model, three-dimensional theory, finite element method, axial tension.

Довготривале деформування нелінійно-в'язкопружних матеріалів з врахуванням виду напруженого стану

О. В. Романов, Д.П. Черноус

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
creep@inmech.kiev.ua

Ключові слова: нелінійно-в'язкопружний матеріал, розтяг з крученням, деформація повзучості, кут виду напруженого стану

Вважаючи, що в умовах складного напруженого стану компоненти тензора деформації пов'язані з компонентами тензора напружень тензорно-лінійним зв'язком у вигляді пропорціональності їх девіаторів і нехтуючи кульовою компонентою через її несуттєвий вплив, отримуємо

$$e_{ij}(t) = \lambda(J_2(D_\sigma\,(t)), J_3[D_\sigma(t)])s_{ij}(t) \tag{1}$$

Вплив третього інваріанту девіатора напружень враховується за допомогою функції кута виду напруженого стану - $\gamma(\psi_\sigma)$, в якій параметр кута виду напруженого стану розглядається у вигляді

$$\psi_\sigma = \frac{1}{3} arccos \frac{27 J_3(D_\sigma)}{2\sigma_i^3}. \tag{2}$$

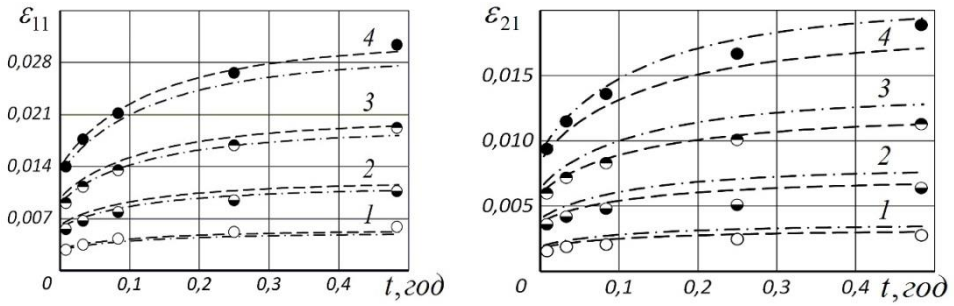
В (1),(2) прийнято $J_2[D_\sigma(t)]$, $J_3[D_\sigma(t)]$ – другий і третій інваріанти діевіатора напружень відповідно; σ_i – інтенсивність нормальних напружень; ψ_σ – кут виду напруженого стану. В цій інтерпретації одновісному розтягу відповідає $\psi_\sigma = 0$, одновісному стиску $\psi_\sigma = \pi/3$, а чистому скрученню $\psi_\sigma = \pi/6$. Визначення функції $\gamma(\psi_\sigma)$ від ψ_σ здійснюється на основі базових дослідів на одновісний розтяг та чисте скручення.

Система визначальних рівнянь записується у вигляді

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij}(t) = \frac{3}{2}\frac{[\pi \pm 6(1-\gamma_\varepsilon)\psi_\sigma]\bar{\varepsilon}_i(\sigma_i,t)}{\pi\sigma_i(t)}\left(\sigma_{ij}(t) - \delta_{ij}\sigma_0(t)\right) + \frac{1}{3}\delta_{ij}\varepsilon_v(t) \\ \phi_i(\bar{\varepsilon}_i(t)) = \sigma_i(t) - \gamma_i \int_0^t K_i(t-\tau)\sigma_i(\tau)d\tau; \\ \phi_v(\varepsilon_v(t)) = \sigma_0(t) + \gamma_v \int_0^t K_v(t-\tau)\sigma_0(\tau)d\tau. \end{cases} \tag{3}$$

де $\phi_v(\cdot)$, $\phi_i(\cdot)$ - функції, які задають не лінійність об'ємних і зсувних в'язкопружних властивостей; $\varepsilon_v(\cdot)$– об'ємна деформація; $K_v(\cdot)$, $K_i(\cdot)$ – функції, які задають ядра об'ємної і зсувної повзучості, задаються дробово-експоненційними функціями [1] [2]; λ_v, λ_i - реологічні параметри.

Результати розрахунків деформацій повзучості тонкостінних трубчастих елементів з поліетилену високої щільності ПЭВП і поліетилену низького тиску в умовах співставленні на рис. 1 з експериментальними даними [3]. Рорахунки за рівняннями (3) нанесені штрих пунктирними лініями, а штриховими лініями нанесені результати розрахунків за рівняннями (3), в яких вплив виду напруженого стану не враховувався.



а б

Рис. 2.1. Деформації повзучості тонкостінних трубчатих елементів з поліетилену високої щільності ПЭВП за умов комбінованого навантаження (1- = 1,77, = 0,83; 2- = 3,54, = 1,66; 3- = 5,31, = 2,49; 4- = 7,08, = 3,32 МПа)

1. Голуб В. П. Нелинейная ползучесть вязкоупругих органических волокон при растяжении / В. П. Голуб, Ю. М. Кобзарь, П. В Фернати // Прикл. механика.-2005.-Том 41, №7
2. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. Крегерс А.Ф. Комплексное исследование полиэтилена высокой плотности в условиях нелинейной ползучести и релаксации напряжений / А.Ф Крегерс., М.Р. Килевич // Механика композитных материалов. – 1985, №2. – С. 195-201.
4. Наместников В.С. О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1957, №4. – С. 141-145.

Long-term deformation of nonlinear viscoelastic materials taking into account the type of stress state

O. Romanov, D. Chernous

S.P. Tymoshenko Institute of Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

creep@inmech.kiev.ua

The process of long-term deformation of nonlinear viscoelastic materials is considered, taking into account the type of stress state, which is carried out by introducing a function with the angle parameter of the type of stress state into the determining equations. The function is determined based on the analysis of basic experimental data on uniaxial tension and pure torsion. The physical and mechanical properties of the nonlinear viscoelastic medium are given in the form of a modified nonlinear Rabotnov viscoelasticity model. The heredity kernel is used in the form of a fractional-exponential function. Comparison of calculations and experimental data of nonlinear creep deformations under combined loading of thin-walled tubular elements made of high-density polyethylene and low-pressure polyethylene showed that taking into account the type of stress state qualitatively and quantitatively improves their agreement.

Keywords: nonlinear viscoelastic material, torsional tension, creep deformation, angle of view of the stressed state

Гранична форма пружних півпросторів з поверхневими виїмками після фретинг зношування

Н. Маланчук[a1], Р. Мартиняк[б], О. Козачок[a]

[a]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[б]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1] natamalanchuk@gmail.com

Ключові слова: пружні півпростори, проковзування, фретинг зношування, гранична форма виїмки, товщина зношеного матеріалу, сингулярне інтегральне рівняння, контактний тиск.

Фретинг зношування притаманне багатьом технічним, біологічним, геологічним та ін. структурам, що функціонують за умов знакозмінного навантаження. Приводячи до зміни геометрії поверхонь в контактних з'єднаннях, воно може істотно впливати на їхню герметичність, провідність, міцність і надійність [1]. Зараз у літературі значну увагу приділяють визначенню граничної форми тіл після фретинг зношування [2, 3], адже саме це дає змогу оцінити, чи зміна форми тіл не перевищує допустиму і чи відповідні контактні напруження не зумовлять поверхневе руйнування.

У праці [4] розвинуто методику визначення граничного стану після фретинг зношування пружних півпросторів з номінально плоскими поверхнями, одна з яких має плитку виїмку, за їх повного контакту. Зношування відбувається на ділянці фрикційного проковзування поверхонь у межах виїмки під дією знакозмінних зсувних зусиль. Ця методика полягає у поданні контактних напружень після зношування через початкову форму виїмки та функцію товщини зношеного матеріалу $h(x)$ на ділянці проковзування, подальшому зведенні відповідної зносоконтактної задачі до сингулярного інтегрального рівняння (СІР) з ядром Коші на функцію $h(x)$ та знаходженні його аналітичного розв'язку.

Використовуючи цю методику, визначимо граничний стан після фретинг зношування двох пружних тіл з поверхневими виїмками різної форми.

Розглянемо контакт двох пружних ізотропних півпросторів D_1 (нижнього) та D_2 (верхнього), матеріали яких мають однакові механічні властивості (G – модуль зсуву, ν – коефіцієнт Пуассона), за умов плоскої деформації. Верхнє тіло має плоску поверхню, а поверхня нижнього на ділянці шириною $2b$ має виїмку, форму якої задає неперервно-диференційована функція

$$r(x) = -r_0(1 - x^2/b^2)^{n+\frac{1}{2}}, \qquad |x| \le b\,, \tag{1}$$

де r_0 – максимальна глибина виїмки ($0 < r_0/b \ll 1$), n=1,2,.. – натуральний параметр. Спершу до тіл на безмежності прикладаються рівномірно розподілені стискальні зусилля P такі, що $P \ge P_{\text{cls}}$, де $P_{\text{cls}} = Gr_0(2n+1)(2n-1)!!/2^{n+1}n!\,(1-\nu)b$ – навантаження, за якого зазор закриється повністю. Далі до тіл на нескінченності прикладаються знакозмінні осцилювальні зсувні зусилля амплітуди S з діапазону $f(P - P_{\text{cls}}) \le S < fP$ (f – коефіцієнт тертя). За такого навантаження на певній ділянці $-c < x < c$ у межах виїмки ($c < b$) виникне зона фрикційного проковзування поверхонь, на якій модуль дотичних напружень дорівнюватиме контактному тиску,

помноженому на коефіцієнт тертя, а поза цією зоною ($|x| \geq c$) поверхні тіл перебувають у зчепленні. З умови обмеженості дотичних контактних напружень на кінцях ділянки проковзування ($x = \pm c$) отримали рівняння

$$S - fP + \frac{Gr_0 f(2n+1)(2n-1)!!}{2^{n+1} n!\,(1-\nu)} - \frac{Gr_0 f(2n+1)}{2b(1-\nu)} M(x) = 0$$

для визначення півширини ділянки проковзування c. Тут $M(x)$ – многочлен степені $2n$. Саме на цій ділянці $|x| < c$ відбувається фретинг зношування тіла з виїмкою внаслідок циклічного відносного руху поверхонь та дії сил тертя. Для виїмок форми (1) отримано замкнутий розв'язок відповідного СІР з ядром Коші та аналітично визначено товщину зношеного матеріалу $h(x)$. Базуючись на знайденому аналітичному розв'язку задачі, проаналізовано залежності граничної форми виїмок (для n=1 та n=2) і контактного тиску від амплітуди зсувних навантажень.

1. T. Yue, M. A. Wahab, A review on fretting wear mechanisms, models and numerical analyses, *Computers, Materials & Continua*, **59** (2), 405–432 (2019). https://doi.org/10.32604/cmc.2019.04253
2. M. Hess, A study on gross slip and fretting wear of contacts involving a power-law graded elastic half-space, *Facta Universitatis Series: Mech Eng*, **17 (**1), 47–64 (2019). https://doi.org/10.22190/FUME190121010H
3. X. Mao, W. Liu, Y. Ni, and V. L. Popov, Limiting shape of profile due to dual-mode fretting wear in contact with an elastomer, *Proc. IMechE. Part C: J Mech Eng Sci*, **230** (9), 1417–1423 (2016). https://doi.org/10.1177/0954406215619450
4. N. I. Malanchuk, R. M. Martynyak, O. P. Kozachok, Fretting wear of elastic half-spaces with a groove in a frictional slip zone, *Mater Sci* (2026). https://doi.org/10.1007/s11003-026-01044-8

Limiting shape of elastic half-spaces with surface grooves after fretting wear

N. Malanchuk[a1], R. Martynyak[b], O. Kozachok[a]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.
[b]Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] natamalanchuk@gmail.com

The limiting shape of two elastic bodies with surface grooves after fretting wear is determined. Wear occurs in the zone of frictional slip of surfaces within the groove under the action of alternating-sign shear forces. The contact stresses of bodies after the end of wear are given by the initial shape of the groove and the function of the thickness of the worn material in the slip zone. To determine the function of the thickness of the worn material a singular integral equation with a Cauchy kernel is written and its analytical solution is obtained. The dependences of the limiting shape of the grooves and contact pressure on the amplitude of the shear load are analyzed.

Keywords: elastic half-spaces, slip, fretting wear, limiting shape of the groove, thickness of the worn material, singular integral equation, contact pressure.

Контакт пружного тіла та жорсткої основи з виїмкою за високої теплопровідності інтерфейсу

К. Чумак[1], Р. Мартиняк

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1] chumakostya@gmail.com

Ключові слова: поверхнева теплопровідність, термопружний контакт, поверхнева виїмка, міжконтаткний зазор, інтерфейс з високою теплопровідністю, контактний тиск.

У цій праці розглянуто термопружний контакт ізотропного півпростору S_1, плоска межа якого наділена високою теплопровідністю, та абсолютно жорсткої основи S_2, поверхня якої містить пологу тунельну виїмку малої глибини $r(x)$, розташовану вздовж смуги шириною $2b$ (рис 1). Вважається, що в тілі S_1 реалізується стан плоскої деформації. Верхнє тіло притискається до нерухомої основи S_2 рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями інтенсивності p. Крім того, в тілі S_1 на нескінченності задано стаціонарний тепловий потік густини q, спрямований вздовж осі y. Вважаємо, що жорстка основа підтримується при нульовій температурі.

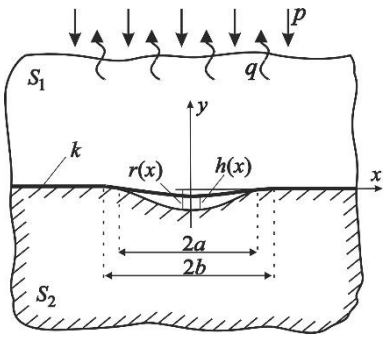


Рис. 1. Схематичне зображення контакту тіл

Поверхнева виїмка зумовлює неповний механічний контакт тіл: на інтерфейсі утворюється зазор, висота $h(x)$ та ширина $2a$ якого є апріорі невідомими й залежать від прикладеного термомеханічного навантаження. Вважаємо, що міжконтактний зазор є теплоізольованим.

Використовуючи модель високопровідного інтерфейсу (HC-type interface) [1, 2], крайові теплові умови для півпростору S_1 на поверхні y=0 запишемо у вигляді:

$$-\lambda\frac{\partial T(x,0)}{\partial y}=k\frac{\partial^2 T(x,0)}{\partial x^2},|x|<a;\quad T(x,0)=0,|x|>a, \tag{1}$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу тіла S_1, k – його поверхнева теплопровідність.

З використанням методу функцій міжконтакних зазорів [3] сформульовану контактну задачу зведено до сингулярного інтегро-диференціального рівняння відносно температури $\Psi(x)=T(x,0)$ межі пружного тіла

$$k\Psi''(x) + \frac{\lambda}{\pi}\int_{-a}^{a}\frac{\Psi'(t)}{t-x}dt = q, \qquad |x| < a \tag{2}$$

та сингулярного інтегрального рівняння відносно похідної висоти зазору $h'(x)$

$$\frac{1}{\pi}\int_{-a}^{a}\frac{h'(t)}{t-x}dt = -\int_{-b}^{b}\frac{r'(t)}{t-x}dt + 2\frac{1-\nu^2}{E}p + \alpha(1+\nu)\Psi(x), \qquad |x| < a. \tag{3}$$

Тут α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу пружного тіла S_1.

Наближений розв'язок рівняння (2) отримано за допомогою підходу, запропонованого у праці [4], що базується на методі колокацій. Рівняння (3) розв'язано аналітично, а ширину зазору визначено з умови обмеженості контактних напружень в околі його країв. Проаналізовано вплив поверхневої теплопровідності інтерфейсу на розподіл температури, контактний тиск та форму зазору.

1. Y. Benveniste, On the decay of end effects in conduction phenomena: A sandwich strip with imperfect interfaces of low or high conductivity, *J Appl Phys*, **86**(3), 1273–1279 (1999). https://doi.org/10.1063/1.370881
2. T. Doan, H. Le-Quang, and Q.-D. To, Effect of void shape and highly conducting boundary on 2D conductivity of porous materials, *Arch Appl Mech*, **91**, 4539–4552 (2021). https://doi.org/10.1007/s00419-021-02014-z
3. R. Martynyak, K. Chumak, Effect of heat-conductive filler on interface gap on thermoelastic contact of solids, Int J Heat Mass Transf, **55** (4), 1170–1178 (2012). https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.09.053

A. Chakrabarti, Hamsapriye, Numerical solution of a singular integro-differential equation, *ZAMM*, **79**(4), 233–241 (1999). https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4001(199904)79:4%3C233::AID-ZAMM233%3E3.0.CO;2-6

Contact between an elastic solid and a rigid foundation with a groove under HC-type interface conditions

K. Chumak[a1], R. Martynyak[a]

[a]S. P. Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] chumakostya@gmail.com

This study investigates the thermoelastic contact between an elastic body and a rigid base in the presence of a high-conducting type (HC-type) interface and a thermally insulated interfacial gap. The formulated problem is reduced to a singular integro-differential equation for the temperature at the boundary of the elastic body, for which an approximate solution is obtained, and a singular integral equation for the derivative of the gap height, which is solved analytically. The influence of the surface thermal conductivity of the interface on the temperature distribution, contact pressure, and gap shape is analyzed.

Keywords: surface thermal conductivity, thermoelastic contact, surface groove, intercontact gap, high-conducting type interface, contact pressure.

Модель термомеханічних процесів при блочному нарощуванні в'язкопластичних тіл

І. Сенченков[1], О. Червінко, В. Усов

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна

[1]term@inmech.kyiv.ua

Ключові слова: нарощування, в'язкопластичні тіла, термомеханічні процеси, залишкові напруження

В роботі розвинуто підхід до моделювання термомеханічних процесів при блочному нарощуванні в'язкопластичних тіл з врахуванням мікроструктурних перетворень. Математична модель базується на теорії тіл, що ростуть [1]. Для задоволення граничних умов на поверхні нарощування використовується концепція «власного» температурно-деформовано-структурного стану в проміжному шарі [2]. Фазовий склад матеріалу визначається за допомогою термокінетичних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту. Термов'язкопластичний стан матеріалу моделюється рівняннями течії Боднера-Партома [3]. Для розв'язання задачі використовуються методи: крокового інтегрування за часом, ітераційний і скінченних елементів.

В схемі, що розглядається, нарощуваний елемент на поверхні нарощування містить прошарок, для якого приймаються майже нульові значення модулю Юнга і теплопровідності. В такій схемі елемент може змінювати термомеханічний стан, не впливаючи на стан раніше нарощеного тіла. В момент нарощення t* прошарок має деформацію ε* і температуру θ* і при t = t* заповнюється основним матеріалом. Визначальні рівняння для матеріалу прошарку формулюються таким чином: $\sigma(\varepsilon^*,\theta^*,t^*)=0$, що відповідає граничним умовам на поверхні нарощування. Як приклад розглянуто блочне нарощування порожнистого циліндра 0.08м < r < 0.09м зі сталі 35ХМ блоками (дисками) Δz=0.01м в розігрітому стані. На рис. 1 наведено кінетику формування залишкової конфігурації при нарощуванні циліндра на етапі третього блоку.

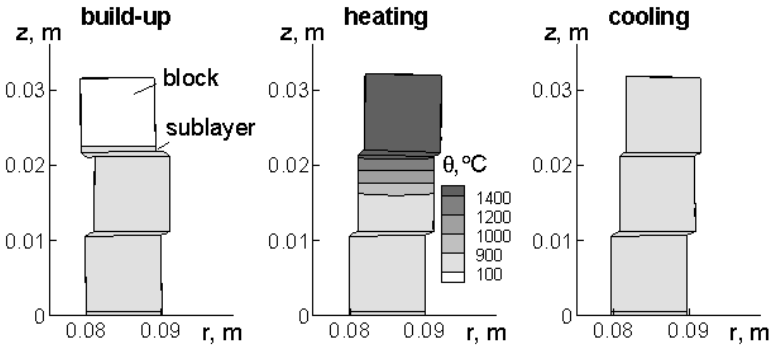


Рис. 1. Етапи нарощення третього блоку

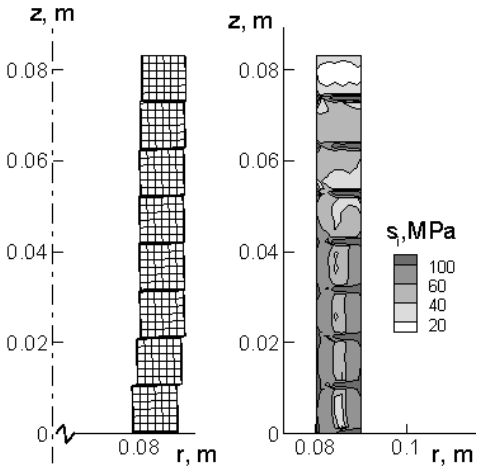


Рис. 2. Залишкові конфігурація і розподіл інтенсивності напружень

На рис. 2 наведені залишкові конфігурація і напруження Мізеса нарощеного циліндру з гладкими умовами на торці опирання. Розрахунки показують, що рівень напружень і деформацій найбільший поблизу поверхонь з'єднання і залежить від параметрів термомеханічного процесу нарощування. Отримані результати можуть бути корисними при виборі параметрів режимів адитивних технологій.

1. Арутюнян Н.Х., Дроздов А.Д., Наумов В.Є. *Механика растущих вязкопластических тел*, Москва: Наука (1987).
2. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турек Є.В. *Наплавка, материалы, технологии, математическое моделирование*, Гливице: Изд-во Силезского политехн. ин-та (2015).
3. Bodner S.R. *Unified plasticity – an engineering approach*, Haifa: Technion Inst. of Techn. (2000).

Model of Thermomechanical Processes in the Block-by-Block Growth of Viscoelastic Bodies

I. Senchenkov[1], O. Chervinko, V. Usov

[a]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, NASU, Kyiv, Ukraine

[1]term@inmech.kyiv.ua

Thermomechanical model of the growth of viscoplastic bodies has been developed. The model of growing bodies, the unified Bodner-Partom viscoplasticity model, and thermokinetic diagrams are used to determine the current and residual stress-strain-structure states. A finite-element method for calculating residual stresses and distortion has been developed. The results of the calculations are presented.

Keywords: growing viscoplastic bodies, thermomechanical processes, residual stresses

Стохастична модель довготривалої міцності конструкційних матеріалів при ізотермічній повзучості

В. П. Пошивалов

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

vposhivalov@gmail.com

Ключові слова: довготривала міцність, повзучість, пошкоджуваність, час до руйнування, функція розподілу часу до руйнування

Для описання процесу повзучості матеріалу з плином часу розглянемо кінетичне рівняння стану у вигляді степеневої залежності від напруження σ

$$\dot{\varepsilon} = \frac{a\sigma^n}{(1-\omega)^n} \tag{1}$$

а кінетичне рівняння пошкоджуваності розглянемо у двох різних варіантах – степеневої залежності від напруження

$$\dot{\omega} = \frac{b\sigma^k}{(1-\omega)^k}, \tag{2}$$

та експоненційної залежності від напруження [1]

$$\dot{\omega} = \frac{b\exp(\sigma/c)}{(1-\omega)^n}, \tag{3}$$

де $a,\ b, n,\ k,\ c$ – сталі повзучості матеріалу.

Вважаємо параметри $n,\ k,\ c$ детермінованими величинами, а параметри a та b – незалежними нормально розподіленими випадковими величинами [2,3].

Далі позначимо через $N(\mu_a,\ s_a^2)$, $N(\mu_b,\ s_b^2)$ розподіли випадкових величин a та b відповідно, де $\mu_a,\ \ \mu_b$ – математичні сподівання, $s_a^2,\ \ s_b^2$ – дисперсії.

Інтегруючи рівняння (2), (3) отримаємо співвідношення для параметру пошкоджуваності кожної з моделей (1) – (2), (1) – (3)

$$\omega_I(t) = 1 - [1 - (k+1)\cdot b\cdot \sigma^k \cdot t]^{1/(k+1)}, \tag{4}$$

$$\omega_{II}(t) = 1 - \left[1 - (n+1)\cdot b\cdot \exp\left(\frac{\sigma}{c}\right)\cdot t\right]^{1/(n+1)}. \tag{5}$$

З рівнянь (4) та (5) враховуючи умови $\omega(0) = 0$, $\omega(t_p) = 1$, визначимо час до руйнування для кожної з моделей відповідно

$$t_{pI} = \frac{1}{b(k+1)\sigma^k}, \tag{6}$$

$$t_{pII} = \frac{1}{b(n+1)\exp(\sigma/c)}. \tag{7}$$

Функція розподілу F_{t_p} часу до руйнування t_p для кожної з моделей визначиться за допомогою наступних співвідношень

$$F_{t_{pI}}(x) = \begin{cases} 0,\ x \le 0 \\ 1 - \int_0^{\frac{1}{x(1+k)\sigma^k}} f_b(t)dt\ ,\ x > 0 \end{cases}, \tag{8}$$

$$F_{t_{pII}}(x) = \begin{cases} 0, \ x \le 0 \\ 1 - \int_0^{\frac{1}{x(n+1)\exp(\sigma/c)}} f_b(t)dt, \ x > 0 \end{cases}, \tag{9}$$

де f_b – щільність розподілу випадкової величини b.

Щільність розподілу f_{t_p} часу до руйнування t_p для кожної з моделей визначиться за допомогою співвідношень

$$f_{t_{pI}}(x) = \begin{cases} 0, \ x \le 0 \\ \frac{1}{(1+k)\cdot\sigma^k}\frac{1}{x^2} f_b\left(\frac{1}{x(1+k)\sigma^k}\right), \ x > 0 \end{cases}, \tag{10}$$

$$t_p. \tag{11}$$

Для оцінки застосовності запропонованої стохастичної моделі руйнування проведемо порівняння теоретичних розрахунків з результатами випробувань на довготривалу міцність зразків з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т при температурі $T = 850\ ^\circ C$ при напруженні $\sigma = 39{,}24$Мпа [4].

На рисунках 1 і 2 відповідно представлені графіки функції і щільності розподілу часу до руйнування для трьох критеріїв руйнування (I – параметричний критерій руйнування; II – деформаційний критерій руйнування; III – змішаний критерій руйнування).

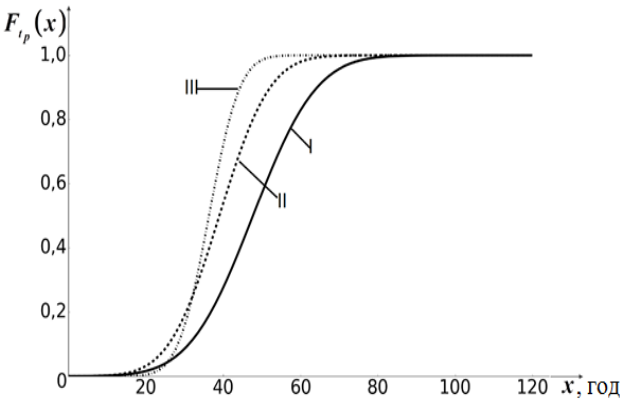


Рис. 1 – Функція розподілу часу до руйнування t_p при напруженні $\sigma = 39{,}24$ МПа та температурі $T = 850$ ºС для корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т

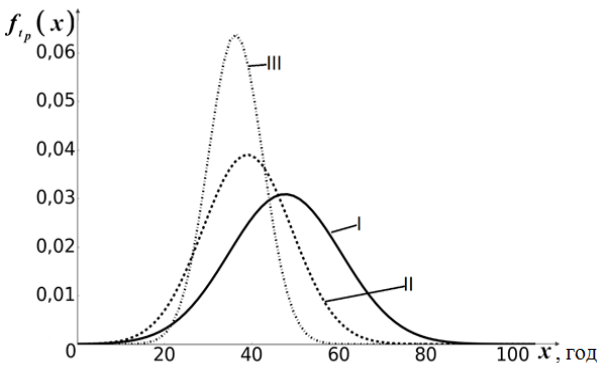


Рис. 2 – Щільність розподілу часу до руйнування t_p при напруженні $\sigma = 39{,}24$ МПа та температурі $T = 850$ ºС для корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т

На кожному з даних рисунків проілюстровано графіки для трьох різних критеріїв руйнування, які показують відмінність значень ймовірності руйнування, розрахованої за різними критеріями за один і той же проміжок часу.

Зокрема, з графіків випливає, що за заданий проміжок часу в більшості випадків параметричний критерій руйнування дає найменший прогноз ймовірність руйнування, а змішаний критерій руйнування найбільший прогноз ймовірності руйнування.

1. В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский Кинетическая природа прочности твердых тел. *Успехи физических наук*. Том 106, вып. 2. 1972. 36 с.
2. В.П. Пошивалов. Об одном подходе к определению времени до разрушения в условиях ползучести. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1993. №3. С. 56 – 60.
3. В.П. Пошивалов, И.А. Дояр. Оценка времени до разрушения конструкционных материалов при ползучести. *Вісник Дніпропетровського університету*. Сер. механіка. 2014. Вип. 18, т. 2. С. 172 – 181.
4. Закономерности ползучести и длительной прочности: справочник / ред. С. А. Шестериков. М. : Машиностроение, 1983. 101 с.

Stochastic model of long-term strength of structural materials under isothermal creep

V. P. Poshyvalov

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Academy of Sciences of Ukraine,
Dnipro, Ukraine

vposhivalov@gmail.com

A stochastic model of the fracture of structural materials during creep without taking into account the temperature dependence and the stage of hardening based on three different fracture criteria has been developed. Stochastic linearization of creep deformation was performed, which allowed analytically determining the main probabilistic characteristics of the creep deformation distribution at an arbitrary point in time. A comparison of theoretical calculations with the results of long-term strength tests of samples made of corrosion-resistant steel 12X18H10T at a temperature of T = 850 °C was carried out. It is shown that theoretical calculations performed using two models are in satisfactory agreement with the experimental results, both in terms of time to failure and its standard deviation.

Keywords: long-term strength, creep, damageability, time to failure, time to failure distribution function

Теплові деформації в матеріалі за умов імпульсного електротермічного впливу

Д. О. Халапсіс[1], Т. В. Ходанен, А. Ю. Дреус

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

[1] den.halapsis@gmail.com

У роботі досліджено задачу виникнення деформацій в одновимірному матеріалі під дією імпульсного електричного розряду, за якого виникає електротермічний удар. Побудовано математичну модель з урахуванням інерційних ефектів та температурно залежних властивостей матеріалу. За допомогою хвильового рівняння з термічним джерелом отримано розподіл деформацій уздовж провідника у фіксований момент часу. Отримані результати можуть слугувати простою фізичною моделлю для аналізу початкових стадій термопружної відповіді тонких шарів теплозахисних покриттів в аерокосмічній техніці.

Ключові слова: *електротермічний удар; термошок; хвильові деформації; теплозахисні матеріали; термопружність; моделювання; імпульсне нагрівання*

Вступ

Електротермічний удар — процес, при якому матеріал зазнає надшвидкого нагрівання, що викликає термошок, хвильові деформації та нерівномірний розподіл напружень, що призводить до локального руйнування матеріалу конструкції. Подібні термопружні процеси спостерігаються також у теплозахисних матеріалах ракетних сопел під час запуску, де прискорене нагрівання викликає термошокові деформації в матеріалі. Отже, дослідження термоелектричних деформацій в тонких шарах матеріалу є важливою прикладною задачею для забезпечення стійкості та витривалості нових конструкційних матеріалів в аерокосмічній техніці за екстремальних експлуатаційних умов.

1. Математична модель провідника під впливом електричного розряду високої потужності

В умовах розряду з піковим струмом, що сягає кількох кА за напруги порядку десятків кВ спостерігається явище електротермічного удару, що враховується в механічному рівнянні як інерційний член, яким часто нехтують у випадку більш повільного нагрівання [1]:

$$\nabla \cdot \sigma \neq 0. \tag{1}$$

Відповідно, механічне рівняння матиме вигляд:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma \tag{2}$$

Режим нагрівання є електротермічним ударом за умови $t_{\text{ел}} \lesssim t_{\text{мех}}$, де $t_{\text{ел}}$ – тривалість струмового імпульсу, $t_{\text{мех}}$ – характерний механічний час, що оцінюється на основі лінійного розміру провідника L та швидкості пружної хвилі c в матеріалі:

$$t_{\text{мех}} = \frac{L}{c}. \tag{3}$$

Тоді тензор напружень матиме вигляд [2]:

$$\sigma = C : (\varepsilon - \alpha(T - T_0)I), \tag{4}$$

де $C = C(T)$ – тензор пружних характеристик матеріалу, $\alpha = \alpha(T)$ – коефіцієнт теплового розширення, $\varepsilon = \varepsilon(u(T))$ – повна деформація.

2. Моделювання електротермічного удару

Для комп'ютерного моделювання розподілу деформацій в одновимірному провіднику було використано хвильове рівняння з термічним джерелом [3]:

$$\rho u_{tt} = E u_{xx} - E\alpha T_x, \tag{5}$$

де E – модуль Юнга, нижні індекси означають диференціювання по відповідним змінним, а деформації $\varepsilon = u_x$.

Для L = 0.1 *м* та c = 5060 *м/с* отримано такий графік розподілу ε по довжині провідника у фіксований момент часу t = 5*10^{-4} *с*:

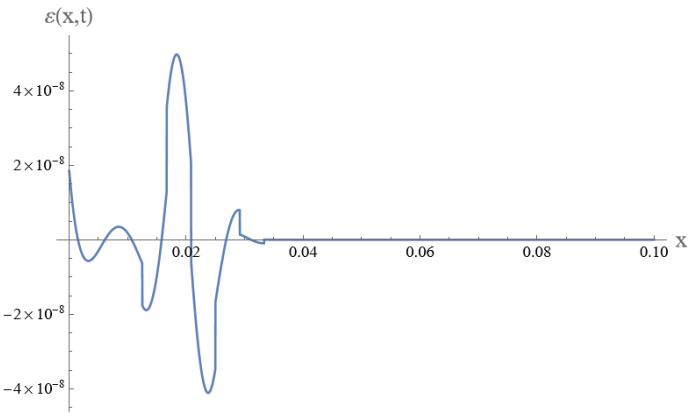


Рис. 1. Розподіл деформацій в момент часу t = 5*10^{-4} *с*

Висновки

Проведено моделювання електротермічних деформацій одновимірного провідника під дією високопотужного імпульсного струму та отримано розподіл деформацій у характерний момент часу. Показано важливість урахування інерційного члена в механічному рівнянні за умов надшвидкого нагрівання, що приводить до формування хвильових термопружних процесів. Отримані результати можуть бути використані як спрощена модель для оцінки поведінки тонких шарів теплозахисних покриттів у режимах різкого нестаціонарного нагрівання.

1. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann (2013).
2. Kushnir, R. M., Tokovyy, Y. V., Yuzvyak, M. Y., & Yasinskyi, A. V. Reduction of the two-dimensional thermoelasticity problems for solids with corner points to key integrodifferential equations. Ukrainian Mathematical Journal. https://doi.org/10.37863/umzh.v73i10.6784 Vol. 73. No. 10. 1355-1367 (2021).
3. Boley, B. A., & Weiner, J. H. *Theory of thermal stresses*. Dover Publications (1997).

Гранична рівновага композиції з пружним високомодульним стрічковим включеням

М. М. Кундрат

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

[1]kundrat@i.ua

Ключові слова: включення, зона передруйнування, функція стрибка, сингулярне інтегральне рівняння, метод колокацій

Для реалізації потенційних можливостей композиційних матеріалів, створюваних шляхом поєднання матриць із маломіцного матеріалу та високоміцних волокон–включень необхідне вивчення їх фізико-механічної поведінки. Включення, приймаючи на себе дію навантаження, одночасно є і концентраторами напружень, біля яких задовго до втрати несучої здатності композиту в цілому проходять процеси локального руйнування: розпушення, нелінійне пластичне руйнування, розшарування та ін. Зокрема, для пластичних матриць [1, 2] із високомодульними включеннями пластичне течіння починається біля їх кінців і поширюється здовж межі їх розділу. При цьому знижується концентрація напружень і збільшується передача навантаження на волокно.

В умовах плоскої задачі теорії пружності розглядаємо ізотропну пластину, що містить пружне високомодульне стрічкове включення завдовжки $2a$ та сталої малої порівняно з довжиною товщини $2h$. Модуль пружності включення $E_в$ більший від модуля пружності матриці E, коефіцієнти Пуассона відповідно – $\nu_в$ та ν. Осі декартової системи координат xOy збігаються з осями геометричної симетрії тіла. Матеріали матриці та контактної межі матриця–включення вважаємо рівноміцними. На пластину діють рівномірно розподілені на нескінченності зусилля $\sigma_{xx}^{\infty} = q$, $\sigma_{xy}^{\infty} = \tau$, $\sigma_{yy}^{\infty} = p$. Оскільки товщина включення мала, то його вплив згідно праці [3] моделюємо функціями стрибків вектора напружень і похідної від вектора переміщень під час переходу через його серединну лінію:

$$\begin{gathered}\left[\sigma_{yy}(x) - i\sigma_{xy}(x)\right] = f_1(x) - if_2(x) = f_1^*(x),\\ \left[\frac{\partial u(x)}{\partial x} + i\frac{\partial v(x)}{\partial x}\right] = f_3(x) + if_4(x) = f_3^*(x),\end{gathered} \tag{1}$$

де $[\phi(x)] = \phi^-(x) - \phi^+(x)$; $\phi^{\pm}(x)$ — значення функції на верхньому й нижньому боках лінії y=0; $f_j(x)$ (j=1,..., 4) – невідомі функції стрибка, причому за межами ($|x| > a$) включення $f_j(x)$=0.

Формули (1) з урахуванням крайових умов породжують систему інтегральних рівнянь стосовно невідомих функцій стрибка, розв'язок якої подаємо у вигляді рядів за многочленами Чебишева першого роду з виділеною кореневою особливістю й методом колокацій приводимо до безмежної системи нелінійних рівнянь. Розміри зон предруйнування знаходимо із умови неперервності (чи обмеженості) напружень в околах їх вершин

Висновки. Розвинута математична модель відшарування пружного підсилення елемента конструкції від основного матеріалу. При симетричному та антисиметричному навантаженні зі збільшенням жорсткості стрічкового

високомодульного включення довжина локалізованих зон передруйнування зростає при інших однакових умовах. Збільшення зовнішніх зусиль впливає на розміри малих зон передруйнування майже лінійно. Зі збільшенням товщини включення зростає його ефективна жорсткість і тому довжини зон передруйнування теж зростають. Зміна відносної жорсткості та товщини включення при фіксованому значенні його ефективної жорсткості хоча й слабо, проте впливає на довжини зон передруйнування.

Податнішим включенням відповідає загально менший рівень дотичних та нормальних напружень на його поверхні. Крім того, існує велика область на середині включення де значення розривних осьових зусиль змінюється незначно, наприклад, при допущенні 5% похибки у значенні зусиль така область може складати 4/5 довжини включення. Це свідчить про можливість одночасного множинного розриву пружних підкріплюючих елементів у даній зоні.

1. Л.Дж. Эберт, П.К. Райт, Поверхности раздела в металлических композитах, *Композиционные материалы. Т. 1. Механические поверхности раздела,* М.: Мир, 42–76 (1978).
2. M.M. Kundrat On the Initial Development of the Slip Band Near an Inclusion in the Interface, *Int. Appl. Mech*, **38** (5), 578-584 (2002).
3. Г.Т. Сулим, *Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями*, Львів: ДВЦ НТШ (2007).

Limit equilibrium of a composition with an elastic high-modulus ribbon inclusion

M. Kundrat[a1]

[a]National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine.

[1] kundrat@i.ua

Development of localized zones of prefracture in compositions with elastic ribbon highmodule inclusion in isotropic matrix under the action by concentrated forces and loads on infinity by method of jump function is investigated. Zones of prefracture developed from the ribbon ends are modelled by fiber-matrix interface slip band. Using the complex potentials we obtain the dependence of the stress and displacement components on the load and unknown jump functions. Taking into account the interaction conditions of a thin inclusion and matrix, the problem is reduced to a singular integral equations for the jump function. An example illustrates the method.

Keywords: inclusion, zone of prefracture, jump function, singular integral equation, collocation method.

Часткове проковзування під час механічного та термомеханічного контакту пружних тіл

Ю. М. Стреляєв[а1], Р. М. Мартиняк[б]

[а]Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій, Запоріжжя, Україна
[б]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1]yu.streliaiev@econom.zp.ua

Ключові слова: *пружне тіло, контактна задача, тертя, дотичні напруження, теплове розширення, часткове проковзування, інтегральне рівняння, числовий розв'язок*

Одним із чинників, що істотно впливають на контактну поведінку елементів різних механічних систем і конструкцій, є тертя, яке може зумовлювати виникнення на поверхнях контакту зон зчеплення і часткового проковзування. В загальному випадку конфігурація таких зон і розподіл контактних напружень на них заздалегідь невідомі і залежать від геометрії тіл, їхніх механічних характеристик, величини та історії навантаження, фрикційних характеристик спряжених поверхонь.

Режим часткового проковзування реалізується, наприклад, за умови, що прикладена до взаємно притиснутих тіл тангенціальна сила недостатня для ковзання одного з них по іншому. Тоді на периферії ділянки контакту тіл виникає зона проковзування з тертям, а на центральній частині ділянки контакту поверхні перебувають у зчепленні [1, 2, 3]. Зі збільшенням тангенціальної сили зона зчеплення зменшується, а зона проковзування збільшується [2]. Коли ділянка проковзування охоплює всю область контакту, відбувається перехід до глобального ковзання тіл, за якого на всій поверхні контакту діють сили тертя. У випадку контакту пружних тіл з неідентичних матеріалів, нормальні й дотичні контактні напруження взаємозв’язані та одночасно впливають на розміри ділянок контакту, зчеплення і проковзування поверхонь. Для таких контактних пар часткове проковзування виникає навіть за відсутності тангенціального навантаження, коли на них діє лише нормальне [3 – 6].

Багато сучасних технічних систем працюють за підвищеної температури, яка може істотно впливати на фретинг-втому і фретинг-зношування фрикційних з’єднань. Коли тіла піддаються нагріванню, термічні деформації можуть спричинити часткове проковзування спряжених поверхонь. Тому виникає необхідність моделювання контактної поведінки тіл з урахування часткового фрикційного проковзування, зумовленого одночасною дією силових і термічних навантажень [7, 8].

Для дослідження часткового проковзування в зазначених випадках запропоновано єдиний підхід, який базується на зведенні контактної задачі до нелінійних граничних інтегральних рівнянь [3, 4, 5]. Отримані рівняння дають можливість враховувати часткове проковзування і зчеплення на поверхні контакту тіл навіть за складних історій навантажуваннях, зокрема за немонотонних, які охоплюють етапи розвантажування [3, 6].

1. Ю. М. Стреляев, Чисельний розв’язок задачі про контакт пружних тіл під дією нормального і дотичного навантажень. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології,* **24**, 100–110 (2016).

2. Ю. М. Стреляєв, Контакт із частковим проковзуванням між пружним півпростором і круговим штампом під дією нормального і дотичного навантажень, *Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки*, **1**, С. 65-73 (2021). https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-08
3. Ю. М. Стреляєв, Просторові контактні задачі зі зчепленням і проковзуванням за складних навантажувань тіл, *Контактна механіка. Фрикційна і адгезійна взаємодія поверхонь: колективна монографія, за заг. ред. Р.М. Мартиняка*, Львів: Видавець Вікторія Кундельська, 138–166 (2022).
4. А. И. Александров, Ю. М. Стреляев, Метод нелинейных граничных интегральных уравнений для контактных задач теории упругости, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий,* **3**(7), 36-40 (2014).
5. Ю. М. Стреляев, Решение квазистатической контактной задачи теории упругости с учетом трения, *Вісник ЗНУ. Фізико-математичні науки*, **2**, 161-172 (2014).
6. Yu. Streliaiev, O. Titova, Indentation of an elastic half-space by the cylindrical flat punch with a rounded edge under non-monotonic loading, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1164**, 012076 (2021). URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1164/1/012076
7. Y. Streliaiev, R. Martynyak, and K. Chumak, Thermomechanical Slip in Elastic Contact Between Identical Materials, *Acta Mechanica et Automatica*, **15**(4), 187-192 (2021). https://doi.org/10.2478/ama-2021-0024
8. Ю. М. Стреляєв, Р. М. Мартиняк, Часткове проковзування при термомеханічному контакті плоского штампу та пружного півпростору, *Прикладна механіка*, **60**(2), 100–110 (2024). http://pm.inmech.kiev.ua/archive/?article=1636

Partial slip during mechanical and thermomechanical contact of elastic bodies

Yu. Streliaiev[a1], R. Martynyak[b]

[a]Zaporizhzhia Institute of Economics and Information Technologies, Zaporizhzhia, Ukraine.
[b]Ott Tymoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine

[1]yu.streliaiev@econom.zp.ua

We consider contact problems concerning the mechanical and thermomechanical frictional interaction of elastic bodies. We use general approach to study the partial slip of contact surfaces of bodies caused by mechanical forces, as well as the simultaneous action of mechanical and thermal loads. Coulomb's law is used to account for friction. The problems are reduced to systems of nonlinear boundary integral equations. Discretization and an iterative method are used to numerically solve these systems. We investigated how the distribution of normal and tangential contact stresses, as well as the configurations of slip and stick zones, depend on variations in mechanical and thermal loading.
Keywords: elastic body, contact problem, friction, tangential stresses, thermal expansion, partial slip, integral equation, numerical solution

Термопружний контакт індентора та метаматеріального шару з негативним термічним розширенням

Р. Мартиняк[a1], М. Селіванов[a], С. Плашенко[б]

[a]Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[б]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

[1] mrostyslav@gmail.com

Ключові слова: тонкий шар, метаматеріал з негативним термічним розширенням, термопружний контакт, фрикційне тепловиділення, контактний тиск, поверхнева температура

Метаматеріали – це штучно створені матеріали, що демонструють надзвичайні властивості, які зазвичай не зустрічаються в природі. Термін «метаматеріал» походить від грецького слова *meta*, що означає «поза межами». В останні два десятиліття інтенсивно розвиваються технології створення *термічних метаматеріалів* з унікальними параметрами, які знаходять широке застосування в різних галузях сучасної техніки [1-2]. Термічні діоди [3] – окремий клас мета-пристроїв, функціонування яких базується на явищі термічної ректифікації [4]. Для його обґрунтування використовують різні підходи, зокрема теорію термопружності і контактну механіку [5-7]. Створено метаматеріали з негативними фізичними властивостями, зокрема з негативним термічним розширенням [8-10], що мають перспективу використання в трибології для істотного покращення функціональних параметрів рухомих з'єднань, які функціонують за високих температур.

У цій праці досліджено термопружну контактну поведінку тонкого шару з метаматеріалу, який характеризується негативним термічним розширенням. З цією метою розроблено математичну модель стаціонарної теплопровідності і термомеханічного деформування шару, яка базується на гіпотезах про лінійний розподіл температури за його товщиною та про консерватизм плоских його перетинів в нормальному напрямі. На основі моделі сформульовано контактну задачу термопружності для тонкого шару, нижня межа якого з'єднана з жорсткою ізотермічною основою, а верхня межа взаємодіє з циліндричним штампом, що рухається вздовж своєї твірної, коли на ділянці контакту відбувається фрикційне тепловиділення. Отримано замкнутий розв'язок цієї задачі та аналітично визначено розподіли контактного тиску і температури і їхні залежності від теплофізичних і механічних характеристик шару, геометричних параметрів елементів контактної пари, швидкості ковзання індентора і коефіцієнта тертя. Проведено якісний і кількісний аналіз впливу негативного термічного розширення метаматеріалу шару на контактні параметри спряження та порівняно результати з випадком традиційного матеріалу. Зроблено висновки щодо використання термічних метаматеріалів для покращення функціональних параметрів рухомих з'єднань за фрикційного тепловиділення на поверхнях контакту.

1. S. Yang, J. Wang, G. Dai, F. Yang, J. Huang, Controlling macroscopic heat transfer with thermal metamaterials: Theory, experiment and application, *Physics Reports*, **908**, 1-66 (2020). https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.006
2. A. Yeswanth, T.L. Kishore, D.S.S. Sai Pavan, A comprehensive review on development of thermal metamaterials. *Discov Mater*, **6(**53), 1-23 (2026). https://doi.org/10.1007/s43939-025-00418-0

3. M.Y. Wong, C.Y. Tso, T.C. Ho, H.H. Lee, A review of state of the art thermal diodes and their potential applications, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **164**(120607), 1-30 (2021) https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120607
4. N.A. Roberts, D.G. Walker, A review of thermal rectification observations and models in solid materials, *International Journal of Thermal Sciences*, **50**(5), 648-662 (2011). https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.12.004
5. J. Zhao, D. Wei, Y. Dong, D. Zhang, D. Liu, Thermal rectification mechanism of composite cylinders with temperature and stress-dependent interface thermal resistance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194(12302415), 1-18 (2022). https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123024
6. K. Chumak, R. Martynyak, Thermal rectification between two thermoelastic solids with a periodic array of rough zones at the interface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**(21–22), 5603-5608 (2012). https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.049
7. K. Chumak, R. Martynyak, The Combined Thermal and Mechanical Effect of an Interstitial Gas on Thermal Rectification Between Periodically Grooved Surfaces, *Front. Mech. Eng.*, **5**(42), 1-8 (2019). https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00042
8. K.K Dudek, D. Attard, R. Caruana-Gauci, K.W. Wojciechowski, J.N. Grima, Unimode metamaterials exhibiting negative linear compressibility and negative thermal expansion, *Smart Materials and Structures*, **25**(025009), 1-9 (2016). http://iopscience.iop.org/0964-1726/25/2/025009
9. J.N. Grima, M. Bajada, S.Scerri, D. Attard, K.K Dudek, R. Gatt. Maximizing negative thermal expansion via rigid unit modes: a geometry-based approach. *Proc. R. Soc. A*, **471**(20150188), 1-13 (2015). http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2015.0188
10. K. Takenaka, Giant Negative Thermal Expansion Materials: Progress of Research and Future Prospects, *Materials Transactions*, **65**(3), 243-252 (2024). https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-Y2023008

Thermoelastic contact between an indenter and a metamaterial layer with negative thermal expansion

R. Martynyak[a1], M. Selivanov[a], S. Plashenko[b]

[a]S. P. Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

[1] mrostyslav@gmail.com

This study examines the thermoelastic contact behavior of a thin metamaterial layer with negative thermal expansion. A mathematical model of its thermomechanical deformation is developed, assuming a linear temperature distribution across the thickness and the preservation of plane cross-sections. Based on this model, a thermoelastic contact problem is formulated for a layer bonded to a rigid isothermal substrate, with a cylindrical punch moving along its generatrix over the upper layer's surface considering frictional heat generation. A closed-form solution is obtained, and the contact pressure and temperature distributions are determined analytically. The influence of negative thermal expansion on contact parameters is analyzed qualitatively and quantitatively, with results compared to those for a conventional material.

Keywords: thin layer, metamaterial with negative thermal expansion, thermoelastic contact, frictional heat generation, contact pressure, surface temperature

Визначення траєкторії поширення тріщини в перфорованій пластині в рамках когезійної моделі

В. Л. Богданов[1], **Д. М. Селіванов**

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1] bogdanov@nas.gov.ua

Запропоновано чисельну процедуру визначення траєкторії поширення тріщини в умовах, коли її шлях є наперед невідомим. Підхід базується на потенціальній когезійній моделі та формулюванні нелінійної задачі критичного стану. Напрямок росту визначається з деформаційного критерію, який у межах потенціальної постановки є еквівалентним умові мінімальної роботи когезійних сил. Довжина приросту тріщини визначається як довжина активної частини когезійної зони. Метод застосовано до задачі про пластину з двома круговими отворами, де складне поле напружень зумовлює істотне викривлення траєкторії тріщини.

Ключові слова: когезійна модель, траєкторія поширення тріщини.

Визначення траєкторії росту тріщини є однією з ключових задач механіки руйнування. У більшості реалізацій когезійних моделей траєкторія тріщини задається наперед або описується через введення розриву переміщень у скінченному елементі, зокрема в рамках розширеного методу скінченних елементів (XFEM) [1]. У запропонованому підході траєкторія розглядається як наперед невідома і визначається як результат послідовного розв'язання нелінійних (викликаних нелінійністю когезійного закону) задач.

У роботі розглядається задача визначення траєкторії поширення тріщини в пружному тілі в умовах складного напруженого стану. Як приклад досліджується пластина з двома круговими отворами та початковою тріщиною, розташованою між ними. Взаємодія полів напружень, зумовлених отворами та вершиною тріщини, призводить до суттєвої зміни напряму її росту.

Модель тріщини подається у вигляді багатоланкового розрізу, остання ланка якого є когезійною та використовується як зонд для визначення напряму подальшого поширення. Для кожного положення цього зонда будується спеціальна скінченно-елементна сітка, параметри якої контролюються заданою долею довжини когезійної ланки та градієнтом переходу до заданого розміру віддаленого елемента. Побудова сітки для кожного положення зонда забезпечує стабільність чисельної процедури та узгодженість розв'язків при зміні напряму.

Когезійна взаємодія описується потенціалом, що містить закони простих режимів руйнування *F*,

$$\Psi(d_n, d_t) = \phi_n F(\bar{d}_n) + \phi_t F(\bar{d}_t) - r\sqrt{\phi_n \phi_t} F(\bar{d}_n) F(\bar{d}_t),\ \bar{d}_n = \frac{d_n}{d_n^{\max}}, \bar{d}_t = \frac{|d_t|}{d_t^{\max}}.$$

Когезійні напруження визначаються як

$$\boldsymbol{t} = \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{d}},\ \boldsymbol{d} = (d_n, d_t) \quad ,$$

що забезпечує енергетичну узгодженість постановки та симетричність дотичної жорсткості [2].

Для кожного пробного напряму когезійної ланки розв'язується нелінійна задача, в якій одночасно визначаються поле переміщень і критичний рівень навантаження. Таким чином, для кожного пробного кута отримується граничний стан системи, що відповідає максимальному нормальному розкриттю в гирлі тріщини ($d_n^{\text{mouth}} = 1$).

Кут поширення тріщини визначається з деформаційного критерію, який у рамках потенціальної постановки є еквівалентним умові мінімальної роботи когезійних сил. Практично це реалізується через вимогу зникнення дотичного розкриття в гирлі когезійної ланки: $d_t^{\text{mouth}} = 0$. Ця умова дає кут зламу на кожному кроці алгоритму.

Довжина приросту тріщини не задається наперед, а визначається як довжина активної частини когезійної зони, отриманої з розв'язку відповідної нелінійної задачі. Запропонований алгоритм узгоджено визначає як напрямок, так і величину приросту тріщини.

На рис. 1 наведено поле напружень у пластині з двома отворами за наявності тріщини. Розподіл напружень є суттєво неоднорідним і характеризується взаємодією зон концентрації біля отворів і вершини тріщини. У результаті траєкторія тріщини відхиляється від початкового напряму та прямує до областей підвищених напружень.

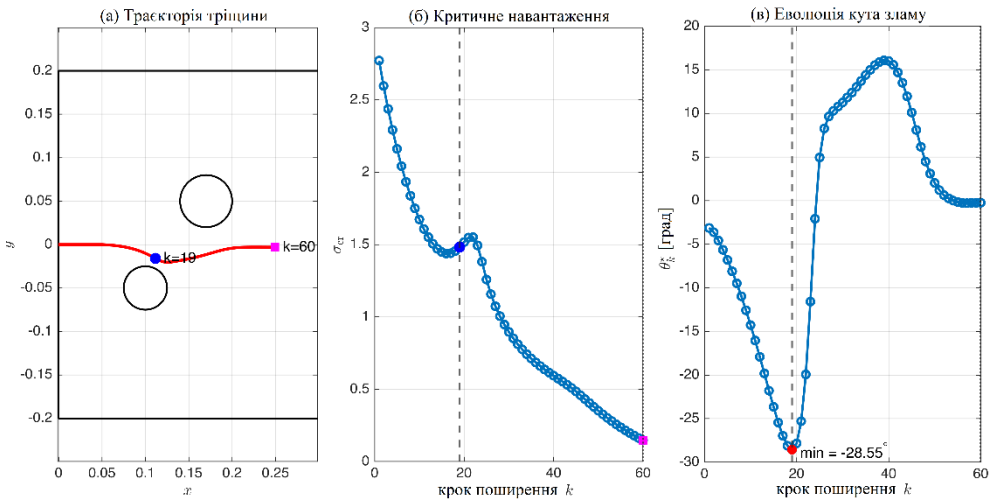


Рис. 1. Поширення тріщини в перфорованій пластині.

Запропонований підхід дозволяє визначати траєкторію поширення тріщини в умовах складного напруженого стану без введення додаткових емпіричних критеріїв для кута росту, забезпечуючи узгоджене визначення геометрії тріщини та енергетичного стану системи.

1. T. Belytschko, T. Black, Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **45**, 601–620 (1999). https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5<601::AID-NME598>3.0.CO;2-S
2. M. Ortiz, A. Pandolfi, Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **44**, 1267–1282 (1999). https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990330)44:9<1267::AID-NME486>3.0.CO;2-7

Вплив початкових напружень на коефіцієнти інтенсивності напружень в плоскій задачі про тіло з двома паралельними тріщинами нормального відриву

О.І. Лесик[a1]

[a]Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

[1]alexey27lesik@gmail.com

Розглянуто плоску задачу про тіло з двома паралельними тріщинами нормального відриву за наявності початкових (залишкових) напружень, спрямованих вздовж тріщин. Базуючись на підходах лінеаризованої механіки деформівних тіл, з використанням подань напружень і переміщень через гармонічні потенціали та представлень цих потенціалів у вигляді інтегральних перетворень Фур'є, поставлену крайову задачу зведено до системи неоднорідних інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду. Отримано вирази для коефіцієнтів інтенсивності напружень і на прикладі нелінійно-пружного матеріалу з потенціалом Трелоара проаналізовано вплив на них початкових напружень та ефекту взаємодії тріщин між собою.

Ключові слова: площина з двома паралельними тріщинами, тріщини нормального відриву, початкові (залишкові) напруження, коефіцієнти інтенсивності напружень.

Розглядається необмежене тіло з двома плоскими тріщинами однакової довжини $2a$, які розташовані в паралельних площинах $y_2 = 0$ та $y_2 = -2h$ з центрами на осі Oy_2 і є нескінченними в напрямі осі Oy_3. В тілі діють спрямовані вздовж тріщин початкові напруження, які зумовлюють початковий розтяг (або стиск) тіла, що характеризується коефіцієнтом початкового подовження (або скорочення) λ_1 вздовж осі Oy_1. Береги тріщин завантажено нормальними зусиллями інтенсивності $\sigma(y_1)$, які в межах лінеаризованого підходу [1] розглядаються як додаткові до початкових напружень. Враховуючи симетрію геометричної та силової схем цієї задачі відносно площини $y_2 = -h$, її можна переформулювати як задачу для півплощини з приповерхневою тріщиною з такими граничними умовами:

$$Q'_{22} = -\sigma(y_1),\ Q'_{21} = 0 \quad (|y_1| \le a;\ y_2 = (0)_{\pm})),$$
$$Q'_{21} = 0,\ u_2 = 0 \quad (-\infty \le y_1 \le \infty;\ y_2 = -h). \qquad (1)$$

Подаючи напруження та переміщення через гармонічні потенціальні функції [1] та використовуючи інтегральні розклади Фур'є цих функцій відносно координати y_2, отримуємо, аналогічно до того, як це було зроблено в [2], систему розв'язуючих інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду, що в безрозмірному вигляді для випадку нерівних коренів характеристичного рівняння ($n_1^* \ne n_2^*$) [1] має такий вигляд:

$$f(\xi) + \int_0^1 K_{11}(\xi,\eta) f(\eta) d\eta + \int_0^1 K_{12}(\xi,\eta) g(\eta) d\eta = \frac{4}{\pi}\xi \int_0^{\pi/2} \Sigma(\xi \sin\theta) d\theta;\ 0 \le \xi \le 1, \quad (2)$$
$$g(\xi) + \int_0^1 K_{21}(\xi,\eta) f(\eta) d\eta + \int_0^1 K_{22}(\xi,\eta) g(\eta) d\eta = 0;\ \Sigma(\xi) = -\sigma(a\xi)(C_{44}^* d_2^* l_2^*)^{-1}$$

з ядрами

$$K_{11}(\xi,\eta) = \pi^{-1} k^{-1} \xi^{-1/2} \eta^{-3/2} [k_1 \beta_1 S(z_{11}) - k_2 \beta_2 S(z_{12})],\ K_{12}(\xi,\eta) =$$
$$-\pi^{-1} k_1 k^{-1} \sqrt{\xi} \{\eta^{-1/2} [Q_{1/2}(z_{11}) + Q_{-1/2}(z_{12})] - [Q_{-1/2}(z_{21}) - Q_{-1/2}(z_{22})]\},$$
$$K_{21}(\xi,\eta) = \frac{1}{2}\pi^{-1} k_2 k^{-1} \xi^{-1/2} \eta^{-3/2} \left\{ \left[1 - \frac{2(2\beta_1)^2 z_{11}}{\xi\eta(z_{11}^2 - 1)} \right] S(z_{11}) - \frac{2{\beta_1}^2}{\xi\eta} P(z_{11}) - \right.$$

$$\left[1-\frac{2(2\beta_2)^2 z_{12}}{\xi\eta(z_{12}^2-1)}\right]S(z_{12})-\frac{2\beta_2{}^2}{2\xi\eta}P(z_{12})\Big\},\ K_{22}(\xi,\eta)=-\pi^{-1}k^{-1}\xi^{-1/2}\{\eta^{-3/2}[k_2\beta_1 S(z_{11})-$$
$$k_1\beta_2 S(z_{21})]-[k_2\beta_1 S(z_{21})-k_1\beta_2 S(z_{22})]\};$$
$$\beta=ha^{-1};\ \beta_i=(n_i^*)^{-1/2}\beta;\ k_1=l_1^*(n_2^*)^{-1/2},\ k_2=l_2^*(n_1^*)^{-1/2},\ k=k_1-k_2,\ z_{1i}=$$
$$(4\beta_i^2+\xi^2+\eta^2)(2\xi\eta)^{-1},\ z_{2i}=(4\beta_i^2+\xi^2+1)(2\xi)^{-1},\ z_1=[(\beta_1+\beta_2)^2+\xi^2+$$
$$\eta^2](2\xi\eta)^{-1},\ z_2=[(\beta_1+\beta_2)^2+\xi^2+1](2\xi)^{-1};\ S(z)=(z^2-1)^{-1}\big[Q_{1/2}(z)-$$
$$zQ_{-1/2}(z)\big];\ P(z)=(z^2-1)^{-1}Q_{-1/2}(z).$$

(Тут $Q_\nu(z)$ – функція Лежандра другого роду; C_{44}^*, d_i^*, l_i^*, n_i^* - параметри матеріалу).

З аналізу асимптотичного розподілу компонент тензора напружень в околі вершини тріщини отримано такі вирази для коефіцієнтів інтенсивності напружень:

$$K_I=-\frac{1}{2}C_{44}^* d_2^* l_2^*\sqrt{\pi a}f(1),\ K_{II}=\frac{1}{2}C_{44}^* d_2^*(n_2^*)^{-1/2}\sqrt{\pi a}\int_0^1 g(\eta)d\eta, \qquad (3)$$

де функції $f(\xi)$ та $g(\xi)$ визначаються з розв'язку інтегральних рівнянь (2).

На рисунках наведено залежності КІН від параметру початкових напружень λ_1 для нелінійно-пружного матеріалу з потенціалом Трелоара (K_I^∞ - КІН для нескінченної площини з тріщиною моди I; $\beta=ha^{-1}$ – безрозмірна відстань між тріщинами).

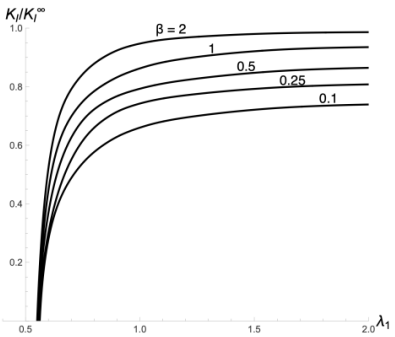


Рис. 1. Залежність КІН K_I/K_I^∞ від параметра початкових напружень λ_1 для матеріалу з потенціалом Трелоара.

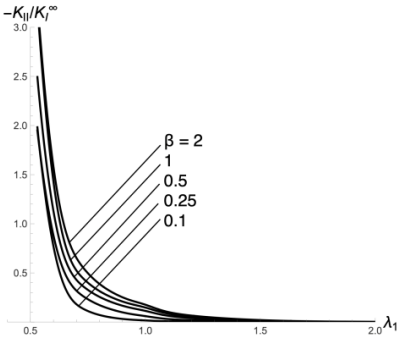


Рис. 2. Залежність КІН K_{II}/K_I^∞ від параметра початкових напружень λ_1 для матеріалу з потенціалом Трелоара.

З отриманих результатів можна зробити такі висновки:

- взаємний вплив паралельних тріщин між собою призводить до якісних змін в розподілі напружень в околі вершин тріщин нормального відриву, а саме, до ненульових значень обох коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I та K_{II};
- коефіцієнти інтенсивності напружень K_I та K_{II} суттєво залежать від початкових напружень, що характеризуються параметром λ_1, та від відстані між тріщинами.

1. Guz A.N., Bogdanov V.L., Nazarenko V.M. Fracture of Materials Under Compression Along Cracks. In: Advanced Structure Materials, vol. 138. - Cham: Springer (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-51814-1
2. Bogdanov V.L., Lesyk O.I. Plane problem of fracture mechanics for half-space with near-surface mode I crack under forces directed along crack, *Int. Appl. Mech.*, 61(4), 415–436 (2026). https://doi.org/10.1007/s10778-026-01364-x

Influence of initial stresses on stress intensity factors in a plane problem on a body with two parallel mode I cracks

O.I. Lesyk

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

alexey27lesik@gmail.com

A plane strain problem for an infinite body with two parallel mode I cracks in the presence of initial (residual) stresses directed along the cracks is considered. Based on the approaches of linearized mechanics, using representations of stresses through harmonic potentials and representations of these potentials in the form of integral Fourier transforms, the boundary value problem is reduced to a system of Fredholm integral equations of the second kind. Expressions for the stress intensity coefficients are obtained and the influence of initial stresses and the effect of crack interaction on them is analyzed.
Keywords: plane with two parallel cracks, mode I cracks, initial (residual) stresses, stress intensity factors.

Розтяг пластини з абсолютно жорсткою шайбою та радіальною тріщиною, на продовженні якої утворилися пластичні зони

М.І. Шайнога, О.В. Смаль

Львівський національний університет імені Івана Франка

maksym.shainoha@lnu.edu.ua, oleh.smal@lnu.edu.ua

Ключові слова: пластина, абсолютно жорстка шайба, тріщина, пластичні зони, комплексні потенціали, задача лінійного спряження, сингулярні інтегральні рівняння.

Розглянемо нескінченну ізотропну пластину товщиною $2h$ з абсолютно жорсткою круговою шайбою радіуса R і наскрізною радіальною прямолінійною тріщиною довжиною $2l$. Береги тріщини вільні від зовнішнього навантаження. Нехай на безмежності до пластини прикладене рівномірно розподілене розтягувальне навантаження P_1 і P_2 (див. рис. 1), під дією якого на продовженні тріщини утворилися прямолінійні пластичні зони завдовжки w_1 і w_2. У серединній площині пластини розмістимо декартову систему координат $Oxy\tilde{z}$ з початком у центрі кругового отвору, а вісь Ox направимо по тріщині, вісь $O\tilde{z}$ направимо перпендикулярно до серединної площини пластини. У точці O виберемо полярну систему координат $Or\theta$ з полярною віссю Ox. У центрі тріщини розмістимо декартову систему координат $O_1x_1y_1\tilde{z}_1$. Нехай L – межа абсолютно жорсткої кругової шайби; L_1 – лінія, де розміщена тріщина; L_1' і L_1'' – прямолінійні пластичні зони; x_0 – відстань між центром шайби та центром тріщини; S^+ – область всередині кругової шайби, а S^- – ззовні шайби; w_1 і w_2 – довжини пластичних зон на продовженні тріщини; a і b – вершини тріщини; c і d – вершини пластичних зон; $\tilde{L}_1 = L_1 \cup L_1' \cup L_1''$.

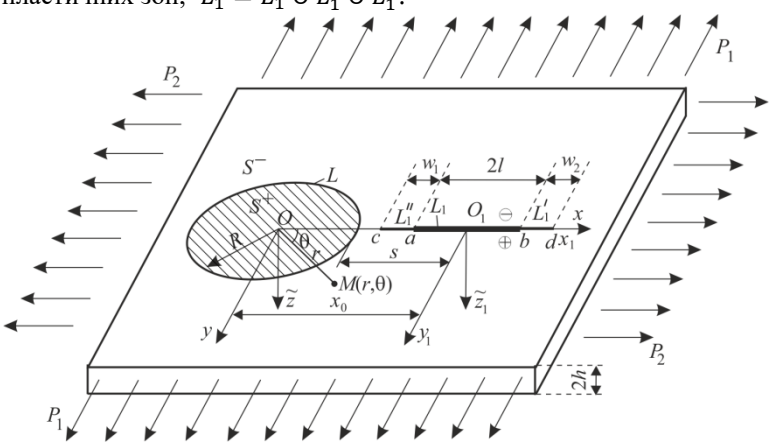


Рис. 1. Схема навантаження пластини та розміщення тріщини

Згідно формулювання задачі на межі абсолютно жорсткої кругової шайби матимемо такі граничні умови

$$u_r = 0, u_\theta = 0, x \in L, \tag{1}$$

де u_r і u_θ – компоненти вектора переміщень у полярній системі координат.

На берегах тріщини матимемо такі граничні умови

$$\sigma_{y_1y_1}^{\pm} = 0, \tau_{x_1y_1}^{\pm} = 0, x_1 \in L_1, \quad (2)$$

де $\sigma_{y_1y_1}$ і $\tau_{x_1y_1}$ – компоненти тензора напружень у декартовій системі координат, значками "+" і "–" позначені граничні значення функцій при прямуванні точки площини до тріщини з пластичними зонами при $y_1 \to \pm 0$.

У пластичних зонах будемо мати такі граничні умови

$$\sigma_{y_1y_1}^{\pm} = \sigma_0^{(1)}, \tau_{x_1y_1}^{\pm} = \tau_0^{(1)}, x_1 \in L_1', \quad (3)$$

$$\sigma_{y_1y_1}^{\pm} = \sigma_0^{(2)}, \tau_{x_1y_1}^{\pm} = -\tau_0^{(2)}, x_1 \in L_1'', \quad (4)$$

де $\sigma_0^{(1)}$, $\sigma_0^{(2)}$, $\tau_0^{(1)}$, $\tau_0^{(2)}$ – невідомі нормальні та дотичні напруження у пластичних зонах.

За допомогою методів теорії комплексних потенціалів для плоскої задачі теорії пружності розв'язано задачу про розтяг безмежної ізотропної пластини з абсолютно жорсткою круговою шайбою та радіальною наскрізною прямолінійною тріщиною на продовженні тріщини утворилися пластичні зони. Для пластичних зон використовувалися умови пластичності Треска-Сен-Венана. Розв'язок сформульованої задачі зведений до системи сингулярних інтегральних рівнянь, яка розв'язана числовим методом механічних квадратур. У статті побудовано графіки для довжин пластичних зон в залежності від прикладеного зовнішнього навантаження та геометричних параметрів задачі.

Tension of a plate with an absolutely rigid inclusion and a radial crack with plastic zones formed on its continuation

M.I. SHAYNOGA, O.V. Smal

Ivan Franko National University of Lviv

maksym.shainoha@lnu.edu.ua, oleh.smal@lnu.edu.ua

The article constructs a solution to the problem of tension of an infinite isotropic plate with an absolutely rigid circular inclusion and a through radial straight crack. It is assumed that under a uniformly distributed tensile load at infinity, plastic zones are formed on the crack continuation, satisfying the Tresca–Saint-Venant yield criteria. Using the methods of the theory of functions of a complex variable and complex potentials, the solution is reduced to a system of singular integral equations, which is solved by the numerical method of mechanical quadratures. A numerical analysis of the problem is performed, and graphs for the lengths of the plastic zones depending on the applied external load are plotted.

Key words: plane problem, plate, absolutely rigid inclusion, crack, plastic zones, boundary conditions, complex potentials, linear conjugation problem, singular integral equations, numerical methods, stress intensity factors.

Розтяг пластини з отвором та радіальною ненаскрізною тріщиною, з урахуванням пластичних зон на її продовженні

М.С. Слободян, Л.В. Маркевич

Львівський національний університет імені Івана Франка

mykola.slobodyan@lnu.edu.ua, Lukiian.Markevych@lnu.edu.ua

Ключові слова: пластина, тріщина, пластичні зони, плоска задача, задача згину пластини, комплексні потенціали, задача лінійного спряження, сингулярні інтегральні рівняння.

Розглянемо безмежну ізотропну пластину товщиною $2h$, яка містить наскрізний круговий отвір радіуса R та ненаскрізну прямолінійну радіальну тріщину завдовжки $2l$. Береги ненаскрізної тріщини та межа кругового отвору вільні від зовнішнього навантаження. Декартову систему координат $Oxy\tilde{z}$ розмістимо у серединній площині пластини з початком у центрі кругового отвору, при чому вісь Ox направимо по тріщині, а вісь $O\tilde{z}$ – перпендикулярно до серединної площини пластини. Введемо полярну систему координат $Or\theta$ з центром у точці O та полярною віссю Ox. У центрі тріщини розмістимо декартову систему координат $O_1x_1y_1\tilde{z}_1$. За дії рівномірно розподіленого розтягувального навантаження на безмежності P_1 і P_2 (див. рис. 1) на продовженні тріщини у областях "2" утворилися прямолінійні пластичні зони завдовжки w_1 і w_2, а матеріал у перемичці (у області "1") за $h_1 \le \tilde{z}_1 \le h$ і $-l \le x_1 \le l$, також перейшов у пластичний стан. Через L позначимо межу кругового отвору; лінію, де розміщена тріщина позначимо L_1, пластичні зони – L_1' і L_1'', відстань між центром отвору та центром тріщини – x_0; область всередині кругового отвору – S^+, а ззовні – S^-; довжини пластичних зон – w_1 і w_2; вершини тріщини – a і b; вершини пластичних зон – c і d; $\tilde{L}_1 = L_1 \cup L_1' \cup L_1''$.

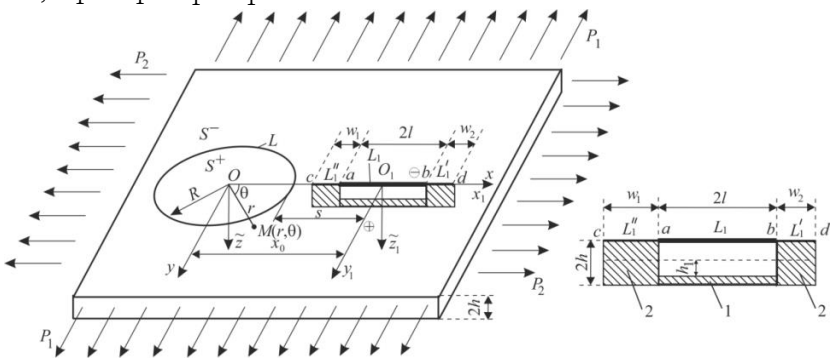


Рис. 1. Безмежна пластина з круговим отвором та тріщиною і пластичними зонами

Розв'язок сформульованої задачі подамо у вигляді розв'язків двох задач: плоскої задачі та задачі згину пластини, за наступних граничних умов:

– на межі кругового отвору:

$$\sigma_{\Pi r} = 0,\ \tau_{\Pi r\theta} = 0,\ M_r = 0,\ P_r = 0,\ x \in L, \tag{1}$$

де $\sigma_{\Pi r}$ і $\tau_{\Pi r\theta}$ – компоненти тензора напружень у полярній системі координат, M_r – згинальний момент, P_r – узагальнена в сенсі Кірхгофа перерізувальна сила;

– на берегах тріщини:

$$\sigma^{\pm}_{\Pi y_1 y_1} = \sigma_Y b_1,\ \tau^{\pm}_{\Pi x_1 y_1} = 0,\ M^{\pm}_{y_1} = \sigma_Y b_2,\ H^{\pm}_{x_1 y_1} = 0,\ N^{\pm}_{y_1} = 0,\ x_1 \in L_1, \quad (2)$$

де $\sigma_{\Pi y_1 y_1}$ і $\tau_{\Pi x_1 y_1}$ – компоненти тензора напружень у декартовій системі координат, M_{y_1}, $H_{x_1 y_1}$, N_{y_1} – згинальний і крутний моменти та перерізувальна сила, σ_Y – границя текучості матеріалу, $b_1 = \frac{(h-h_1)}{(2h)}$, $b_2 = \frac{(h^2-h_1^2)}{(2h)}$;

– у пластичних зонах “2”:

$$\sigma^{\pm}_{\Pi y_1 y_1} = \sigma_0^{(1)}, \tau^{\pm}_{\Pi x_1 y_1} = \tau_0^{(1)},\ M^{\pm}_{y_1} = M_0^{(1)},\ H^{\pm}_{x_1 y_1} = H_0^{(1)},\ N^{\pm}_{y_1} = 0,\ x_1 \in L_1', \quad (3)$$

$$\sigma^{\pm}_{\Pi y_1 y_1} = \sigma_0^{(2)}, \tau^{\pm}_{\Pi x_1 y_1} = -\tau_0^{(2)},\ M^{\pm}_{y_1} = M_0^{(2)},\ H^{\pm}_{x_1 y_1} = -H_0^{(2)},\ N^{\pm}_{y_1} = 0,\ x_1 \in L_1'', \quad (4)$$

де $\sigma_0^{(1)}$, $\sigma_0^{(2)}$, $\tau_0^{(1)}$, $\tau_0^{(2)}$ – невідомі нормальні та дотичні напруження у пластичних зонах, $M_0^{(1)}$, $M_0^{(2)}$, $H_0^{(1)}$, $H_0^{(2)}$ – невідомі згинальні і крутні моменти у пластичних зонах.

Розв’язок задачі побудований з використанням методів теорії функцій комплексної змінної та комплексних потенціалів і зведений до системи сингулярних інтегральних рівнянь, яка розв’язана чисельно за допомогою методу механічних квадратур. Побудовано графіки для довжин пластичних зон в залежності від прикладеного зовнішнього навантаження та геометричних параметрів задачі.

Розтяг пластини з отвором та радіальною ненаскрізною тріщиною, з урахуванням пластичних зон на її продовженні

M.S. Slobodian, L.V. Markevych

Ivan Franko National University of Lviv

mykola.slobodyan@lnu.edu.ua, Lukiian.Markevych@lnu.edu.ua

The problem of the tension of an infinite isotropic plate with a circular hole and a radial non-through rectilinear crack is solved. It is assumed that under the action of external loading at infinity, plastic zones have been formed on the extension of the non-through crack, for which the Tresca-Saint Venant plasticity conditions are satisfied. Since the crack is non-through, the solution of the formulated problem was sought in the form of solutions of two interrelated problems: the plane problem of elasticity theory and the plate bending problem (classical theory). The solution of the problem is constructed using the methods of the theory of functions of a complex variable and complex potentials, and is reduced to a system of singular integral equations, which is solved numerically using the method of mechanical quadratures. Graphs are plotted for the lengths of the plastic zones depending on the external load and the geometric parameters of the problem.

Keywords: plate, crack, plastic zones, boundary conditions, elasticity theory, plane problem, plate bending problem, complex potentials, linear conjugation problem, singular integral equations, numerical methods, stress intensity factors.

Дослідження технічного стану агрегатів шасі літаків типу Су-27, для визначення можливості продовження їх ресурсу

О. М. Добриденко[a1], Ю. О. Манулін[a], І. А. Токар[a]

[a]Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

[1] oleg.don61@gmail.com

Ключові слова: агрегати, продовження, призначений ресурс, призначений строк служби, встановлені показники.

У зв'язку із веденням повномасштабних бойових дій з залученням авіаційної техніки Повітряних Сил ЗСУ є актуальним завдання щодо забезпечення авіаційних військових частин максимально можливою кількістю літальних апаратів. Зокрема, одним із найбільш затребуваних типів літальних апаратів є літак типу Су-27. Встановлені ресурси для літака Су-27 зображені на рисунку 1.



Рис. 1. - Встановлені ресурси для літака Су-27

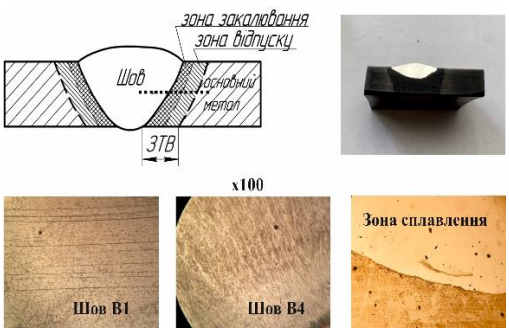


Рис.2 - Зони зварного з'єднання та результати первинних металографічних досліджень.

Відповідно до керівних наказів, а також вказівок головного інженера авіації ПС, введено Переліки обов'язкових робіт та перевірок працездатності авіаційної техніки, що виконуються під час робіт зі збільшення ресурсу (продовження строку служби) за типами ЛА.

Аналіз матеріалів стосовно відмов шасі літаків типу Су-27 показав, що найбільшої уваги в процесі експлуатації заслуговують відмови, обумовлені виникненням тріщин втоми в зварних з'єднаннях шасі, які мають найбільший вплив на рівень надійності і безпеки польотів.

Актуальним в цьому напрямку є вирішення проблеми підвищення надійності і продовження ресурсу основних амортизаційних стояків шасі літака Су-27, які вичерпали призначений ресурс або в яких виявлені експлуатаційні дефекти, розробка технології ремонту зварюванням, вивчення особливостей впливу режимів дугового зварювання та типу зварювальних матеріалів на формування структури та фізико-механічні властивості зварних з'єднань сталі високої міцності 30ХГСН2А, обґрунтування надійності та терміну подальшої експлуатації стояків шасі.

На рисунку 2 зображені зони зварного з'єднання та результати первинних металографічних досліджень.

Слід зазначити, що тенденція збільшення затрат на відновлення значно залежить від накопиченої пошкодженості, яка у свою чергу залежить від умов та інтенсивності експлуатації.

1. С. В. Пащенко, М. Ф. Хільченко, В. В. Юхачов, Методологія збільшення ресурсів авіаційної техніки, *Збірник наукових праць ДНДІА, 2012,* № 8(15), С. 161-166.
2. *Звіт за результатами виконання оперативного завдання щодо формування основних визначальних критеріїв технічного стану виробів авіаційної техніки при прийнятті рішень щодо їх допуску до подальшої експлуатації.* Київ, ДНДІА, 2024, 162 с.
3. П. М Витвицкий, С. Ю. Попина *Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел.* Киев, Наукова думка, 1980. 187 с.
4. О. П. Осташ *Механіка руйнування та міцність матеріалів. Довідниковий посібник. Том 15: структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій.* Львів, СПОЛОМ, 2015. 312 с.
5. А. П. Бойко, О. В. Мамлюк, Ю. М. Терещенко, В. М. Щибенко *Конструкція літальних апаратів.* Київ, Вища освіта, 2001. – 383 с.
6. *Сборник методик исследования аварийной и неисправной авиатехники. Книга 2. Методики исследования агрегатов и систем шасси самолетов*. Вип. 2849, Типография в/ч 75360, 1972, 228 с.
7. В. Е. Стрижиус *Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. Справочное пособие*. Москва, Машиностроение, 2012, 272 с.

Research of the technical condition of the landing gear units of Su-27 aircraft to determine the possibility of extending their service life

O. Dobrydenko[a1], Y. Manulin[a], I. Tokar[a]

[a]State Research Institute of Aviathion, Kyiv, Ukraine

[1] oleg.don61@gmail.com

Relevant in this direction is the solution of the problem of increasing the reliability and extending the service life of the main shock absorber struts of the Su-27 aircraft landing gear, which have exhausted their intended service life or in which operational defects have been identified, the development of welding repair technology, the study of the peculiarities of the influence of arc welding modes and the type of welding materials on the formation of the structure and physical and mechanical properties of welded joints of high-strength steel 30KhGSN2A, the justification of the reliability and term of further operation of landing gear struts.

Keywords: units, extension, intended resource, intended service life, established indicators.

Втрата несучої здатності елементів конструкції авіаційної техніки при бойових ураженнях

А.С Бологін[1], П.О. Жикол[2]

Державний науково-дослідний інститут авіації

E-mail: [1]bolas@ukr.net, [2]zhikakiev@ukr.net.

Ключові слова: бойові пошкодження, моделювання, напружений стан, елемент конструкції

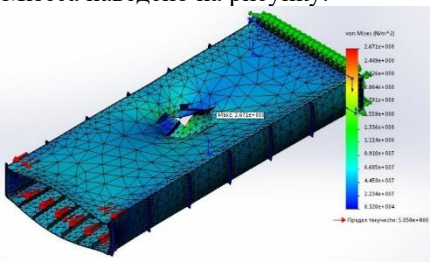
Бойова живучість авіаційної техніки значною мірою визначається здатністю її силових елементів зберігати працездатність після виникнення локальних пошкоджень. Під час експлуатації в умовах бойових дій елементи конструкції зазнають пошкоджень від уламків боєприпасів або інших факторів бойового впливу, що призводить до утворення дефектів у силовому наборі. Виникає необхідність прийняття рішення щодо відновлення та можливості подальшої експлуатації [1]. За таких умов особливого значення набуває оцінювання напружено-деформованого стану конструкції та визначення залишкової міцності її елементів [2].

Об’єктом дослідження є силова конструкція елемента крила літака, яка сприймає згинальні, поперечні та крутні навантаження під час польоту. Конструкція складається з панелей обшивки, лонжеронів і стрингерів, які формують просторову силову систему та забезпечують сприйняття основних експлуатаційних навантажень.

Оцінювання напруженого стану виконано методом скінченних елементів. Геометричну модель конструкції сформовано на основі конструкторської документації з подальшою дискретизацією просторовою скінченно-елементною сіткою. У розрахунковій моделі враховано механічну взаємодію між елементами силового набору, а клепані з’єднання між деталями конструкції приймалися як нероз’ємні. Розрахункова сітка містить понад 6 млн вузлів і близько 4 млн скінченних елементів, що забезпечує достатню точність визначення напружено-деформованого стану конструкції.

До моделі прикладалися основні силові фактори, характерні для експлуатаційних режимів польоту: згинальний момент, поперечна сила та крутний момент. Поверхня у зоні болтових з’єднань, через яку елемент крила кріпиться до центральної частини планера, приймалася жорстко закріпленою. Для моделювання бойових пошкоджень використано ідеалізовані дефекти геометрично правильної форми, що дозволяє оцінити вплив концентрації напружень на несучу здатність конструкції.

Результати розрахунку напруженого стану у вигляді розподілу еквівалентних напружень за критерієм Мізеса наведено на рисунку.



Розподіл еквівалентних напружень у моделі елемента крила

Аналіз показує, що напружений стан конструкції має неоднорідний характер. Найбільші значення напружень локалізуються у зонах стикування обшивки з елементами силового набору та у місцях кріплення конструктивних вузлів, де формуються природні концентратори напружень. При цьому максимальні значення

еквівалентних напружень залишаються нижчими за межу текучості матеріалу, що свідчить про наявність запасу міцності конструкції у штатних умовах експлуатації [3].

Моделювання бойових пошкоджень показало, що дефекти, які зачіпають лише панель обшивки, спричиняють локальне підвищення напружень, однак не призводять до критичної втрати міцності. У цьому випадку відбувається перерозподіл силових потоків між сусідніми елементами силового набору.

Інша ситуація виникає при пошкодженні, яке одночасно порушує цілісність обшивки та стрингера. У таких умовах спостерігається різке зростання локальних напружень, що пов'язано зі зміною траєкторій передавання внутрішніх силових факторів [4]. Найбільш небезпечними є пошкодження з гострими кутами, які формують значні концентратори напружень і створюють передумови для розвитку локального руйнування.

Проведений аналіз показав, що пошкодження одного стрингера призводить до перерозподілу навантаження на сусідні елементи силового набору та зменшення несучої здатності приблизно на 15%. У випадку пошкодження двох і більше стрингерів зниження несучої здатності може досягати 30–40%, що обмежує подальшу експлуатацію конструкції без проведення відновлювальних робіт.

Отримані результати свідчать, що характер зміни несучої здатності силових елементів конструкції авіаційної техніки після бойового пошкодження визначається не лише розмірами дефекту, але й його геометричною формою та положенням відносно елементів силового набору. Дефекти з гострими кутами формують найбільш небезпечні концентрації напружень і можуть призводити до суттєвого зниження міцності навіть за відносно невеликих розмірів пошкодження.

1. А.С.Бологін, Ю.О.Манулін, Г.Т.Горохов "Експертна оцінка рішень відновлення конструкції планерів літальних апаратів з бойовими пошкодженнями" Збірник наукових праць ДНДІА вип. №18(25) 2022 https://znp.dndia.org.ua/index.php/znp/article/view/45

2. Міцність матеріалів і конструкцій. Том 2. Втома металів. Під ред. академіка В.Т.Трощенка Київ.-2009.- 662 с.

3. Осташ О.П., Федірко В.М., Учанін В.М. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Том 9. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 1068 с.

4. П. Я. Пукач, І. П. Мединський, І. І. Демків, О. А. Кузін, М. О. Кузін, Г. І. Білущак "Оптимізація напружено-деформованого стану функціонально-градієнтних конструкцій за наявності концентраторів напружень", Проблеми міцності, № 3, 120-130, (2024).

Loss of load-carrying capacity of aircraft structural elements under combat damage

Andrii Bolohin, Pavlo Zhykol

State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine.

The paper examines the influence of combat damage on the stress-strain state of aircraft structural elements. Based on finite element analysis, the stress distribution in a wing structural component with local defects is investigated, and the effect of damage on its load-carrying capacity is evaluated. The formation of stress concentration zones in structural joints is identified, and the dependence of load-carrying capacity degradation on the geometry and location of damage is determined.

Keywords: combat damage, numerical modeling, stress-strain state, structural element

Експериментальні дослідження міцності цементно-піщаної суміші з додаванням механоактивованої золи виносу ТЕС

В.Г. Шевченко[1], С.О. Авраменко

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

[1]V.Shevchenko@nas.gov.ua

Проведено експериментальні дослідження властивостей цементно-піщаної суміші (ЦПС) з додаванням механоактивованої золи виносу ТЕС. Підготовчий етап полягав у механічному просіюванні золи виносу на полічастотному грохоті МВГ для отримання фракції мінус 40 мкм. Механоактивація золи виносу проводилась шляхом помолу фракції мінус 40 мкм у камері вібраційного млина з віброударним полічастотним збудженням. Механоактивацію фракції 40 мкм проводили в двох часових режимах: механоактивація тривалістю 15 хв. та 30 хв. Також варіювався час зберігання механоактивованої золи до моменту виготовлення зразків. Для визначення оптимального вмісту золи виносу змінювався відсоток її додавання в суміш. Найбільша міцність зразків спостерігалась при 10-тивідсотковому вмісті золи виносу, що співпадає з нормами вмісту, регламентованими ДСТУ. Перевищення міцності зразків з додаванням механоактивованої золи міцності зразків зі звичайною золою при - 10-тивідсотковому вмісті склало 1,35, в інших випадках міцність в середньому перевищувала в 1,1 раз. Результати досліджень за розробленою методикою підтвердили доцільність використання для помолу та механоактивації золи виносу вібраційного полічастотного млина з віброударним збудженням камери помолу.

Ключові слова: експериментальні дослідження, властивості ЦПС, механоактивована золи виносу ТЕС, вібраційний полічастотний млин.

Вступ

Цементно-піщана суміш (ЦПС) вважається ключовим матеріалом, який використовується в сучасному будівництві Введення в бетонну суміш золи, на відміну від інших активних мінеральних добавок, як правило не погіршує, а поліпшує легкоукладальність, що пояснюється кулястою формою часточок золи. Введення золи сприяє зниженню водовідділення бетонної суміші. Пластифікуюча і водоутримуюча здатність золи сприяє її застосуванню в легких бетонах. Бетонні суміші з оптимальною добавкою золи мають досить високу життєздатність і придатні для транспортування на далекі відстані. Механічна активація полягає у підвищенні питомої поверхні вихідної золи шляхом її помелу [1-3].

Авторами пропонується процес подрібнення та механоактивації золи виносу здійснювати у вібраційному полічастотному млині [4, 5], що сприятиме зниженню витрат енергії, часу та покращить показники якості матеріалу.

У зв’язку з цим, проведення експериментальних досліджень властивостей ЦПС з додаванням механоактивованої у вібраційному полічастотному млині золи виносу ТЕС та визначення впливу додавання механоактиванної золи виносу до складу ЦПС і на її міцність є актуальним науковим завданням, що має істотне значення для зниження витрат енергії, часу та покращення показників якості виробів.

Мета дослідження полягає у виявленні впливу додавання механоактиваної у вібраційному полічастотному млині золи виносу до складу ЦПС на її міцність.

1. Методи

До зразків бетону для випробувань висувались основні вимоги відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками" [6].

Для визначення міцності бетону в залежності від часу його виготовлення (наприклад, 7 або 28 діб) виготовлялась серія, яка складається щонайменше з трьох однакових зразків. За кінцевий результат приймають середнє арифметичне значення міцності цих зразків.

2. Теоретична та експериментальна частини

Розроблена методика проведення експериментальних досліджень ЦПС полягає в наступному.

Для проведення досліджень було відібрано золу виносу з Придніпровської ТЕС.

Підготовчий етап полягав у механічну просіюванні на грохоті МВГ [7, 8] для отримання фракції мінус 40 мкм, яка є найцінніша для виробництва цементу, оскільки вона забезпечує щільну мікроструктуру.

Подача вихідної золи здійснювалась дозовано. Підрешітний продукт крупністю мінус 40 мкм та надрешітний продукт крупністю плюс 40 мкм вивантажувався у відповідні ємності.

Механоактивація золи виносу проводилась шляхом помолу фракції мінус 40 мкм у камері вібраційного млина з віброударним полічастотним збудженням [4, 5].

Дані параметри наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Змінні параметри при дослідженні механоактивації золи виносу

Час механоактивації	15 хв.			30 хв.		
Час витримки після механоактивації	1 доба	10 діб	30 діб	1 доба	10 діб	30 діб
Кількість золи виносу доданої на 1 зразок	10%	10%	10%	10%	10%	10%
	20%	20%	20%	20%	20%	20%
	30%	30%	30%	30%	30%	30%
	40%	40%	40%	40%	40%	40%
	50%	50%	50%	50%	50%	50%

3. Процес механоактивації

Процес механоактивації золи виносу в вібраційному полічастотному кульовому млині базується на передачі кінетичної енергії помольних тіл (кульок) матеріалу для руйнування їх кристалічної решітки та збільшення питомої поверхні.

Заповнення камери млина золою виносу складало від 30 до 40% її об’єму, решту складали помольні тіла.

Камера герметично закривалась, встановлювалась та жорстко закріплювалась на вібраційному приводі, який здійснює разом з камерою віброударні полічастотні коливання с широким спектром частот від нуля до десятків тисяч Гц.

4. Виготовлення зразків

Для визначення міцності ЦПС на стиск було обрано зразки кубічної форми розміром 100х100х100 мм. Процес виготовлення включав: приготування суміші; формування; ущільнення; твердіння та інтенсивний набір міцності; розпалублення.

5. Результати

Результати дослідження міцності зразків з додаванням механоактивованої золи виносу наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати дослідження міцності зразків з додаванням механоактивованої золи виносу

№ досліду	Вміст золи в суміші					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
	Навантаження при руйнуванні зразків, т					
1	15,1	22,6	17,6	14,6	12,7	8,7
2	14,7	21,8	17,2	14,6	14,4	8,0
3	16,2	23,4	17,4	13,4	13,7	8,4
Середнє значення, т	15,3	22,6	17,4	14,2	13,6	8,4
Перевищення міцності зразків з додаванням механоактивованої золи міцності зразків зі звичайною золою	1	1,350	1,098	1,078	1,291	1,091

На рис. 1 наведено графіки навантаження-деформація зразків з ЦПС без додавання золи виносу та з додаванням звичайної золи виносу при 10-тивідсотковому її вмісті. На рис. 2 наведено графіки навантаження-деформація зразків з ЦПС з додаванням механоактивованої золи виносу при 10-ти та 20-тивідсотковому її вмісті.

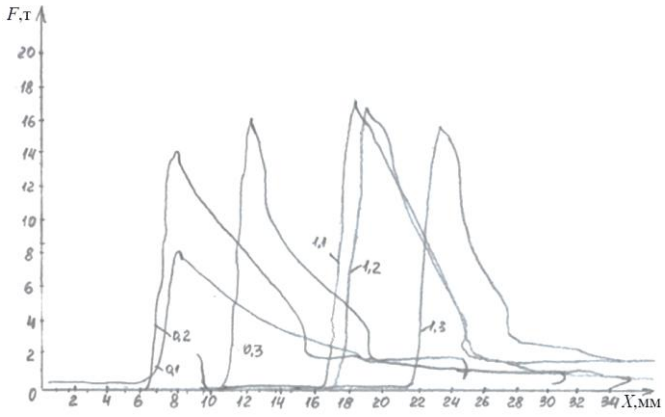


Рис. 1. Графіки навантаження-деформація зразків з ЦПС без додавання золи виносу (0.1, 0.2, 0.3) та з додаванням звичайної золи виносу при 10-тивідсотковому її вмісті (1.1, 1.2, 1.3)

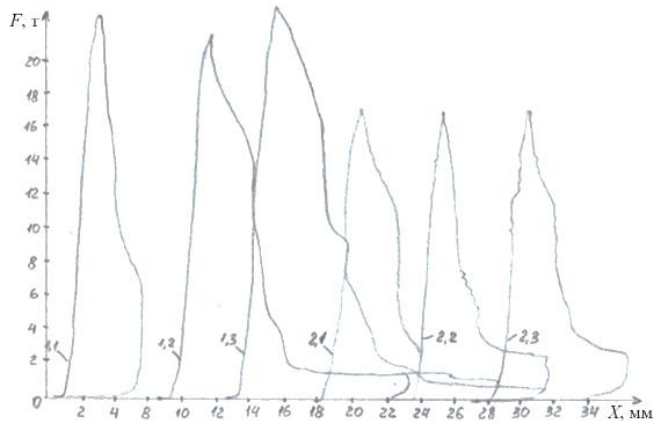


Рис. 2. Графіки навантаження-деформація зразків з ЦПС з додаванням механоактивованої золи виносу при 10-ти (1.1, 1.2, 1.3) та 20-тивідсотковому (2.1, 2.2, 2.3) її вмісті

Аналіз результатів показує, що додавання золи-виносу без механоактивації збільшує міцність зразків. При цьому найбільша міцність спостерігається при 10-тивідсотковому її вмісті, що узгоджується з вимогами стандартів. При додаванні золи виносу механоактивованої шляхом помолу в віброударному полічастотному млині міцність зразків в 1,35 рази перевищує міцність зразків при додаванні звичайної золи виносу.

Висновки

1. Розроблено методику та проведено експериментальні дослідження властивостей ЦПС з додаванням механоактивованої золи виносу ТЕС.

2. Для більш ретельного визначення впливу механоактивації на властивості золи виносу, механоактивація отриманої фракції мінус 40 мкм проводилась в двох часових режимах: 15 хв. та 30 хв. Для визначення оптимального вмісту золи виносу змінювався відсоток її додавання в ЦПС від 0 до 50 %.

3. Процес механоактивації золи виносу в вібраційному полічастотному кульовому млині базується на передачі кінетичної енергії помольних тіл (кульок) матеріалу для руйнування його кристалічної решітки та збільшення питомої поверхні. Ефективність активації визначається енергетичною напруженістю агрегату та дотриманням регламентованих параметрів.

4. Для визначення міцності ЦПС на стиск на гідравлічному пресі було обрано зразки кубічної форми розміром 100x100x100 мм. Максимальне навантаження, досягнуте в момент руйнування, фіксувалось, відзначався характер руйнування, будувався графік навантаження–деформація за допомогою самописця.

5. Найбільша міцність спостерігалась при 10-ти відсотковому вмісті золи виносу, що співпадає з нормами вмісту, регламентованими ДСТУ. Результати досліджень за розробленою методикою підтвердили доцільність використання для помолу та механоактивації золи виносу вібраційного полічастотного млина з віброударним збудженням камери помолу.

1. Dong, Y., Ning, X., Han, T., Hou, H., Zang, M., Lu, H., & He, X. (2025). Triethanolamine assisted ball milling activation of high alumina fly ash: Grinding kinetics, activation mechanism. Ceramics International, 51 (4), 4168–4177, https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.393

2. Fanni Dolgos, Roland Szabó, Wei-Ting Lin and Gábor Mucsi (2025), Mechanical activation and geopolymerisation of Taiwanese fly ash. Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin). Pp. 153-165. DOI: 10.17794/rgn.2025.5.12.

3. Ali, T, Qureshi, M. Z., Onyelowe, K. C., Althaqafi, E., Dei falla, A., Ahmed, H., & Ajwad, A. (2025). Optimizing re cycled aggregate concrete performance with chemically and mechanically activated fly ash in combination with coconut fiber. Scientific Reports, 15, https://doi.org/10. 1038/s41598-025-92227-x

4. Heorhii Shevchenko, Volodymyr Shevchenko. Analytical researches of a vibrating mill with vibroimpact excitation of a crushing chamber. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Conference "Essays of Mining Science and Practice". 2024. Vol. 1348. **DOI** 10.1088/1755-1315/1348/1/012050.

5. Heorhii Shevchenko, Volodymyr Shevchenko, Oleksandr Tytov, Vitaly Sukhariev, Oleksandr Sushchenko and Oleh Samodryha. Establishment of effective parameters for grinding mineral raw materials in a vibrating mill with multi-frequency vibroimpact excitation of the grinding chamber. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Conference "Essays of Mining Science and Practice". 2025. Vol. 1491. **DOI** 10.1088/1755-1315/1491/1/012068.

6. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25943

7. Пат. 45544 Україна, МПК B07B 1/42,. Привід полічастотного грохота / Булат А.Ф., Шевченко Г.О., Шевченко В.Г. – № u200906845; заявл. 30.06.09 ; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21, 2009 р.

8. Шевченко Г.А., Шевченко В.Г. Кадиров А.Р. Полічастотні грохоти для розділення тонких сипучих матеріалів. Збагачення корисних копалин: Науково-технічний збірник. – Дніпропетровськ: НГУ. - 2009. - Вип. 38(79). - С. 44-50.

Використання явища самосинхронізації інерційних віброзбудників для збудження бігармонічних коливань

М. Ярошевич[1], В. Пуць,Т. Ярошевич

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

[1] yaroshevichmp@gmail.com

Ключові слова: бігармонічні коливання, вібромашина, інерційний віброзбудник, самосинхронізация, інтегральний критерій, асинхронний електродвигун

Використання бігармонічних коливань зазвичай істотно підвищує технологічну ефективність вібромашин [1-4]. Водночас, вібромашини, у яких використовуються бігармонічний закон коливань робочого органу, поширені незрівнянно менше, ніж машини з моногармонічним законом коливань. Причиною є більша складність бігармонічного віброприводу. За привод таких машин, зазвичай використовують чотиривальний вібратор, ротори якого з'єднані кінематичними передачами з передатним відношенням, рівним двом (рис.1). Використання явища самосинхронізації механічних віброзбудників дозволяє істотно спростити привод вібромашин [1, 5].

Мета дослідження - показати практичну можливість отримання стабільних бігармонічних коливань робочого органу вібромайданчика прямолінійних вертикальних коливань з використанням не з'єднаних кінематичними передачами інерційних віброзбудників.

Розглянуто динаміку вібромайданчика вертикальних коливань з двома парами дебалансних віброзбудників, які приводяться від незалежних асинхронних електродвигунів з кратними синхронними частотами (рис.2). Для дослідження використано інтегральний критерій стійкості синхронних рухів та підхід вібраційної механіки [1].

Встановлено, що: самосинхронізація можлива лише у парах; у кожній парі віброзбудники будуть обертатися зі своїми синхронними частотами; у заразонансній області стійким завжди буде протифазне обертання віброзбудників; обидва режими стійкі за будь-яких поєднань параметрів, якщо $r_I \neq 0, r_{II} \neq 0$. При цьому, несуче тіло буде здійснювати бігармонічні поступальні коливання зі змінною асиметрією руху. Відомо, що для окремих технологічних процесів наявність змінної асиметрії коливань робочого органу є доцільною.

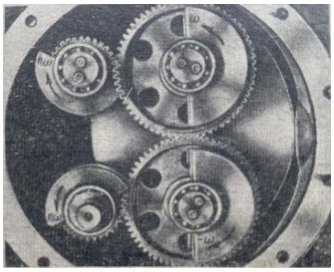


Рис. 1. Конструкція бігармонічного віброприводу з кінематичною синхронізацією віброзбудників.

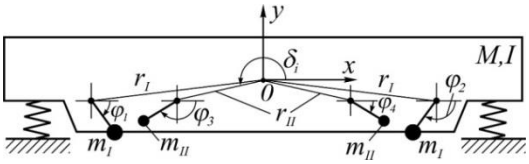


Рис. 2. Схема вібромайданчика бігармонічних вертикальних коливань з кінематично незв'язаними віброзбудниками.

Показано, що при зміні напрямку обертання в одній з пар віброзбудників на протилежний, а також за іншого розміщення площин, у яких знаходяться осі пар

віброзбудників, вираз для потенціальної функції не змінюється. Отже, для таких динамічних схем також будуть мати місце два незалежні, стійкі режими протифазного обертання віброзбудників у парах.

Отримано рівняння повільних процесів встановлення синхронних режимів обертання віброзбудників; вирази для динамічних моментів, які забезпечують самосинхронізацію віброзбудників; умови існування та стійкості синхронного режиму руху віброзбудників. На практиці, коли парціальні частоти віброзбудників у парах достатньо близькі та потужність електродвигунів істотно не завищено, для зарезонансних вібромашин дані умови, зазвичай, виконуються навіть за незначної вібрації.

Збудження стабільних бігармонічних коливань робочого органу вібромайданчика вертикальних коливань підтверджується чисельним моделюванням та натурним експериментом.

1. I.I. Blekhman, L.I. Blekhman, H. Dresig et al., *Selected Topics in Vibrational Mechanics. Singapore: World Scientific*, 409 (2004).
2. А.Ф. Булат, Г.А. Шевченко, Влияние поличастотных колебаний просеивающих поверхностей вибрационных грохотов на разделение сыпучих материалов, *Науковий Вісник НГУ, Вип. 4,* 92–97 (2010).
3. V.Yatsun, G. Filimonikhin, A. Haleeva, A. Nevdakha, On stability of the dual-frequency motion modes of a single-mass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2(7 (92)*, 59–67 (2018). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128265
4. М.П.Ярошевич, В.М.Тимощук, Самосинхронізація дебалансних збудників з кратними частотами обертання у вібраційних машинах з плоским рухом робочого органа, *Український міжвузівський науково-технічний збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні»*, Вип.45, 256-262 (2011).
5. N. Yaroshevich, V. Puts, T. Yaroshevych, O. Shovkomud, V. Martyniuk, Study of self-synchronization of unbalanced vibration exciters of a biharmonic vibration drive, *Vibroengineering procedia*, vol. 59, 96–102 (2025). DOI: 10.21595/vp.2025.25204

The Use of Inertial Exciters' Self-Synchronization for Generating Biharmonic Oscillations

M. Yaroshevich[1], V. Puts, T. Yaroshevych

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine.

[1] yaroshevichmp@gmail.com

A reliable solution for generating stable biharmonic oscillations using unbalanced vibration exciters without kinematic coupling is proposed. The dynamics of a vertical vibration platform equipped with two pairs of exciters driven by independent asynchronous motors with multiple synchronous frequencies are examined. The study employs an integral stability criterion for synchronous motions and the vibrational mechanics approach. Equations describing the slow processes of establishing synchronous rotation modes are derived, along with the conditions for the existence and stability of the synphase motion mode. It is demonstrated that a biharmonic oscillation mode of the carrying body with variable motion asymmetry occurs. The realization of stable biharmonic oscillations is validated through numerical simulation and physical experiments.

Keywords: biharmonic oscillations, vibration machine, inertial vibration exciter, self-synchronization, integral criterion, asynchronous electric motor.

Інформаційна комп'ютерна технологія діагностики та керування технічним станом устаткування шахтних підйомних комплексів

С.Р. Ільїн[a1], Л.Г. Адорська[a], І.С. Ільїна[б]

[a]Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна
[б]НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

[1] iljin_sr@ukr.net

Ключові слова: шахтний підйом, шахтні стовбури, підйомна посудина, армування стовбуру, провідники, розпори.

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України же понад 30 років займається питаннями створення та впровадження науково-методичного забезпечення та автоматизованих цифрових систем реєстрації та обробки даних щодо керування станом експлуатаційної безпеки шахтних підйомних комплексів (ШПК) у сучасних умовах. Роботи виконуються на основі інформаційної комп'ютерної технології діагностики діючого обладнання із застосуванням програмно-апаратного комплексу «Техно-Мак» [1, 2]. За цією технологією обстежено більш 600 стовбурних відділень рудників та вугільних шахт України.

Апаратурна частина технології – це багатозадачний програмно-апаратний комплекс, в який входить: ПЕОМ, багатоканальний контролер з аналого-цифровими перетворювачами, тензопідсилювальний блок, безконтактні датчики прискорень, силовимірювальні башмаки з контактними датчиками, дистанційний пульт управління комплексом.

Математична частина містить методи розрахунку параметрів експлуатаційного стану підйомного обладнання, які враховують багатоланкову структуру ШПК, просторовий характер армування стовбуру із металевими провідниками, періодичну пружність провідників між дискретно встановленими по глибині стовбуру розпорами. Динамічні процеси в системі «підйомна посудина – армування» мають параметричний характер та описуються системами диференціальних рівнянь типу Матьє-Хілла, які мають декілька зон нестійкості з аварійно небезпечним рівнем параметричного резонансу [3]. Спеціальне програмне забезпечення, яке розроблене на базі цих математичних моделей, виконує системну обробку даних вимірювань зносу армування, просторових викривлень профілів провідників, горизонтальної плавності та вертикальної швидкості руху посудин, динамічного напружено-деформаційного стану провідників та розпорів.

Розподіл динамічних навантажень на армування та механічних напружень у провідниках та розпорах від дії підйомних посудин має неоднорідний характер по глибині стовбурів, залежить від сполучень багатьох параметрів комплексу та швидкості руху посудин. Така неоднорідність підсилюється за рахунок того, що знос провідників та розпорів відрізняється на ділянках армування по глибині стовбура. Це відображено на рис. 1 на прикладі даних вимірювань та розрахунків в реальній діючій підйомній установці одного з рудників України.

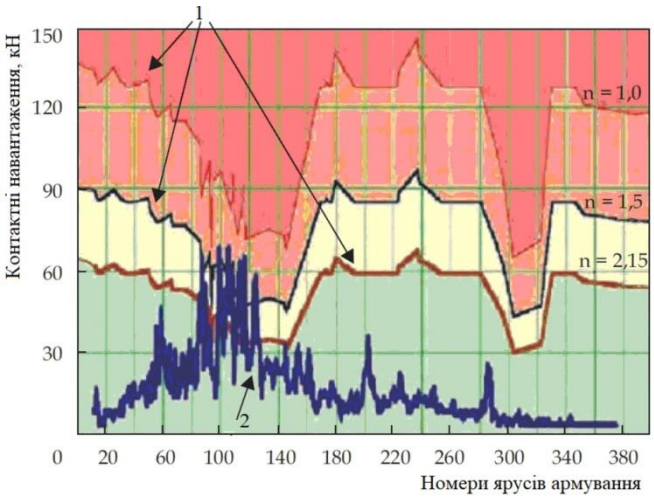


Рис. 1. Визначення рівня безпечної експлуатації обладнання ШПК: 1 – допустимі навантаження при заданих запасах міцності (n); 2 – експлуатаційні навантаження.

1. ГР 3-032-2004. Діагностика стану систем „кріплення-масив” та „підйомна посудина-жорстке армування” шахтних стовбурів. Порядок та методика виконання. *Київ: Міністерство промислової політики України* (2004).
2. С.Р. Ильин, Л.Г. Адорская, Б.С. Послед. Измерительно - аналитическая компьютерная технология диагностики и управления состоянием оборудования шахтных подъемных комплексов. *Геотехническая механика*, № 93, 28–38 (2011).
3. С.Р. Ильин, С.С. Ильина, В.И. Самуся. Механика шахтного подъема. *ДВНЗ «Національний гірничий університет»* (2014).

Information computer technology for diagnostics and control of the technical condition of mine hoisting equipment

S. Ilin[a1], L. Adorska[a], I. Ilina[b]

[a]M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[b]NTU "Dniprovska Polytechnic"**,** Dnipro, Ukraine.

[1] iljin_sr@ukr.net

The paper considers an information computer technology for diagnostics and control of the technical condition of mine hoisting equipment. The technology is based on the use of the “Techno-Mak” hardware–software complex, which provides measurement, data acquisition, and processing of operating parameters of hoisting equipment. The hardware and mathematical components of the system are presented, including sensors, controllers, and specialized software for analyzing dynamic processes in the system “hoisting vessel – shaft reinforcement”. The mathematical models take into account the multi-link structure of mine hoisting systems and the parametric nature of oscillatory processes.

Keywords: mine hoisting**,** mine shafts**,** hoisting vessel**,** shaft reinforcement**,** guides**,** buntons.

Геомеханічні процеси, як чинник структурних перетворень твердих вуглеводневих матриць

К. А. Безручко[1], О. В. Бурчак, Л. І. Пимоненко, О.В. Приходченко[a]

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, Київ, Україна

[1]gvrvg@meta.ua

Ключові слова: тверда вуглеводнева матриця, викопне вугілля, геомеханічний чинник, тиск, структурно-функціональні перетворення, пружна енергія.

Перетворення органічної речовини в процесі вуглефікації відбувається під впливом комплексу геологічних факторів, серед яких важливу роль відіграють геомеханічні процеси. Зовнішні сили, що діють на вуглепородний масив, призводять до накопичення енергії у структурі вугілля, яка частково витрачається на фізико-хімічні перетворення, а частково акумулюється у вигляді внутрішніх структурних напружень. Саме з цією енергією пов'язані процеси, які значною мірою визначають еволюцію структури та властивостей твердих вуглеводневих матриць.

Викопне вугілля розглядається як складна полікомпонентна гетерогенна система, здатна накопичувати значні обсяги внутрішньої енергії на молекулярному рівні. Під впливом геомеханічних процесів у вугільній речовині формуються енергетичні збурення, релаксація яких спричиняє структурні трансформації. Наслідком таких процесів є зміна фазового стану речовини, що проявляється у виділенні флюїдів, зокрема метану, а також у структуризації твердого залишку з підвищеним вмістом вуглецю.

Вивчення закономірностей структурних перетворень вугілля є важливим для розробки нових технологій використання викопної органічної сировини. Зокрема, такі дослідження сприяють створенню науково обґрунтованих підходів до отримання синтетичних палив, водню та сучасних вуглецевих наноматеріалів, а також дозволяють зменшити негативний вплив гірничодобувної діяльності на довкілля.

Метою дослідження є оцінка величини енергії, що накопичується у вугільній речовині під дією геомеханічних факторів, та визначення її ролі у процесах структурно-функціональних перетворень кам'яного вугілля для подальших науково обґрунтованих технологічних рішень з керування процесами трансформації матриць твердих вуглеводнів.

Було застосовано комплексний метод досліджень, який включає аналіз та узагальнення геологічних умов у вугленосній товщі; технічний аналіз вугілля (зольність та вихід летких речовин), лабораторну перевірку отриманих даних шляхом фізичного моделювання процесів у вугільній речовині на атомно-молекулярному рівні під зовнішнім впливом. Отримані дані співставленні з результатами досліджень сучасними фізичними методами: ядерного магнітного резонансу (ЯМР), інфрачервоної спектроскопії (ІЧС) та безконтактної оцінки енергетичного стану кам'яного вугілля методом SQUID-магнітометрії.

Для дослідження геомеханічного чинника еволюції твердих вуглеводневих матриць проводилася оцінка пружних властивостей зразків вугілля всіх стадій метаморфізму

статичним методом за опором стиску. За основу алгоритму проведення вимірів покладено методику досліджень викладену в роботі [1, 2].

Встановлено, що безоборотне поглинання енергії вугільною речовиною під силовим навантаженням реалізується в межах початкових циклів, що свідчить про завершення деформаційних, крихких та фізико-хімічних процесів за заданих умов. Подальша дія механічного фактору не призводить до суттєвих структурних змін, а характеризується накопиченням пружної енергії, яка визначає формування квазістабільного енергетичного стану системи.

Висновки. Запропоновано інноваційний підхід до ідентифікації та кількісного оцінювання пружної енергії, що може бути накопичена в молекулярній структурі вугільної речовини під механічним навантаженням.

Встановлено, що вуглефікована органіка є енергетично активною, здатною акумулювати пружну енергію на молекулярному рівні під дією силових навантажень. Накопичена енергія є внутрішнім потенціалом, що впливає на кінетику подальших фізико-хімічних процесів і може виступати енергетичним ресурсом для структурно-функціональних перетворень у вуглеводневій матриці.

Отримані дані поглиблюють уявлення про механо-хімічні аспекти поведінки вугільної речовини та формують теоретичне підґрунтя для розробки нових технологічних підходів до керування процесами трансформації вуглецевих матеріалів та підвищення ефективності використання вугільної сировини.

1. Булат А.Ф., Круковський О.П., Буліч Ю.Ю., Безручко К.А., Бурчак О.В. Geomechanics as a factor of carbonification transformations at various hierarchical and scale levels. *Геотехнічна механіка*. № 170, 156-164 (2024) doi: https://doi.org/10.15407/geotm2024.170.156
2. Bezruchko K.A., Pymonenko L.I., Burchak O.V., Baranovskyi V.I., Prykhodchenko O.V. Residual deformations of coal during destruction under pressure *Геотехнічна механіка*.- 2025.- № 172.- С. 93-104. http://www.geotm.dp.ua/index.php/en/collection/460-2025en/geotm-172en/8757-geotm172-09

K. Bezruchko[a1], O. Burchak[a], L. Pymonenko[a], O. Prykhodchenko[a]

[a]M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] gvrvg@meta.ua

It has been established that carbonized organic matter is energetically active and capable of accumulating elastic energy at the molecular level under the action of mechanical loads. The accumulated energy represents an internal potential that influences the kinetics of subsequent physicochemical processes and may serve as an energy resource for structural and functional transformations within the hydrocarbon matrix. The obtained data deepen the understanding of the mechanochemical aspects of coal matter behavior and form a theoretical basis for the development of new technological approaches to controlling the transformation processes of carbon materials and improving the efficiency of coal raw material utilization.

Keywords: solid hydrocarbon matrix, fossil coal, geomechanical factor, pressure, structural-functional transformations, elastic energy.

Експрес-оцінка міцності гірських порід неруйнівними методами

О. П. Круковський, С. І. Скіпочка, В. М. Сергієнко[1], Л. В. Прохорець

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1] viictorms@ukr.net

Ключові слова: міцність гірських порід, неруйнівний контроль, метод ударного імпульсу, ультразвуковий метод, лінійна залежність між параметрами.

Для зниження вартості та підвищення оперативності контролю широке застосування отримали непрямі методи визначення міцності гірських порід. Вони передбачають вимірювання в польових умовах певних параметрів, що пов'язані з міцністю кореляційними залежностями. Для широкої категорії порід ефективним є ультразвуковий метод [1, 2]. Відомо також використання молотка Шмідта [3]. Для підвищення достовірності визначення міцності застосовується комплекс двох або декількох неруйнівних методів [4, 5]. Застосовують також непрямі руйнівні методи [6, 7]. Розгляд ефективності різних видів непрямого визначення міцності гірських порід представлено в роботах [8, 9].

Основна проблема при використанні непрямих методів визначення міцності полягає в необхідності попереднього встановлення кореляційних залежностей між параметром, що визначається даним методом, та міцністю, що встановлена прямими випробуваннями. Метою даної роботи є розробка методики експрес-оцінки міцності гірських порід методами неруйнівного контролю, що могла б бути застосована для всіх або хоча б для переважної більшості порід родовища без виконання тарування для кожного окремого типу порід.

Проведені дослідження включали визначення швидкостей пружних хвиль в породі з використанням ультразвукового методу, визначення тривалості пружної взаємодії сферичного ударника зі зразком як варіант методу ударного імпульсу [10] та руйнівне визначення міцності на одновісний стиск.

Для проведення експерименту були використані проби гірських порід з вугільних шахт Західного Донбасу «Дніпровська» та «Самарська», а також з залізорудного кар'єру Полтавського ГЗК. Кожна проба містила по три куски неправильної форми, з яких потім були підготовлені зразки кубічної форми з ребром 42 мм для руйнівних випробувань. Порівняльні результати неруйнівного контролю та руйнівного визначення міцності на одновісний стиск з усередненням по типах порід наведено в табл. 1.

Встановлено, що для широкого діапазону значень міцності гірської породи для всіх її типів, окрім вугілля, зв'язок між міцністю та інформативними параметрами неруйнівного контролю з достатньою точністю може бути описаний єдиною лінійною залежністю. Вигляд вказаної залежності для різних варіантів оцінки міцності представлено в табл. 2.

Таблиця 1.

Усереднені результати прямого визначення міцності порід шляхом роздавлювання зразків на пресі та інформативних параметрів неруйнівного контролю для різних типів порід

Тип породи	Умовний номер	Кількість проб	Міцність на стиск $б_{ст.}$, МПа	Швидкість поздовжньої хвилі, км/с		Тривалість ударного імпульсу τ, мс
				вздовж шарів V_p II	поперек шарів V_p ┬	
Кварцит	1	8	113	4,41	3,89	0,13
Пісковик	2	1	92	4,19	3,90	0,14
Сланець	3	4	86	3,81	3,52	0,15
Амфіболіт	4	5	81	3,70	3,39	0,17
Граніт	5	2	51	3,51	3,24	0,19
Алевроліт	6	3	25	3,08	2,58	0,21
Аргіліт	7	13	19	3,00	2,45	0,22
Вугілля	8	7	29	2,15	1,91	0,27

Таблиця 2.

Лінійна апроксимація залежностей між інформативними параметрами неруйнівного контролю та міцністю

Функціональна залежність	Лінійна апроксимація	Достовірність апроксимації
Міцність на стиск $б_{ст.}$, МПа – тривалість ударного імпульсу τ, мс	$б_{ст.} = -10\tau + 240$	0,92
Міцність на стиск $б_{ст.}$, МПа – швидкість ультразвуку вздовж шарів V_p II, км/с	$б_{ст.} = 66V_p - 176$	0,95
Міцність на стиск $б_{ст.}$, МПа – швидкість ультразвуку поперек шарів V_p ┬, км/с	$б_{ст.} = 60V_p - 129$	0,93

1. V. Ambati, S. Sharma, M. N. Babu and R. R. Nair, Laboratory measurements of ultrasonic wave velocities of rock samples and their relation to log data: A case study from Mumbai offshore, Journal of Earth System Science, 130, 176 (2021). https://doi.org/10.1007/s12040-021-01696-x.
2. T. Rahman and K. Sarkar, Correlations between uniaxial compressive strength and dynamic elastic properties for six rock types, International Journal of Geomechanics, 23, no 6, 04023064-1 (2023). https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-7854.
3. L. Selçuk and E. Yabalak, Evaluation of the ratio between uniaxial compressive strength and Schmidt hammer rebound number and its effectiveness in predicting rock strength, Nondestructive Testing and Evaluation, 30, 1-12 (2015). https://doi.org/10.1080/10589759.2014.977789.
4. M. Gomez-Heras, D. Benavente, C. Pla, J. Martinez-Martinez, R. Fort and V. Brotons, Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements, Construction and Building Materials, 261, 119996 (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119996.
5. L. Selçuk and A. Nar, Prediction of uniaxial compressive strength of intact rocks using ultrasonic pulse velocity and rebound-hammer number, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 49, no 1, 67-65 (2016). https://doi.org/10.1144/qjegh2014-094.

6. S. Kalantari, H. Hashemolhosseini and A. Baghbanan, Estimating rock strength parameters using drilling data, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 104, 45-52 (2018). https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.02.013.
7. K. Gao, X. Xu and S. Jiao, Measurement and perception of the rock strength by energy parameters during the drilling operation, Measurement, 227, 114268 (2024). https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114268.
8. M. He, N. Li, J. Zhu and Y. Chen, Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit, Journal of Petroleum Science and Engineering, 187, 106847 (2020). https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106847.
9. S. V. Swamy, B. M. Kunar, K. R. Chandar, M. Alwetaishi, S. Krishnan and S. Reddy, Prediction of uniaxial compressive strength of limestone from ball mill grinding characteristics using supervised machine learning techniques, Scientific Reports, 15, 28395 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-09063-2.
10. С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, В. Н. Сергиенко и Л. В. Прохорец, Экспресс-оценка прочности горных пород в массиве методом ударного импульса, Металлургическая и горнорудная промышленность, № 2, 74-77 (2013).

Rapid assessment of rock strength by non-destructive methods

O. Krukovskyi, S. Skipochka, V. Serhiienko[1], L. Prokhorets

M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] viictorms@ukr.net

The possibility of assessing the strength of rocks by non-destructive testing methods without prior, individual calibration for each type of rock by means of comparative destructive tests on a press was considered. The suitability of two methods was experimentally established: ultrasonic and shock pulse. The optimal operating frequency and the appropriate range of the sounding base were substantiated for the ultrasonic method. A close to linear dependence was established between the velocity of the longitudinal wave in the rock and its strength to uniaxial compression. For conducting research in field conditions, serial ultrasonic equipment of domestic production was recommended. The informative parameter in the proposed variant of the shock pulse method is the duration of the elastic interaction of the spherical striker with the rock. It was established that the dependence between the value of the specified parameter and the strength of the rock to uniaxial compression is also satisfactorily described by a linear function. Both methods can be used both for rapid strength assessment of rock samples of arbitrary shape in field conditions and for strength assessment directly in the massif.

Keywords: rock strength, non-destructive testing, shock pulse method, ultrasonic method, linear dependence between parameters.

Довгострокова працездатність металевого кріплення гірничих виробок в умовах корозійного впливу шахтних вод

О. Круковський[a1], В.Круковська[a], Ю. Виноградов[б]

[a] Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, Україна

[б] Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, Україна

[1] igtm@ukr.net

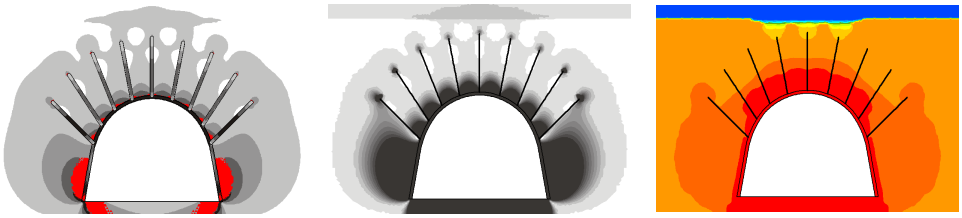
Ключові слова: металеве кріплення; корозія; шахтні води; чисельне моделювання; довгострокова стійкість

Агресивні шахтні води є однією з основних причин передчасного руйнування металевого кріплення гірничих виробок. Корозійні процеси призводять до зниження міцності рам і анкерів, втрати їх несучої здатності та зменшення строку безпечної експлуатації виробок. Особливо небезпечним є поєднання корозійного впливу з високими напруженнями, характерними для глибоких шахт, оскільки за таких умов інтенсифікується корозійне розтріскування під напруженням. Тому метою роботи є розробка чисельної моделі для дослідження довгострокової працездатності металевого кріплення капітальних гірничих виробок в умовах корозійного впливу шахтних вод.

Розглянуто плоску задачу зв'язаних процесів пружно-пластичного деформування породного масиву з гірничою виробкою та фільтрації води з підроблюваного обводненого пласта. Моделювання виконано методом скінчених елементів із використанням критерію міцності Кулона–Мора. Досліджено два варіанти кріплення: рамне та анкерно-рамне. Анкери змодельовано стрижневими елементами в пружно-пластичній постановці. Корозійний вплив на металеві рами враховано шляхом поступового зниження межі міцності сталі, при цьому на ділянках пластичного деформування швидкість деградації приймалась підвищеною. Корозія анкерів враховувалась через зменшення їх діаметра на ділянках контакту з агресивним середовищем.

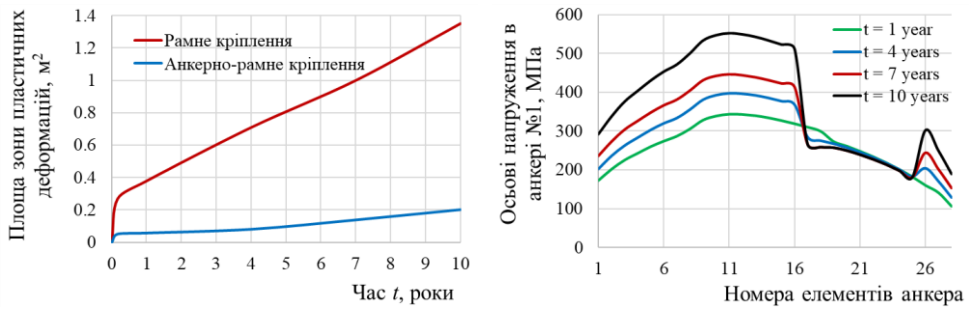
Результати чисельних розрахунків (рис. 1) показали, що основний перерозподіл напружень у вміщуючих породах завершується протягом перших місяців після проведення виробки. Проте у випадку рамного кріплення зона пластичних деформацій металевого профілю з часом продовжує зростати внаслідок корозійного зниження міцності, навіть за стабілізованого напруженого стану масиву (рис. 2а). Це свідчить про взаємне підсилення процесів корозії та втрати стійкості рам.

Анкерно-рамне кріплення забезпечує формування породно-анкерного перекриття в покрівлі виробки, зменшує анізотропію поля напружень і проникність порід, а також обмежує доступ агресивних шахтних вод до металевих елементів. Показано, що за прийнятих умов корозійне пошкодження анкерів протягом розрахункового періоду не призводить до втрати несучої здатності породно-анкерної системи (рис. 2б). За прийнятих умов моделювання анкерно-рамне кріплення забезпечує стійкий стан капітальної виробки протягом тривалого часу експлуатації.



а *б* *в*

Рис. 1. Результати розрахунків для варіанту з анкерно-рамним кріпленням в момент часу 1 рік: *а* – анізотропія напружень і зони непружних деформацій (червоний колір); *б* – проникність порід; *в* – поровий тиск води.



а *б*

Рис. 2. Зміна напружено-деформованого стану металевого кріплення протягом 10 років: *а* – пластичні деформації металевого профілю; *б* – осьові напруження в центральному анкері.

Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування вибору типу кріплення, оцінки довгострокової надійності виробок та управління ризиками втрати їх стійкості в умовах агресивного шахтного середовища.

Long-term serviceability of metal support in mine workings under corrosive action of mine water

Oleksandr Krukovskyi[a1], Viktoriia Krukovska[a], Yurii Vynohradov[b]

[a] M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[б] Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] igtm@ukr.net

This paper presents a numerical study of the coupled processes of rock mass deformation, water filtration, and corrosion-induced degradation of steel frames and rockbolts. The influence of stress state and moisture conditions on the loss of bearing capacity of support elements is analysed. A comparison of frame and combined rockbolt–frame support systems is performed. The results demonstrate the advantages of reinforced support in improving long-term stability under corrosive conditions.

Keywords: metal support; corrosion; mine water; numerical modelling; long-term stability

Про один метод оцінювання чутливості функцій до варіації параметрів в прикладних задачах механіки

Ларіонов Г.І., Рюміна Д. М.

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України
igtmlarionov@gmail.com, darya445@gmail.com

Розглядаються результати досліджень у напрямку прикладної механіки та обчислювальної математики. Розвиток методів обчислювальної математики полягав у формулюванні гіпотези, на базі якої стало можливим виконувати представлення скалярних функції у околі будь якої точки із області визначення у мультиплікативній формі, добутками якої є елементарні функції які залежать від одного параметру. Таке застосування методу дозволяє представляти результати чисельних методів у аналітичній формі у околі будь-якої точки із області визначення. Використання степеневих функцій у якості елементів добутку дозволило наближено виконувати процедуру визначення чутливості обраної функції до варіації параметрів. Чутливість функції якості процесу встановлювалась за показниками степенів функцій добутку. Чим більший показник степеню параметру тим більше його вплив на функцію якості. На базі сформульованої гіпотези і алгоритму розроблено метод послідовної апроксимації. За його використання розв'язано низку задач з прикладної і геотехнічної механіки та проведено дослідження на адекватність отриманих результатів. Встановлено, що для задач прикладної та геотехнічної механіки окіл визначення функції у мультиплікативному представлені може бути розширений на всю область визначення з точністю достатньою для проведення інженерних обчислень. Використання методу послідовної апроксимації, розробленому на базі запропонованої гіпотези, дозволило вирішати ряд задач прикладної механіки.

Ключові слова: експериментальні та обчислювальні дослідження, активний експеримент, мультиплікативна форма представлення, чутливість, варіація параметрів, окіл функції, апроксимація функцій, наближена оцінка, низька похибка.

Вступ. За результатами проведених експериментів з виявлення тих чи інших властивостей машин, механізмів, приладів, тобто функцій якості процесів, як правило, проводили побудову математичної моделі, яка давала можливість узагальнити процес її вивчення. У якості таких моделей для опису функції якості (потужність у двигуна, швидкість обертання валу, інтенсивність напружень, потужність вихідного сигналу електронного приладу, тощо), обирають або адитивну або мультиплікативну моделі від незалежних змінних параметрів процесу, які представляють собою апроксимації результатів експерименту. Мультиплікативні моделі отримали широке застосування при обробці даних експерименту. Проте не до кінця з'ясованим залишилась проблема вибору коефіцієнту апроксимації, або мультиплікатора, який передував добутку функцій. Саме від його вибору залежать і адекватність отриманих даних. Більш детальне вивчення процесів проведення фізичних експериментів показало, що у значній більшості алгоритм дослідження складався з послідовності наступних кроків:

1. Обирають опорну(базову) точку $X_0 = X(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots x_n^0)$, причому обирають, як правило, центроїд області визначення;
2. Проводять по шагову зміну одного із параметрів, причому всі інші залишаються фіксованими;

3. Обирають наступний параметр, фіксуючи всі інші, включаючи попередній;
4. Отримують форму представлення функції якості у вигляді, наприклад, добутку;
5. Обирають алгоритм вибору мультиплікатора, тобто коефіцієнта апроксимації.

Мультиплікатор почали обирати як функцію параметрів із області визначення. Виявилось, що попри високу точність та значні затрати на проведення експерименту, функція якості процесу має задовільну точність лише у околі опорної точки. Спроби визначення функції якості в інших точках позитивного результату не давали, не дивлячись на використання різних алгоритмів вибору мультиплікатора. Зрозуміло, що експеримент проведений у точці просто не може задовольняти точності визначення функції якості у інших точках і повинен бути не функцією координат, а числом для кожної точки із області визначення. Правило, за яким його можна знайти, буде наведено нижче.

Узагальнюючи можна стверджувати, що будь-який процес дослідження, який проводиться за допомогою активних експериментів, в тому числі і чисельних, може бути представлений у вигляді чорної скриньки (Рис.1)



Рис.1 Схема представлення процесу побудови ММ у вигляді чорної скриньки

Тобто подаючи на вхід чорної скриньки, за сформульованим вище загальним правилом, значення змінних отримуємо множини значень функції якості. Послідовно виконуючи апроксимацію функції від параметрів отримуємо функції добутків для мультиплікативної форми представлення функції якості процесу.

2. Постановка задачі полягає у розробці методу представлення результатів експериментів у аналітичному вигляді у мультиплікативній формі, за яким можна було б наближено встановлювати швидкість відгуку функції якості процесу до варіації параметрів або наближено встановлювати чутливість її до зміни параметрів і таким чином здійснювати наближену оцінку впливу параметрів процесу.

3. Основні результати базуються на гіпотезі наведеній нижче і у якості чорної скриньки (Рис.1) виступали ряд задач прикладної та геотехнічної механіки, наприклад [1].

Гіпотеза. Нехай існує скалярна функція $F(X) = F\left(x_1, x_2, x_{3,\dots,} x_n\right)$ яка є обмеженою визначеною і неперервною у замкнутій області $\overline{D}$ скалярного поля P. Тоді $\forall M \in D; \forall \varepsilon \geq 0 \exists U_\varepsilon(M) \subset \overline{D}$ виконується нерівність :

$$|F(X) - \phi(X)| \leq \varepsilon, \forall M_0 \in U_\varepsilon(M_0)$$

де $U_\varepsilon(M_0)$ - окіл функції; $\phi(X) = \alpha \prod_{i=1}^{n} g_i(x_i)$ а $g_i\left(x_i\right)$ - функції апроксимації для $f_1, f_2, \dots, f_n$ які належать до класу елементарних функцій і задані наступним чином:

$$f_1(x_1) = \mathrm{F}(\mathrm{x}_1, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0),\ f_2(x_2) = \mathrm{F}(x_1^0, x_2, x_3^0, \dots, x_n^0),\ f_3(x_3) = \mathrm{F}(x_1^0, x_2^0, x_3, \dots, x_n^0)$$

а α – коефіцієнт апроксимації або мультиплікатор, визначається у відповідності до формули:

$$\alpha = \frac{F(M_0)}{g_1(x_1^0) g_2(x_2^0), \dots g_n(x_n^0)}.$$

Базова точка має істотне значення для якості апроксимації. Її розташування в області визначення функції залежить від характеру досліджуваного процесу, наявної апріорної інформації та поставленої інженерної задачі. У разі відсутності достатніх попередніх відомостей доцільно обирати базову точку в центральній частині області зміни параметрів або в зоні, що відповідає типовому режиму функціонування системи.

Метод послідовної апроксимації дозволяє будувати аналітичне подання функції у вигляді добутку однофакторних функцій у тих випадках, коли є таблично задані або чисельно обчислені значення функції на лініях, отриманих послідовною зміною кожного параметра за фіксованих значень інших відносно базової точки. Такий підхід є зручним для практичного використання, оскільки не потребує повного аналітичного задання функції.

Окремий інтерес становить використання степеневих апроксимацій. У цьому випадку показники ступеня можуть бути використані як наближені індикатори відносної чутливості функції до зміни відповідних параметрів у межах прийнятого класу моделей і в околі обраної базової точки. При цьому слід враховувати, що така інтерпретація має локальний або квазілокальний характер і залежить від вибраної параметризації задачі.

Апробацію підходу виконано на прикладах задач прикладної та геотехнічної механіки. Отримані результати свідчать, що метод послідовної апроксимації може бути ефективним інструментом інженерного аналізу у випадках, коли необхідно швидко отримати компактну апроксимаційну модель і виконати порівняльну оцінку впливу параметрів без побудови надмірно складного аналітичного опису.

Висновки

1. Фізичні процеси, результати дослідження яких можуть бути зведені до активного експерименту та подані у вигляді «чорної скриньки», можуть розглядатися як об’єкти застосування методу послідовної апроксимації.

2. Метод послідовної апроксимації дозволяє отримувати наближене аналітичне подання скалярної функції відгуку у мультиплікативній формі, де кожен множник залежить від одного параметра.
3. За використання степеневих апроксимацій показники степеня можуть застосовуватися для наближеної оцінки відносного впливу параметрів на функцію відгуку в межах прийнятої моделі та обраної області аналізу.
4. Практична цінність методу полягає у можливості його застосування в інженерних задачах механіки для компактного опису результатів експериментальних і чисельних досліджень, а також для попереднього аналізу чутливості.
5. Межі застосування методу визначаються вибором базової точки, характером досліджуваної функції, класом апроксимуючих залежностей та допустимим рівнем похибки для конкретної прикладної задачі.

1. Miroslav Rimar, Oleksandr Yeromin,Grigoriy Larionov, Andrii Kulikov,Marcel Fedak, Tibor Krenicky, Olena Gupalo, Yana Myanovskaya//Method of sequential approximation in modelling the processes of heat transfer and gas dynamics in combustion equipment, *Appl.Sci*.2022,12, 11948.https://doi.org/10.3390/app122311948.

Закритичне зростання газонаповнених тріщин при розвантаженні вугільного/породного пласта

Е.П.Фельдман, Н.О.Калугіна[1], О.О.Віннік

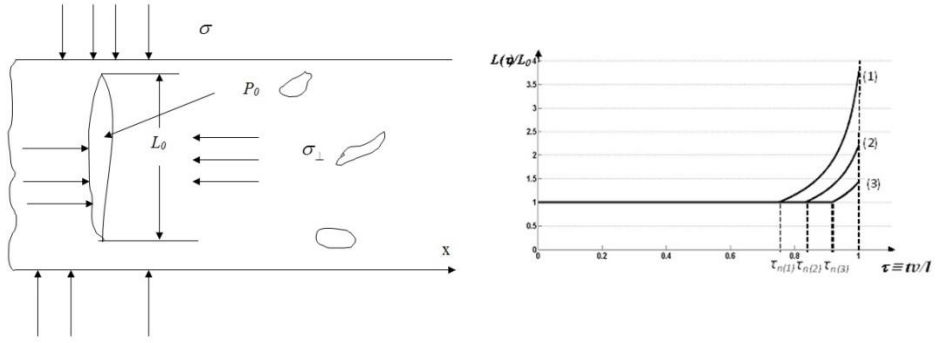
Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1] kalugina_n_a@ukr.net

Ключові слова: газонаповнена тріщина, вугільно-породний пласт, стискаючі напруги, тиск газу.

Інтенсивний розвиток гірничих робіт у газоносних вугільних пластах супроводжується складними процесами зміни напружено-деформованого стану масиву, утворення та розвитку тріщин, заповнених газом. За певних умов можливий практично неконтрольований розвиток тріщин, що може відігравати суттєву роль у формуванні небезпечних газодинамічних явищ.

Розглянемо тріщину (рис. 1a), з початковою довжиною L_0, площина залягання якої паралельна поверхні вибою. У порожнині тріщини знаходиться газ (зазвичай це метан) під тиском P_0. У момент початку відпрацювання пласта (зі швидкістю просування вибою $\mathcal{V}$), тріщина знаходиться на відстані l від поверхні вибою.



а *б*

Рис. 1. Модель закритичного зростання магістральної тріщини*: а* – схематичне розташування у вугільному/породному пласті; *б* – залежність довжини тріщини (в одиницях L_0) від часу (в одиницях $\frac{l}{v}$) при σ_m/P_0=2; (1) – K_0/M_c=2, (2) – K_0/M_c=1,5, (3) – K_0/M_c=1,2

Протягом відпрацювання пласта йде розвантаження пласта, так що зменшується стискаючі напруги бокового розпору σ_m, і одночасно діють напруги, що розтягують, обумовлені тиском P газу всередині тріщини. Протягом всього етапу докритичного розвитку тріщини її довжина залишається незмінною, $L(\tau) = L_0$, при цьому тріщина набухає, її зяяння зростає. Після початкової стадії розкриття тріщини можливий перехід до режиму її закритичного росту (при $\tau = \tau_n$), коли об'єм порожнини тріщини

збільшується лише за допомогою довжини тріщини, з наступною кінцевою швидкістю зростання $\mathcal{V}_l$ [1]:

$$\mathcal{V}_l = \frac{\pi\sigma_m L_0^{3/2} \mathrm{K}_0^3 \mathcal{V}}{(1+a_m)^3 M_c^4 l} \tag{1}$$

де K_0 – калібрувальний коефіцієнт концентрації напруг, σ_m – абсолютна величина максимальних напруг бічного розпору, M_c – модуль зчеплення матеріалу, параметр a_m враховує ефективне зяяння тріщини і пружний модуль матеріалу.

Отримані графіки залежності довжини тріщини від часу наведено на рис. 1*б*. До моменту τ_n тріщина стоїть на місці, потім рушає з місця зі швидкістю, яка зростає, залишаючись кінцевою до повного розвантаження матеріалу (у нашому прикладі до поглинання тріщини вибоєм).

Таким чином, вперше виявлено існування повільного закритичного режиму еволюції тріщин у газонасичених твердих матеріалах, який принципово відрізняється від передбаченого класичною моделлю Гріффітса [2] катастрофічного «вистрілювання» тріщини. Цей результат відкриває новий підклас поведінки тріщин у газонаповнених середовищах і суттєво розширює та доповнює межі класичної теорії, має прикладний потенціал для підвищення безпеки та ефективності видобувних робіт.

1. E.P. Feldman, N.O. Kalugina. Supercritical growth of gas-filled cracks in gas-bearing coal/rock seams during compressive stress unloading, *Philosophical Magazine*, 246596 (2025). https://doi.org/10.1080/14786435.2025.2464596
2. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Ser. A. **221**(2), 163–198 (1921). urn:doi:10.1098/rsta.1921.0006

Supercritical growth of gas-filled cracks during unloading of a coal–rock seam

E. Feldman[a], N. Kalugina[a1], O. Vinnik[a]

[a]Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] kalugina_n_a@ukr.net

For the first time, the existence of a slow supercritical regime of crack evolution in solid gas-saturated materials has been revealed, which fundamentally differs from the regime predicted by the classical Griffith model. In contrast to the catastrophic crack "runaway" predicted by this theory, a stage of slow, non-catastrophic crack growth is identified, with the growth rate determined by the rate of unloading of the material from compressive stresses. This result reveals a new subclass of crack behavior in gas-filled media and significantly extends and complements the classical fracture mechanics framework, providing practical potential for improving the safety and efficiency of mining operations.

Keywords*:* gas-filled crack, coal-rock seam, compressive stresses, gas pressure

Технологічний аналіз геотермальних систем для відбору тепла шахтних вод

О. В. Інкін[а,61], Н. О. Калугіна[б], Ю. В. Хрипливець[б]

[а]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[б]Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1] inkin.o.v@nmu.one

Ключові слова: геотермальна система, зонд, гірничі виробки, шахтні води, теплова енергія.

Проблеми, які пов'язані з підтримкою гідробезпеки шахт в експлуатаційний та постексплуатаційний період, а також необхідність застосування джерел відновлюваної енергії для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, актуалізують можливість геотермального освоєння теплової енергії шахтних підприємств. Виконані в цьому напрямку попередні дослідження [1] показують, що використання тепла шахтних вод у системах опалення різних споруд у більшості випадків, є економічно доцільним та рентабельним. Освоєння теплової енергії шахтних вод може здійснюватися за допомогою відкритого або замкнутого циклу, кожен з яких має свої переваги та недоліки [2]. Так, у замкнутій системі (рис. 1 *а*) підземні води не відбираються, а обмінюються теплом із зануреним у них геотермальним зондом в якому рухається теплоносій (як правило 25–38 % водний розчин етиленгліколю). Але в цих системах на зовнішніх стінах зонда може відбуватися наростання шару вохри внаслідок вмісту заліза у шахтних водах, що суттєво знижує продуктивність системи [3].

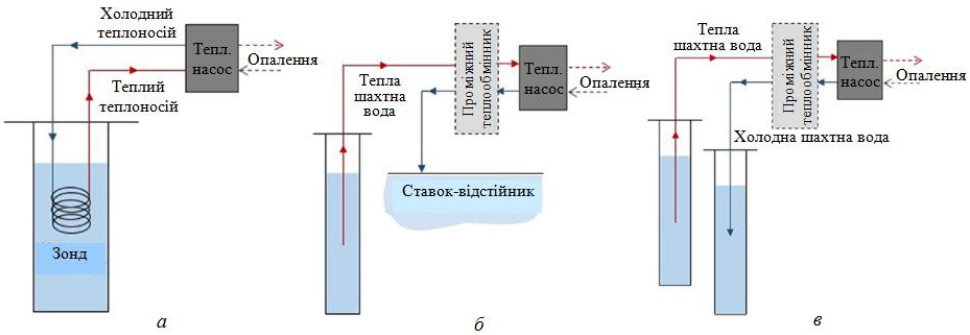


Рис. 1. Типи геотермальних систем для відбору тепла з шахтних вод: *а* – система з замкнутим циклом; *б*, *в* – система з відкритим циклом відповідно без та зі зворотним закачуванням.

У системах з відкритим циклом шахтна вода відбирається з гірничих виробок на денну поверхню, що забезпечує підтримку її гідродинамічно безпечного рівня та можливість видобутку корисних копалин. Порівняно з системами закритого циклу, відкриті системи мають вищу ефективність теплообміну шахтних вод, оскільки відбувається їх безпосередній контакт з гірськими породами [4]. Необхідно зазначити,

що системи з відкритим циклом поділяються на ті які утилізують термічно відпрацьовану воду на денної поверхні (рис. 1 *б*) та ті, що закачують її назад у гірничі виробки (рис. 1 *в*). У першому випадку шахтна вода відбирається із шахти через ствол або свердловини та проходить через теплообмінник, який з'єднаний з тепловим насосом. Після теплообміну та певної форми очищення вода скидається у поверхневі водотоки або водойми. До можливих недоліків цих систем слід віднести вартість очищення та можливість забруднення устаткування хімічними осадами. У другому випадку термічно відпрацьована вода повторно закачується назад у гірничі виробки або в інший водоносний горизонт на деякій відстані від місця відбору [5]. Перевага цього способу полягає в тому, що зберігається ресурс шахтних вод з одночасним уникненням витрат на їх очищення.

Слід зазначити, що окрім трьох розглянутих основних технологічних схем, існують більш складні схеми освоєння тепла шахтних вод, які, незважаючи на деякі переваги, мають обмежене поширення внаслідок необхідності проведення великої кількості робіт для їх встановлення та експлуатації.

1. A. Matas‑Escamilla, R. Álvarez, F. García‑Carro et al., Mine water as a source of energy: an application in a coalfield in Laciana Valley, Clean Technologies and Environmental Policy, 25, 2747–2760 (2023). https://doi.org/10.1007/s10098-023-02526-y
2. A. Hall, J. Scott, H. Shang, Geothermal energy recovery fromunder ground mines, *RSER*, **15**, 916–924 (2011). http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.007
3. D. Banks, P. Younger, R.-T. Arnesen et al., Mine-water chemistry : the good, the bad and the ugly, *Environ. Geol*, **32** (3), 157–174 (1997).
4. D. Banks, P. Younger, R.-T. Arnesen et al., Mine-water chemistry : the good, the bad and the ugly, Environ. Geol, 32 (3), 157–174 (1997).
5. J. Luo, Experimental measurements and numerical modeling of a Ground Source Heat Pump system, Universität Erlangen-Nürnberg, (2014).

Technological analysis of geothermal systems for heat extraction from mine water

O. Inkin[a,b1], N. Kalugina[b], Y. Khryplyvets [b]

[a]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[b]Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1]inkin.o.v@nmu.one

Geothermal systems for heat extraction from mine water are considered. A comparative analysis of open- and closed-loop schemes is carried out, highlighting their advantages and limitations. The potential of mine water as a source of thermal energy is demonstrated, taking into account operational and environmental factors.

Keywords: geothermal system, probe, mine workings, mine water, thermal energy.

Самонагрівання вуглепородних відвалів за умов обмеженого доступу атмосферного кисню

Л. І. Стефанович[1], Е. П. Фельдман

Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1] listef2591@ukr.net

Ключові слова: вуглепородний відвал, кінетика самонагрівання, обмежений доступ кисню, вигоряння вугільної складової відвалу.

Розглянуто процес самонагрівання нескінченного шару шахтної породи завтовшки h, верхня поверхня якого контактує з атмосферним повітрям навколишнього середовища та вдень прогрівається сонячним випромінюванням. Нижня поверхня контактує безпосередньо з ґрунтом (рис. 1).

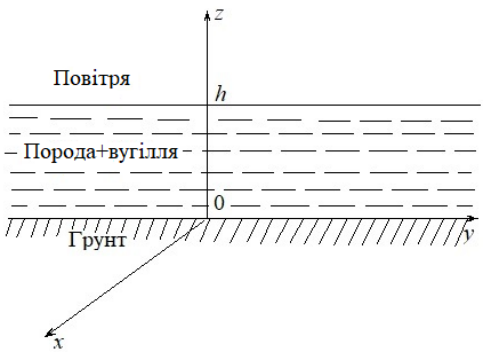


Рис. 1. Геометрія задачі. Тут h – товщина вуглепородного відвалу. У плоскості x0y відвал передбачається нескінченно довгим.

Досліджено кінетику самонагрівання вуглепородного відвалу (ВПВ) з перебігом часу у наближенні, коли єдиним механізмом перенесення повітря всередину відвалу є дифузія. Тепло у ВПВ виділяється в результаті екзотермічної хімічної реакції взаємодії кисню з вуглецем, що міститься у частинках вугілля відвалу. У температурному інтервалі від 0^0 до 150^0C вказана хімічна реакція є реакція першого порядку [1, 2], тобто. швидкість реакції прямо пропорційна об'ємній частині кисню (c):

$$dc/dt = -k[T(t)] \cdot c(t), \tag{1}$$

де $k[T(t)]$ – константа швидкості сорбції, яка нелінійним чином залежить від температури переважно за законом Арреніуса

$$k[T(t)] = \kappa_0 \exp[-E_a/RT(t)]. \tag{2}$$

Тут R - універсальна газова постійна $R = 8.31$ *Дж/(моль·К)*; E_a - енергія активації окиснення вугілля у повітрі (*Дж/моль*). Ми також врахували, що температура відвалу не є постійною величиною, тобто згодом змінюється як наслідок самонагрівання. Тут величина κ_0 має розмірність зворотнього часу.

За початкову температуру ВПВ ми приймаємо температуру навколишнього середовища, вважаючи, що вона дорівнює T_0=300 *K*. На рис.2 представлено еволюцію середньої температури вглибині відвалу (в одиницях T_0) з перебігом часу для різних початкових концентрацій горючої компоненти.

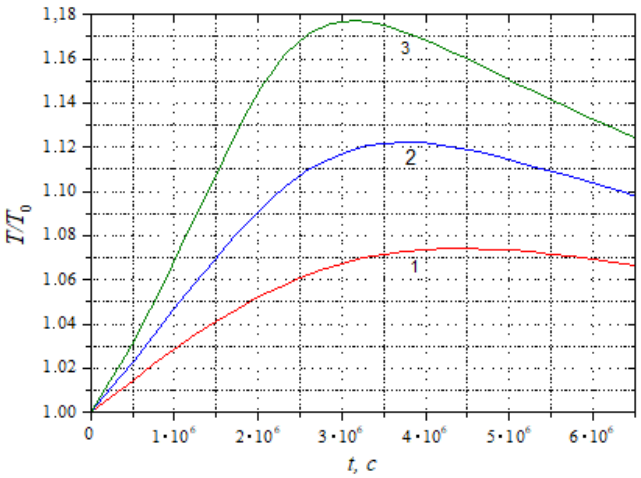


Рис. 2. Еволюція середньої температури вглибині відвалу (в одиницях T_0) з перебігом часу. Криві 1 – 3 відповідають початковим концентраціям вугільної компоненти 4%, 6% та 8%.

1. В.С. Веселовский, Н.Д. Алексеева, Л.П. Виноградова. *Самовозгорание промышленных материалов*, Наука, Москва (1964).
2. В.С. Веселовский, Л.П. Виноградова, Г.Л. Орлеанская и др. (1972). *Физические основы самовозгорания угля и руд*, Наука, Москва (1972).

Self-heating coal dumps under conditions of difficult access of atmospheric oxygen

L. Stefanovich[a1], E. Feldman[a]

[a]Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] listef2591@ukr.net

The theory of self-heating of coal heaps, despite its approximate nature, shows that the process of increasing the temperature of coal heaps due to oxidation in the air atmosphere has a universal nature, regardless of the content of the coal component in the range of 4% - 8%. It consists of two main stages: the first stage is rapid self-heating of the waste heat to the maximum value. However, due to the limited supply of oxygen inside the heap from the ambient air, self-ignition of the heap does not occur. After passing the temperature maximum, the second, slower stage occurs, which consists in cooling the coal mass.

Keywords: coal-bearing dump, self-heating kinetics, limited oxygen access, burnout of the coal component of the dump.

Зональна дезінтеграція- причини, структура та розвиток

С. В. Тинина[1].

Інститут Геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1]haratonroots@gmail.com

Ключові слова: Зональна дезінтеграція, породний масив, блокова структура, розподіл напружень, форма поверхні торця.

Явище зональної дезінтеграції (ЗДІ) породного масиву було вперше детально описане у 1989 р **Error! Reference source not found.**.

Воно полягає в тому, що при проведенні робіт у масиві гірських порід навколо виробок утворюються структури з послідовно сильною та слабкою порушеністю. (Рис.1).

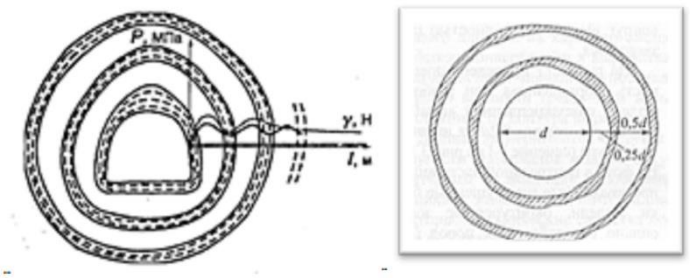


Рис 1. – Структура ЗДІ по Шемякину Е.І., Фісенко Г.Л та ін.

В період 2005-2025 рр. у Інституті геотехнічної механіки ім. Полякова НАН України проведено ряд досліджень які розширюють уявлення це явище. У результаті проведених досліджень розроблено окрему теорію про структуру ЗДІ **Error! Reference source not found.**, природу формування, та причини її виникнення (Рис.2).

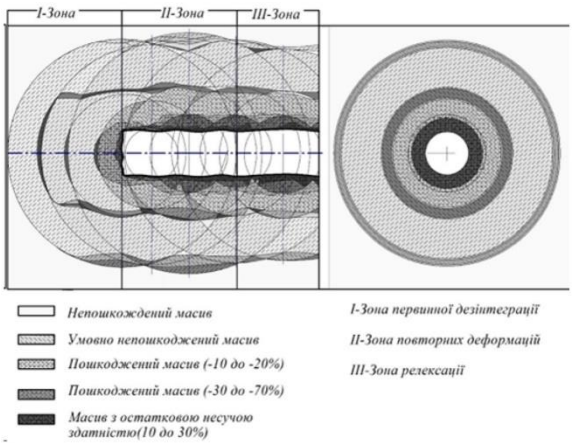


Рисунок 2. Структурна схема ЗДІ за теорією Тинини С.В. **Error! Reference source not found.**

Основою цієї теорії стало дослідження впливу форми торця виробки на формування та розподіл напружень навколо неї **Error! Reference source not found.**, щ о є причиною формування та розвитку структури ЗДІ та типу блокових структур з яких навколо виробки вона складається. (Рис. 3).

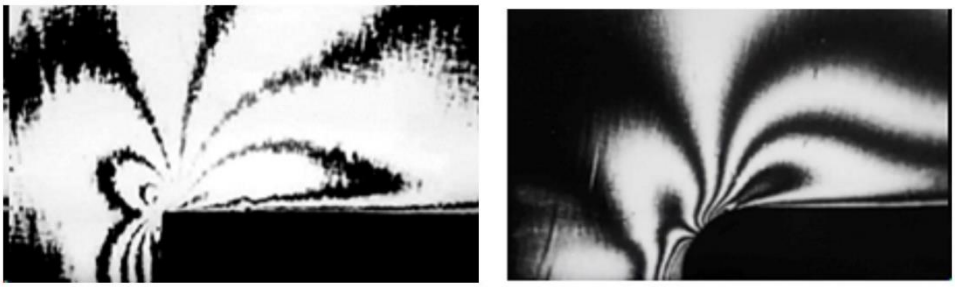


Рис. 3.- Картина розподілу напружень навколо плоскою та сферичною торця виробки

Добре встановлено, що найбільша щільність напружень саме у торці виробки, а не на її бокові поверхні. Найконцентрованішим виявилася пласка форма поверхні торця виробки, особливо у містах контакту торця з боковою поверхнею. Найменш напруженою є сферична поверхня. Вздовж її поверхні відбувається біль плавний перерозподіл напружень, а їх найбільша концентрація формується що найближче до центру сфери.

Так було доведено, що форми торця виробки та способи його формування, гладкість бокової поверхні та швидкість ведення робіт визначають особливості розвитку ЗДІ та стійкість блокових структур з яких вона формується.

1. Е. И. Шемякин, Г. Л. Фисенко, М. В. Курленя, В. Н. Опарин и др., *Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Ч. I (№ 3, 1986); Ч. II: Разрушение горных пород на моделях из эквивалентных материалов* (№ 4, 1986); Ч. III: Теоретические представления (№ 1, 1987); Ч. IV: Практические приложения (№ 4, 1989), ФТПРПИ.
2. Е. И. Шемякин, Г. Л. Фисенко, М. В. Курленя, В. Н. Опарин и др., *Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок*, ДАН СССР, Т. 289, № 5 (1986).
3. Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин и М. А. Розенбаум, *Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок*, Открытие № 400 СССР, Опубл. в БИ, № 1 (1992).
4. С.В. Тинина, І.І. Чоботько, *Про структуру зональної дезінтеграції гірничих порід,* Физико-технические проблемы горного производства: Сб. научн. тр. Вип. 23 (2021).
5. С.В. Тынына, Л.Д. Шматовский, И.А. Сапунова, М.С. Зайцев, О.И. Ананьева *Исследование армопородных оболочек для повышения стойкости выработок*, Днепр: Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр., – Вып. 129, (2016).
6. Тинина С.В. *Про стійкість гірничих виробок, що підтримуються армопородними оболонками, в напруженому породному масиві*, Физико-технические проблемы горного производства: Сб. научн. тр. Вип. 23, (2021)

7. Тинина С.В. І.І. Чоботько, Г.М. Шевельова *Перспективи розвитку теорії створення несучих армопородних оболонок*, Дніпро, Геотехнічна механіка. Межвід. сб. науч. тр., ІГТМ им. М.С. Полякова НАН України. Вип. 157, (2021).

Zonal Disintegration: Causes, Structure, and Development. (Times New Roman, Bold, 11 pt)

S. Tynyna [1]

M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] haritonrots@gmail.com

The influence of the face surface shape during the development of zonal disintegration of the rock mass around mine workings is considered as one of the key factors. It is shown that the surface shape significantly affects the stress distribution and its concentration near the surface. It was established that the highest stress density is observed specifically with a flat shape of the working face, particularly at the points of contact between the face and the sidewall. The spherical surface is the least stressed. Along this surface, a smoother stress redistribution occurs, and their highest concentration is formed closest to the center of the sphere. It is substantiated that the shape of the working face and the methods of its formation, the smoothness of the sidewall surface, and the speed of operations determine the patterns of zonal disintegration development and the stability of the block structures from which it is formed.

Keywords:. Zonal disintegration, rock mass, block structure, stress distribution, face surface shape.

Шляхи підвищення міцності і довговічності гірничого обладнання

А. П. Мухачев, В. М. Яковлєв, В. Г. Шевченко, Д. О. Єлатонцев

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

map45@ukr.net

Ключові слова: міцність і довговічність, гірниче обладнання, високопрочний чавун, мелючі кулі, зносостійкість, легування, рідкісноземельні елементи.

Уранові руди України залягають у гранітних породах із твердістю за Протод'яконовим до 20 одиниць (досягаючи 32), тому основним способом їх розробки є камерний. Сьогодні для видобутку уранової руди використовуються вибухові речовини типу «українніт», які закладаються в свердловини висотою до 2 м. Буріння свердловин здійснюється інструментом на основі сплаву «побідит». Витрата інструменту на буріння свердловини досить велика – одна коронка на 3 см проходки, тому буріння на глибину 2 м може тривати до двох місяців із великими енергетичними та трудовими витратами. Розв'язати проблему могли б нові ультратверді матеріали зі структурою алмазу. Враховуючи стратегічну цінність урану для енергетики України, ця проблема залишатиметься актуальною в найближчому десятилітті.

Актуальною проблемою є застосування виробів із високопрочного чавуну в технології видобутку рудної сировини. Процеси подрібнення руд і концентратів різного мінералогічного складу залишаються найбільш трудомісткими у виробництвах урану, цирконію, титану та рідкісноземельних елементів (РЗЕ). Тонке подрібнення уранової руди до класу –74 мм пов'язане з підвищеним руйнуванням мелючих тіл – куль діаметром 20–60 мм. Швидке зношування куль призводить до погіршення якості продукту та скорочення продуктивності кульових млинів. Твердість куль на поверхні повинна бути не більше 55 HRC. З цією метою використовуються кулі зі сталі, легованої хромом, марганцем, вуглецем і кремнієм. Висока твердість та зносостійкість матеріалу досягається термообробкою – загартуванням і відпуском. Легування сприяє досягненню однорідності механічних властивостей в об'ємі кулі. Сучасний метод отримання куль – гаряче штампування, яке забезпечує більш щільну та однорідну структуру без пор, що підвищує ударну стійкість і довговічність порівняно з литими кулями.

Більш раціональним способом отримання куль із підвищеною зносостійкістю четвертої та п'ятої груп твердості є легування чавуну рідкісноземельними елементами в поєднанні з ніобієм і бором. Це дає змогу підвищити твердість матеріалу до понад 60 одиниць і знизити витрату куль на 10 %. Використання високопрочного чавуну важливо не лише для куль подрібнення, а й для зносостійких змінних деталей гірничих машин (бульдозерів, екскаваторів тощо), які наразі застосовуються досить інтенсивно.

Необхідна межа міцності на розтягнення до 700 МПа (близька до сталі) досягається легуванням чавуну церієм. Вміст церію в концентратах рідкісноземельних елементів досягає 50 % за масою. Для легування достатньо вмісту Се не більше 0,3 %. Україна володіє запасами РЗЕ, які містяться у золошлакових відходах, фосфогіпсі та червоному шламі, та може організувати виробництво високопрочного чавуну з власної сировини.

Дуже перспективним є застосування високопрочного чавуну для виробництва насосів для перекачування абразивних середовищ, деталей для трубопроводів та арматури, термін служби яких досягає 100 років, а також елементів для тунелів і метробудівництва. Високопрочний кулястий чавун успішно замінює вуглецеву сталь у деталях зі змінними навантаженнями, в агресивних середовищах і для зниження маси конструкцій.

При виробництві 500 т сплаву РЗЕ обсяг випуску високопрочного чавуну може досягти 250 000 т. Так, світовий ринок високопрочного чавуну в 2023 році становив 28 млн. т, демонструючи стійку тенденцію зростання завдяки чудовому балансу властивостей і економічності цього матеріалу.

Ways to improve the strength and durability of mining equipment

A. P. Mukhachev, V. M. Yakovlyev, V. H. Shevchenko, D. O. Yelatontsev

M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

map45@ukr.net

The paper examines durability problems of mining equipment in Ukraine's uranium mining. Ores in granite with Protodyakonov hardness up to 32 are chamber mined. Boreholes are drilled with "Pobedit" tools for "Ukrainit" explosives but extreme wear extends drilling to two months. Ultrahard diamond materials could solve it. Rapid ball wear in mills for –74 μm grinding occurs. High-strength cast iron with rare-earth, niobium and boron alloying increases hardness above 60 and reduces consumption by 10%. Cerium ≤0.3% achieves 700 MPa. Ukraine can produce it from waste. Cast iron suits abrasive pumps, pipelines, tunnels and machines, replacing steel and lasting 100 years. 500 tonnes rare-earth alloy enables 250,000 tonnes cast iron. Global market was 28 million t in 2023 and is growing.

Keywords: strength and durability, mining equipment, high-strength cast iron, grinding balls, wear resistance, alloying, rare earth elements.

Про безпілотне машинне виймання залишкової руди з днищ блоків з торцевим випуском

В. М. Яковлєв, А. П. Мухачев, Д. О. Єлатонцев

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

rarogua@gmail.com

Ключові слова: підземний видобуток руди, вантажно-транспортно-відвалювальні машини, дистанційно кероване гірничодобувне обладнання, безпека оператора.

У гірничій справі давно існує проблемне питання повноти виймання залишкових запасів руди з днищ очисних блоків з торцевим машинним випуском. Поки виймання руди виконується з наповненого об'єму блоку, рудна маса створює природні відливи через завчасно спроектовані і створені заїзди в днище блока. Руда черпається погрузочно-доставочною машиною (ПДМ), керованою оператором за важелями машини, у безпечному просторі під'їзної виробки висотою 2,2-2,6 м. Але після виймання основних об'ємів блоку відливи руди поступово зменшуються, затягуючись у простір за лобовиною заїзду в блок. Заїжджати у відкритий простір камери блоку оператору категорично заборонено: існує загроза падіння бутів з потолочини блоку (висота 40–60 м). З цієї причини на деяких українських шахтах залишкові запаси відбитої руди не забираються, а списуються у втрати, як такі, що неможливо взяти. У вартісному вимірі втрати складають десятки мільйонів гривень тільки у втраті корисної копалини з одного очисного блоку.

Проте, крім старого дідівського способу взяти руду на «скрепер», існує сучасний швидкісний і безпечний спосіб: оператор покидає кабіну з дистанційним пультом управління в руках і відправляє ПДМ у камеру без пілота. Рухаючись 3–6 м вперед з опущеним на днище ківшем, машина наповнює і підіймає ківш з рудою і здає назад до оператора: руда, яку «неможливо взяти», а точніше, до якої заборонено наближатись гірнику, вже у безпечному місці, біля оператора, вся операція займає 15–20 с.

Вартість корисної копалини в залишкових об'ємах на днищах блоків, наприклад, урану, складає від 25 до 50 млн. грн. (в цінах урано-оксидного концентрату на 2020 р.). Вартість однієї машини LH-203 "Sandvic" стандартної комплектації становить 318 тис. євро (з ПДВ), що становить близько 15,9 млн. грн. Вартість цієї ж машини з виносним дистанційним пультом керування дорожча на 25 тис. євро (близько 1,25 млн. грн.), тобто загальна вартість ПДМ, обладнаної дистанційним керуванням складе близько 17,15 млн. грн. Не складно помітити, що вартість такої необхідної ПДМ з дистанційним керуванням повністю відшкодується вартістю вибраної руди навіть з одного середнього блоку (близько 6 тис. т. руди).

На виконання заходів з ліквідації недопустимих втрат відбитої руди, яка залишається на днищах очисних блоків пропонується:

1. Рекомендувати для кожної рудної шахти, яка застосовує системи розробки з машинним торцевим випуском, придбання погрузочно-доставочних машин типу ST-2D "Atlas Copco" або LH-203 "Sandvic" з ківшем об'ємом 2,0 м^3 з пультом дистанційного керування.

2. Рекомендувати гірничо-технічним інспекціям суворо наглядати за необґрунтованим списанням готових до виймання залишкових обсягів руди на днищах блоків: адже крім втрати вартості самих корисних копалин на їх розвідування, проходку виробок, буріння відбійних віял свердловин, вибухові роботи шахтою вже були витрачені значні кошти.

On unmanned machine extraction of residual ore from the bottoms of blocks with end release

V. M. Yakovlyev, A. P. Mukhachev, D. O. Yelatontsev

M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

rarogua@gmail.com

This paper addresses the problem of incomplete recovery of residual ore from the bottoms of stoping blocks in underground mining with drawpoint extraction. It is shown that after the main ore mass is removed, natural ore flow decreases, leading to significant losses. A safe and efficient method based on the use of remotely operated load–haul–dump (LHD) machines is proposed. The approach eliminates the need for operator presence in hazardous zones and enables extraction of otherwise inaccessible ore. The operational cycle and performance parameters of remote-controlled LHDs are analyzed. Economic evaluation demonstrates that the additional investment is fully compensated by the value of recovered ore from a single block. The proposed solution improves both resource recovery and occupational safety.

Keywords: underground ore recovery, load-haul-dump machines, remote-controlled mining equipment, operator safety.

Оптимізація буріння свердловин

О.М. Молчанов, С.П. Мінєєв, В.Ф. Ганкевич, Н.О. Калугіна, В.Я. Киба

Інститут геотехнічної механіки НАН України, Дніпро, Україна

Ключові слова: буріння, свердловини, видобуток, корисні копалини, руйнування.

Відомо. що однією з найскладніших робіт при видобутку корисних копалин є буріння свердловин у міцних гірських породах та безпека праці. Це пов'язано у першу чергу з роботою бурового інструмента, який працює в надважких умовах на межі міцності та витривалості його матеріалу. Одним з вирішальних факторів зносу або ламання бурових доліт є зворотна дія породи забою, яка, наприклад, для шарошкових доліт може бути в 3-4 рази більшою від зусилля подачі бурового долота, а висота відскоку долота від забою може досягати 50-80 мм.

Дослідження показали, що під час буріння міцних порід виникають осьові та тангенціальні коливання. При бурінні шарошковими та корончатими долотами виникають переважно осьові, а при бурінні ріжучим інструментом−тангенціальні коливання. Обидва види коливань передаються від бурового долота на буровий постав і буровий станок, що призводить до їх передчасного зносу та руйнування. Частота коливань. може бути в 3 рази вище частоти обертання бурового долота. Ефективне гасіння коливань дозволяє:

−збільшити термін використання бурового обладнання;

−покращити якість буріння;

−підвищити продуктивності буріння;

−покращити умови праці та безпеку робітників.

Для боротьби із шкідливими механічними коливаннями бурового інструмента і бурового поставу використовуються механічні, гідравлічні або пневматичні амортизатори, які встановлюються між буровим інструментом і буровим поставом.

Найбільш розповсюдженими є механічні амортизатори, у яких використовують пружні елементи, такі як циліндричні корпуси з прорізами з пружних марок сталі, різні види пружин, вироби з гуми достатньо високої жорсткості. Їх використання дозволяє підвищити швидкість буріння на 15-25% і працездатність доліт на 20-40%. Разом з цим механічні амортизатори мають ряд суттєвих недоліків: зворотна дія від поверхні забою до бурового долота передається у вигляді коротких, але значних імпульсів сили, які у подальшому передаються на буровий постав і буровий верстат, створюючи осьові коливання. Руйнуюча дія на буровий інструмент і бурове обладнання обумовлено саме коротким часом передачі значного імпульсу від забою до інструмента. Механічні амортизатори з пружним елементом у вигляді пружини підвищують час дії ударного навантаження, розтягують імпульс з боку забою на долото у часі й тим самим зменшують його шкідливий вплив, але зменшують його величину тільки частково на розмір втрат енергії від нагріву пружини або гуми при їх стисненні. Більша частина величини імпульсу, хоч і за довший час усе ж таки передається на буровий став і буровий станок, що може перевищувати номінальні зусилля у 3-3,5 рази.

Амортизатори з пружними елементами у вигляді гуми не отримали широкого розповсюдження, тому що в результаті частого змінного навантаження швидко втрачають пружні властивості та руйнуються.

Універсальний гідропневмоамортизатор має такі переваги у порівняно з відомими амортизаторами:

1. Універсальність, тобто можливість працювати на рідині чи газі, які використовують для видалення продуктів руйнування при бурінні, а також можливість гасити як осьові, так і тангенціальні коливання, що дає можливість його використання для всіх видів буріння і бурових доліт, тоді як відомі амортизатори, спеціалізовані на різні види буріння і їх конструкції, відрізняються.
2. Значне зменшення величини імпульсу реакції породи на буровий інструмент, буровий став і буровий станок за рахунок того, що гасіння імпульсу відбувається в усьому об'ємі рідини чи газу, який знаходиться у буровому поставі, і трубопроводах аж до насосу чи компресору.
3. Забезпечення постійного рівня параметрів роботи. У відомих гідро або пневмоамортизаторів по мірі зносу ущільнень, як зазначалось раніше, зменшувалася працездатність за рахунок перетікання рідини чи газу з гальмівних камер. В розробленій конструкції універсального гідропневмоамортизатора гальмівні камери постійно поповнюються рідиною чи газом високого тиску з бурового ставу і магістралі подачі їх для видалення продуктів руйнування, що забезпечує роботу універсального гідропневмоамортизатора на однакових значеннях тиску рідини чи газу.

Таким чином, запропонований універсальний гідропневмоамортизатор дозволяє повністю гасити тангенціальні коливання та зменшити осьові коливання у 1,7-2 рази, що зменшить запас міцності бурового обладнання, зменшить його масу, термін дії та взагалі вартість бурових робіт.

1. Патент 158304 Україна, МПК E21 B 17/04 Універсальний гідропневмоамортизатор / В.Є. Антончик, В.Ф. Ганкевич, В.Я. Кіба. - Опубл. 22.01.2025, БИ №4.

Optimization of well drilling

O.M. Molchanov[1], S.P. Mineev[1], V.F. Hankevich[1], N.O. Kalugina[1], V.Ya. Kyba[1]

Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St., 49000, Dnipro, Ukraine

It is known that one of the most difficult operations in the extraction of minerals is drilling wells in solid rocks and occupational safety. This is primarily due to the operation of the drilling tool, which operates in extremely difficult conditions at the limit of strength and endurance of its material. Studies have shown that when drilling hard rocks, axial and tangential vibrations occur. To combat harmful mechanical vibrations of the drilling tool and the drill pipe, mechanical, hydraulic or pneumatic shock absorbers are used, which are installed between the drilling tool and the drill pipe.

Keywords: drilling, wells, mining, minerals, destruction.

Patent 158304 Ukraine, MPK E21 V 17/04 Universal hydropneumatic shock absorber / V.E. Antonchyk, V.F. Hankevich, V.Ya. Kiba. - Publ. 01/22/2025, BI No. 4.

Геомеханічна стійкість верхової дамби хвостосховища

В. Тимощук[а], Л. Рудаков[б], О. Орлінська[в], Д. Пікареня[б1]

[а] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[б] Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна
[в] Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1] pikarenyads@gmail.com)

Для оцінки геомеханічної стійкості грунтової дамби на хвостосховищі радіоактивних відходів використано реалізовану на базі методу кінцевих елементів деформаційну пружно-пластичну модель середовища. Вихідними даними слугували результати геофізичних досліджень методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі, завдяки яким встановлені зони обводнення в тілі дамби та рівень грунтових вод. Моделювання по двом профілям показало зниження стійкості низового укосу ґрунтової дамби, яка характеризується коефіцієнтами запасу стійкості відповідно k_s = 1,202 і k_s = 1,704. В умовах динамічного впливу для профілю 1, коефіцієнт стійкості якого менше нормативного γ_n = 1,25, можуть призвести до виникнення аварійної ситуації, тому необхідно розробити заходи щодо зміцнення стійкості верхової дамби першої секції хвостосховища «Сухачівське».

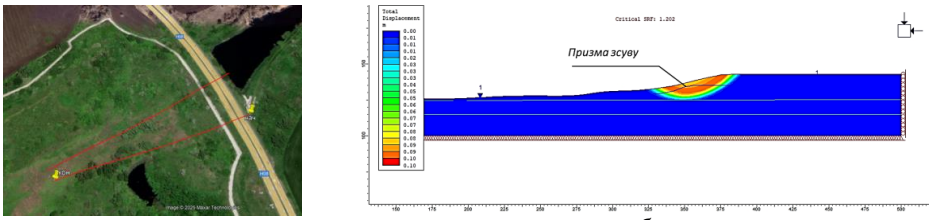
Ключові слова: грунтова дамба, геомеханічна стійкість, запас стійкості, моделювання, пружно-пластична модель середовища

Вступ. Хвостосховище «Сухачівське» яружно-балочного типу складається з двох секцій, розташованих послідовно одна за одною. Загальна його довжина 4,8 км. Верхова дамба ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції являє собою насип автодороги у верхів'ї першої секції. По гребеню насипу проходить автомагістраль Дніпро-Кременчук з асфальтовим покриттям. Ширина дороги становить 40 м, загальна ширина гребеня насипу – 74 м Водопропускних конструкцій в основі насипу не має. З північної частини розташоване озеро-ставок. Південна частина дамби складена лесоподібними суглинками. Наявність ставка-накопичувача може створювати небезпеку руйнування цієї дамби та розкриттю завдяки проходженню хвилі прориву захисного шару, що перекриває радіоактивні відходи першої секції хвостосховища, тому була виконана геомеханічна оцінка її стійкості.

Методика досліджень. Спочатку для визначення обводнених зон і ділянок фільтрації води через тіло дамби, а також встановлення рівня грунтових вод проведені геофізичні роботи [1] методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ), в результаті яких зафіксовано положення зон обводнення ґрунтової товщі в межах низового укосу дамби ставка-накопичувача та отримані інші дані, що покладені в подальші дослідження. Оцінка геомеханічної стійкості дамби ставка-накопичувача проводилася з використанням деформаційної пружно-пластичної моделі середовища, яка реалізована на базі методу кінцевих елементів [2, 3]. Розрахунки виконувалися в програмі Phase 2 для двох профілів, положення яких відповідає характерним ділянкам дамби (рис. 1-*а*).

При виборі розрахункових профілів враховувалось їх положення відносно чаші хвостосховища, вплив якого визначає положення гідравлічної депресії у низовому

укосі дамби, і, як наслідок, геомеханічної стійкість самої дамби. Відповідно до положення зон обводнення, виявлених геофізичними роботами, на профілях задано підвищене положення рівнів ґрунтових вод, що може бути одним із чинників розвитку суфозійних процесів і, як наслідок, порушення стійкості низового укосу дамби ставка-накопичувача. Динамічні впливи від руху автомобільного транспорту по верховій дамбі враховувалися завдяки залученню даних щодо зниження параметрів міцності супіщаних і суглинистих ґрунтів на стійкість штучного ґрунтового масиву згідно з результатами досліджень, наведених у [4].



а *б*

Рис. 1. До оцінки геомеханічної стійкості ґрунтової дамби: *а* – схема розташування розрахункових профілів на ділянці дамби ставка-накопичувача хвостосховища «Сухачівське»; *б* – характер зсувного деформування низового укосу дамби ставка-накопичувача в умовах дії динамічного навантаження, розрахунковий профіль 1-1 – k_s = 1,202.

Результати досліджень. Моделювання показують, що в умовах дії динамічних навантажень від руху наземного транспорту фіксується зниження стійкості низового укосу ґрунтової дамби, яка характеризується коефіцієнтами запасу стійкості відповідно k_s = 1,202 і k_s = 1,704 (рис. 1-*б*). Наявність достатнього навіть за умови обводнення верхньої частини укосу дамби ставка-накопичувача і динамічних навантажень запасу стійкості (окрім в умовах динамічного впливу для профілю 1, для якого коефіцієнт стійкості менше нормативного γ_n = 1,25) дозволяє розглядати у якості можливого фактору порушення існуючого стану ґрунтового масиву діяльність фільтраційних вод і пов'язані з ними прояви поверхневої суфозії.

Висновки. Небезпека появи та розвитку процесів, що можуть призвести до виникнення аварійної ситуації цілком реальна, тому необхідно розробити заходи щодо зміцнення стійкості верхової дамби першої секції хвостосховища «Сухачівське».

1. Orlinska, O., Pikarenia, D., Rudakov, L.**,** Hapich, H. Local and Regional Tectonic Influence of Territory on Geohazard of Dam of Radioactive Waste Tailings (Ukraine). GeoHazards *2026, 7(1), 18*, https://doi.org/10.3390/geohazards7010018

2. Duncan, J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *J. Geotechnical & Geoenvironmental Engineering.* 2000. С. 307–316.

3. Карпіловський В.С. Метод скінченних елементів і задачі теорії пружності. Київ: «Софія А», 2022. 275 с.

4. Шепель Н.М. Закономірності деформування геотехнічної системи «споруда – лесовий масив» в зоні дії динамічних навантажень: автореф. дис … канд. техн. наук: 05.15.09. – Дніпропетровськ, 2016. URL: https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/4896420a-2ed4-4348-bfed-55e435d4b27a/content (дата звернення 15.12.2025).

To assess the geomechanical stability of an earthen dam at a radioactive waste tailings pond, an elastic-plastic deformation model of the medium based on the finite element method was used. The input data consisted of the results of geophysical studies using the natural pulsed electromagnetic field of the Earth, which identified zones of water saturation within the dam body and the groundwater level. Simulation along two profiles revealed a decrease in the stability of the toe slope of the earthen dam, characterized by stability safety factors of $k_s = 1.202$ *and* $k_s = 1.704$*, respectively. Under dynamic loading conditions, Profile 1, whose stability coefficient is less than the standard value* $\gamma n = 1.25$*, could lead to an emergency situation; therefore, measures must be developed to strengthen the stability of the upstream slope of the first section of the Sukhachivske tailings pond.*

Keywords: earthen dam, geomechanical stability, safety factor, modeling, elastic-plastic model of the medium.

Оцінка ризиків руйнування складних геотехнічних систем: статистичний аналіз аварійності на хвостосховищах світу

О.В. Орлінська[а], Д.В. Рудаков[б], Д.С. Пікареня[в], Л.М. Рудаков[в1]

[а] Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[б] НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України, Дніпро, Україна

[в] Дніпровський державний аграрно-економічний університет МОН України, Дніпро, Україна

[1] rudakov.l.m@dsau.dp.ua

Сформований перелік містить детальну інформацію про 206 аварійних ситуацій. Дослідження охоплює тривалий часовий період з 1960 по 2025 рік. Для точного аналізу динаміки було відібрано 179 об'єктів із встановленим роком аварії Максимальне значення аварійності зафіксовано у 2025 році, коли сталося 10 великих інцидентів. Це безпосередньо пов'язано з інтенсивним розвитком гірничої промисловості та утворенням нових об'єктів. Протягом XX століття пік аварійності припав на період з 1970 по 1995 рік. Після цього періоду кількість інцидентів почала поступово зменшуватися. Позитивна тенденція пов'язана з введенням більш суворих стандартів безпеки. Також вплинуло згортання гірничого видобутку в ряді європейських країн. Важливим фактором стало впровадження способів видобутку, що виключають накопичення відходів на поверхні. Застосування закладення виробленого простору значно знижує потребу у великих хвостосховищах.

Ключові слова: хвостосховище, геотехнічна система, ризик руйнування, причина аварії, стійкість дамби, статистичний аналіз

Вступ. Огороджувальні дамби хвостосховищ належать до найбільш відповідальних споруд у складі гірничо-збагачувальних комплексів. Забезпечення їхньої надійності є критично важливим завданням для запобігання масштабним техногенним катастрофам. Рівень аварійності таких дамб значно вищий, ніж у традиційних ґрунтових водонапірних гребель. Традиційні греблі зазвичай будуються відразу на повну проектну висоту і працюють у стабільних режимах. Натомість будівництво огороджувальних споруд хвостосховищ виконується переважно поетапно, по мірі їх заповнення. Це зумовлює специфічний режим, за якого здійснюється одночасне будівництво та експлуатація об'єкта. У такому процесі фізико-механічні характеристики тіла дамби та її основи зазнають суттєвих змін. Подібна динаміка значно ускладнює забезпечення високих стандартів якості цих гідротехнічних споруд. Обмежена можливість вибору площі під хвостосховища змушує нарощувати їхню ємність за рахунок висоти підпірних споруд. Постійна зміна напружено-деформованого стану конструкцій суттєво підвищує ймовірність виникнення аварій – часткового або повного руйнування, що супроводжується витоком хвостів. Відмінності в конструктивних рішеннях та виборі матеріалів створюють унікальні виклики для механіки деформованих тіл [1].

Виклад основного матеріалу. Вивченням питань безпечної експлуатації хвостосховищ займаються декілька провідних світових інтернет-порталів. Ключовими джерелами є Міжнародна комісія по великим греблям (ICOLD) [2] та Глобальний портал хвостосховищ [3]. Також важливу інформацію надають ресурси Tailings.info та WISE Uranium Project [4]. Відомості про інциденти збиралися з урахуванням численних наукових та архівних джерел. Сформований перелік містить детальну

інформацію про 206 аварійних ситуацій. Дослідження охоплює тривалий часовий період з 1960 по 2025 рік (рис.1). Статистична вибірка включає дані з 29 різних країн світу. Кожен випадок ідентифікований за типом: руйнування, нештатна ситуація або порушення режиму вод. Для точного аналізу динаміки було відібрано 179 об'єктів із встановленим роком аварії. Майже 75% усіх випадків зосереджені у п’яти країнах: США, Чилі, Канаді, Великій Британії та ПАР. Така концентрація пояснюється, ймовірно, повнішим обліком аварій у цих регіонах [5, 6-8].

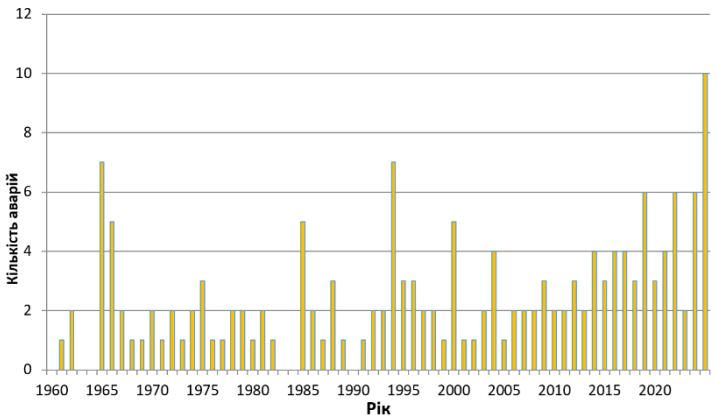


Рис. 1. Кількість аварій на хвостосховищах, що сталися за період із 1960 по 2025 роки.

Частота аварій демонструє різке зростання, починаючи з середини 1960-х років. Максимальне значення аварійності зафіксовано у 2025 році, коли сталося 10 великих інцидентів. Це безпосередньо пов’язано з інтенсивним розвитком гірничої промисловості та утворенням нових об'єктів. Протягом XX століття пік аварійності припав на період з 1970 по 1995 рік. Після цього періоду кількість інцидентів почала поступово зменшуватися. Позитивна тенденція пов’язана з введенням більш суворих стандартів безпеки. Також вплинуло згортання гірничого видобутку в ряді європейських країн. Важливим фактором стало впровадження способів видобутку, що виключають накопичення відходів на поверхні. Застосування закладення виробленого простору значно знижує потребу у великих хвостосховищах.

Аналіз дозволив ранжувати причини аварій за їхнім пріоритетом та частотою прояву. Провідним фактором руйнування визнано порушення стійкості схилу дамби. Наступними за вагомістю є сейсмічні прояви, що дестабілізують складні системи. Переповнення проектної ємності часто стає причиною неконтрольованих проривів. Порушення основи та втрата структурної цілісності також призводять до відмов. Процеси фільтрації та ерозії поступово руйнують внутрішню структуру споруд. Окремим фактором є просідання конструкцій внаслідок ведення підземних гірничих робіт. Для активних об'єктів фактор стійкості схилу спричинив майже третину всіх аварій. На неактивних об’єктах найбільш небезпечними є сейсмічні явища та переповнення ємності. Ці фактори відповідальні за 25-30% аварій на законсервованих хвостосховищах.

Тип огороджувальної споруди має вирішальне значення для оцінки ризику. Найвищий ризик зафіксовано для намивних дамб, що споруджуються «вгору за течією». На цей тип конструкцій припадає 51,2% усіх аварій з ідентифікованим типом

греблі. Геометричні параметри, зокрема висота, також є критичними факторами. Близько 90% аварій стаються на дамбах заввишки до 50 метрів. Натомість при висоті понад 100 метрів цей показник становить лише 2%. Найбільш вразливими виявилися споруди висотою від 10 до 20 метрів — на них припадає 28% інцидентів. Споруди висотою до 10 метрів становлять 21% відмов, а від 20 до 30 метрів — 20%. Об'єм закладованих хвостів безпосередньо впливає на масштаби катастрофи при прориві. Встановлено функціональні зв'язки між об'ємом накопичених хвостів та об'ємом їх виливу.

Оцінка рівня безпеки повинна враховувати гідрологічні та гідрогеологічні явища. Необхідність постійного контролю стану хвостосховищ закріплена законодавством України [1, 9]. Державна система моніторингу довкілля передбачає збирання та аналіз інформації про стан об'єктів. Суб'єктами цього процесу є профільні міністерства та самі підприємства-надрокористувачі. Моніторинг регламентується Положенням [9], і має включати як візуальні, так і інструментальні спостереження [9]. До візуальних належить контроль укосів, берм та гребеня дамб на наявність тріщин і просідань. Особлива увага приділяється стану дренажних пристроїв та водоскидних споруд. Важливим є нагляд за цілісністю контрольно-вимірювальної апаратури. Сучасні інструментальні спостереження використовують неруйнівні методи діагностики. Вони дозволяють виявляти приховані деформації елементів конструкції.

Висновки. Системний механіко-статистичний аналіз підтверджує, що стійкість намивних дамб є критичним вузлом у безпеці геотехнічних систем. Законодавство України вже зараз пропонує механізми для вирішення питань техногенної безпеки, хоча вони часто ігноруються на практиці. Впровадження вимог європейських Директив щодо управління відходами є єдиним шляхом мінімізації ризиків для людини та довкілля. Системний моніторинг фізико-механічних полів залишається основою для забезпечення довготривалої стійкості хвостосховищ. Отримані результати можуть бути використані для розробки нових моделей прогнозування стану складних деформівних конструкцій.

1. Рудаков. Д.В. Безпека хвостосховищ: Конспект лекцій. Дніпро НТУ «ДП», 2024. 90 с.
2. ICOLD. Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. Bulletin 121. – Paris, France: United Nations Environmental Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) and International Commission on Large Dams (ICOLD). 2001. 144 c. URL: https://www.icoldchile.cl/boletines/121.pdf
3. 3 Global Tailings Portal. URL: https://tailing.grida.no/#header
4. Chronology of major tailings dam failures. (from 1960). (last updated 24 Nov 2025). URL: https://www.wise-uranium.org/mdaf.html
5. Радчук О., Махінько А. Аварії на огороджувальних спорудах хвостосховищ: аналіз статистичних даних. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини,* 2024. Вип. № 28. С. 183–191.
6. Piciullo L. A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*. 2022. №303:106657. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657
7. Tailings.info. URL: https://tailings.info/storage/containment.htm

8. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=
9. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля: Постанова від 30.03.1998 № 391. Дата початку дії 26. 09.2024 р. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=52205

The compiled list contains detailed information on 206 accident scenarios. The study covers a long time period from 1960 to 2025. For an accurate analysis of trends, 179 sites with a recorded year of the accident were selected. The highest accident rate was recorded in 2025, when 10 major incidents occurred. This is directly linked to the intensive development of the mining industry and the establishment of new facilities. During the 20th century, the peak in accident rates occurred between 1970 and 1995. After this period, the number of incidents began to gradually decrease. This positive trend is linked to the introduction of stricter safety standards. The decline in mining operations in several European countries also played a role. An important factor was the adoption of mining methods that eliminate the accumulation of waste on the surface. The use of backfilling of mined-out spaces significantly reduces the need for large tailings ponds.

Keywords: tailings pond, geotechnical system, risk of failure, cause of failure, dam stability, statistical analysis.

Визначення параметрів пульпоутворення шляхом модулювання руху розсипу безнапірною течією бінгамо-шведовського середовища

Є.В. Семененко[1], О.О. Медведєва

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1]evs_igtm@i.ua

Ключові слова: розсипи, гідромонітор, пульпоутворення, відвал, гідросуміш, концентрація.

Результати багаторічних досліджень фахівцями Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України режимів та параметрів роботи гідротранспортних комплексів Вільногірського гірничо-металургійного комбінату та Іршанського гірничо-збагачувального комбінату вказують на те, що ці технологічні об'єкти працюють у динамічно нестійкому режимі, який обумовлено коливаннями густини та витрати гідросуміші на вході в головний насос [1, 2]. Виникнення таких небажаних ситуації обумовлено особливістю процесу пульпоутворення (ПП) за допомогою гідромоніторів, який використовується на відкритих розробках розсипів [1, 2]. ПП є циклічним та здійснюється за наступним алгоритмом: спочатку виконується вруб або підрізування забою, потім, після його обвалення – розмивання обваленої частини породи, яка сповзає по похиленому жолобу або площині на грати зумпфа, де її розмив закінчується з залученням усіх наявних гідромоніторів. Після цього весь цикл повторюється. Така технологія характеризується нерівномірністю величин густини та об'ємної витрати гідросуміші, що надходить до зумпфа протягом кожного циклу. Відомі моделі ПП добре працюють на першому етапі процесу. Для другого етапу ПП авторами вперше створено математичну модель технологічної операції змиву струменями гідромоніторів матеріалу, що потрапив на майданчик після зсуву частини відвалу, яка описує рух по похилому каналу частини масиву, що посунулась схилом, по тонкому шару гідросуміші високої концентрації, який утворюється між нею та дном каналу з рідини, що подається гідромоніторами, й виступає в якості змазки з реологічними властивостями середовища Бінгамма-Шведова [1, 2]. Це дозволило вперше визначити витрати рідини, твердої фракції та гідросуміші, а також величину підвищення концентрації гідросуміші на другому етапі ПП. Зокрема модель ПП, що запропонована, на відміну від традиційної схеми розмиву, розглядає можливість направлення струменя гідромонітора вище ніж точка торкання поверхні майданчика розмиву з масивом розсипу (рис. 1), що створює додаткову можливість керування параметрами ПП. Для визначення висоти шару розсипу на майданчику для розмиву після обрушення основної частини відкосу, яка обумовлює параметри безнапірної течії середовища Бінгамма-Шведова [1, 2], було розглянуто закон збереження маси для об'ємів розсипу до та після обрушення, що дозволило отримати залежність цієї величини від умов ПП та висоти масиву, що руйнується. Розгляд цієї залежності сумісно з формулами для обчислення гідравлічних характеристик безнапірної течії середовища Бінгамма-Шведова [1, 2], дозволив отримати наступні рівняння для обчислення параметрів ПП:

$$Q_c = \frac{q}{2}\left(p-2+wH\right)^2\left(p-\frac{1}{2}+wH\right);\ Q_t = \frac{3q}{4}\left(p-2+wH\right)^2;\ Q_m = \frac{q}{2}\left(p-2+wH\right)^3;$$

$$C = 1-\frac{2Q_g}{q\left(p-1+wH\right)^3};\ Q_p = \frac{q}{2}\left(p-1+wH\right)^3 - Q_g;\ w = \frac{\rho_s g tg\varphi}{4{,}76s}\left(\sqrt{r}-1\right);\ k = \frac{2}{c}\frac{1-m'}{1-m};$$

$$p = \frac{1-k\varepsilon}{\sqrt{r}};\ q = \frac{\tau_0^3 B}{\mu\left(\rho_s g\sin\beta\right)^2};\ r = 1+k\left(\frac{1-z}{0{,}1c}ctg\varphi-1\right);\ \varepsilon = \frac{sc}{4\tau_0}\sin\beta;\ c = \frac{\sin^2\varphi}{\sin\left(\varphi-\beta\right)},$$

де Q_c – сумарна витрата гідросуміші; Q_t – витрата гідросуміші у вигляді недеформованого масиву; Q_m – витрата гідросуміші в тонкому рухому шарі; q – масштаб витрати; B – ширина низу насипного масиву; μ – ефективна в'язкість гідросуміші високої концентрації; β – кут нахилу дна каналу до обрії; τ_0 – початкове дотичне напруження гідросуміші високої концентрації; Q_g – витрата рідини крізь гідромонітор; C – об'ємна концентрація гідросуміші в тонкому рухому шарі; Q_p – витрати твердої фази гідросуміші в тонкому рухому шарі; H – висота масиву, що руйнується; φ – кут внутрішнього тертя матеріалу розсипу; s – коефіцієнт зціплення матеріалу розсипу; m – пористість відвалу; m' – пористість шару розсипу, що формується після обрушення на майданчику для розмиву; ρ_s – густина розсипу у відвалі; g – прискорення вільного падіння; z – параметр врубу, тобто відносна відстань точки торкання струменя гідромонітора з масивом розсипу від поверхні майданчика розмиву.

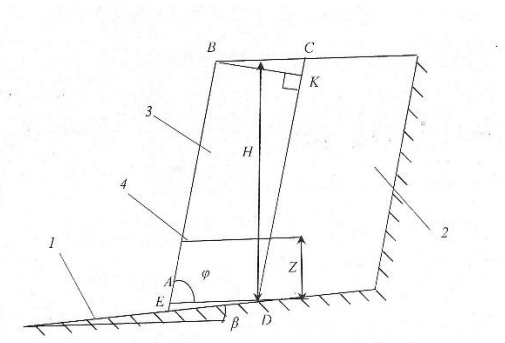


Рис. 1. Схем відкосу розсипу при розмиву струменем гідромонітору: 1 – дно майданчику для розмиву; 2 – масив розсипу; 3 – частина масиву розсипу, яка обрушається на майданчик для розмиву; 4 – лінія, вздовж якої діє струмінь гідромонітору.

1. Y. Semenenko, L. Yakubenko et al., Modelling Changes in Hydraulic Transport Parameters during Pulp Formation Using Hydromonitors, *Advances in Science and Technology*. ISSN: 1662-0356, Vol. 172, pp 29-44pp. DOI: 10.4028/p-k7VQ9c
2. Y. Semenenko, O. Medvedieva et al., **Calculation of the flow rate of the hydraulic mixture of the hydraulic transport complex by analytical method**, *Geo-Technical Mechanics*, Dnipro, 2025, Vol. 172, pp. 114 – 129. https://doi.org/10.15407/geotm2025.172.114.

Determination of slurry formation parameters by modeling placer movement as a free-surface flow of a bingham-shvedov fluid

Ye.V. Semenenko[a1], O.O. Medvedieva[a]

[a]M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine

[1]evs_igtm@i.ua

This abstract investigates the problem of dynamic instability in the hydrotransport systems of mining and processing plants, which is caused by the non-uniformity of the cyclic slurry formation process using hydraulic monitors. For the first time, the authors have developed a mathematical model for the second stage of slurry formation—the flushing of collapsed rock. This model describes the movement of the rock mass along an inclined channel over a thin layer of slurry, which acts as a grease with the rheological properties of a Bingham-Shvedov fluid. The proposed model allows for the calculation of component flow rates and slurry concentration, and also substantiates new methods for the spatial control of the hydraulic monitor jet to stabilize the entire technological process.

Keywords: placer deposits, hydraulic monitor, slurry formation, dump, slurry, concentration.

Ґрунтове середовище під поверхневим динамічним навантаженням

О. А. Савицький

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

savitskii@nas.gov.ua

Ключові слова: пружно-пластичний ґрунт, модель зміцнюваного ґрунту, напружено-деформований стан, граничні умови, статичні та динамічні навантаження, аналіз хвиль.

Оцінка динаміки систем фундамент-ґрунт враховує геометрію елементів фундаментів та ґрунтової основи, фізико-механічні властивості матеріалів, контактні умови та особливості динамічної взаємодії. Методики та приклади динамічних розрахунків плитних фундаментів з ґрунтовою основою наведено в [1], де використано метод ортогональних поліномів, базований на універсальному методі граничних інтегральних рівнянь та моделях ґрунту з лінійно-пружними реакціями, зокрема, моделлю пористопружного насиченого рідиною ґрунту M. A. Biot. Використання в таких методиках аналітичних розв'язків у крайових задачах для лінійних моделей ґрунтового середовища призводить до недостовірних результатів без врахування складної структури ґрунтової основи та нелінійної деформації ґрунту.

Наразі ефективно використовуються методи скінченних елементів (СЕ) чи скінченних об'ємів. В сучасні комп'ютерні розрахункові комплекси включено широкий набір ґрунтових моделей (ґрунти дисперсні та скельні, насичені рідиною та ін.), реалізованих в сполученні з моделями інженерних конструкцій та розрахункових схем спеціальних об'єктів для методів СЕ або чисельно-аналітичних. Ряд застосувань таких комплексів представлено в збірці доповідей XI української конференції механіки ґрунтів і геотехніки, наприклад в роботі [2] подано результати моделювання взаємодії ґрунтового середовища з захисною підземною спорудою при впливі вибуху або удару.

Метою даної роботи є вивчення програмних комплексів та використання моделей ґрунтового середовища, визначення зміни напружено-деформованого стану при динамічному навантаженні при взаємодії з фундаментами, при моделюванні коливань тестового штампу на ґрунтовій основі при гармонічному навантаженні заданої частоти. Звертаємось до використання методу СЕ для можливості ускладнення розрахункових схем відповідно до реальної структури ґрунтових основ та використання пружно-пластичних числових моделей ґрунтового середовища.

Моделювання коливань фундаментів на пружно-пластичній основі обмеженого розміру вимагає встановлення на межах області: спеціальних елементів для забезпечення пропуску хвиль, хоча б пружних, для заданого матеріалу; контактних умов для межі фундамент-основа. Для основи прийнято модель зміцнюваного ґрунту з урахуванням малих деформацій (hardening soil with small-strain stiffness) [3]. Модель вважається достовірною для задач динаміки фундаментів на ґрунтовій основі, заглиблених споруд, будівництва в умовах щільної міської забудови та ін. Переваги моделі наступні: враховується нелінійна залежність модуля зсуву від амплітуди деформації, збільшення жорсткості ґрунту при малих зсувних деформаціях; враховуються тиски та деформації (що включає історію навантаження); зменшуються

деформації на відстані від джерела динамічного навантаження. Модель придатна для піщаних та глинистих ґрунтів в звичайних умовах експлуатації споруд. Враховуються граничні умови на контакті ґрунтових товщ між собою, з фундаментом, підземними спорудами та ін. Основні розрахунки виконуються з застосування ітераційного методу Ньютона-Рафсона у часі.

Дослідження обмежено застосуванням бюджетних комп'ютерів, тому розглядаються одновимірні та 2D ґрунтові моделі, що дозволяє простіше виявляти відповідність результатів при аналізі розповсюдження хвиль та зон пластичної деформації.

1. Гомилко А. М., Савицкий О. А., Трофимчук А. Н. *Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики*, Наук. Думка, Київ (2016). Режим доступу: https://itgip.org/metody-superpoziczii-sobstvennyh-fun/
2. Носенко В., Нечипоренко Д. Оцінка впливу імпульсного навантаження спричиненого вибухом та ударом на заглиблені захисні споруди та ґрунтове середовище. *Основи та фундаменти*. 2025. Вип. 50. С. 200-209. DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.200-209
3. Benz, T., Schwab, R., & Vermeer, P. A. (2009). A small-strain constitutive model for soil stability analysis, *Bautechnik* (John Wiley & Sons, Ltd), Vol. 86, pp 16-27. DOI: 10.1002/BATE.200910038

Ground medium under dynamic surface loading

O. Savytskyi

Institute of Hydromechanics of National Academy of Sciences of Ukraine

savitskii@nas.gov.ua

The Finite Element Method is applied for the numerical solution of problems involving the dynamics of foundations on soil bases, embedded structures, construction in dense urban environments, etc. The Hardening Soil model with Small-Strain Stiffness accounts for the non-linear dependence of the shear modulus on strain amplitude and the increase in soil stiffness at small shear strains. It also considers pressure and deformation (including loading history) and reflects the attenuation of deformations with distance from the dynamic load source. The model is suitable for sandy and clayey soils under standard structural operating conditions. Boundary conditions at the interfaces between soil layers, as well as between soil and foundations or underground structures, are taken into account. The core calculations are performed using the Newton-Raphson iterative method in the time domain. The study is limited to the use of entry-level PC; therefore, 1D and 2D soil models are considered. This approach facilitates a more straightforward verification of results when analyzing wave propagation and plastic deformation zones.

Keywords: elastic-plastic soil, hardening soil model, stress-strain condition, boundary conditions, static and dynamic loads, wave propagation analysis.

Вплив режиму термічної обробки на величину границі міцності монокристалів алмазу типу Ib

М.О. Цисар[a1], Т.О. Псярнецька[a], А.В. Клисько[б], С.О. Виноградов[a]

[a]Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна
[б]Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна

[1] ts_maxim@ukr.net

Розглянуто вплив підвищеної температури на границю міцності алмазної сировини. Детальне вивчення технологічного процесу виробництва алмазних коронок інфільтраційним методом дозволило розробити аналог режиму термічної обробки. Встановлено мінімально можливу температуру обробки на рівні 1150°С. Часовий діапазон нагріву було обмежено 15хв, оскільки це відповідає часу просочення коронки середнього розміру. Результати дослідження двох груп зразків монокристалів типу Ib у вихідному стані та після термообробки показали тенденцію до збільшення міцності. Для оцінки термостабільності було використано такі характеристики як: коефіцієнт термостабільності та показник термостабільності. Результат обрахунків дозволив віднести досліджувані кристали до кристалів підвищеної термостабільності.

Ключові слова: границя міцності, буровий інструмент, монокристал алмазу, термічна обробка, технологічні етапи виготовлення.

Одна з найбільш розповсюдженими технологіями виробництва алмазних коронок є інфільтраційна. Ця технологія передбачає просочування розплавленим металом матриці. Процес складається з декількох етапів. На дно графітової форми в заздалегідь насвердлені отвори встановлюють крупні монокристали. На викладені алмази насипають шихту твердого сплаву. Сформовану коронку в графітовій прес-формі сушать при температурі 150…200ºС. Після чого починається спікання в електричній печі при температурі в 1150ºС. Це мінімальна оптимальна температура для розплаву та придання достатнього рівня текучості просочуючому металу (зв'язки). Час цього процесу в залежності від розміру коронки складає 15…45 хв. Однак висока температура може негативно впливати на вихідну алмазну сировину [1]. Процес інфільтрації представлено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1.

Технологічні режими гарячого пресування матриці імпрегнованої коронки

Час, хв.	1,0	1,5	2,0	3,0	3,3	6,0	6,5
Температура, ±20˚С	918	1096	1152	1152	1112	725	685
Тиск, МПа	3	6	10	10	15	15	-

В межах випробувань досліджували лише вплив температури тому відповідний тиск не відтворювався. Нагрів також проводився в більш повільному режимі, для зменшення ризику руйнування кристалів в наслідок температурного удару. Графік термообробки кристалів представлено на рис. 1. Для імітації впливу технологічного процесу в дослідженнях було використано лабораторну трубчасту піч марки СУОЛ 025 25/14 при температурі Т=1150°С [2].

Для використання в породоруйнівному інструменті велике значення має термостійкість кристалів алмазу, що можна охарактеризувати коефіцієнтом термостабільності (КТС):

$$K_{TC} = \frac{R_{BT}}{R_{BB}} \quad (1)$$

Проведені дослідження для двох груп зразків з п’яти кристалів в вихідному стані та після термообробки, згідно наведеного режиму, показали, що границя міцності кристалів типу Ib має значення 4535МПа та 6436 МПа відповідно. Таким чином величина КТС складає 1,41

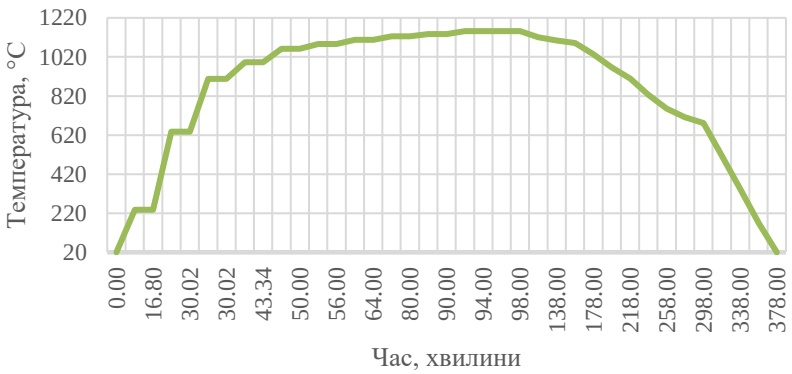


Рис. 1. Експериментальний режим термообробки із витримкою протягом 15 хв. при температурі 1150°С.

Якість кристалів оцінюється за показником термостабільності встановлюють категорію термостабільності монокристалів алмазу згідно ТУ У 28.5-05417377-075-2003. Термостабільності (ПТС) обчислюють за формулою:

$$П_{ТС} = К_{СТ} \cdot 10 \quad (2)$$

Таким чином ПТС складає 14, що характеризує даний тип кристалу як підвищеної стабільності.

1. Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Г.Д. Ильницкая, Р.К. Богданов, Г.Ф. Невструев, А.П. Закора, А.М. Исонкин, В.Н. Ткач, И.Н. Зайцева Повышение износостойкости бурового инструмента, оснащенного синтетическими алмазами, *Сверхтв. материалы*, № 1, 83–92 (2009). https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/63361
2. Н.В. Новиков, А.П. Закора, Г.Д. Ильницкая Исследование физико-химических характеристик крупных синтетических монокристаллов для бурового инструмента, *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр.*, №14, 249-254 (2011). https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/63244

The influence of the heat treatment regime on the ultimate strength of single crystals diamonds type Ib

M. Tsysar[a1], T. Psyarnetska[a], A. Klisko[b] , S Vinogradov[a]

[a]V.Bakul Institute for Superhard materials the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b] National Technical University of Ukraine “KPI”, Kyiv, Ukraine.

[1] ts_maxim@ukr.net

Determined the influence of high temperatures on the tensile strength of diamond. information about specific operations of the technological process of infiltration impregnation allowed the researcher to formulate a heat treatment regime. The minimum possible processing temperature was calculated to be 1150°C. The temperature treatment time is 15 minutes, exactly the amount needed to infiltrate a medium-sized drill bit. The tensile strength of type Ib diamonds after heat treatment was greater than that of diamonds in their original state. To assess quality the thermal stability coefficient and thermal stability index were used. The calculation results showed that the crystals possess increased thermal stability.

Keywords: ultimate strength, drilling tool, diamond single crystal, heat treatment, technological stages of manufacturing.

Експериментальні дослідження захисних елементів для сейсмо- та віброізоляції багатоповерхових будівель

М.І. Лисиця[1а], М.Г. Мар'єнков[б], Г.Н. Агальцова, А.В. Новікова[а], Н.М. Лисиця[в], Є.В. Калганков[а]

[а] Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна
[б] ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», Київ, Україна
[в] Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна

[1] vita.igtm@gmail.com

Ключові слова: віброізоляція, сейсмоізоляція, гумометалічний блок, сейсмоопора

Сейсмоізоляція – це перспективний напрямок, який розвивається в останні роки в багатьох країнах. У Японії, наприклад, збудовано вже понад тисячу сейсмоізольованих будівель та мостів. В останні роки дедалі більше сейсмоізольованих будівель, мостів та інших споруд зводяться в різних країнах на різних континентах. Також усе більше розгортається процес додавання сейсмо- та віброізоляції будівлям, які спочатку були побудовані без такого захисту (старовинні будівлі, культурні будівлі, пам'ятники тощо). Найбільше застосування сейсмоізоляція отримала у Японії, Китаї, США, Канаді, Вірменії, Новій Зеландії та Італії. Широке поширення при реконструкції та зведенні нових будівель набули системи сейсмоізоляції на основі гумометалевих сейсмоізолюючих блоків.

В Україні цей напрямок розвивається поки що повільними темпами, що пов'язано як з відсутністю необхідного фінансування, так і з необхідністю експериментальної перевірки систем сейсмоізоляції на натурних фрагментах будівель. Додаткові труднощі сворюються військовими діями. Також це додає ще й необхідність захисту будівель критичної інфраструктури, виробництв від ударних навантажень та вібрацій від вибухів.

Для практичного застосування систем сейсмоізоляції будівель Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України та ДП НДІБК було виконано експериментальні дослідження для обґрунтування параметрів гумометалевих сейсмоблоків, запатентовано їх конструкції, розроблено конструкторську документацію та виготовлено експериментальні зразки трьох типів гумометалевих сейсмозахисних блоків діаметром 400 мм і 500 мм та загальною висотою гумового шару 2×120 мм, 2×70 мм та 2×50 мм (рис. 1).



Рис. 1. Експериментальні зразки конструкцій гумометалевих сейсмоблоків

Для експериментального визначення фактичних жорстких та демпфуючих характеристик гумометалевих блоків були проведені в ДП НДІБК лабораторні випробування трьох типів розроблених конструкцій при статичних та динамічних навантаженнях відповідно до вимог Єврокоду 8 [1], європейського та міжнародного стандартів.

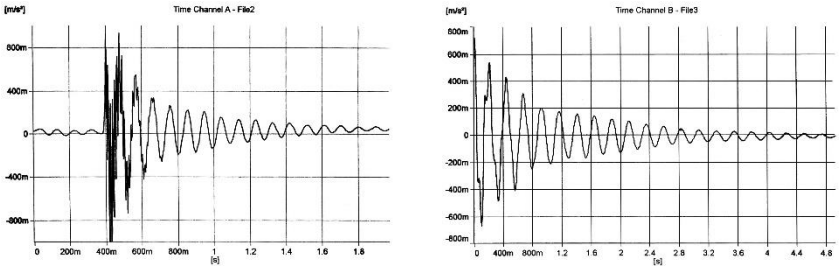
Випробування гумометалевих блоків проводилися у два етапи: спочатку динамічні – визначення частот коливань та демпфуючих характеристик опор, а потім статичні – визначення жорстких характеристик опор на стиск та зсув.

При динамічних випробуваннях на чотири однакові гумометалеві блоки встановлювався залізобетонний блок масою 5100 кг, 2850 кг та 3400 кг рис. 2. Коливання блоку в горизонтальній та вертикальній площинах задавалися спеціальним пристроєм та реєструвалися восьмиканальною системою сейсмомоніторингу та двоканальним спектроаналізатором марки 2148 фірми «Brüel & Kjær» (Данія).

На основі інструментальних записів сигналів віброприскорень при вільних коливаннях динамічної системи «бетонний блок – гумометалевий сейсмоблок» (рис. 3) визначено значення динамічної вертикальної та горизонтальної жорсткостей та параметри згасання випробуваних опор.



Рис. 2. Лабораторні динамічні випробування гумометалевих сейсмоблоків



а *б*

Рис. 3. Приклади запису коливань залізобетонного блоку на чотирьох гумометалевих блоках: *а* – коливання у вертикальній площині; *б* – коливання в горизонтальній площині

При статичних випробуваннях опор на стиск навантаження здійснювалося гідравлічними домкратами ступенями по 50-300 кН на спеціальному стенді (рис. 4) і на пресі ступенями до максимального навантаження 9000 кН, в залежності від типу опори з витримкою 5 хв на кожному ступені, після чого знімалися показання.

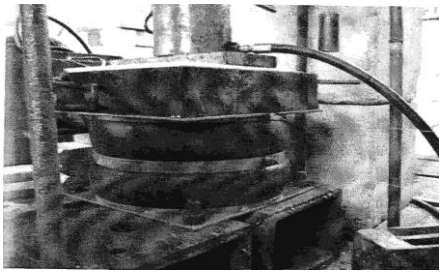


Рис. 4. Випробування гумометалевого блоку на стиск на спеціальному стенді

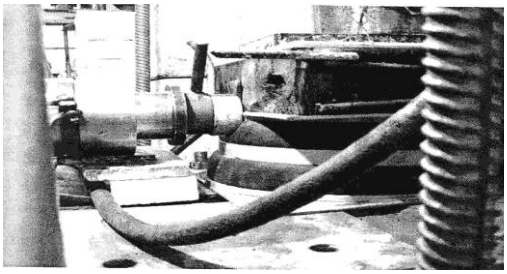


Рис. 5. Випробування гумометалевого блоку на зсув на спеціальному стенді

Випробування опор на зсув (рис. 5) проводилися на спеціальному стенді, обладнаному гідравлічними домкратами для створення вертикальних та зсувних навантажень. Вимірювання зсувних переміщень верху сейсмоопори виконувались при вертикальних навантаженнях 300; 500; 600; 1000 кН. На рис. 6 представлені залежності «вертикальне навантаження – переміщення» для опор діаметром 400 мм, де крива 1 відповідає гумометалевим блокам заввишки 2×70 мм, крива 2 – висотою 2×120 мм.

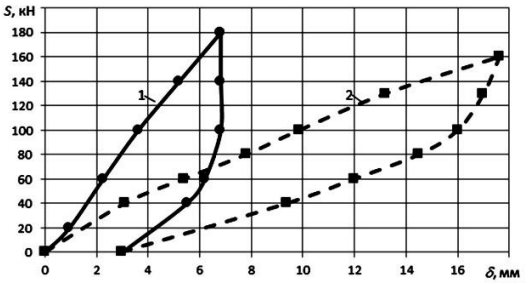


Рис. 6. Залежність «навантаження – переміщення» для гумометалевого блоку діаметром 400 мм

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує:

а) відношення жорсткості на стиск до жорсткості на зсув гумометалевих блоків збільшується із зменшенням товщини гумового шару та збільшенням діаметра гумових елементів;

б) жорсткість гумометалевих блоків на зсув збільшується зі зростанням вертикального навантаження;

в) логарифмічний декремент загасання коливань дещо зменшується із зменшенням висоти гумового шару;

г) узагальнені коефіцієнти дисипації гумометалевих блоків (з урахуванням конструкційного демпфування) становлять 0,39-0,74 залежно від типу опор та умов навантаження.

Розроблені та випробувані конструкції гумометалевих блоків можуть бути використані для сейсмозахисту житлових будинків та забезпечити власну частоту коливань будівлі у горизонтальній площині 1 Гц і менше.

1. Comité Européen de Normalisation: “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings”. EN 1998-1, CEN, Brussels, 2004.

Experimental studies of protective elements for seismic and vibration isolation of multi-storey buildings

Mykola Lysitsya[1a], Mykola Marienkov[b], Hennadii Agaltsov[a], Alina Novikova[a], Natalia Lysytsia[c], Yevhen Kalhankov[a]

[a] M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine
[b] State Enterprise “State Research Institute of Building Constructions”, Kyiv, Ukraine
[c] Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

[1] vita.igtm@gmail.com

Keywords: vibration isolation, seismic isolation, rubber-metal block, seismic support

Порівняння енергоефективності руйнування граніту у щокових дробарок з урахуванням дії дотичних напружень

Д. Лайков [a1], М. Маліч [a], С. Авраменко [б], Д. Маліч [a]

[a] Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), Дніпро, Україна
[б] Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

[1] d.v.laikov@ust.edu.ua

Ключові слова: граніт, щокова дробарка, простий рух щоки, складний рух щоки, зсувне руйнування, дотичні напруження, питома енергія дроблення, граніт.

Вступ та актуальність. Питомі енерговитрати на подрібнення твердих гірських порід є критичним показником ефективності в гірничо-переробній промисловості, оскільки ці операції формують значну частку енергоємності виробництва щебню та процесу збагачення. Традиційні енергетичні закони (Ріттінгера, Кіка, Бонда) описують процес інтегрально, не враховуючи диференційований вплив нормальних і дотичних напружень, що виникають залежно від кінематики рухомої щоки.

Об'єкт та мета дослідження. Об'єктом дослідження є процес циклічного дроблення зерен граніту. Мета роботи — кількісне порівняння енергоефективності дробарок з простим (ПРЩ) та складним (СРЩ) рухом щоки шляхом побудови моделі, що враховує роль зсувних деформацій у процесі руйнування.

Теоретична модель та критерій руйнування. Для опису взаємодії «щока–матеріал» використано лінійно-пружну модель нормального контакту та модель Кулона для дотичного напрямку. Ключовою відмінністю в кінематиці є наявність у СРЩ суттєвої тангенціальної складової переміщення $y(t) = A_{\tau} \sin(\omega t + \beta)$.

В основі порівняння лежить критерій руйнування Мора–Кулона:

$$\tau \geq c + \sigma \tan \varphi$$

- У ПРЩ домінує нормальна складова σ, і руйнування відбувається при напруженнях, близьких до межі міцності на стиск.
- У СРЩ значний дотичний компонент τ дозволяє досягти граничного стану при суттєво нижчих значеннях нормального напруження σ.

Результати моделювання. Для порівняльного аналізу обрано дроблення граніту (міцність 145 МПа) фракції 20–40 мм. Результати розрахунків наведено в таблиці:

Таблиця 1. Результати розрахунків параметрів для ПРЩ та СРЩ

Показник	ПРЩ	СРЩ
Середня потужність приводу, кВт	42,2	39,0
Питома енергія E_{sp}, кВт·год/т	1,92	1,71
Частка корисної роботи руйнування, %	62,4	68,1
Втрати на тертя, %	26,5	20,8

Висновки. Дослідження підтверджує, що кінематична схема СРЩ є енергетично вигіднішою завдяки цілеспрямованому формуванню дотичних напружень. Це дозволяє не лише знизити необхідну потужність приводу, а й збільшити частку корисної енергії, що витрачається безпосередньо на руйнування матеріалу. Основним

резервом підвищення ефективності є оптимізація контактної взаємодії в камері дроблення.

1. Gupta A., Yan D. Mineral Processing Design and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.
2. King R.P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2012.
3. Donovan J.G. Fracture toughness based models for the prediction of power consumption, product size, and capacity of jaw crushers. PhD dissertation, Virginia Tech, 2003.
4. Mwangi J.K. Optimisation of motion and force transmissions in a single-toggle jaw crusher. MSc thesis, JKUAT, 2022.
5. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique. 1979. Vol. 29(1). P. 47–65. (як базовий підхід DEM для контактних моделей, аналогічних використаним у статті).
6. Matsiuk I. Substantiation of rational design parameters of a crusher with two movable jaws. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. No.5. P. 45–52.
7. Bearman R., Briggs C. Energy and comminution in crushing circuits: A review of practical benchmarks. Minerals Engineering. 2019. Vol. 134. P. 181–190.
8. ISO 21873-1:2019. Building Construction Machinery and Equipment — Mobile Crushers — Part 1: Terminology and Commercial Specifications. Geneva: ISO, 2019.

Comparison of the energy efficiency of jaw crushers, taking into account the effect of shear stresses

D. Laikov [a1], M. Malich [a], S. Avramenko [b], D. Malich [a]

[a] Ukrainian State University of Science and Technologies (USUST), Dnipro, Ukraine
[b] The M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics NASU

[1] d.v.laikov@ust.edu.ua

This study presents a comparative energy efficiency analysis between simple-motion (SMPJ) and complex-motion (CMPJ) jaw crushers during granite crushing. The research utilizes kinematic and contact models to evaluate the influence of normal and tangential stress components on the fragmentation process. Results demonstrate that the complex motion of the jaw generates significant shear stresses, allowing for material failure at lower normal stress levels according to the Mohr–Coulomb criterion. Numerical simulations for 20–40 mm granite indicate that CMPJs achieve a 10.9% reduction in specific energy consumption (1.71 kWh/t vs. 1.92 kWh/t). The findings confirm that optimizing the contact interaction to emphasize shear deformation significantly enhances the effective use of input power.

Keywords: jaw crusher, simple jaw motion, complex jaw motion, shear failure, shear stress, specific crushing energy, granite.

Про особливості коливальних процесів в пружних тілах

В.Т.Грінченко, Н. С. Городецька

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, вул. М.Капніс 8/4.,
e-mail: nsgihm@gmail.com

Ключові слова поздовжні і поперечні пружні хвилі, власні частоти, пружний хвилевід, дисперсійне рівняння, біжучі хвилі, неоднорідні хвилі, крайовий резонанс.

Формування базових понять в теорії коливання пружних систем починалось з аналізу поведінки пружної струни. Одним із важливих висновків з такого аналізу є уявлення про співвідношення між геометричними (фізичними) параметрами модельних рівнянь і таким важливим параметром як власна частота (період коливань). Висновок про існування обернено пропорційної залежності між частотою і довжиною струни став сприйматися як основа для аналізу поведінки більш складних систем. Подальший розвиток теорії коливань пружних тіл виявив, наприклад, ту особливість, що вже для пружного стрижня власні частоти не мають такої властивості. Це обумовлено тим, що хвильові рухи, які формують власні форми коливань струни це чисто поперечні хвилі, в яких напрям швидкості точок струни є перпендикулярними напрямку поширення хвилі. Що стосується коливань пружного стрижня, то тут уже маємо справу з такою ситуацією, коли хвильовий рух стрижня слід сприймати як суперпозицію поздовжніх і поперечних хвиль. В такій пружній системі вже не існує гармонічного співвідношення між власними частотами.. Воно зберігається лише для спеціального випадку шарнірного закріплення кінців стрижня. Для вільного чи закріпленого торця такого співвідношення вже не має. Вже такий простий приклад пружної коливальної системи вказує на необхідність враховувати той факт, що в пружних тілах існує два типу хвиль - повздовжні і поперечні. За наявності граничної поверхні ці хвилі взаємодіють між собою, відбувається постійна трансформації енергії одного типу руху в інший. При цьому в певних випадках можливе повне перетворення одного типу в другий.

Ця властивість хвильового руху в пружному тілі є важливою для розуміння формування нормальної хвилі в хвилеводі. Дисперсійне рівняння для такої хвилі формується доволі просто – в кожній точці поверхні хвилеводу має виконуватись певне балансне співвідношення – скільки енергії втрачає при відбитті хвиля одного типу стільки має додатися до неї при відбитті хвилі другого типу. Ця обставина породжує частотну залежність розподілу кінематичних і силових характеристик в нормальній хвилі. Розв'язок дисперсійного рівняння для пружного хвилеводу, крім типових для одношвидкісних хвилеводів полів біжучих і строго неоднорідні хвилі з експоненціальним затуханням, також включає біжучі неоднорідні хвилі з комплексними сталими поширення, які з'являються парами і утворюють стоячі хвилі.

Такі особливості хвильових рухів в хвилеводах приводять до виникнення нових фізичних ефектів в скінченних пружних тілах. Одним із них є крайовий резонанс, який проявляється в локалізація коливань поблизу торця хвилеводу на певній частоті.

В роботі представлено залежність частоти крайового резонансу від коефіцієнта Пуассона (ν), частотні залежності амплітуди першої неоднорідної хвилі для різних

значень ν, частотні залежності середнього за період і миттєвого потоку потужності.

На основі розв'язання модельної задачі, а саме пружний напівшар з вільною бічною поверхнею, були встановлені закономірності прояву резонансу. Крайовий резонанс обумовлений зростанням амплітуд неоднорідних хвиль з комплексними сталими поширення, які мають максимум амплітуд на частоті резонансу. Із зростанням номеру хвилі з комплексною сталою поширення, її вклад в формування власної формі на резонансі падає. Крайовий резонанс існує для всього діапазону можливих значень коефіцієнту Пуассона (ν). При збільшенні ν частота резонансу зростає, а його добротність падає. Крайовий резонанс існує в частотному діапазоні, в якому лише одна нормальна хвиля є поширювальною. При цьому на резонансній частоті перша нормальна біжуча хвиля утворена суперпозицією поперечної хвилі, що поширюється і неоднорідної поздовжньої хвилі. В той же час при відбитті поперечної складової першої нормальної хвилі від вільної межі на частотах в околі крайового резонансу виникає поздовжня хвиля, яка поширюється. В дальньому полі поздовжня складова першої нормальної біжучої хвилі може бути тільки неоднорідною. Таке протиріччя обумовлює значне збудження неоднорідних хвиль необхідних для узгодження структури дальнього і ближнього полів. Проте таке пояснення причини крайового резонансу існує не для всіх ν. Для $\nu < 0.16$, і $\nu > 0.42$ у відбитому від торця полі на торці напівшару поздовжня хвиля залишається неоднорідною в околі частоти крайового резонансу [1]. Цей факт стимулював аналіз енергетичних характеристик крайового резонансу. Зокрема, було встановлено, що на частоті крайового резонансу середній за період потік потужності досягає максимального значення, а реактивна частина миттєвого потоку потужності дорівнює нулю.

1. В.Т.Грінченко, Н.С.Городецька, Про особливості спектра власних частот пружних тіл, *Допов. Нац. акад. наук Укр.*, № 5, 22-27 (2018) doi: https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.05.022.

Features of oscillatory processes in elastic bodies

V.T. Grinchenko, N.S. Gorodetska

Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv
E-mail: nsgihm@gmail.com

An analysis of the characteristics of the resonance on inhomogeneous waves with symmetric vibrations of a semi-infinite plate with free lateral boundary is carried out. The study covers forced vibrations as well as the reflection of the first normal wave from the free edge. At the frequency of the edge resonance, the first propagating normal wave is formed by the superposition of a propagating transverse wave and an inhomogeneous longitudinal wave. In the vicinity of the edge resonance frequency the reflection of the transverse component of the first normal wave from a free boundary results in the emergence of a propagating longitudinal wave. The contradiction between near and far fields causes significant excitation of inhomogeneous waves.

Keywords: longitudinal wave, transverse wave, eigenfrequencies , elastic waveguide, dispersion relation, propagation wave, inhomogeneous wave edge resonance.

Міцність конструкції як ключовий фактор ефективності транспортних засобів

І. Нестерук[1]

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

[1] inesteruk@yahoo.com

Ключові слова: ефективність доставки корисного вантажу, комерційна ефективність, зменшення опору, збільшення дальності, міцність видовжених конструкцій

Маса корисного навантаження m_u зазвичай є меншою від повної маси транспортного засобу. Цей факт вимагає корекції відомого критерію комерційної ефективності k (відношення віги до опору) [1, 2]. Було запропоновано визначати ефективність доставки корисного вантажу E як енергію, необхідну для переміщення 1 N ваги цього вантажу на один метр та зроблено оцінки для електричних, атомних та інших типів транспортних засобів [3]. Отримано аналітичну формулу для залежності E від відношення $k_m = m_m/m_e$ максимальної маси апарата $m_m=m_e+m_u+m_f$ до маси порожнього апарата m_e (m_f є масою палива перед початком автономного руху або масою електричних батарей/акумуляторів чи масою атомної силової установки):

$$E = \begin{cases} \frac{k(k_m-1)}{p_1 k_m(1+k_u)}, & for\ electrical\ and\ nuclear\ vehicles \\ \frac{k(k_m-1)}{p_1[k_m+0.5k_u(k_m+1)]}, & for\ other\ vehicles \end{cases} ;\ k_u = \frac{m_f}{m_u};\ p_1 = \frac{N_A}{N} \quad (1)$$

Тут механічна потужність $N=XU$ усталеного горизонтального руху зі швидкістю U (X є опором апарата), N_A потужність двигунів. Зазвичай, N_A є в 2-4 рази більшою від N. Зокрема, для неелектричних літаків коефіцієнт p_1 можна оцінити за формулою, [4]:

$$p_1 = \frac{N_A}{N} \approx 3.24(m_1 g)^{-0.037} \quad (2)$$

що випливає з осереднених характеристик, наведених в [5] (масу m_1 =1.393m_e слід брати в кілограмах).

З формули (1) видно, ефективність E пропорційна відношенню ваги до опору k, не перевищує значення комерційної ефективності k та зростає для більших апаратів (див. також (2)). Для покращання ефективності потрібно максимально збільшувати значення коефіцієнта $k_m = m_m/m_e$, що вимагає зміцнення конструкції для забезпечення доставки більшої корисної маси без значного зростання маси порожнього апарата. Для неелектричних літаків середнє значення k_m =*1,786* [5], але є приклади і суттєво більших значень цього коефіцієнта (для Shahed-136 k_m≈2,45 [3]).

Додаткові вимоги щодо міцності виникають через те, що збільшення коефіцієнта k та дальності вимагає використання видовжених корпусів з великими значеннями відношення довжини L до максимального діаметру D (L/D>>1), [6-14]. Зокрема, при використанні спеціальних осесиметричних корпусів, що запобігають відриву примежового шару [11, 12], можна забезпечити ламінарний режим обтікання при досить великих числах Рейнольдса. При цьому мінімальні значення об'ємного коефіцієнту опору досягаються при, [7, 14]

$$\frac{UV}{L^2} = 1.81 \cdot 10^5 \nu \quad (3)$$

(де ν кінематична в'язкість води або повітря) з використанням приблизної формули для об'єму тіл обертання спеціальної безвідривної форми [6] $V \approx 0.28LD^2$ отримуємо з (3) параметри оптимальних корпусів

$$Re_L = \frac{UL}{\nu} = 6{,}46 \cdot 10^5 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \quad (4)$$

З формули (4) видно, що використання максимально видовжених корпусів дозволяє збільшити швидкість та розміри оптимальних апаратів. Зменшення опору літаків та планерів досягається за рахунок використання максимально видовжених крил [4, 6-8], що також вимагає збільшення міцності конструкцій.

1. F. Saibene a n d A. E .Minetti, Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans, *Eur J Appl Physiol.*, **88**, 297–316 (2003).
DOI 10.1007/s00421-002-0654-9
2. Y. Gabrielly and Th. von Karman, What price speed, *Mechanical Engineering*, USA, **72**, No. 10, 775-779 (1950).
3. I. Nesteruk, Efficiency of payload delivery of various types of vehicles, *Preprint Research Gate. March 6, 2026*. DOI: 10.13140/RG.2.2.36500.97925
4. I. Nesteruk, Instructions for Improving The Shape of Long-range Subsonic Airplanes and Gliders, *Research Square.* (2026). DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8368732/v1
5. Tianshu Liu, Comparative Scaling of Flapping and Fixed Wing Flyers, *AIAA Journal*, **44** (1) (2006).
6. I Nesteruk, Efficiency of Steady Motion and its Improvement with the Use of Unseparated and Supercavitating Flow Patterns, *KPI Science News*, 6, 51-67 (2016). https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.6.81605.
7. І.Г. Нестерук, Принципи оптимізації форми безпілотних апаратів великої дальності, *Наукові вісті КПІ*, No 1–4, 49–61 (2024) doi:10.20535/kpisn.2024.1-4.314223
8. I. Nesteruk, Prandtl's Boundary-Layer Theory as a Basis for Improving Aerodynamic Shapes, *Conference: Topical Problems of Fluid Mechanics 2026, Prague, February 18 – 20, 2026*. DOI: 10.14311/TPFM.2026.022
10. I. Nesteruk, Shapes of the fastest fish and optimal underwater and floating hulls. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, (2022) DOI: 10.1016/j.taml.2022.100378
11. I. Nesteruk, Rigid Bodies without Boundary-Layer Separation, *Int. J. of Fluid Mechanics Research*, **41**(3), 260-281 (2014).
12. I. Nesteruk, Maximal speed of underwater locomotion, *Innov Biosyst Bioeng*, 3(3), 152-167 (2019). https://doi.org/10.20535/ibb.2019.3.3.177976
13. I. Nesteruk and O. Dorozhkin, User-Friendly Interface for Conceptual Shape Design of Subsonic Airplanes and Gliders. *Preprint Research Gate* (2026).
DOI: 10.13140/RG.2.2.29643.45607
14. I. Nesteruk, Low-Drag Bodies of Revolution and Their Applications for Effective Transportation, *Transportation Development Research*, 3(2): 1–8 (2025).
DOI: https://doi.org/10.55121/tdr.v3i2.697

Числове моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів: проблеми та перспективи

А. В. Сохацький

Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна

Sokhatsky_anatoly@ukr.net

Ключові слова: аеродинаміка транспортних апаратів, моделі турбулентності, числове моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, аеродинамічні характеристики.

Математичне моделювання механічних систем, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями, які повинні повністю відображати динаміку процесу з урахуванням складних нелінійних ефектів залишається проблемним. Турбулентний рух рідини настільки складний і підходи до його вивчення настільки різноманітні, що він не залишає шансів на системне і, головне, повне викладення. Теорія турбулентності усе ще перебуває у стадії розробки й далека від свого завершення. Повний розрахунок турбулентного руху поки що неможливий. Продовжують з'являтися всі нові підходи до її вивчення. Зростає кількість моделей, запропонованих для кращого розуміння окремих її властивостей. Моделювання реальних турбулентних течій навколо транспортних апаратів і на сьогодні є не вирішеною проблемою.

Методи моделювання турбулентних течій, з певною мірою умовності можна розділити на три групи: підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Навьє-Стокса (Reynolds Averaged Navier - Stokes - RANS); два класичних підходи - пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation - DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES); гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів для різних областей течії .

На сьогодні найбільш поширеними підходами є методи , що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Навьє-Стокса (Reynolds Averaged Navier - Stokes - RANS). Вони замикаються за допомогою тієї або іншої напівемпіричної моделі турбулентності .

Класичні вихоророзрізняючі підходи є найбільш досконалими. Це пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation - DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES). Метод DNS базується на безпосередньому прямому числовому розв'язуванні тривимірних нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стоксу з розрізненням усіх просторово-часових масштабів турбулентності. Він ґрунтується на фізичних принципах аеродинаміки і повністю вільний від емпіричних припущень.

У рамках методу LES ті ж рівняння розв'язуються безпосередньо після їх попередньої просторової фільтрації. Це дозволяє виключити з розгляду частину просторово-часових масштабів. Проведена операція дозволяє значно понизити вимоги до просторово-часового розрізнення. Таким чином понижуються вимог до необхідних обчислювальних ресурсів. Для урахування впливу відфільтрованих масштабів турбулентності притягуються ті або інші напівемпіричні моделі. В науковій

літературі для підкреслення кардинальних відмінностей методу LES від підходів, що використовуються для замикання RANS, їх називають "підсітковими".

До третьої групи відносять гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів в різних областях течії. Вони є найбільш розповсюдженими для практичного використання, виходячи з можливостей обчислювальної техніки. У відповідності з даним підходом розрахунок турбулентних течій стисливої рідини проводиться шляхом безпосереднього розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса осереднюються за Рейнольдсом для густини та тиску .

Незважаючи на характер осередненої течії, її вимірність та стаціонарність чи нестаціонарність, необхідно розв'язувати тривимірні нестаціонарні рівняння Нав'є-Стокса. Це пов'язано з тим, що турбулентність є принципово тривимірним і нестаціонарним явищем. Слід звернути увагу на те, що для ряду моделей, наприклад DNS, необхідно забезпечити достатню точність розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

Для числового моделювання турбулентного обтікання транспортного апарату використовувалися осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, замкнені однопараметричною моделлю турбулентності Спаларта-Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів. Вихідна система рівнянь записувалась та розв'язувалась в криволінійній тривимірній системі координат. Побудовано алгоритм та методику числового розв'язування. Комплекс програм написано на мові програмування FORTRAN-95.

Проведено числовий розрахунок обтікання транспортного апарату. Отримано розподіл параметрів турбулентної течії навколо транспортного апарату.

Numerical simulations of turbulent flows around transport vehicles: problems and prospects

A. Sokhatskyi

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Sokhatsky_anatoly@ukr.net

An analysis of modern approaches to mathematical modeling of turbulent flows has been conducted. Issues related to the construction of a mathematical model and a numerical method for solving the problem are considered. The possibilities of using Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with empirical turbulence models are evaluated. A methodology, algorithms, and a set of programs for modeling turbulent flows have been developed. Examples of numerical solutions using personal computers are given.

Keywords: aerodynamics of transport vehicles, turbulence models, numerical modeling, Navier-Stokes equations, aerodynamic characteristics.

Дослідження вихрових течій у вентильованій каверні

Н. Ф. Димитрієва

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

Dimitrieva@nas.gov.ua

Ключові слова: обчислювальна гідродинаміка, математичне моделювання, двофазна течія, суперкавітація, каверна, вихор, OpenFoam, метод об'єму рідини.

Дане дослідження присвячено вивченню складних вихрових потоків усередині суперкаверни та впливу параметрів піддуву на перебудову вихрової структури.

Проблема суперкавітації як методу керування потоком відома із середини XX століття [1]. По суті це є процес утворення в потоці одиночної парової каверни за обтічним тілом, для підтримки якої всередину вдувається повітря. За низьких швидкостях потоку основної течії рідини ефектом випаровування можна знехтувати.

Математичне моделювання поставленої задачі для двофазного нестисливого середовища вода-повітря в нестаціонарній тривимірній постановці ґрунтується на методі об'єму рідини [2]. Два середовища, що не змішуються, вважаються однією ефективною рідиною у всій розрахунковій області:

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \upsilon \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \sigma\kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}\ , \qquad \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \qquad \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0, \tag{1}$$

де i, j = 1, 2, 3, u_i – компонента поля швидкості, p – тиск, α – фазова частка, υ – коефіцієнт кінематичної в'язкості, t – час, густина ρ розраховується як середньозважене значення на основі розподілу концентрації рідини, σ – константа поверхневого натягу, κ – кривизна поверхні розділу фаз.

Розрахунки виконано за допомогою пакета прикладних програм OpenFoam. Модель interFoam використовується для двох нестисливих ізотермічних середовищ без фазового переходу. Сітку побудовано методом покрокового згущення комірок за допомогою утиліти snappyHexMesh.

Чисельні результати показали, що в сліді за тілом утворюється стійка каверна. Отримано гарну якісну згоду з експериментальними даними [3, 4]. Розвинену каверну з великим подовженням можна умовно розділити на три зони (рис. 1).

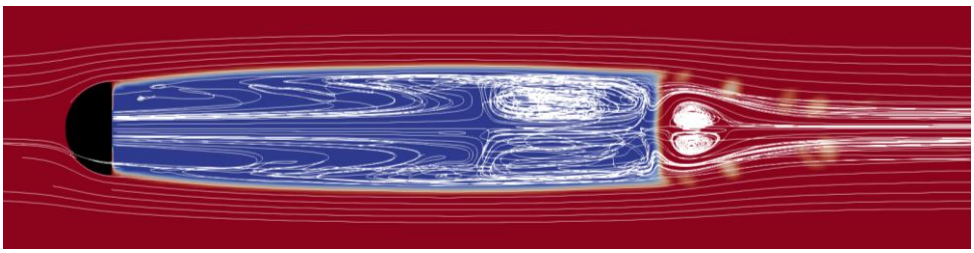


Рис. 1. Центральний переріз вентильованої каверни: чорний колір – обтічне тіло, синій – повітря, червоний – вода, білий – лінії течії..

Перша зона характеризується постійним тиском і досить точно визначається межею молекулярного шару поверхні розділу фаз повітря-вода. Друга зона відрізняється товщиною шару, що заповнений дрібними краплями води завдяки в'язкій дифузії. Третя зона описується двофазним шаром перемішування, який утворює слід порожнини. Така тризонна модель вентильованої каверни без урахування масових сил добре узгоджується з ранніми теоретичними дослідженнями для осесиметричного випадку [5].

Таким чином, за рахунок штучної вентиляції подовжується і підтримується зона постійного тиску. Розміри зон вентильованої каверни залежать від швидкості основного потоку рідини та витрати газу, що вдувається [6]. Така структура течії газу в каверні можлива, коли товщина внутрішнього примежового шару істотно менша за радіус каверни та відсутній масообмін через поверхню розділу фаз.

1. M.P. Tulin, Supercavitating flows. Small perturbation theory, *J Ship Res*, **8**, 16–37 (1964).
2. C.W. Hirt, B.D Nichols, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *J Comp Phys*, **39**, 201–225 (1981). https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5
3. *Supercavitation: Advances and Perspectives. A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu. N. Savchenko, ed. I. Nesteruk*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg (2012).
4. Г. О. Воропаєв, В. І. Коробов, Н. Ф. Димитрієва, Моделювання вентильованої каверни за обтічним тілом, *Журнал обчислювальної та прикладної математики*, 8, № 1, 73–78 (2021). https://doi.org/10.17721/2706-9699.2021.1.09
5. Г. О. Воропаєв, В'язке втягнення газу у вентильованій каверні заданої форми, *Прикладна гідромеханіка*, 15(87), № 1, 10–23 (2013).
6. N.F. Dimitrieva, Vortices Inside a Ventilated Cavity, *in Topical Problems of Fluid Mechanics*, 45–50 (2025). https://doi.org/10.14311/TPFM.2025.007

Investigation of vortex flows in a ventilated cavity

N. Dimitrieva

Institute of Hydromechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Dimitrieva@nas.gov.ua

Complex vortex flows within a cavity and the influence of ventilation parameters on vortex reorganization are considered. A method for numerically simulating two-phase flows using the open-source OpenFoam software is proposed. A 3D unstructured mesh with predominantly hexahedral elements is constructed to account for small-scale flow structures in the phase transition zone and near the streamlined body. The influence of geometric and dynamic parameters on the formation and development of the air cavity, its size, shape, and stability was investigated.

Keywords: computational fluid dynamics, mathematical modeling, two-phase flow, supercavitation, cavity, vortex, OpenFoam, volume of fluid method

Вплив великомасштабної топографії дна на структуру океанічних течій

В. А. Воскобійник[а1], Т. Радко[б], Г. Якобс[в], А. В. Воскобійник[а], А. М. Онищенко[г], О. А. Воскобойник[а]

[а]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна
[б]Військово-морська аспірантура, Монтерей, США
[в]Військово-морська дослідна лабораторія, Стенніс, США
[г]Національний транспортний університет, Київ, Україна

[1] vlad.vsk@gmail.com

Ключові слова: океанічна течія, топографія дна, підводна гора, чисельне та фізичне моделювання, вихрова структура, візуалізація, поле швидкості, спектральна характеристика

Представлено результати чисельного і фізичного моделювання та натурних досліджень взаємодії мегамасштабних океанічних течій з великомасштабними нерівностями топографії дна, які отримано в результаті виконання спільного проекту американських і українських науковців за проектом P827. Проаналізовано динаміку взаємодії течії та топографії дна в регіонах океану з сильними течіями, крутими схилами та складним багатомасштабним рельєфом. Розроблено нові параметризації, що відображають вплив топографії на більші масштаби глибинних та поверхневих течій Світового океану. Проведено лабораторні експерименти з фізичного моделювання взаємодії течії з нерівностями дна, які показують ключові механізми цієї взаємодії, та проведено натурні дослідження з визначення цих механізмів.

Мета роботи полягає у визначенні ролі нерегулярної мінливості морського дна в формуванні структури великомасштабних течій у дуже активних регіонах Світового океану. Результати дослідження покращать розуміння впливу великомасштабної топографії в глобальних операційних і кліматичних океанологічних моделях.

Грубий або великомасштабний рельєф представляє собою неправильні батиметричні особливості океанічного дна з бічними масштабами в кілька кілометрів. Недавні аналізи продемонстрували драматичний вплив нерівного рельєфу на великомасштабні та мезомасштабні схеми циркуляції. Вертикальний та горизонтальний рух води внаслідок градієнтів температури, солоності, щільності, дії вітрів над океанічною поверхнею та сил Коріоліса, які викликані обертанням Землі приводять до формування циркуляційних течій у Світовому океані. На своєму шляху мегамасштабні циркуляційні течії зустрічають нерівності донної поверхні та прибережних схилів, що суттєво впливає на їх траєкторії руху і гідродинамічні характеристики. В результаті виникають складні неоднорідні та нестаціонарні за характером гідродинамічні явища, генеруються вихрові, слідні і струменеві течії, внутрішні та підвітряні хвилі [1]. Це суттєво впливає на глибоководне та поверхневе перемішування, розподіл поживних речовин, змінює поширення звуку та швидкість у товщі води, а також впливає на рух і гідроакустичні системи підводних та надводних апаратів, особливо дрібномасштабних, таких як дрони та планери.

Вплив дрібномасштабних вихорів, які генеруються під час обтікання придонних неоднорідностей, чисельно досліджувалися з визначення ефектів дрібномасштабної батиметрії на мегамасштабні циркуляційні течії. Нозроблено “теорію наждачного

паперу” [2], що дало можливість оцінити форсування течії за нерівним рельєфом за спектральними характеристиками рельєфу дна. Ефект нерівного рельєфу дуже чітко проявився в експериментах із взаємодією течії та підводної гори.

В гідравлічній лабораторії Інституту гідромеханіки НАН України були проведені експериментальне моделювання впливу течії Гольфстрім на підводну гору Атлантіс II, яка розташована біля східного узбережжя США. Проводилися візуальні дослідження за допомогою підфарбованої води та інструментальні дослідження з визначення поля швидкості Визначено особливості генерації та еволюції вихрових структур, струменевих та хвильових течій в околі моделі підводної гори Атлантіс II. Інструментальні вимірювання групою датчиків [3] дозволили отримати інтегральні та спектральні характеристики полів швидкості та тиску поблизу та на поверхні шорсткої моделі підводної гори.

1. G. A. Jacobs, R. W. Helber, J. M. Toole, E. J. Metzger, and T. G. Jensen, North Atlantic upper ocean sound channel variations, *J. Acoust. Soc. Am.*, **157**(6), 4573-4587 (2025). https://doi.org/10.1121/10.0036944
2. T. Radko, The sandpaper theory of flow-topography interaction for multilayer shallow-water systems, *J. Flud Mech.*, **988**, A52 (2024). https://doi.org/10.1017/jfm.2024.470
3. V. Voskoboinick, A. Onyshchenko, O. Voskoboinyk, A. Makarenkova, A. Voskobiinyk, Junction flow about cylindrical group on rigid flat surface, *Heliyon*, e12595 (2022). http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12595

The influence of large-scale bottom topography on the structure of ocean flows

V. Voskoboinick[a1], T. Radko[b], G. Jacobs[c], A. Voskobiinyk[a], A. Onyshchenko[d], O. Voskoboinyk[a]

[a]Institute of Hydromechanics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[b]Naval Postgraduate School, Monterey, USA
[c]Naval Research Laboratory, Stennis, USA
[d]National Transport University, Kyiv, Ukraine

[1]vlad.vsk@gmail.com

The results of numerical and physical modeling and field researches of the interaction of mesoscale ocean flows with large-scale irregularities of the bottom topography are presented. The dynamics of the interaction of the flow and the bottom topography in regions of the ocean with strong currents, steep slopes and complex multi-scale relief are analyzed. New parameterizations are developed that reflect the influence of topography on larger scales of deep and surface flows of the World Ocean. A series of laboratory experiments on the physical modeling of the interaction of the flow with the bottom irregularities are carried out, which show the key physical mechanisms of this interaction, and the field researches were conducted to determine these mechanisms.

Keywords: ocean flow, bottom topography, seamount, numerical and physical simulation, vortex structure, visualization, velocity field, spectral characteristic.

Моделювання процесу очистки стічних вод в біореакторах із закріпленим біоценозом

С.В.Телима [1], Ю.І.Калугін

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна
[1] sertelyma@gmail.com

Ключові слова:біореактор,біоплівка,субстрат,біомаса, моделювання, питомий потік.

Вступ. Розроблено математичну модель очистки стічних вод в біореакторах із закріпленим біоценозом.Аналіз отриманих результатів показав, що основний вплив на ефективність біоочистки мають гідродинамічні умови надходження стічних вод в реактор та режим відриву біомаси від поверхні біоплівки.

Основні результати. Розглянемо комплексну математичну модель біоплівки, що описується наступними рівняннями [1,2]:

1. Рівнянням транспорту субстрату та його споживання всередині біоплівки:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - \frac{\mu_{max}}{Y} \frac{L X_L}{K_{mL}+L}, \tag{1}$$

з граничними умовами:

при $x = 0$ $$-D_L \frac{\partial L}{\partial x} = K_L (L_e - L), \tag{2}$$

при $x = \delta$ $$\frac{\partial L}{\partial x} = 0. \tag{3}$$

2. Рівнянням балансу біомаси:

$$\frac{\partial X_L}{\partial t} = \mu_{max} \frac{L X_L}{K_{mL}+L} - b X_L^2, \tag{4}$$

де r – інтенсивність відриву біомаси від біоплівки; μ_{max} – питома максимальна швидкість росту мікроорганізмів в біоплівці; X_L – початкова концентрація біомаси в плівці, г/м^3; Y – стехіометричний коефіцієнт приросту біомаси в біоплівці; K_{mL}– коефіцієнт напівнасичення, г/л. L_e – концентрація субстрату на виході із біоплівки, г/м^3, D_L – коефіцієнт молекулярної дифузії в біоплівці, м^2/год.

Система рівнянь (2) - (5) вирішується з наступними початковими умовами:

$$L(0,t) = L_0,\ X_L(0,t) = L_{L0},\ \delta(0) = \delta_0. \tag{5}$$

Шуканими функціями є концентрації відповідно субстрату і біомаси $L(x,t), X_L(x,t)$. Розв'язок системи рівнянь (2)-(5) отримано методом послідовної зміни стаціонарних станів, суть якого полягає в тому, що в кожний момент часу tпри відповідній товщині плівки δрозподіл концентрацій $L(\delta)$ і $X_L(\delta)$ знаходиться з вирішення стаціонарних рівнянь транспорту субстрату та балансу біомаси .

Для визначення питомого потоку в біоплівку запишемо рівняння (1) у безрозмірних змінних:

$$\frac{d^2 \bar{L}}{d\bar{x}^2} - \alpha \frac{\bar{L}}{\bar{K}_{mL}+\bar{L}} = 0 \tag{6}$$

при $\bar{x} = 0$ $$\frac{d\bar{L}}{d\bar{x}} = \beta(\bar{L} - 1), \tag{7}$$

при $\bar{x} = 1$ $$\frac{d\bar{L}}{d\bar{x}} = 0. \tag{8}$$

де $$\bar{x} = \frac{x}{\delta},\ \bar{L} = \frac{L}{L_e},\ K_{mL} = \frac{\bar{K}_{mL}}{L_e},\ \alpha = \frac{\mu_{max} X_L \delta^2}{Y D_L L_e},\ \beta = \frac{K_L \delta}{D_L} \tag{9}$$

Надалі рисочки над змінними для простоти викладу опускаємо.

З рівняння (6) після заміни змінних $f(L) = \frac{dL}{dx}$ та відповідних перетворень з використанням граничної умови (8) на границі $x = 1$, отримуємо

$$\frac{dL}{dx} = \sqrt{2\alpha}\sqrt{L - L(1) - K_{mL} \cdot ln\left(\frac{L+K_{mL}}{L(1)+K_{mL}}\right)}. \quad (10)$$

На підставі (10) для питомого потоку $N = -\frac{dL}{dx}$ знаходимо залежність питомого потоку $N(L)$ як функції від концентрації L:

$$N(L) = -\sqrt{2\alpha}\sqrt{L - L_1 - K_{mL} \cdot ln\left(\frac{L+K_{mL}}{L_1+K_{mL}}\right)}. \quad (11)$$

На границі $x = 0$ потік дорівнює:

$$N_0 = -\sqrt{2\alpha}\sqrt{L_0 - L_1 - K_{mL} \cdot ln\left(\frac{L+K_{mL}}{L_1+K_{mL}}\right)}, \text{ де } L_0 = L(0). \quad (12)$$

Підставляючи залежність (10) у граничну умову (8), після нескладних перетворень можна знайти неявну залежність між значеннями концентрації на межах області:

$$L_1 - L_0 + K_{mL} \cdot ln\left(\frac{L_0+K_{mL}}{L_1+K_{mL}}\right) + \gamma(1 - L_0)^2 = 0, \text{ де } \gamma = \frac{\beta}{2\alpha}. \quad (13)$$

На рис.1 представлено графіки залежності питомого потоку від величини концентрації субстрату на виході із біоплівки при різних значеннях коефіцієнту інтенсивності відриву біомаси з поверхні біоплівки та коефіцієнту її напівнасичення 20г/л. Аналіз побудованих графіків показує, що при збільшенні концентрації очищенної води на виході із біоплівки її потік збільшується незалежно від значення коефіцієнту інтенсивності відриву біомаси. При цьому спостерігається майже лінійна залежність величини питомого витоку від концентрації очищеного субстрату.

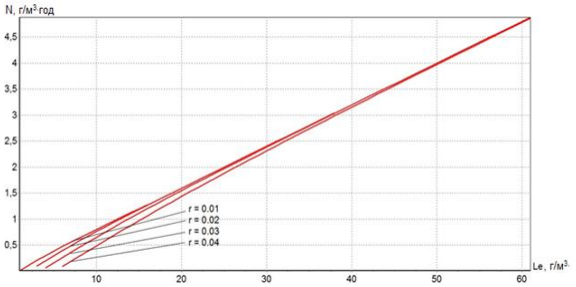


Рис.1.

Висновки.Проведено теоретичне обґрунтування та розроблена математична модель по визначенню потоку стічної очищеної води на виході із біоплівки, величина якого може свідчити про ефективність роботи очисних споруд даної конструкції.

1.Boltz J., Morgenroth C.,Dipankar Mathematical modeling of biofilms and biofilm reactors. *Water Science and Technology,*20, 1821-1836 (2010).

2.Олійник О.Я.,Телима С.В.,Калугін Ю.І.,Олійник Є.О.Аналіз впливу гетерогенності біоплівки на ефективність вилучення органічних забруднень в біореакторах. *Екологічна безпека та основи природокористування*. №3(47). 5-20 (2023).

The mathematical model of determining of specific flow of cleaning wastewater in bioreactor with fixed biocenosis with using the method of successive changes of steady states is developed. It was appears that the main influence on the efficiency of treatment have the hydrodynamic conditions and the biomass detachment from the biofilm surface.

Key words:bioreactor,biofilm,substrate,biomass, modeling, specific flow.

Обґрунтування параметрів теплонасосних установок на основі методів ексергетичного аналізу

В. А. Волощук [а,б] [1], Є.І. Никифорович[б]

[а] Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна
[б] Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

[1] vl.volodya@gmail.com

Ключові слова: теплонасосна установка, ексергетичний аналіз, енергетична ефективність, економічна ефективність, робоче тіло.

Існуючі в науковій та особливо в інженерній практиці показники сумарно враховують вплив різних факторів на ефективність теплоенергетичних установок без можливості роздільного оцінювання впливу кожної необоротності реальних процесів. Саме необоротності є причинами неефективного використання вхідного енергоносія.

На відміну від методології енергетичного (ентальпійного) аналізу (найбільш поширеної в науковій та інженерній практиці) методологія ексергетичного оцінювання (термодинамічний підхід) дає можливість визначити місцезнаходження, значення, джерела, вартість та негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат в процесах передачі та перетворення енергії [1].

Методи ексергетичного аналізу в найбільшій мірі розроблено та апробовано в промисловій теплоенергетиці [2]. Разом з тим, зараз з’явився інтерес до використання цих методів у сфері теплозабезпечення будівель [3].

Мета роботи – обґрунтувати параметри теплонасосних установок (ТНУ) у складі системи теплозабезпечення будівель на основі методів ексергетичного аналізу.

Сучасні методи прикладної термодинаміки пропонують використання таких понять як ексергія «палива», ексергія «продукту», «деструкція ексергії» та втрати ексергії [4], [5]. Комплексний ексергетичний, економічний та екологічний (на основі оцінювання життєвого циклу) аналіз запропоновано реалізувати на основі алгебраїчного підходу із використанням методу питомої ексергетичної вартості та негативного впливу на довкілля (SPECO-метод) [4], [5].

В роботі досліджено декілька типів ТНУ («вода-вода», «повітря-вода», реверсивні ТНУ) із різними робочими тілами (R410a, R134a, R152a, R290, R1234ze(E), R1234yf, R744, R1270, R600a, R600, R601a, R601 та RE170) у складі системи тепло- та холодозабезпечення будівель з урахуванням змінних режимів роботи впродовж року.

Методами ексергетичного аналізу показано, що для ТНУ типу «вода-вода» та «повітря-вода» з робочими тілами R410a та R134a зменшення необоротності у випарнику сприяє найбільшому підвищенню термодинамічної ефективності ТНУ і лише незначному збільшенню вартості ексергії палива. Конденсатор є компонентом, для якого мінімізація необоротності забезпечує одночасне підвищення термодинамічної та економічної ефективності.

Дослідження із застосуванням ексергетичного оцінювання режимів роботи реверсивних ТНУ типу «повітря-вода» з робочими тілами R410a, R134a, R152a, R290, R1234ze(E) та R1234yf показали, що заміщення R410A і R134a такими робочими

тілами як R152a і R290 забезпечує найбільше підвищення енергетичної ефективності таких ТНУ.

Результати досліджень на основі ексергетичного аналізу щодо обґрунтування розрахункових параметрів реверсивної ТНУ типу «повітря-вода» з використанням R290 показали, що для співвідношень розрахункових навантажень на опалення та охолодження ($Q_{Design}^{Heat}/Q_{Design}^{Cool}$) в діапазоні від 0,65 до 1,2 таку ТНУ доцільно проектувати на основі розрахункових навантажень на охолодження. У такому випадку можна отримати меншу сумарну деструкцію ексергії в системі порівняно з системою, яка запроектована на основі розрахункового навантаження на опалення. А для співвідношення $Q_{Design}^{Heat}/Q_{Design}^{Cool}$ вище 1,2 проектування такої ТНУ слід здійснювати на основі розрахункового навантаження на опалення.

Окремі дослідження термодинамічної ефективності ТНУ із вуглекислим газом (R744) та його сумішей із такими робочими тілами як R290, R1270, R600a, R600, R601a, R601 та RE170 з масовою часткою 1…10% показали, що застосування суміші, що містить 92 % R744 та 8 % R290 є найбільш доцільним, оскільки це сприяє найбільшому зниженню степення стиснення у компресорі та відповідному подовженню терміну його експлуатації. Удосконалення компресора є найбільш ефективним з точки зору підвищення енергетичної ефективності всієї ТНУ.

1. Tsatsaronis, G. The Future of Exergy-Based Methods. *Energy* **2024**, *302*, 131881, doi:10.1016/j.energy.2024.131881.
2. Frangopoulos Ch.A., Sakalis G.N., Tzortzis G.J. Intertemporal and Dynamic Optimization of Synthesis, Design and Operation of Energy Systems. The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE-2016). September, 14-16, 2016. Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. P. 3–28.
3. Picallo-Perez, A.; Sala, J.M.; Tsatsaronis, G.; Sayadi, S. Advanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for Assessing Building Thermal Systems. *Entropy* **2019**, *22*, 32, doi:10.3390/e22010032.
4. Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M.J. *Thermal Design and Optimization*; Wiley: New York, 1996; ISBN 978-0-471-58467-4.
5. Morosuk, T.; Tsatsaronis, G. Advanced Exergy-Based Methods Used to Understand and Improve Energy-Conversion Systems. *Energy* **2019**, *169*, 238–246, doi:10.1016/j.energy.2018.11.123.

Parameter optimization of heat pumps using exergy-based analysis

V. Voloshchuk[a1], E. Nikiforovich[a]

[a]Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] vl.volodya@gmail.com

This study proposes results of parameter optimization of heat pumps using exergy-based analysis to overcome the limitations of conventional energy-based one. Findings indicate that for the subcritical heat pumps reducing irreversibility in the evaporator and condenser are the most effective to enhance the energy and economic efficiency of the whole system. But for the transcritical heat pumps the compressor features the highest potential to enhance the efficiency of the system.

Keywords: heat pump unit, exergy analysis, energy efficiency, economic efficiency, working fluid.

Співвідношення оцінки детонаційного імпульсу в 2D та 3D наближенні при застосуванні FRC-EM

В. В. Філонов[a1,б], Г.О. Воропаєв[a]

[a]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна
[б]ТОВ «ІПП-Центр», Київ, Україна

[1] workFVV@gmail.com

Ключові слова: дефлаграція, детонація, скінчено-хімічна кінетика, реактивний імпульс, рівняння енергії.

В роботі розглядається застосовність модифікованої моделі одностадійної скінчено-хімічної кінетики [1] для оцінки детонаційного імпульсу в тривимірному наближенні. Запропонована модель FRC-EM базується на модифікації рівняння енергії для класичної моделі суміші шляхом занулення дифузійної складової для концентрацій та введення явного джерела енерговиділення на основі лінеаризованого джерела швидкості реакції. Це дозволило контролювати тепловиділення під час хімічної реакції, яка описується спеціальним рівнянням Ареніуса з демпферними функціями, що залежать від часових масштабів турбулентності [2].Математична постановка реалізована як додаткова модель горіння в ANSYS CFX.

У випадку параметричного аналізу потенційної камери згоряння практичність застосування 2D наближення не викликає сумнівів, проте постає питання чи еквівалентні результати для повномасштабної геометрії (3D). Принципова відмінність полягає у формалізації точкового джерела ініціації, оскільки в 2D наближенні це фактично є тор, що здебільшого не відповідає дійсності і може суттєво впливати на характерні часові точки формування імпульсу, а також на протяжність дефлаграційної зони горіння.

На Рис. 1 показані основні параметри детонаційного імпульсу, які отримані в 2D та 3D наближеннях для ідеально-заповненої камери згоряння стехіометричною сумішшю пропану та кисню за нормальних умов. Для двовимірної постановки розглянуті два типи ініціаторів за своєю потужністю: звичайна свічка (TCI**,** E_1) та високоефективна (CDI + MSD, $E_2 \approx 5 \cdot E_1$). Співвідношення потужності систем запалу більше 30 разів. В тривимірному випадку для (TCI**,** E_1) розглянуто два типи дискретизації та їх вплив. Кількісні характеристики наведені в Табл.1.

Таблиця 1. **Параметри одиничного імпульсу**

Розрахунок:	2D_Spark0	2D_SparkSpec	TR_3D0	TR_3D_FINE
Ширина, мс	3.51	**3.53**	**2.23**	2.24
ave(F_R), Н	785.7	804.8	**1062.6**	1031.0
F_R, Н/Гц	2.76	**2.84**	2.32	**2.31**
ave(P_a), атм	**2.31**	2.18	2.03	**1.91**
ave(T), K	1179.5	**1090.3**	**1145.8**	1248.7

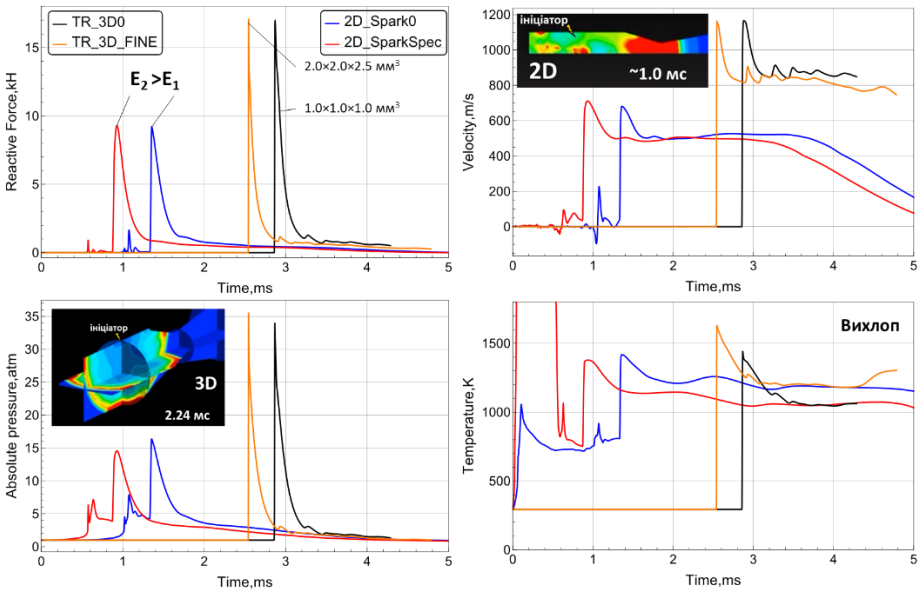


Рис. 1. Розподіл у часі одиничного імпульсу на зрізі детонаційної труби (на виході)

1. В.В. Філонов, Г.О. Воропаєв, *Енергетичні особливості класичної моделі суміші для оцінки параметрів детонації в обмеженому об'ємі.* Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, (2025). https://doi.org/10.20998/2222-0631.2025.02(9).17.
2. Poinsot T. Theoretical and numerical combustion / T. Poinsot, D. Veynante. — 2nd ed. — Philadelphia : Edwards, 2005. — 522 p.

Detonation pulse estimation ratio in 2D and 3D approximation when using FRC-EM

V.V. Filonov[a1,b], G.O. Voropaiev[a]

[a]Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine.
[b]IPP – Centre LLC, Kyiv Ukraine

[1] workFVV@gmail.com

В работе представлены результаты апробации применение специальной модели конечно-химической кинетики и модифицированного уравнения энергии для оценки параметров детонации в трёхмерной постановке. Как максимальные, так и средние величины для одиночного реактивного импульса. По сравнению с двухмерной постановкой наблюдается существенная задержка перехода от дефлаграции к детонации, что скорее всего связано с пространственной трактовкой источника инициации. Характерные максимальные величины импульса в трехмерном случае значительно выше (приблизительно в два раза) и не сильно зависят от дискретизации расчетной модели. Тем не менее наблюдается определенная эквивалентность удельных результатов, что может быть учтено при разработке подходов для оценки многоцикловых детонационных процессов.

Keywords: deflagration, detonation,finite-rate chemistry, reactive impulse, energy equation.

Гетерогенні властивості моделі суміші для швидкого прогнозу параметрів критичного витоку двофазного середовища

В. В. Філонов[a1,б], Д.О. Федоров[a]

[a]ТОВ «ІПП–Центр», Київ, Україна
[b]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна.

[1]filonov-vv@ipp-centre.com.ua

Ключові слова: гетерогенність, двофазний потік, криза течії, морфологія тріщини, масова швидкість, швидкість звуку, тиск запирання

Задача критичного витоку теплоносія (досягнення локального числа Маха рівного 1.0) є свого роду «істинно – гетерогенною» з точки зору процесу течії двофазних потоків і разом з тим «індикативною», оскільки встановлені параметри є функціями власних значень такої системи. Постановку можна спростити, якщо вся «гетерогенність потоку» буде зосереджена в характеристичній величині швидкості поширення малих збурень, яка визначається морфологією двофазного середовища. Для врахування гетерогенної природи двофазного потоку в наближенні суміші, градієнт густини кожної із фаз представляється у вигляді лінійної комбінації градієнту тиску та ентальпії з коефіцієнтами у вигляді термодинамічних функцій (стисливість та функція температурного розширення). Виразивши функцію стисливості потоку через локальне значення швидкості звуку для гетерогенного потоку [1] можна наближено представити:

$$a_{mix} = \left[\frac{a_v^2 \cdot a_l^2 \cdot \rho_v}{vf \cdot a_l^2\left[\rho_f - \left(\rho_f - \rho_g\right)vf\right] + (1 - vf) \cdot a_v^2 \cdot \rho_v}\right]^{0.5} \approx \left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{p}}\right)^{-2} \quad (1)$$

Де vf – об'ємний паровміст , ρ_f, ρ_v – густини рідкої та парової фази на лінії насичення, a_l, a_v – термодинамічні швидкості звуку на лінії насичення.

Таким досить простим способом узагальнюються одномірні співвідношення суміші (фактично - механічно та термічно гетерогенна система) на двофазний випадок, у якому гетерогенна природа зберігається на рівні поширення малих збурень, що визначає критичне значення витрати (запирання). При цьому, жодних суттєвих обмежень на співвідношення L/D_h у моделі не закладено, за винятком чисельних складнощів та обробки вхідних ділянок (проблема емпіричної інформації, яка враховує перебудову радіальних профілів).

Схематизація проточної частини розрахункової процедури оцінки критичного потоку показано на Рис. 1. В основних вузлах розрахункової області реалізуються параметри зв'язування кусочно-лінійних ділянок області інтегрування [2]. Безпосередньо граничні умови на виході алгоритмічно реалізовані через спеціальну модельну функцію згладжування. Валідація для щілин та тріщин показана на Рис. 2.

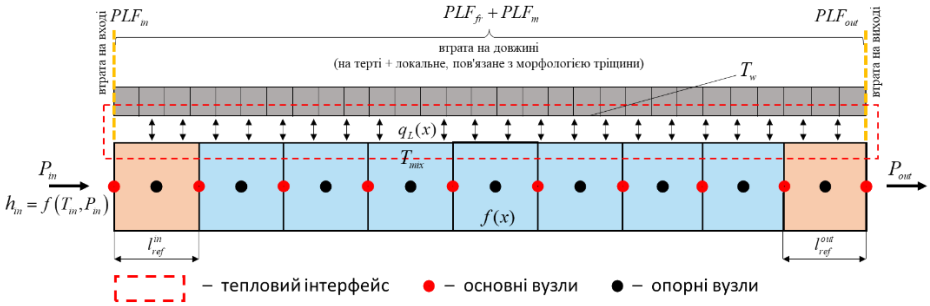


Рис. 1. Схематизація розрахункової процедури (проточна частина та тверда стінка)

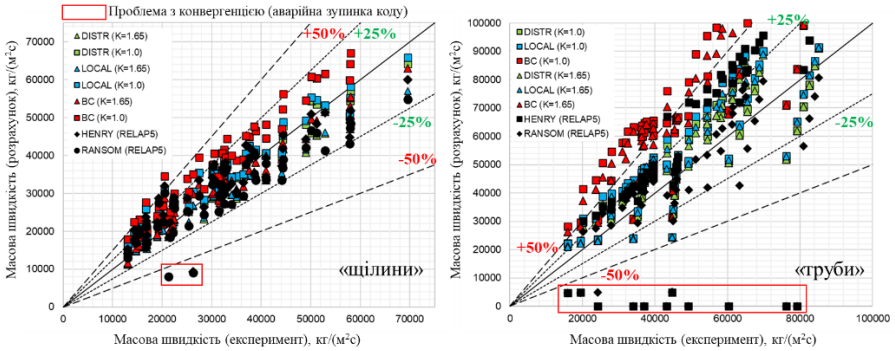


Рис. 2. Результати розрахунку експериментальних режимів (К – коефіцієнт корекції тертя відносно базової функції PLF)

1. Lund, H., Flåtten, T. (2010). *Equilibrium conditions and sound velocities in two-phase flows*, presented at SIAM Annual Meeting. Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
2. Filonov, V., Filonova, Y., Dubyk, Y., et.al. *Transfer matrix method for analysis of flow thermohydraulic characteristics with extremely nonlinear behavior of thermophysical properties using channel approach*. Int. J. Heat&Mass Transfer, 187, (2022)

Heterogeneous properties of the mixture model for the fast prediction parameters of the two-phase medium critical flow

V. Filonov[a1,b], D. Fedorov[a]

[a]IPP – Centre LLC, Kyiv Ukraine
[b]Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine.

[1]filonov-vv@ipp-centre.com.ua

The paper examines the physical and technical aspects of developing a fast assessment procedure for the leakage of subcooled coolant through slits and cracks. The proposed approaches allow to consider the flow heterogeneity as well as the thermal inertia of the pipe material. The predictive capability of the model is confirmed through verification and validation procedures.

Keywords: heterogeneity, two-phase flow, critical flow, crack morphology, mass velocity, sound velocity, critical pressure

Особливості формування вихрової структури в гладких та частково гофрованих трубах за неізотермічних умов

Г. Воропаєв[а,б], О. Баскова[а,б1]

[а]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна
[б]КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

[1] BaskAleksandra@gmail.com

Ключові слова: течія в трубі, вихрова течія, перехідний режим течії, неізотермічна течія, структурування поверхні, гофрована поверхня.

Проблема розроблення енергоефективного обладнання широко пов'язана із необхідністю детального вивчення структури течії, яка виникає за умов його роботи. Будь-які поліпшення геометрії окремих елементів устаткування повинні спиратися на фізичні особливості процесів, які в ньому протікають. В даній роботі особлива увага приділяється саме процесам розвинення течії, що мають місце при перехідному режимі (число Re = 7000) та за наявності градієнту температур, а, отже, і значень в'язкості. У якості способу структурування поверхні обрано часткове гофрування. Структурування обтічної поверхні у вигляді гофрів розглядалося в роботах чималої кількості дослідників [1, 2, 3], але саме частковому гофруванню та взаємодії породжених ним вихрових структур із власними збуреннями потоку приділяється доволі мало уваги.

В доповіді наводяться результати чисельного моделювання формування структури течії на початковій ділянці труби довжиною 46d с гофрованою ділянкою довжиною 4d, розташованою на змінній відстані від входу. На вході задавалася постійна швидкість (U_0 = 0,1 м/с, T_0 = 333 К), на виході граничні умови Outflow. Постійна температура T_w = 283 К та умови прилипання задавалися на стінках труби.

Дослідження проводилися на основі прямого чисельного моделювання. Математична постановка детально представлена в [4].

Наявний градієнт в'язкості в пристінній зоні зумовлює складний поетапний розвиток вихрової структури [4]. Особливу увагу привертають детерміновані тороподібній структури, поява їх є завершальним етапом переходу до турбулентного режиму (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Q-візуалізація вихрової структури в трубі: *а* – гладка труба; *б* – труба із гофрованою вставкою.

Характер параметрів вихрових структур, виникаючих у гладкій трубі (рис.1, а) при відповідному діапазоні чисел Рейнольдса, майже не залежить від числа Рейнольдса і визначається радіусом труби. Відповідно до цих параметрів були досліджені параметри гофрування. Сама гофрована вставка розташовувалася в місці початку формування тороподібних структур. ЇЇ наявність привела до суттєвого (на відстань ~ 8d) збільшення довжини ділянки існування тороподібних структур. Дана ділянка характеризується, зниженим (до 20%) значенням напруження тертя, у порівнянні із гладкою трубою. Проте зменшення напруження тертя майже не вплинуло на інтенсивність конвективного теплообміну, що є предметом подальших досліджень.

1. S. Rainieri and G. Pagliarini, Convective heat transfer to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, №45, 4525–4536 (2002). doi: 10.1016/S0017-9310(02)00156-4M.
2. P. G. Vicente, A. Garc, and A. Viedma, Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, №47, 671–681 (2004).
3. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.005.
4. A. Tyagi, G. Kumar, R. K. Singh Thermal-hydraulic behavior of corrugated pipe configurations. *Journal of Polymer & Composites*, №10, 108-114 (2022). DOI (Journal): 10.37591/JoPC
5. G. Voropaiev, O. Baskova, Some features of a laminar flow stability loss in a pipe, *Journal of Numerical and Applied Mathematics*, №1 (135), 59-65 (2021). https://doi.org/10.17721/2706-9699.2021.1.07)

Features of Vortex Structure Formation in Smooth and Partially Corrugated Tubes under Non-Isothermal Conditions

G. Voropaiev[a,b], O. Baskova[a,b1]

[a]Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

[1] BaskAleksandra@gmail.com

At present, numerous studies focus on evaluating different types of surface structuring to achieve better performance of the equipment and it`s parts. Typically, such studies explore specific ranges of physical and geometric parameters through extensive parametric variations. We proposed take a flow characteristic as the starting point. Based on the structure and parameters of natural flow disturbances, the geometry and configuration of surface structuring are defined. Partial surface modification allows controlled influence on disturbance development without fundamentally altering its natural evolution. In these study numerical simulations are performed for transitional Reynolds numbers under non-isothermal conditions using direct numerical simulation without turbulence models. The influence of corrugation wavelength is identified.

Keywords: internal flow; vortical structures; transitional regime; non-isothermal conditions; surface structuring; corrugated walls.

Течія в околі каверн різних форм та їх опір

Н.В. Розумнюк[1]

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

[1]nrozymnyuk@gmail.com

Ключові слова: течія в каверні, гідродинамічний опір, чисельне моделювання

Чисельне моделювання на основі нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса течії в'язкої нестисливої рідини біля плаского поверхні з каверною застосовано для аналізу впливу геометрії каверни на структуру течії в ній, а також на додатковий опір обтічної поверхні, який генерує каверна.

Розглядаються мілкі ($1 \le L/h \le 4$, L – ширина, d – глибина) двомірні каверни при помірних числах Рейнольдса; розміри каверн суттєво перевищують товщину локального примежового шару. В таких кавернах формується "відкритий" режим обтікання [1] з одною або кількома ($L/h > 2$) добре розрізнюваними вихровими зонами з протилежними напрямками обертання, розмір яких визначається глибиною каверни [2,3,4]. Взаємодія цих вихрів між собою та зі зсувним шаром, який утворюється між вихрами та зовнішнім потоком, призводить до коливань в каверні, а відповідна зміна положення зсувного шару при його натіканні на навітряну стінку каверни викликає суттєві стрибки тиску. Саме ця ділянка підвищеного тиску біля кромки вносить найбільший вклад в опір "відкритої" каверни, оскільки на решті довжини стінок тиск змінюється мало. Метою дослідження було проаналізувати, як модифікації форми стінок каверни змінюють картину течії та розподіл тиску на стінках.

Розглядались каверни різної відносної ширини; стінки каверн були прямі, округлі з різними радіусами, а також різної висоти та з криволінійним спряженням з обтічною поверхнею (Рис.1).

При збільненні відносної ширини в каверні відбувається розвиток і посилення нестаціонарності з втратою стійкості зсувного шару, утворенням внаслідок його коливання мілких відривних вихрів на навітряній кромці. Одночасно зростають осереднені величини тиску і опору, а миттєві значення суттєво їх перевищують [3,4]. Заокруглення навітряної стінки (Рис.1в,г) призводить до подальшого посилення амплітуди нестаціонарних коливань через більш інтенсивний відрив на загостреній кромці. Водночас заокруглення підвітряної стінки дещо зменшує нестійкість зсувного шару, що знижує амплітуди коливань і зменшує опір.

Зниження навітряної стінки і рівня обтічної поверхні за каверною (Рис.1а), з одного боку, прибирає зону підвищеного тиску на навітряній стінці, де на неї натікає зсувний шар. З іншого боку, за рахунок різної довжини стінок змінюється баланс вкладу стінок в загальний опір, підвищуючи його. Відновлення висоти навітряної стінки шляхом додаванням ділянки плавного спряження з обтічною поверхнею за каверною (Рис.1б) робить опір власне каверни практично нульовим, але з'являється додаткова складова на ділянці спряження, куди переміщується зона підвищеного тиску в місці приєднання зсувного шару. В той же час, її вклад менший за рахунок суттєвої зміни кута нормалі до поверхні відносно напрямку потоку. Зі збільшенням відносної ширини каверни і посиленням нестаціонарності вплив форми стінок послаблюється.

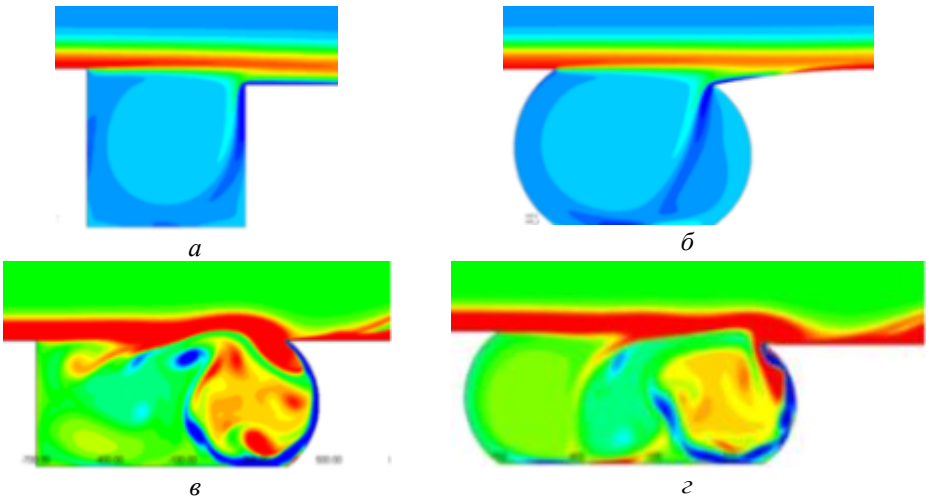


Рис. 1. Приклади каверн різної форми. Розподіли завихреності.

1. Lin J.-C., Rockwell D. Organized oscillation of initially turbulent flow past a cavity. AIAA Journal. 2001. 39, N 6. P. 1139–1151
2. Grace S.M., Dewar W.G., Wroblewski D.E. Experimental investigation of the flow characteristics within a shallow wall cavity for both laminar and turbulent boundary layer // Experiments in Fluids. – 2004. – 36. - P.791-804
3. Martinez M. A., Di Cicca G. M., Iovieno M., Onorato M.. Control of Cavity Flow Oscillations by High FrequencyForcing // Journal of Fluids Engineering. – 2012. - Vol. 134
4. Г. О. Воропаєв, Н. В. Розумнюк, О.О. Баскова, Особливості структури течії у каналі із прямокутною траншеєю, *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*, **1**, 45-51 (2023)

The flow about a cavity of varied shape and its drag

N. Rozumnyuk[a1]

[a]Institute of Hydromechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1]nrozymnyuk@gmail.com

We numerically analyze an unsteady viscous flow about the "open" cavity and effects of its walls shape on the vortical structures in the cavity, as well as additional drag due to pressure redistribution on the walls.

Keywords: cavity flow, hydrodynamic drag, CFD

Про методи розрахунку задачі руху крилового профілю поблизу екрану

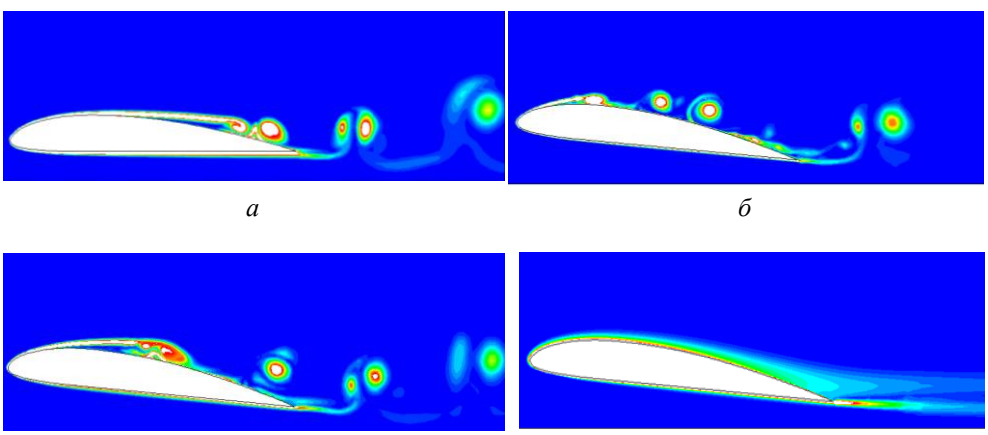
Я. Загуменний[a1], Д. Кушнір[a], О. Сірош[a]

[a]Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, Київ, Україна

[1] zagumennyi@gmail.com

Ключові слова: в’язка нестислива рідина, криловий профіль, кут атаки, екранний ефект, відрив потоку, вихровий слід, чисельне моделювання, розрахункова сітка.

Крило як елемент будь-якого технічного пристрою, що забезпечує не тільки підйомну силу, а й силу тяги, у закритичних режимах нестаціонарного відривного обтікання викликає суттєві амплітуди коливань характеристик потоку, що ускладнює конструювання технічних пристроїв або обмежує умови їхньої експлуатації [1]. Особливо це критично в умовах пересування апарату поблизу екрану, коли нестаціонарна зміна діючих сил призводить до осцилюючої траєкторії його руху [2]. Методи чисельного моделювання дозволяють враховувати реальні умови експлуатації, складність геометрії, важливі властивості середовища, проте досі залишається ряд питань і невизначеностей щодо чисельного моделювання задачі руху апарату поблизу екрану, які потребують вирішення та уточнення [3]. У цій доповіді обговорюються деякі питання вибору методів та алгоритмів розрахунку, якості та роздільної здатності розрахункової сітки, постановки початкових і граничних умов, валідації розрахунків, а також ряд інших важливих питань щодо оптимізації обчислень, надійності та достовірності отримуваних результатів.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Вихрова структура течії навколо несиметричного профілю Clark-Y під кутом атаки поблизу екрануючої поверхні (відстань від крила до екрану 0.08 довжини хорди профілю): *а* – $\alpha = 2°$, $Re = 2.1 \cdot 10^5$; *б* – $\alpha = 7°$, $Re = 2.1 \cdot 10^5$; *в* – $\alpha = 7°$, $Re = 4.2 \cdot 10^4$; *г* – $\alpha = 7°$, $Re = 2.1 \cdot 10^5$ із застосуванням методів розрахунку DNS (*а–в*) і URANS (*г*).

Розглядається нестаціонарна задача обтікання в’язкою нестисливою рідиною крилових профілів симетричної і несиметричної форм при різних числах Рейнольдса, кутах атаки і відстанях від профілю до екрану. Для розв'язання поставленої задачі

застосовується нестаціонарна система рівнянь Нав'є-Стокса, чисельний розв'язок якої будується методом скінченного об'єму на структурованих розрахункових сітках зі згущенням вузлів у напрямку поверхні профілю та екрану.

На основі проведеної серії тестових розрахунків з використанням різних розрахункових сіток і методів розрахунку визначено найбільш оптимальні та достовірні підходи до чисельного розв'язання розглядуваного типу задач. Як показують результати розрахунків на Рис. 1, метод DNS (Direct Numerical Simulation) досить реалістично описує вихрову структуру течії, проте вимагає дуже дрібної сітки в області примежового шару для достовірного розрахунку відривної течії, тоді як підхід URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) взагалі не показує відриву потоку та вихровий слід. Виявлено, що найкращими методами для розрахунку відривних течій і вихрового сліду є гібридні методи DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) та WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity), які є оптимальним поєднанням швидкості обчислень та достовірності отримуваних результатів.

1. J. Zhao, A. Sharma, A. Agrawal, K. Hourigan, and M. Thompson, Two- and three-dimensional wake transitions of a NACA0012 airfoil, *Journal of Fluid Mechanics*, **954**(A26), 45–54 (2023). https://doi.org/10.1017/jfm.2022.958
2. I. Hussain, and M. Abood, Experimental study of CLARK-Y smoothed inverted wing with ground effect, *Int. J. Computer Applications*, **147**(1), 45–54 (2016).
3. Q. Qu, W. Wang, P. Liu, and R. Agarwal, Airfoil aerodynamics in ground effect for wide range of angles of attack, *AIAA Journal*, **53**(4), 1048–1061 (2015). https://doi.org/10.2514/1.J053366

On methods for calculating flow around a wing profile in ground effect

Ya. Zagumennyi[a1], D. Kushnir[a], O. Sirosh[a]

[a]Institute of Hydromechnics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] zagumennyi@gmail.com

The unsteady problem of viscous incompressible fluid flow around a wing profile with various symmetric and asymmetric shapes is considered at different Reynolds numbers, angles of attack and ground distances. To solve the problem, an unsteady system of Navier-Stokes equations is used with numerical implementation based on the finite volume method and structured grid with grading towards the surface of the profile and the ground. Based on a series of test calculations with various computational grids and numerical methods, it is revealed that the most optimized and reliable numerical approaches are hybrid DDES and WALE methods as an optimal combination of computation speed and reliability of results, while DNS requires a very fine mesh in the boundary layer region and URANS does not reflect the flow separation process and the vortex wake at all.

Keywords: viscous incompressible fluid, wing profile, angle of attack, ground effect, flow separation, vortex wake, numerical simulation, computational grid.

Чисельне моделювання виникнення парової каверни за тілом, що рухається

Г. Воропаєв[а,б], С.Коваль[а,б1]

[а]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна
[б]КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

[1] koval.sergiy-ipt@lll.kpi.ua

Ключові слова: парова каверна, критичний тиск виникнення пари у рідині, число кавітації, форма каверни, вихрова течія

Виникнення локальної кавітації на поверхні обтічних тіл було виявлено та пояснено понад століття тому, проте проблеми, пов'язані з її руйнівною дією, спостерігаються й донині [1]. Рішення цієї проблеми при збереженні режимів течії знайшли і знаходять на шляху реалізації суперкавітаційного режиму обтікання, коли замикання каверн відбувається поза обтічними поверхнями. Для ідеальної невагомої рідини на основі енергетичної моделі виділення вільної межі в суцільному середовищі була побудована теорія суперкавітаційного режиму обтікання тіл [2], на основі якої було сформовано механізм виникнення суперкаверни за рухомим тілом, визначаються форма і розміри каверни, опір кавітуючого тіла, як функції числа кавітації з деяким набором емпіричних констант, що цілком влаштовує практиків. Однак форма поверхні реальної каверни за її серединою зі зростанням числа кавітації стає нестійкою, насичена пара каверни виноситься з каверни, що вимагає враховувати не тільки кінематичні та динамічні умови на вільній межі, але й масові потоки на межі, що робиться в режимі безперервного середовища багатофазних середовищ [3].

У цій доповіді представлено результати чисельного моделювання формування суперкаверни за рухомим (V=50 м/с) осесиметричним тілом. Застосовано модель двофазних в'язких нестисливих середовищ, що включає рівняння

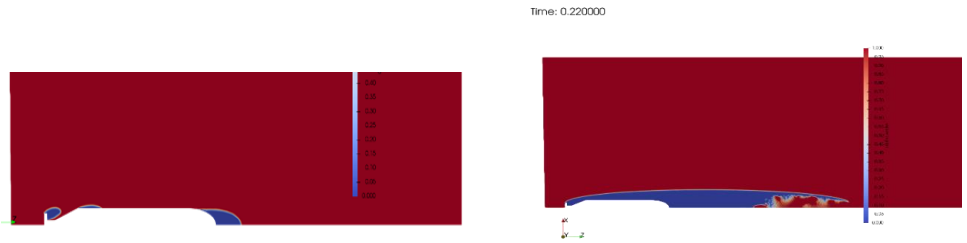


Рис. 1. Межи розподілення фаз у різні моменту часу в процесі формування суперкаверни (σ=0.08)

маси, імпульсу та енергії, записаних для кожної окремої фази з урахуванням фазового переходу, що залежить від тиску та температури, а також постульованого обміну імпульсом між фазами. Розроблена чисельна методика дозволяє простежити еволюцію течії від зародження локальних каверн до квазістаціонарної форми каверни, що відповідає заданому числу кавітації (рис. 1). Передня частина каверни абсолютно

стійка, за міделем каверни можна спостерігати біжучі хвилі з довжиною хвилі порядку радіуса каверни.

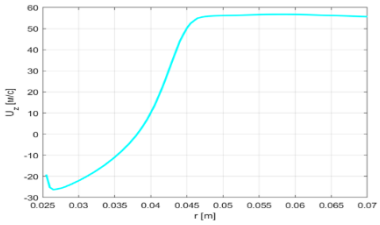


Рис. 2. Поздовжня компонента швидкості в каверні (σ=0.08)

У каверні фіксується несиметрична вихрова течія насиченої пари (рис. 2), що відповідає відведенню пари з каверни. Отримана масова витрата насиченої пари склала ~0,008 кг/с, що збіглося з раніше отриманими значеннями в'язкого винесення газу [4], при збереженні стійкого положення каверни.

1. I.S. Pearsall. Cavitation. London: Mills and Boon Limited , 1972.- P. 71.
2. Г.В. Логвинович Гідродинаміка течій з вільними межами. К:.Наукова думка. 1969. -206 С.
3. Lite Zhang, Chengwei Zhang, Huixia Jia, Ruoling Dong, Effects of Lateral Flows on the Supercavitation and Hydrodynamic Characteristics of Underwater Series and Parallel High-Speed Projectiles, J. Mar. Sci. Eng., 11(4), 878 (2023). https://doi.org/10.3390/jmse11040878
4. Г.О. Воропаєв В'язке залучення газу у вентильованій каверні заданої форми. . *Прикладна гідромеханіка, 2013, Том.15, №1, -с. 10-23.*

Numerical simulation of the formation of a steam cavity behind a moving body

G. Voropaiev[a,b], S. Koval[a,b1]

[a]Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

[1] koval.sergiy-ipt@lll.kpi.ua

This paper presents the results of numerical modeling of supercavity formation behind a moving (V = 50 m/s) axisymmetric body. This model is based on a two-phase viscous incompressible fluid model, incorporating mass, momentum, and energy equations written for each phase separately, taking into account a pressure- and temperature-dependent phase transition and a postulated momentum exchange between the phases. The developed numerical method allows us to trace the flow evolution from the inception of localized cavities to a quasi-steady-state cavity shape corresponding to a given cavitation number. The head of the cavity is completely stable, while traveling waves with a wavelength on the order of the cavity radius can be observed behind the midsection of the cavity.

Keywords: steam cavity, critical pressure of vapor formation in a liquid, cavitation number, cavity shape, vortex flow.

Дослідження руху суперкавітуючих тіл, що проникають у воду під малими кутами до горизонту

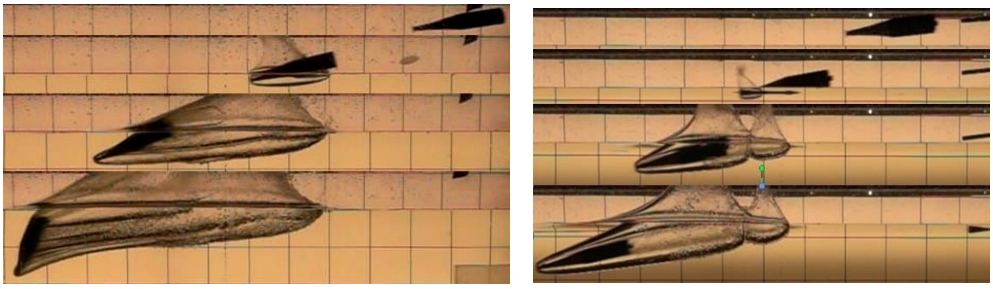
Ю. М. Савченко[a], В. М. Семененко[a], Г. Ю. Савченко[a1], О. І. Наумова[a]

[a] Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

[1] e-mail: Georgiy.Savchenko@yahoo.com

Ключові слова: вхід у воду, суперкавітація, динаміка, рикошет, комп'ютерне моделювання

Проведено серії випробувань по входу та проникненню моделі зі змінним центром мас у воду під кутами $4° \div 15°$ до поверхні води з початковою швидкістю $10 \div 25$м/с. З цією метою була модифікована експериментальна установка на основі прозорої робочої ділянки гідродинамічної труби та пневматичної катапульти [1]. Отримано кінограми руху моделей і розвитку каверн шляхом швидкісної відеореєстрації (швидкість зйомки 1000 кадр/с). Шляхом обробки кінограм отримано експериментальні графіки залежності швидкості моделі, пройденої відстані і кута тангажу моделі від часу. Описано чотири типи динамічної поведінки моделей: 1) проникнення у воду в режимі суперкавітації; 2) підводний рикошет (відскок); 3) підводне перекидання моделі; 4) поверхневий рикошет. Дано оцінку впливу положення центру мас моделі на динаміку моделі після входу у воду. Нижче наведено оцінку та висновки впливу кута входу у воду і положення центру мас на стійкість руху до відхилень.



а *б*

Рис. 1. Кінограми випробувань: *а* – № С0033, кожний 27-й кадр, підводне перекидання моделі; *б* – № С0018, кожний 22-й кадр, прямолінійний рух моделі.

Таблиця 1.

Початкові параметри при вході моделі у воду

№	x_c,мм	V_0, м/с	γ, °	ψ, °	ω_z,°/с	Результат
С0018	116	9.8	7.75	8.73	150	прямолінійний рух
С0033	132	15.8	5.24	12.80	254	підводне перекидання

Аналіз початкових параметрів та динаміки показує, що поточна модель з діаметром кавітатора $D_n = 17$мм, масою $m = 0.3$кг, густиною ρ = 1.87 г/см^3 і при змінному положенні центру мас моделі $x_c = 116$мм і $x_c = 132$мм (при сталій середній густині) може на цих кутах входу мати два сценарію розвитку подій: 1) неуспішний

вхід (поверхневий або підводний рикошет); 2) успішний вхід (модель повністю занурюється і розвивається каверна). При успішному зануренні модель може як швидко втратити стійкість (підводне перекидання), так і продовжити відносно прямий і стійкий рух у суперкавітаційному режимі. Аналіз кінограм та початкових умов дає можливість зробити наступні висновки:

- густина моделі більша в два рази за густину води дає можливість моделі на цих режимах обертатися (перекидатися) у рідині;
- зміщення центру мас у даному діапазоні є достатнім, щоб на тих самих кутах входу мати занурення або мати рикошет;
- зміщення центру мас до заднього положення є достатнім, щоб модель з великою ймовірністю (70 ÷ 90% отриманих кінограм) мала неуспішні вхід у воду або рух під водою на дистанції спостереження;
- початкові збурення кута атаки і/або кутової швидкості можуть сприяти зануренню, але у більшості випадків збільшують нестійкість руху;
- значення початкового кута входу 4°÷15° суттєво впливає на здатність моделі з цією геометрією проникати у воду. Якщо при кутах ~15° модель стовідсотково не має рикошету, то на кутах ~5° на проникнення суттєво впливає положення центру мас (до 75% рикошетів із заднім положенням центру мас).

Також у роботі уточнено математичну модель і методику розрахунку динаміки суперкавітуючих моделей, засновану на принципі незалежності розширення перерізів каверни Г.В. Логвиновича [2, 3], шляхом урахування впливу вільної поверхні води на форму стаціонарних та нестаціонарних суперкаверн. Розроблену методику розрахунку реалізовано у вигляді демонстраційних комп'ютерних програм **DIVE**. В нашій роботі [4] наведено приклади комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів при вході і проникненні різних моделей у воду. Дано оцінку ймовірності рикошету від поверхні води різних моделей на площині початкових параметрів входу у воду. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показує, що дана уточнена математична модель дозволяє з задовільною точністю передбачити основні особливості гідродинамічних процесів при русі суперкавітуючих моделей на малих відстанях від поверхні води та при вході і проникненні моделей у воду під малими кутами до поверхні води.

1. Yu.N. Savchenko, Yu.A.Semenov, Yu.D. Vlasenko, and G.Yu. Savchenko, Water entry of a disk at small angles to a free surface, *Матеріали XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю "Підводна техніка і технологія",* м. Миколаїв, 09 –10 грудня 2021 р. – С. 3–9.
2. Г.В. Логвинович, *Гидродинамика течений со свободными границами,* Киев, Наукова думка (1969).
3. V.N. Semenenko and Ye.I. Naumova, *Study of the supercavitating body dynamics*, in book: *Supercavitation: Advances and Perspectives*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 147–176 (2012).
4. Ю.М. Савченко, В.М. Семененко, Г.Ю.Савченко, О.І. Наумова, Експериментальне дослідження та комп'ютерне моделювання динаміки суперкавітуючих тіл**,** що проникають у воду під малими кутами до вільної поверхні, *Гідродинаміка і акустика*, **4** (94), N 1, 1 – 25 (2025).

Наукова школа «Динаміка об'єктів космічної техніки». Результати досліджень у 2021 – 2025 роках

А. П. Алпатов, С. В. Хорошилов[1]

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1]khoroshylov.s.v@nas.gov.ua

Ключові слова: машинне навчання, керований рух об’єктів космічної техніки, дистанційне зондування, космічне сміття, промислова платформа, орбітальний сервіс, затінення Землі.

Наукову школу "Динаміка об'єктів космічної техніки" заснував член-кореспондент НАНУ Микола Федорович Герасюта, один з заступників М. К. Янгеля, в 1987 році. Початкова команда складалася з дослідників наукових установ міста Дніпра. Значна кількість науковців походила з Інституту технічної механіки НАНУ. В інституті дослідницька традиція школи отримала подальший розвиток. Нині наукове керівництво школою забезпечує член-кореспондент НАНУ, проф. Анатолій Алпатов.

Основними напрямками досліджень наукової школи є системний аналіз проблем космічної галузі та дослідження вільних і керованих режимів функціонування механічних систем космічного і наземного базування в умовах широкого спектру дій.

Дослідницькі досягнення наукової школи «Динаміка об'єктів космічної техніки» Національної академії наук України за останні п'ять років були спрямовані на вирішення широкого спектру ключових проблем у космічному секторі. Робота інтегрує як фундаментальні, так і прикладні аспекти сучасної космонавтики. Фундаментальні дослідження були зосереджені на передових підходах до синтезу систем керування на основі методології штучного інтелекту [1]. Проблема перетворень складних інформаційних представлень у ті, що більш придатні для швидкого прийняття рішень, може бути вирішена на основі парадигми граничного узагальнення [2]. Ця концепція отримала значний подальший розвиток як основа для моделювання та проєктування когнітивних технічних систем. Серед прикладних напрямків особлива увага приділяється актуальній проблемі зменшення космічного сміття. Зростаюча присутність космічного сміття на навколоземних орбітах створює серйозну перешкоду для сталого використання космічного простору. Відповідно, значна частина дослідницьких зусиль школи була присвячена цьому питанню [3, 4]. Важливі результати включають розробку нової парадигми вирішення проблеми космічного сміття на основі концепції його переробки на орбіті. У цьому напрямку розглянуто методологічні аспекти створення космічних промислових платформ та запропоновано обґрунтовані підходи до вибору орбітальних конфігурацій, придатних для збору та зберігання сміття як ресурсу, що підлягає переробці [5, 6]. Розглянуто низку актуальних задач, пов’язаних із розвитком нових технологій та дають змогу суттєво підвищити ефективність супутників дистанційного зондування Землі та їх угруповань [7]. Ще один важливий напрямок досліджень стосується зменшення сонячної радіації за допомогою спеціалізованих космічних систем. Початкові висновки були

представлені та обговорені на сесії Комітету ООН з мирного використання космічного простору [8].

1. S. Khoroshylov, M. Redka, Deep Learning for Space Applications, *In: I. Potapov et al. Communications in Computer and Information Science*, vol 2647, Springer, Cham, 39–46, (2025). DOI:10.1007/978-3-032-04731-1_5
2. Y. Prokopchuk, *Intuition: The Experience of Formal Research*, Dnipro, PSACEA Press, 724 p. (2022)
3. A. P. Alpatov, O. P. Kuznetsov, O. S. Palii, E. O. Lapkhanov, Development of R&D framework for the modernization of the aerodynamic deorbit system for the use in the upper stage of Cyclone-1M launch vehicle, *Science and innovation*, 18, 6, 60–71. (2022). https://doi.org/10.15407/scine18.06.060
4. O. A. Fokov, S. V. Khoroshilov, D. S. Svorobin, Relative motion of a spacecraft with an aerodynamic compensator in a direction perpendicular to the orbital plane during contactless removal of space debris (in Ukrainian), *Space Science and Technology*, 27, 2 (129), 15–27, (2021). https://doi.org/10.15407/knit2021.02.015
5. A. P. Alpatov, O. S. Palii, S. V. Syutkina-Doronina, Conceptual design of a space industrial platform. Problem statement (in Ukrainian), *Space Science and Technology*, 29, 6, 13–25, (2023). https://doi.org/10.15407/knit2023.06.013
6. Yu. M. Goldshtein, Orbital structure optimization technique of the low-orbit complex of on-orbit service, *Space Science and Technology*, 29, 4, 3–11, (2023). DOI: 10.15407/knit2023.04.003
7. A. V. Pirozhenko, A. I. Maslova, Regularities of controlled and uncontrolled satellite motion in low Earth orbit, *International Applied Mechanics*, 61, 393–402, (2025). https://doi.org/10.1007/s10778-025-01362-5
8. A. P. Alpatov, E. O. Lapkhanov, The general issues of space sunshade system creation, *United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA)*, (2025). URL: https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2025/ListOfTechnicalPresentations/3_%20Wednesday5th%20/6b_-_UKRAINE_The_general_issues_of_space_sunshade_system_creation_ppt.pdf.

The scientific school "Dynamics of space technology objects". Research results in 2021–2025

A. Alpatov, S. Khoroshylov

The Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

khoroshylov.s.v@nas.gov.ua

This work presents a review of the research that had been carried out from 2021 to 2025 by scientists from the National Academy of Sciences of Ukraine representing the "Dynamics of Space Technology Objects" research school. Some of this work concerns a systems analysis of Ukraine's space industry. Research of the spacecraft dynamics and systems has been conducted in several areas. These areas are the development of machine learning methods in spacecraft control, optimization of spacecraft controlled motion, systems for remote sensing of the Earth's surface, deorbiting of space debris, a methodology for conceptual design of an industrial space platform, the problem of space service technology, and the formation of a paradigm for stabilizing the Earth's climate based on space systems for shading its surface.

Keywords: machine learning, controlled motion of space technology objects, Earth remote sensing, deorbiting of space debris, industrial space platform, on-orbit service, Earth's surface shading.

Аналіз напружено-деформованого стану пари «колесо–рейка» на коліях 1520 і 1435 мм

Т. Ф. Мокрій[1], Л. Г. Лапіна[2], С.С. Пасічник

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1]mokriyt@gmail.com; [2] lapina.l.h@nas.gov.ua

Ключові слова: напружено-деформований стан, контактні напруження, пара «колесо–рейка», профілі ободів коліс, колії 1520 і 1435 мм.

Актуальною задачею для вітчизняного залізничного транспорту є інтегрування до європейської транспортної системи. Завдання суттєво ускладнено тим, що залізниці України та більшої частини Європи відрізняються параметрами рейкової колії, перш за все шириною (1520 і 1435 мм відповідно). Міжнародний досвід показав, що для швидкого переходу рухомого складу на залізничну колію іншої ширини ефективним технічним рішенням є застосування розсувних колісних пар, які дають змогу змінювати відстань між колесами на спеціальних колійних пристроях без заміни візків. Разом з цим необхідно забезпечити сумісність контактної пари "колесо–рейка" на коліях різних стандартів устрою: з рейками Р65 з підхилом 1/20 в Україні; з рейками UIC60 з підхилом 1/40 в країнах Західної Європи. Для вирішення цієї проблеми в Інституті технічної механіки НАН України і ДКА України розроблено нові профілі поверхні кочення коліс ІТМ-73ЕР і ІТМ-73ЕС для пасажирських і вантажних вагонів відповідно [1, 2]. За прогнозними оцінками застосування цих профілів дозволить забезпечити високі динамічні якості екіпажів і прийнятні показники їхньої взаємодії з коліями на залізницях обох стандартів.

В процесі експлуатації форми профілів поверхонь контакту коліс і рейок змінюються внаслідок зношування, особливо інтенсивного в кривих малого радіуса. Форми зношених рейок на коліях 1520 і 1435 мм розрізняються між собою не лише внаслідок різниці початкових профілів, а й внаслідок того, що вони контактують переважно зі стандартними для кожної залізничної системи профілями коліс: ДСТУ ГОСТ 10791:2016 – в Україні, S1002 – в країнах Західної Європи. За таких умов застосування нових профілів ІТМ-73ЕР і ІТМ-73ЕС потребує оцінювання їх впливу на взаємодію пари «колесо–рейка» та ресурс її елементів при контакті зі зношеними рейками.

В представленому дослідженні аналіз взаємодії колеса і рейки виконано на основі розрахунку напружено-деформованого стану цієї контактної пари, що дозволило визначити розподіл контактних напружень і спрогнозувати зони зношення і утворення дефектів контактно-втомного походження. Розглянуто взаємодію набіжних на зовнішні рейки коліс при вписуванні вагонів з постійною швидкістю у кругові криві малого радіусу, та проведено аналіз впливу зміни форми головок рейок внаслідок їх зношення на напружено-деформований стан при контакті з колесами із різними профілями ободів. Для моделювання контактної взаємодії коліс та рейок побудовано тривимірні скінченноелементні моделі з урахуванням реальної форми бічного зношення головок рейок (від 2 до 8 мм). Досліджувалися колеса з профілями ободів ІТМ-73ЕР і ІТМ-73ЕС, а також – для порівняння – із стандартними профілями кожної

із залізничних систем. За результатами розрахунків отримано епюри напружень для контактних пар «колесо–рейка», що включають різні поєднання елементів.

Аналіз отриманих результатів показав, що застосування стандартних профілів коліс може призводити до суттєвого зростання напружень в гребеневій зоні при контакті зі зношеними рейками іншої залізничної системи. При використанні коліс з розробленими в ІТМ НАНУ і ДКАУ профілями ободів ІТМ-73ЕР і ІТМ-73ЕС забезпечуються покращені показники їхньої взаємодії зі зношеними рейками як українського, так і європейського стандартів, що сприятиме зниженню гребеневого зносу коліс та підвищенню їх ресурсних показників.

1. Т. Ф. Мокрій, І. Ю. Малишева, Л. Г. Лапіна, Н. В. Безрукавий, Профіль обода коліс пасажирського вагона для умов спільної експлуатації на українських і європейських залізницях, *Технічна механіка*, № 4, 111–120 (2022). https://doi.org/10.15407/itm2022.04.111
2. Т. Ф. Мокрій, І. Ю. Малишева, С. С. Пасічник, Профіль обода коліс вантажного вагона з перспективними візками для умов спільної експлуатації на українських і європейських залізницях, *Технічна механіка*, № 4, 90–103 (2023). https://doi.org/10.15407/itm2023.04.090

Stress–Strain State Analysis of the Wheel–Rail Pair on 1520 and 1435 mm Tracks

T. F. Mokrii[a1], L. H. Lapina[a2], S. S. Pasichnyk[a]

[a]Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the SSA of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1]mokriyt@gmail.com

[2] lapina.l.h@nas.gov.ua

The paper presents an analysis of the stress–strain state of the wheel–rail contact pair during railway vehicle operation on 1520 and 1435 mm gauge tracks. The interaction of wheels running onto the outer rail in sharp circular curves is considered with account for lateral rail head wear. Three-dimensional finite element models of the contact pair were developed to determine contact stress distributions for various combinations of rail head and wheel tread profiles, including both standard and ITM-73EP and ITM-73EC profiles developed at the Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the SSA of Ukraine. The results show that standard wheel profiles in contact with worn rails of a different railway system lead to increased flange stresses. The proposed profiles ensure a more favorable stress distribution and improved wheel service life under international operation conditions.

Keywords: *stress–strain state, contact stresses, wheel–rail pair, wheel tread profiles, 1520 and 1435 mm track gauges.*

Сепараційні процеси в паливних баках космічних ступенів в умовах мікрогравітації та методи стабілізації положення палива в баках

О. Д. Ніколаєв [a], І.Д. Башлій [1a], Д.В. Клименко[б]

[a]Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна
[б]ГП «КБ «Південне», Дніпро, Україна

[1] bashliyin@gmail.com

Ключові слова: космічна ракета-носій, мікрогравітація, багаторазовий запуск двигуна, пасивний етап польоту, метод об'єму рідини, пристрій керування паливом.

Для реалізації програмного руху космічного корабля і управління переорієнтацією в умовах мікрогравітації система управління космічної двигунної установки повинна забезпечити кілька пусків і зупинок головних рідинних ракетних двигунів. Під час пасивного польоту космічного ступеня при зупинці двигуна рідке паливо рухається до верхньої частини паливного баку, а газ наддуву – в його нижню частину, що створює потенційну небезпеку для реалізації надійного багаторазового запуску двигуна внаслідок надходження газу наддуву на вхід двигуна. Незважаючи на досягнутий прогрес у вивченні динаміки газорідинних середовищ у баках РН визначення параметрів руху рідини в баках палива в умовах мікрогравітації є актуальною проблемою, яка потребує вирішення при проєктуванні космічних рідинних двигунних установок [1].

Розроблено підхід до теоретичного розрахунку параметрів руху системи «газ – рідина» в паливних баках сучасних космічних ступенів в умовах мікрогравітації. Підхід базується на використанні методу об'єму рідини з урахуванням сил поверхневого натягу та змочування палива, сил опору руху палива, особливостей конструкції паливного баку за допомогою сучасних комп'ютерних інструментів для скінченно-елементного аналізу (Computer Aided Engineering systems) [2].

Запропонований підхід апробований при визначення параметрів руху границі розділу «газ – рідина» в модельному циліндричному баку паливного баку космічного ступеню «Центавр» [3] і в баках сфероподібної форми ДП «КБ «Південне» [4], експериментально досліджених в «кидкових вежах» в умовах мікрогравітації.

Відповідно до літературних джерел фізичні властивості компонентів палива істотно залежить від температури. Це може бути використане для стабілізації розташування газової порожнини в баку космічного ступеня на пасивній ділянці польоту [5]. З використанням підходу проведено чисельне моделювання руху рідини в експериментальному зразку резервуара сферичної форми в різних умовах: без урахування та з урахуванням штучно введеної гарячої зони, розташованої біля верхнього днища баку. В результаті розрахунків показано, що у випадку урахування гарячої зони газова порожнина стабілізується і не виникає небезпечної ситуації, коли газ потрапляє на вхід у двигун у кількостях, що перевищують допустимі норми.

Підхід може бути використаний для теоретичного прогнозування динамічної міцності та працездатності двигунних установок космічного ступеня РН в умовах багаторазових пусків-зупинок та програмного руху ступеня РН під час його маневрування в просторі. Застосування розробленого підходу дозволить значно скоротити обсяг експериментальної перевірки проєктованих космічних ступенів.

1. И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун *Ракета как объект управления,* АРТ–Пресс, Днепропетровск (2004).

2. P. Kohnke *Ansys, Inc. Theory Manual* 001369, Twelfth Edition, Canonsburg, (2001)
3. LI Zhang-Guo, LIU Qiu-Sheng, LIU Rong, HU Wei, DENG Xin-Yu. Influence of Rayleigh–Taylor Instability on Liquid Propellant Reorientation in a Low-Gravity Environment. *Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd*. Vol.26, No.11., 114701-1-114701-4. (2009).
4. I. V. Sedykh, D. S. Nazarenko, A. N. Minai, Ya. O. Babiychuk, Experimental determination of the fuel sedimentation time in a spherical tank before restarting the main engine. *System design and analysis of the characteristics of aerospace technology.* 27, 136—144. (2019).
5. S. Gregory Mungas, *Thermal phase separation*, FIRESTAR ENGINEERING, US 2013/0048097, F16L 53/00, 28.02.2013. (2013).

Separation process in launch vehicle space stage in microgravity condition and system of propellant management device in tanks

O. D. Nikolayev[a], I. D. Bashliy[a1], L. D. V. Klymenko[b]

[a]Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.
[b]Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine.

[1] bashliyin@gmail.com

An approach to the theoretical computation of the parameters of the motion of the 'gas - fluid' system in the propellant tanks of modern space stages in microgravity conditions has been developed. The approach uses the finite element method, the Volume of Fluid method and modern computer tools for finite-element analysis (Computer Aided Engineering systems). The numerical simulation of the fluid movement in experimental sample of spherical shape tank in microgravity conditions with and without artificially introduced heating zone near upper tank bottom was performed. The motion parameters of the 'gas-fluid' interface in cylindrical and spherical tank obtained as a result of mathematical modeling are in satisfactory agreement with the experimental data. The use of the developed approach will significantly reduce the amount of experimental testing of the designed upper and space stages.

Keywords: space launch vehicle, microgravity, engine multiple start-ups, passive flight, volume of fluid method, propellant management device (PMD).

Дренажна магістраль ракети

В.С. Дудніков

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

dudvlad1944@gmail.com

Ключові слова: дренажна магістраль, клапан дренажно-запобіжний, днище бака

Дана розробка належить до ракетно-космічної техніки, а саме до конструкції дренажних пристроїв ракети, призначених для виключення руйнування баків від надмірного підвищення тиску в них, та може бути застосована для других і третіх ступенів багатоступеневих ракет, в яких використовується скидання головних аеродинамічних обтічників [1].

Дренажний пристрій ракети з відокремлюваним відсіком складається з двох частин, пов'язаних між собою стиком, що розділяється в польоті. Перша частина після відділення відсіку залишається на ракетній ступені, а друга частина відноситься разом з відокремлюваним відсіком (см. рис.1). Перша частина представлена у вигляді дренажно-запобіжного клапана 1, встановленого на верхньому днищі бака останнього ступеня багатоступінчастої ракети. Друга частина виконана у вигляді патрубка 2 з центральним магістральним каналом 3 для проходу надлишкового тиску в баку компонентів ракетного палива, що скидається дренажно-запобіжним клапаном 1. Патрубок 2 притискається до сферичної поверхні 16 клапана 1 під дією розпірного зусилля попередньо стиснутої пружини 6. Зусилля пружини 6 досить для того, щоб виключити поділ стику між клапаном 1 і патрубком 2 під дією статичного тиску потоку газів, що скидаються з бака.

Пристрій працює наступним чином.

За межами відокремлюваного відсіку (стулок 11) збирається друга частина дренажного пристрою. Вона являє собою патрубок 2, на який встановлюється пружина 6, втулка 5, кришка 9, гайка 15. У канавку 20 встановлюється ущільнювальне гумове кільце 21. Після цього зібрана друга частина через отвір 22 в стулці 1 відокремлюваного відсіку заводиться всередину відсіку. Циліндроконічне розточування 17 стикується з сферичною поверхнею 16 клапана 1. Гумове кільце 21 з натягом обжимає сферичну поверхню 16 клапана 1, забезпечуючи герметичність стику. Кришка 9 притискається до стулки 11 і закріплюється винтами 10, додатково підгортаючи пружину 6, створюючи зусилля, достатнє для виключення поділу стику між двома частинами пристрою при проходженні по ньому надлишкового тиску газів, що скидаються при спрацьовуванні дренажно-запобіжного клапана 1. Наявність двох сферичних поверхонь 16 і 7, а також можливість вільного поздовжнього переміщення втулки 5 щодо патрубка 2, дозволяє компенсувати в значних межах радіальні, кутові і окружні переміщення, які виникають між дренажно-запобіжним клапаном 1 і стулкою 11 відокремлюваного відсіку в процесі заправки ракети паливом, польоту до моменту відділення відсіку. Таким чином, друга частина дренажного пристрою є самоустановна конструкція, що забезпечує герметичність і не надає додаткового силового впливу на сполучні елементи

конструкції ракети. Так як головні аеродинамічні обтічники, як правило, скидаються шляхом поздовжнього поділу на стулки з подальшим їх розворотом, то стулка 11 впирається в гайку 15, тягне за собою патрубок 2, знімаючи його із сферичної поверхні 16 дренажно-запобіжного клапана 1. Таким чином, вся друга частина дренажного пристрою повністю відноситься відокремлюваним відсіком, а перша частина у вигляді дренажно- запобіжного клапана залишається на ступені ракети. Конструкція відрізняється простотою конструкції, за рахунок самоустановності забезпечує надійну працездатність при значних експлуатаційних переміщеннях, сприяє максимальному полегшенню останніх ступенів ракети-носія за рахунок своєчасного видалення частин конструкції, потреба в яких відпала на даний момент часу, та підвищує енергетичну характеристику ракети.

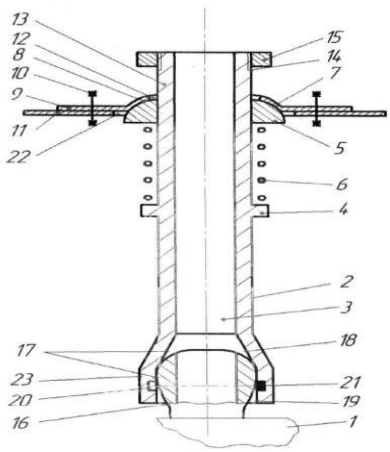


Рис. Принципова схема дренажної магістралі

1. Патент України на корисну модель №137905, B64G1/00, 2019. Дренажний пристрій ракети з відокремлюваним відсіком. ДудніковВ.С., Сіроух П.А.

Drainage main of the rocket

V. Dudnikov

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

dudvlad1944@gmail.com

The design of the drainage line of the tanks of the upper stages of rockets is considered, which is separated from the drainage safety valve installed on the upper bottom of the tank and carried away by a detachable part of the rocket, for example, an aerodynamic fairing. The design is characterized by its simplicity of design, and its self-installation design ensures reliable performance during significant use displacements, the maximum lightness of the remaining stages of the launch vehicle is taken into account for the timely removal of parts of the structure, the need for which has fallen at the moment, and which predicts the energy characteristics of the rocket.

Keywords: drainage line, drain and safety valve, tank bottom

Спосіб контролю тиску в ємностях ракет при тривалому зберіганні їх в заправленому стані

В.С. Дудніков

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

dudvlad1944@gmail.com

Ключові слова: тиск, ємність, тензорезистор, тарувальний графік

Дане повідомлення належить до способів вимірювання тиску і призначена, в перше чергу, для вимірювання величини падіння тиску в ємностях високого тиску при тривалому зберіганні в заправленому стані. Відоме широке застосування газів високого тиску в системах подачі компонентів палива в камеру згоряння ракетних двигунів міжконтинентальних балістичних ракет, ракет-носіїв космічних літальних апаратів, зенітних керованих ракет і снарядів. Газ високого тиску (повітря, азот, гелій) знаходиться на борту ракетно-космічного об'єкта в спеціальних ємностях (акумуляторах тиску) . З метою підвищення боєготовності сучасні ракети зберігаються з заправленими системами живлення, в тому числі і газовими акумуляторами тиску. При зменшенні тиску газів в акумуляторах тиску нижче певного допустимого рівня може відбутися відмова в роботі елементів системи живлення, порушення функціонування системи, що призводить до аварії під час пуску або польоту ракети . Так причиною скасування першого випробувального пуску ракети-носія "Ангара-1,2ПП" легкого класу стало падіння тиску в кулебалоні наддуву демпфера окислювача. Зменшення тиску в ємностях високого тиску при тривалому зберіганні може бути викликано негерметичністю. Падіння тиску відбувається внаслідок негерметичності зварних швів ємності і дифузії через метал ємності. З метою контролю величини тиску газу встановлюються сигналізатори тиску, які видають відповідні сигнали в інші системи ракети при наборі передстартових команд. Однак, при цьому потрібно роз'єднання пневматичної системи або встановлення спеціальних штуцерів для підключення в систему перетворювачів тиску, що знижує герметичність і надійність всієї системи .

Відомий спосіб тензометрії, в якому передбачено попереднє перед наклейкою тензорезистора стиснення (розтягнення) самої деталі, яка випробовується, що створює після зняття навантаження в тензорезисторах деформацію розтягування (стиснення), тобто протилежну за знаком майбутній експлуатаційній напрузі.

Завдяки цьому досягається розширення (прямо до 2-х разів) діапазону вимірювань тензорезистором. Стосовно до ємностей, цей спосіб вимагає наклейку тензорезистора здійснювати після повної заправки ємності під високим тиском, а потім здійснити тарування тензорезистора шляхом повного відведення газу з ємності, що технічно і економічно недоцільно. Хоча можна приблизне тарування здійснювати в лабораторних умовах на інший аналогічній ємності. Однак, через об'єктивні розбіжки в розмірах ємності, параметрах тензорезисторів, параметрах вимірювальної схеми це знижує точність вимірювання, що може привести до непоправних наслідків. В нашому випадку необхідне індивідуальне тарування кожної конкретної ємності. Таким чином, хоча проблема, пов'язана зі зміною пружних властивостей тензорезистора і клейового з'єднання, начебто вирішена, проте в такому вигляді цей

спосіб неприйнятний для ємностей ракетно-космічної техніки. Однак, при тривалому зберіганні ємності під тиском відбувається значна зміна в часі (практично до нуля) початкового рівня сигналу тензорезистора, який постійно знаходиться під повним навантаженням (розтягнутий на величину подовження ємності під тиском), зокрема від зміни пружних властивостей тензорезистора і його клейового з'єднання з поверхнею ємності. Такий тензорезистор починає видавати неправдиву інформацію про величину тиску робочого тіла в ємності. Надійність способу при тривалому зберіганні ємності практично дорівнює нулю.

Була поставлена задача підвищення надійності і точності тензометрії ємностей високого тиску за допомогою тензорезисторів за рахунок зменшення впливу зміни в часі пружних властивостей тензорезистора і його клейового з'єднання з ємністю.

Спосіб здійснюється таким чином [1].

На поверхні ємності готуються місця для наклейки двох тензорезисторів. Спочатку наклеюється перший тензорезистор, який включається в вимірювальну схему. Ємність заправляється стисненим газом до повного значення експлуатаційного тиску, через деякий час (після охолодження ємності до температури навколишнього середовища) виконують фіксацію значень цього першого тензорезистора, тобто виконують тарування за тиском ємності. Відомо, що тарувальна залежність має лінійний характер, а тому потреба в проміжкових значеннях показань тензорезистора відпадає. Будується лінійний тарувальний графік, максимальне значення якого відповідає тиску заправленого газу в ємності.

Контроль тиску при заправці здійснюється за допомогою манометрів заправної системи.

Після цього на заправлену ємність наклеюють другий тензорезистор з такими ж параметрами. Потім від'єднують перший датчик, за яким було проведено калібрування, від вимірювальної системи, а замість нього підключають другий тензорезистор. В результаті мостова вимірювальна схема почне видавати нульовий сигнал, якому, насправді, відповідає реальний тиск газів заправленої ємності, який раніше зафіксовано за допомогою манометра заправної системи і першого тензорезистора.

За допомогою нового тарувального графіка можна визначати в кожен момент часу тривалого зберігання в заправленому стані поточне значення тиску газів в ємності. Так як другий тензорезистор не навантажений, то відсутня зміна пружних властивостей тензорезистора і його клейового з'єднання з ємністю, що значно підвищує надійність і точність вимірювання поточного тиску газів в ємності під час її зберігання в заправленому стані.

1. Патент України на корисну модель №129631, G01L9/04. 2018. Спосіб контролю тиску в ємностях при тривалому зберіганні їх в заправленому стані. Дудніков В.С., Сахно О.А.

A method of controlling pressure in rocket tanks during long-term storage in a fueled state

V. Dudnikov
Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
dudvlad1944@gmail.com

This paper examines a method for monitoring the pressure in high-pressure gas tanks aboard liquid-propellant rockets and used in positive displacement systems for feeding propellant components into the combustion chamber of a rocket engine. During long-term storage in a fueled state, leaks can cause a pressure drop, which can lead to engine failure. A method for strain-gauging the tank structure is proposed that eliminates (or reduces) the influence of relaxation of the metal lattice of the strain gauge itself and the adhesive joint. This improves the accuracy and reliability of determining the current pressure in the tank during long-term storage.

Keywords: pressure, capacity, strain gauge, calibration graph

Дослідження характеристик потоку в укороченому соплі ракетного двигуна

Н.С. Прядко, Г.О. Стрельников

Інститут технічної механіки НАН України і ДКАУ України, Дніпро, Україна

np-2006@ukr.net

Ключові слова: укорочене сопло, ракетний двигун, характеристики потоку, тиск.

У сучасних ракетних силових установках використовуються різні види сопел: сопло Лаваля, дзвоноподібне, подвійне дзвоноподібне, кільцеве і т.д. Основні характеристики сопла Лаваля добре вивчені, запропоновано різні варіації його конструкції [1]. Однак існують умови роботи сопел, які спричиняють перерозширення або недорозширення потоку, що знижує ефективність його роботи. Тому дослідники займаються різними модифікаціями стандартного сопла. На основі «класичного» сопла Лаваля проводяться дослідження зі створення укорочених сопел. Останнім часом у ракетних двигунах розглядається дзвоноподібне сопло, що має більший у порівнянні з соплом Лаваля кут входу в надзвукову частину сопла [2]. Укорочені сопла з дзвіноподібним насадком, що розглядаються в роботі, зручні у використанні при щільному компонуванні двигуна ракети. Спеціально профільований насадок дозволяє максимально заповнювати простір та зменшувати загальну вагу. На показники сопла впливають умови польоту, тобто. початковий тиск потоку та тиск навколишнього середовища.

Мета роботи – дослідження характеристик течії газу в укороченому соплі ракетного двигуна з дзвоноподібним насадком при зміні тиску перед соплом та зовнішнього середовища.

Досліджено хвильову структуру потоку у чотирьох укорочених соплах різної геометричної форми при початковому тиску P0 = 50, 100 і 200 бар та з урахуванням умов польоту – на рівні землі і висоті, тобто. при зовнішньому тиску Рн = 1 бар та 0,01 бар.

Встановлено, що при невеликих значеннях тиску на вході в сопло менше 50 бар при роботі в земних умовах на стінці насадка від кутової точки входу в насадок до його зрізу існує розвинена відривна зона з велико-і дрібномасштабним вихором в області зрізу насадка. В області першої «бочки» потоку газу існує «сідлоподібна» хвильова структура стиснення малої інтенсивності, її розміри та інтенсивність залежать від тиску на вході в сопло.

На рис показано розподіл швидкості потоку газу в укороченому соплі з дзвіноподібним насадком при різних величинах початкового тиску.

Встановлено, що статичний тиск у поперечному перерізі на зрізі насадка при $P_н$ = 0,1 бар пропорційно тиску на вході в сопло. При зовнішньому тиску $P_н$ = 1 бар статичний тиск у поперечному перерізі на зрізі насадка при P_0 > 100 бар має такий самий характер, як і при $P_н$ = 0,1 бар. При P_0<50 бар статичний тиск у поперечному тиску монотонно зменшується аж до радіусу R = 0,57.

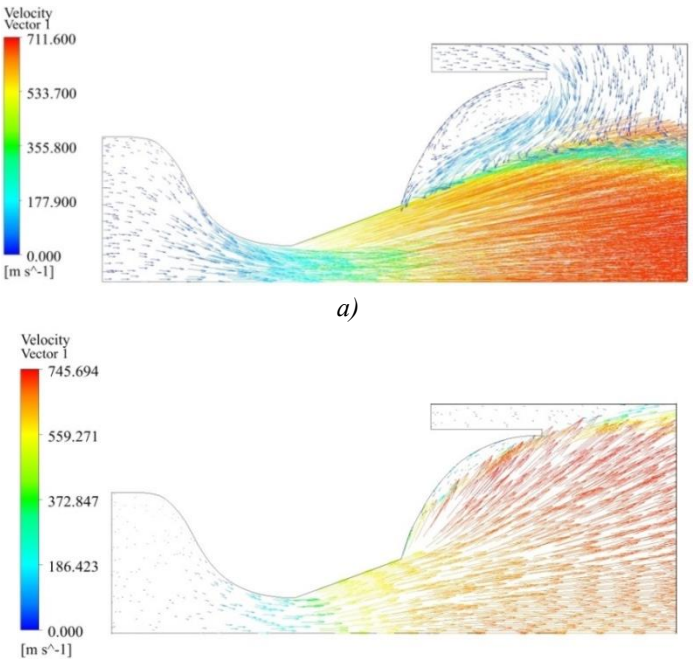


Рис. 1. Розподіл швидкості течії газу в укороченому соплі з дзвіноподібним насадком при зміни початкового тиску: *а* – P_0 = 50 бар; *б* – P_0 = 200 бар

1 Г. О. Стрельников, Н.С. Прядко та К.В. Тернова, *Надзвукові круглі укорочені сопла*, Академперіодика, Киев (2025) .

2. G. Strelnikov, O. Ihnatiev, N. Pryadko, K. Ternova Gas flow in a shortened Laval nozzle with a bell-shaped nozzle, *Tech. mech*, № 3, 35-46 (2022).

Study of flow characteristics in a shortened nozzle of a rocket engine

N. S. Pryadko[a], G. O. Strelnikov

[a]Institute of Technical Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] np-2006@ukr.net

We consider the flow in the nozzle with a bell-shaped tip at various inlet pressures (P_0=50 – 300 bar) and at external pressure Pn = 1 bar and 0.01 bar. It was shown that at small values of the pressure at the nozzle inlet less than 50 bar when operating in terrestrial conditions on the nozzle wall from the corner point of the nozzle inlet to its cut there is a developed separation zone with a large- and small-scale vortex in the nozzle cut area. In the area of the first "barrel" of the gas flow there is a "saddle-shaped" compression wave structure of low intensity, its dimensions and intensity depend on the pressure at the nozzle inlet. It is established that the static pressure in the cross section at the nozzle cut also depends on inlet and external pressures.

Keywords: shortened nozzle, rocket engine, flow characteristics, gas flow, pressure.

Моделювання детонації заряду з мідним пористим сердечником

Ю.М. Сидоренко [a1] Ю.І. Войтенко [б]

[a] Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна

[б] Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Марії Капніст, 8/4, Київ, Україна

[1] yura_michael@ukr.net

Ми представляємо результати математичного моделювання детонації заряду з пористим сердечником всередині із інертного матеріалу (монолітна і пориста мідь). Досліджувалось вплив пористості (0, 10%, 20%, 30%) на процес деформації матеріалу сердечника, кінематичні параметри руху корпусу заряду на початковій стадії польоту.

Ключові слова: заряд, вибухова речовина, детонація, реакційно здатний матеріал, пористість, енергія

В зарядах з регульованою потужністю використовують дві схеми збільшення енергії: шляхом змішування реакційно здатного матеріалу (РМ) з вибуховим матеріалом; шляхом введення блоку пористого РМ із порошкових компонентів в конструкцію заряду [1].

Для визначення картини хвильових процесів в пористому матеріалі і оцінки параметрів його динамічного деформування проводилося моделювання детонації заряду з мідним пористим сердечником. Розрахунок функціонування зарядів проводився з використанням чисельної процедури і моделей поведінки матеріалів корпусу заряду, сердечника і вибухового матеріалу, отриманими раніше [2].

В основу методу покладено систему рівнянь, що описує адіабатичний рух пружно-пластичного середовища. Дослідження процесу великих пластичних деформацій корпусу осколково-фугасного заряду (ОФЗ), а також мідного циліндричного сердечника в алюмінієвій оболонці проводилося з використанням кінцевих деформацій та теорії пластичної течії і відповідних співвідношень у формі Прандтля-Рейсса. Для розв'язання зазначеної вище системи диференційних рівнянь використовувався ейлеровий підхід щодо опису процесу руху суцільного середовища, що деформується. Наявність у конструкцій осколково-фугасних зарядів, що розглядаються у роботі, осьової симетрії дозволяє використовувати циліндричну (r, z) систему координат та відповідну двомірну вісесиметричну континуальну постановку, тобто без урахування процесів руйнування, або розпушування матеріалів сталевого корпусу заряду та мідного циліндричного сердечника в алюмінієвій оболонці, з використанням наскрізного розрахунку через контактні границі за алгоритмом методу концентрацій.

У зв’язку з тим, що разом з матеріалом корпусу осколково-фугасного заряду та мідного циліндричного сердечника в алюмінієвій оболонці через нерухому ейлереву сітку переноситься ряд історичних змінних, які характеризують стан і історію деформування матеріальних часток, то для відслідковування швидкості руху різних частин конструкції під час вибуху використовувався метод "вморожених" маркерів – спеціальних рухомих разом зі середовищем реперних точок.

Для розв'язання поставленої задачі математичної оцінки параметрів функціонування осколково-фугасного заряду використовувалось рівняння динамічної

стисливості матеріалу корпусу заряду, а також розміщеного по його вісі симетрії циліндричного сердечника з міді, що має оболонку з алюмінію – ударна адіабата у вигляді $p = p(\rho)$ (в формі Тета) та у вигляді $D = a + \lambda \cdot u$.

Математичний опис стану продуктів детонації заряду вибухової речовини (ВР) проводилося за допомогою рівняння стану ПД у формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL). У зв'язку з тим, що під час проведення математичних розрахунків приймається припущення, що процес розширення ПД є ізоентропічним, то замість рівняння стану в формі (JWL) використовувалося рівняння ізоентропи ПД в формі ступеневого двочлена Л.П. Орленко та в формі JWL

Для опису поведінки повітря, що оточує конструкцію осколково-фугасного заряду, використовувалося рівняння у формі степеневого поліному. Ініціація детонації заряду ВР здійснювалася в точці на вісі симетрії заряду на внутрішній торцевій поверхні корпусу заряду.

Зображена на рис.1 конструкція має сталевий циліндричний корпус (1) довжиною 128 мм з товщиною стінки 2 мм із закритою донної частиною. Діаметр зовнішньої поверхні корпусу становить 34 мм, а внутрішньої – 30 мм. Усередині корпусу розміщується заряд вибухової речовини (ВР) (2) – вибухова суміш щільністю $\rho_0 = 1760$ кг/м^3, швидкістю детонації $D = 7470$ м/с, $p_{C-J} = 24$ ГПа, $\rho_{C-J} = 2335$ кг/м^3 (RDX – 64 % (гексоген), TNT (тротил) – 36 %). За своїми енергетичними характеристиками він є близьким аналогом флегматизованого гексогену ($\rho_0 = 1{,}67$ г/м^3, $D = 8000$ м/с). Також, в середині корпусу заряду по вісі симетрії на відстані 20 мм від внутрішньої доної поверхні розміщено циліндричний мідний сердечник (3) довжиною 70 мм та діаметром 10 мм. Навколо мідного сердечника знаходиться оболонка з алюмінію (4) з товщиною стінки 0,5 мм. Ініціація детонації заряду вибухової речовини здійснювалася в точці на вісі симетрії заряду (5) у внутрішньої поверхні донної частини корпусу заряду (1).

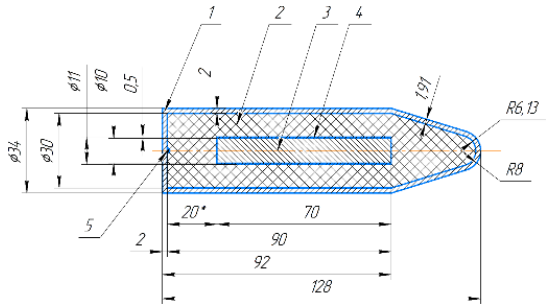


Рис. 1. Схема конструкції заряду з сердечником: 1 – корпус, 2 – заряд вибухової речовини, 3 – пористий сердечник, 4 – алюмінієва оболонка сердечника.

Таблиця 1

Механічні характеристики матеріалу корпусу заряду, встановленого в його середину сердечника в оболонці

№ з/п	Елемент конструкції	Матеріал	Густина, кг/м^3	Модуль зсуву, ГПа	Границя міцності, МПа
1.	Корпус (1)	Сталь 20	7850	81	600
2.	Сердечник (3)	Мідь (М1)	8940	49	200
3.	Оболонка сердечника (4)	Алюміній (AL 2024)	2785	28	470

Основні результати досліджень наступні:

1. Розроблено метод розрахунку функціонування осколково-фугасних зарядів з циліндричним подовженим сердечником із міді пористістю в 10%, 20% та 30%, що знаходиться в алюмінієвій оболонці.
2. За результатами проведеного моделювання процесу функціонування ОФЗ встановлено та описано картини хвильових процесів в продуктах детонації, корпусі заряду та в сердечнику, виготовленому з пористої міді, та просторово-масовий розподіл матеріалу корпусу заряду, що формується за результатами його вибуху.
3. Визначено, що зміна пористості мідного сердечника до 30%, встановленого по вісі симетрії ОФС, практично не впливає на значення як осьової V_z, так і радіальної V_r компоненти швидкості руху окремих частин корпусу ОФЗ, а також меридіонального кута розльоту осколкової маси корпусу ОФЗ.
4. Досліджено поведінку зовнішньої поверхні сердечника (Δy – величини розширення/звуження, мм) в залежності від величині пористості матеріалу сердечника. Встановлено, що незалежно від величини пористості міді, що використовується для виготовлення сердечника (від 10 до 30%), до 9…10 мкс процесу вибуху ОФС ця поведінка практично ідентична. У подальшому, коливальний процес розширення-звуження поверхні сердечника продовжується, але:

- в донній частині сердечника різниця між значеннями Δy для різних варіантів пористості міді поступово зменшується і поверхня сердечника на момент завершення процесу вибуху ОФЗ переходить у стан розширення;
- в центральній та головній частинах сердечник залишається у стані звуження, але в центральній частині значення Δy коливаються навколо середніх значень, що відповідають своєму рівню пористості, а в головній – рівень звуження стрімко збільшується. Зростання величини пористості на кожні 10% в цих частинах сердечника призводить практично до подвоєння величини Δy;
- існують відмінності в поведінці головної частини сердечника залежно від пористості міді; для пористості 30% спостерігається викид матеріалу сердечника в осьовому напрямку по аналогії з кумулятивним ефектом; для пористості 10% цей ефект відсутній.

1. Яшин В.Б., Алексеев В.В., Ходырев С.П. и др. Параметры взрыва зарядов из тротила, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композиций // Инженерный журнал. Наука и инновации. – 2013. - №.1 - С. 83-95
2. Sydorenko Yu.M. Methodology of two-dimensional computer modeling of the processes of functioning of highexplosive amunitions // Artillery and gunnery. – 2005. – No. 1. – P.18-21.

Modeling of the detonation of a charge with a porous copper core

Yu.I. Voitenko[a1], Yu.M. Sydorenko[b]

We present the results of mathematical modeling of the detonation of a charge with a porous core inside made of inert material (solid and porous copper). The influence of porosity (0, 10%, 20%, 30%) on the deformation process of the core material, kinematic parameters of the charge body motion at the initial stages of flight were studied.

Keywords: charge, explosive, detonation, reactive material, porosity, energy.

Про механізми збільшення енергії під час вибуху складеного заряду, що містить реакційно здатні матеріали

Ю.І. Войтенко[a1], Ю.М. Сидоренко[б]

[a] Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Марії Капніст, 8/4, Київ, Україна Київ, Україна
[б] Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна

[1] voytenkoui@gmail.com

Представлено результати розрахункової оцінки енергії деформування пористої міді в умовах динамічного стиснення вибухом. Досліджувалось вплив пористості (30%, 47%, 52,4%) на параметри деформації матеріалу сердечника і величину енергії, яка при цьому виділяється. Проведено порівняння цієї величини з величиною енергії хімічної взаємодії компонентів композитів Cu-Al, Ni-Al та інших відомих високоенергетичних матеріалів. Показано наявність діапазону пористості міді, в якому величина теплової енергії максимальна.

Ключові слова: заряд, вибухова речовина, реакційно здатний матеріал, детонація, температура, енергія

Однією із конструкційних схем зарядів з регульованою потужністю є наявність в конструкції капсульованих, або відкритих включень із реакційно активних матеріалів (РМ), теплота вибуху, або горіння яких на стадії розширення продуктів детонації значно перевищує теплоту вибуху вибухової речовини [1-2].

Якщо порівнювати теплоту вибуху основних індивідуальних і сумішевих ВР і теплоти горіння і вибуху деяких РМ (табл 1), то очевидно, що основний вклад в сумарну енергію вибухового перетворення заряду з добавками РМ вносять теплові ефекти хімічної взаємодії компонентів РМ і продуктів їхньої взаємодії з киснем повітря і продуктами детонації на стадії розширення вогняної кулі. Тим не менше цікаво порівняти тепловий ефект, який супроводжує динамічну деформацію пористого матеріалу з величиною теплового ефекту хімічних реакцій РМ. Таку оцінку проведемо на відомих матеріалах: пориста мідь і порівняємо з пористими композитами Cu-Al, Ni-Al.

Для визначення теплових ефектів при деформації пористої міді скористаємося результатами робіт [5-6].

В роботі [5] досліджено процеси деформації пористих металів при вибуху кумулятивного заряду з облицюванням із пористої міді, нікелю та заліза. Зокрема показано, що температура нагрівання пористої міді за фронтом ударної хвилі визначається співвідношенням [5]

$$\Delta T_н = (E_н - E_х)/c \tag{1}$$

$$E_х = \frac{c_0^2 \varepsilon^2}{2}, \tag{2}$$

де $E_н$ – енергія за фронтом ударної хвилі (УХ); $E_х$ – енергія холодного стиснення суцільної міді; с – теплоємність; c_0 – початкова швидкість звуку в суцільній речовині; ε – ступінь стиснення речовини.

$$V_0/V = \frac{\rho}{m\rho_{00}} = 1 + \varepsilon;\ m = \frac{\rho_0}{\rho_{00}},$$

де ρ_0, ρ_{00} – початкові щільності суцільної і пористої речовини; m – пористість; V_0 – питомий об’єм суцільної речовини; V – поточний питомий об’єм. В цій же роботі отримані значення залишкової температури ΔT_S після розвантаження в хвилі

розрідження по ізоентропі до нульового тиску. Залишкові температури для m=1,4 і m=1,9 зменшуються на 30 – 40%, для m=2,1 m=2,5 – відповідно на 13% і 5%.

Таблиця 1

Теплота згорання і вибуху деяких простих речовин, органічних і неорганічних сполук

Реакція	Щільність, кг/м^3	Масова теплота горіння, МДж/кг	Теплота вибуху МДж/кг	Температура горіння, К	Джерело
$2B + (3/2)O_2 = B_2O_3$	2350	58,9	-	3745	[3]
$2Al + (3/2)O_2 = Al_2O_3$	2700	30,9	-	3970	[3]
$Mg + (1/2)O_2 = MgO$	1740	24,7	-	3390	[3]
$2AlB_2 + (9/2)O_2 = Al_2O_3 + 2B_2O_3$	3190	38,1	-	3753	[3]
$MgB_2 + (3/2)O_2 = MgO + B_2O_3$	2690	38.4	-	3297	[3]
Al+Ni=AlNi	5200	12,6	1,7	1500	[1, 4]
$3Cu+Al=Cu_3Al$		-	1,5	1200	[4]
$Ti+2B=TiB_2$	3500	31,7	4,8		[1]
$Al+KClO_4$	2600	10,6	10,6		[1]
$Al + MoO_3$	3900	8,4	4,7		[1]
TNT	1640	14,5	4,2		[1]

Для тисків на фронті УХ 90…100 ГПа ступінь стиснення суцільної міді досягає 0,34 [6]. Для пористості m=1,4 – 0,43 [5]. Для більших значень пористості (m=1,9) цей параметр буде ще більшим [5]. Тому скористаємось даними роботи [5], в якій отримано температури за фронтом УХ для пористої міді: $\Delta T_н$=4820 К (m=1,5; ε=0,2); $\Delta T_н$=43350 К (m=1,9; ε=0,2). Розрахунок за формулою (1) для c= 0,389 кДж/кг·К без врахування енергії холодного стиснення E_x дає 1875,0 кДж/кг і 16863,2 кДж/кг. Якщо порівняти ці величини з даними таблиці, то можна зробити висновок, що пористість може активно впливати на сумарний тепловий ефект заряду з РМ. Оптимальна пористість сприяє не лише більшому виділенню енергії за рахунок стиснення, але й більш ранньому початку хімічних реакцій РМ і більшій кількості компонентів РМ, які прореагують.

Зауважимо, що отримано оцінки для нормального ходу ударних адіабат. Достатньо висока температура розвивається при аномальному ході ударних адіабат (m=2,1 і m=2,5, відповідно 31570 К і 9850 К) [5], Ці температури значно перевищують температуру кипіння (2840 К), випаровування і фазового вибуху пористої міді (5450 К).

Висновок. У разі оптимальної пористості теплова енергія, яка виділяється при деформації РМ може бути співмірна з енергією хімічної взаємодії компонентів пористого композиту, а для деяких композитів перевищує її.

1 Яшин В.Б., Алексеев В.В., Ходырев С.П. и др. Параметры взрыва зарядов из тротила, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композиций // Инженерный журнал. Наука и инновации. – 2013. - №.1 - С. 83-95
2 Li, JB., Li, WB., Wang, XM. *et al.* Experimental Investigation on the Enhancing Effect of Reactive Materials on Explosion Fireballs and Shock Waves of Composite Charges // Combust. Explos. Shock Waves. - 2024. – V. **60**,# . P. 222–232 https://doi.org/10.1134/S0010508224020084/
3 Rosenband V., Gany A. Thermal Explosion Synthesis of a Magnesium Diboride Powder //Combust. Explos. Shock Waves. - **2014**, - V.*50*, #6. - P. 653-657.
4 Письменская Е.Б. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений в режиме динамического теплового взрыва [Текст]: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Письменская Елена Борисовна; Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН. - Черноголовка, 2000.- 179 с
5 Trishin, Y.A., Kinelovskii, S.A. Effect of porosity on shaped-charge flow // Combust Explos Shock Waves- 2000. – V. 36, №2, - P.272–281. https://doi.org/10.1007/BF02699373
6 Войтенко Ю.І., Сидоренко Ю.М. Моделювання детонації заряду з мідним пористим сердечником //Збірник матеріалів конференції по актуальним проблемам механіки і машинознавства. – Київ: Інститут проблем міцності НАН України, 2026. – С. 00-00.

On the mechanisms of energy increase during the explosion of a composite charge containing reactive materials

Yu.I. Voitenko[a1], Yu.M. Sydorenko[b]

The results of the calculated estimation of the deformation energy of porous copper under conditions of dynamic explosive compression are presented. The influence of porosity (30%, 47%, 52.4%) on the deformation parameters of the core material and the amount of energy released in this case was studied. This value was compared with the amount of energy of chemical interaction of components of Cu-Al, Ni-Al composites and other known high-energy materials. The presence of a range of copper porosity in which the amount of thermal energy is maximum is shown.

Keywords: charge, explosive, reactive material, detonation, temperature, energy

Перспективи використання оптичних, теплових та мікрохвильових методів дистанційного зондування Землі в угрупованнях малих космічних апаратів

Д. О. Храмов[1], О. Л. Волошенюк, А. І. Маслова, О. О. Пироженко

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1] dakhramov@gmail.com

Ключові слова: мультиспектральна зйомка, гіперспектральна зйомка, лідар, теплова інфрачервона зйомка, обробка даних на борту, радіометр, радар, скаттерометр, альтиметр

Сучасний етап розвитку дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) характеризується активним переходом від одиночних великих космічних апаратів (КА) до багатосупутникових угруповань малих КА масою до 1200 кг. Цей перехід створює нові можливості для застосування різноманітних методів спостереження Землі, але водночас виявляє істотні відмінності в ступені готовності окремих технологій до масового впровадження на малих платформах.

Оптичні методи ДЗЗ є найбільш зрілими для використання на малих КА. Мультиспектральна зйомка розвивається шляхом збільшення кількості спектральних каналів, застосування вужчих каналів (15–20 нм замість 70–80 нм), підвищення просторової роздільної здатності як у задачах детального (до 0,25 м), так і оглядового спостереження (3–5 м). Ключовим фактором зростання повторюваності зйомки без зниження роздільної здатності є створення угруповань недорогих малих КА (Flock компанії Planet, Jilin-1 китайської CGST). Гіперспектральна зйомка та лідарна зйомка перебувають на етапі технологічного відпрацювання: основною перешкодою є обробка та передавання великих обсягів даних. Перспективним рішенням є обробка даних безпосередньо на борту КА. У галузі лідарної зйомки існують передумови для створення угруповання КА, що забезпечуватиме регулярне щорічне глобальне покриття земної суші без прогалин.

Теплова інфрачервона зйомка довгий час поступалася оптичним методам за доступністю даних та просторовою роздільною здатністю через технічні складності (зокрема, через необхідність кріогенного охолодження датчиків). Проте за останні 5–7 років ситуація кардинально змінилася завдяки розгортанню комерційних угруповань малих КА теплового ДЗЗ (OTC, HotSat, Hydrosat, FireSat, EarthDaily тощо). Спостерігається перехід до мультиспектральної зйомки в середньохвильовому і довгохвильовому інфрачервоних діапазонах, що дозволяє одночасно виявляти високотемпературні об'єкти (пожежі) та вимірювати температуру поверхні. Впроваджуються енергоефективні неохолоджувані датчики на основі мікроболометрів, що робить можливим їх розміщення на мініатюрних платформах типу CubeSat. Широко застосовується штучний інтелект (ШІ) для підвищення просторової роздільної здатності даних, автономного виявлення аномалій на борту КА та прогнозування поширення пожеж. Більшість угруповань теплової зйомки мають подвійне (цивільне та військове) призначення.

Мікрохвильові методи ДЗЗ мають унікальну перевагу – можливість отримувати інформацію будь-який час доби, незалежно від сонячного освітлення та в широкому

діапазоні метеорологічних умов. Серед мікрохвильових методів найактивніше розвивається радарна зйомка за допомогою радарів із синтезованою апертурою. За останнє десятиліття відбулася заміна одиночних великогабаритних розвідувальних радарних КА багатосупутниковими угрупованнями малих КА (наприклад, угруповання компаній ICEYE, Capella Space, Umbra). Особливий інтерес становить побудова оперативних цифрових моделей земної поверхні на основі радарних даних. Перехід китайських компаній на більш високочастотні діапазони зйомки (Ku-діапазон) дає змогу досягти субметрової просторової роздільної здатності з меншими витратами. Мікрохвильові радіометри завдяки державному замовленню США будуть масово представлені на борту малих комерційних метеосупутників (Tomorrow.io, PlanetiQ). Найближчими роками очікується орбітальне тестування гіперспектральних мікрохвильових радіометрів. Розміщення радарних альтиметрів і скаттерометрів на малих КА технічно можливе, але наразі не затребуване комерційними замовниками; їх поява може бути пов'язана з потребами військової метеорології.

Інтеграція різних методів ДЗЗ є ключовою тенденцією розвитку угруповань малих КА. Спостерігається універсалізація малих КА: сучасні платформи масою менше 1 тони здатні нести кілька типів знімальної апаратури (наприклад, поєднання оптичних, теплових та радарних датчиків). Можливе створення гетерогенних угруповань, де окремі КА спеціалізуються на різних методах спостереження, а їхні дані інтегруються для вирішення комплексних завдань. Поєднання спектральної інформації (оптична та гіперспектральна зйомка) зі структурною (лідари, радари) та температурною (теплова зйомка) дає змогу значно розширити коло вирішуваних задач – від моніторингу стану сільськогосподарських культур до виявлення геологічних структур та оперативного реагування на надзвичайні події.

Prospects for the use of optical, thermal, and microwave methods of Earth observation in small spacecraft constellations

D. Khramov[a1], O. Volosheniuk[a], A. Maslova[a], O. Pyrozhenko[a]

[a] Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the SSA of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] dakhramov@gmail.com

The paper analyzes prospects for implementing optical, thermal infrared, and microwave Earth observation methods within constellations of small satellites. Optical multispectral imaging represents the most mature technology, with hyperspectral and LiDAR systems advancing through onboard data processing to overcome bandwidth limitations. Thermal infrared sensing is rapidly evolving with uncooled microbolometer sensors, multispectral MWIR/LWIR capabilities, and AI-driven onboard anomaly detection, primarily for fire monitoring and dual-use applications. Microwave remote sensing shows strongest development in synthetic aperture radar constellations. The integration of complementary sensing methods – spectral, thermal, and structural – within heterogeneous or universal satellite platforms emerges as a key trend for comprehensive, all-weather Earth monitoring.

Keywords: multispectral imaging, hyperspectral imaging, lidar, thermal infrared imaging, onboard data processing, radiometer, radar, scatterometer, altimeter

Біфуркаційний стан та раціональне проєктування складених підкріплених оболонкових конструкцій

Д. В. Грищак[а], В. З. Грищак[б1], Н. М. Д'яченко[в]

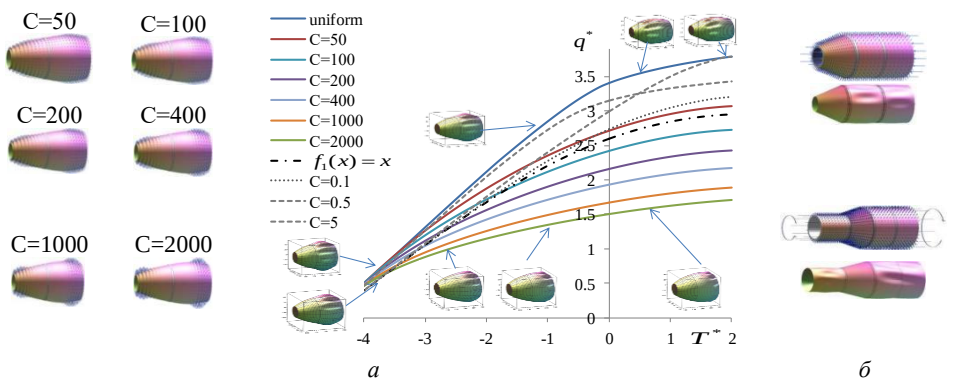
[а]ДП Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля,УДУНТ, Дніпро, Україна
[б]Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна
[в]Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

[1]hryshchak.v.z@mnu.one

Ключові слова: складена оболонкова конструкція, дискретність розташування шпангоутів, біфуркаційний стан, локальні і загальні форми випинання, Гауссова кривизна, раціональне проєктування.

Однією з проблем раціонального проєктування складених підкріплених оболонкових систем у екстремальних умовах експлуатації є забезпечення стійкості складених оболонкових відсіків різної геометрії серединної поверхні та жорсткісних характеристик при впливі комбінованого зовнішнього навантаження, кожна складова якого здатна викликати втрату первісної форми. В даній доповіді представлені результати вказаного напрямку досліджень на базі застосування аналітико-чисельного підходу.

Математична модель і дослідження біфуркаційного стану складених оболонкових систем за умови дискретності розташування шпангоутів, з врахуванням впливу жорсткості їх з площини початкової кривизни, обговорюються у монографії [1]. Встановлено вплив жорсткісних параметрів підкріплюючих силових елементів на величину критичних зусиль, що надає можливість реалізації критерію рівностійкості локальних та загальних форм біфуркації.У дослідженнях складених оболонок з ненульовою Гауссовою кривизною серединної поверхні додатна кривизна, у ряді випадків, відзначається суттєвим підвищенням загальної стійкості конструкції. Доведено, зокрема, що знак кривизни серединної поверхні складових відсіків визначає механізм втрати стійкості складеної конструкції з виявленням характеру деформування оболонкових елементів.



а *б*

Рис. 1. Біфуркаційні стани складених конструкцій: *а* – одношарової з ненульовою гауссовою кривизною відсіків, *б* – тришарової з нульовою гауссовою кривизною відсіків

Встановлено вплив характеру змінності зовнішнього тиску за осьовою координатою на критичні навантаження та форми біфуркації (рис. 1, *а*) [2]. Для складених тришарових конструкцій типу «конус–циліндр» визначено біфуркаційні стани та надано аналіз впливу параметрів конструкції на величину критичних зусиль [3, 4].

Запропоновано підхід до раціонального проєктування з точки зору рівностійкості прольотів і відсіків та загальної форми біфуркації конструкції, забезпечуючи ефективність з точки зору критичного навантаження, а також алгоритми візуалізації закритичних форм випинання, зокрема тришарових відсіків (рис. 1, б).

Обговорюються побудова та аналіз форми граничних кривих, які відокремлюють область стійкості досліджуваних систем, необхідних при створенні конструкцій нової техніки.

1. О. В. Дегтярьов, В. З. Грищак, В. М. Сіренко та ін., *Математичні моделі та прогнозування руйнівних навантажень в ракетно-космічних системах*, Видавничий дім «Гельветика», Запоріжжя (2020).
2. V. V. Baburov, V. Z. Gristchak, D. D. Hryshchak, and N. M. Dyachenko, The effect of the variability of external pressure on the local and overall buckling loads for the reinforced compound type “barrel-ogive” shell structure, *Comput Sci Appl Math*, No. 2, 5–13 (2021). https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-2-01
3. V. Z. Gristchak, D. V. Hryshchak, N. M. Dyachenko, A. F. Sanin, and K. M. Sukhyy, Bifurcation state and rational design of three-layer reinforced compound cone-cylinder shell structure under combined loading, *Space Sci Technol*, 29, No. 6, 26–41 (2023). https://doi.org/10.15407/knit2023.06.026
4. В. З. Грищак, Д. В. Грищак, Н. М. Д’яченко, і В. О. Купріков, Біфуркаційні стани та візуалізація закритичної деформації тришарових складених конструкцій, *Comput Sci Appl Math*, No. 2, 39–53 (2024). https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-05

Bifurcation state and rational design of compound reinforced shell structures

D. Hryshchak[a], V.Gristchak[b1], N. Dyachenko[c]

[a]Design Bureau “Pivdenne” named after M.K. Yangel, USUST, Dnipro, Ukraine.
[b] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.
[c] Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

[1] hryshchak.v.z@mnu.one

An overview of research results on the stability and rational design of reinforced compound shell structures is presented. Mathematical models of discretely reinforced shells with nonzero Gaussian curvature, as well as three-layer and ribbed structures, are developed. The influence of geometric parameters, reinforcing compartments, and curvature sign on local and overall buckling are discussed. Particular attention is paid to bifurcation modes visualization and critical curves separating the stability region. Rational design is based on the principle of equal stability of structure component compartments.

Keywords: compound shell structure, circular ribs discreteness, bifurcation state, local and overall buckling modes, Gaussian curvature, rational design.

Порівняльний аналіз моделей глибокого навчання для виявлення вибухонебезпечних об'єктів з застосуванням автономних робототехнічних систем

К. Берхміллер[1], С.В. Хорошилов

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро,Україна.

[1] xhatter7@gmail.com

[2] khoroshylov.s.v@nas.gov.ua

Ключові слова: глибоке навчання, детекція об'єктів, автономні робототехнічні системи, YOLOv8, RT-DETR.

Застосування автономних робототехнічних систем для роботи у небезпечних середовищах потребує ефективних алгоритмів комп'ютерного зору для автоматичного виявлення потенційно небезпечних об'єктів. Однією з ключових задач є забезпечення балансу між точністю детекції та швидкістю обробки зображень. Для систем реального часу цей компроміс є критичним, оскільки алгоритм має забезпечувати достатню точність розпізнавання при обмежених обчислювальних ресурсах платформи.

У роботі розглянуто дві сучасні архітектури детекції об'єктів: YOLOv8 та RT-DETR. Модель YOLOv8 належить до класу одноетапних детекторів, що використовують згорткові нейронні мережі для швидкої обробки зображень [3]. Модель RT-DETR базується на трансформерній архітектурі, яка забезпечує кращий аналіз глобального контексту зображення та підвищує точність детекції [4].

Для оцінювання ефективності моделей було проведено порівняльний аналіз їх продуктивності на основі експериментальних даних, представлених у роботі [2]. Дослідження включало аналіз впливу роздільної здатності вхідних зображень, розміру об'єктів та часу обробки. Оцінювання результатів виконувалося за стандартними метриками комп'ютерного зору: середньою точністю детекції (mAP), точністю (precision) та повнотою (recall).

У межах експерименту аналізувалися три варіанти роздільної здатності зображень: 384×384, 512×512 та 640×640. Збільшення роздільної здатності дозволяє точніше виявляти дрібні об'єкти, однак збільшує обчислювальні витрати та час обробки. Результати порівняльного аналізу наведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз моделей детекції об'єктів

Модель	*Роздільна здатність зображення*	Розмір об'єктів	*mAP (%)*	Precision (%)	*Recall (%)*	Час обробки (ms)
YOLOv8n	384 × 384	малі	63.4	72.1	68.5	18
YOLOv8n	512 × 512	середні	68.7	75.4	72.6	23
YOLOv8x	640 × 640	великі	72.5	78.2	75.9	32
RT-DETR	384 × 384	малі	70.1	74.8	73.2	41
RT-DETR	512 × 512	середні	75.6	79.5	77.4	46
RT-DETR	640 × 640	великі	78.3	82.1	80.7	53

Аналіз отриманих результатів показує, що модель **RT-DETR** демонструє вищу точність детекції у порівнянні з YOLOv8. Зокрема, при роздільній здатності 640×640 значення mAP для RT-DETR становить **78.3 %**, що приблизно на **6 %** перевищує результати моделі YOLOv8x. Підвищена точність пояснюється використанням трансформерної архітектури, яка дозволяє враховувати взаємозв'язки між різними областями зображення.

Водночас результати показують, що час обробки одного зображення для RT-DETR значно більший. Наприклад, при максимальній роздільній здатності час обробки становить **53 мс**, тоді як для YOLOv8x цей показник дорівнює **32 мс**. Це означає, що YOLOv8 є більш придатною для застосування в автономних системах реального часу, де швидкість обробки має критичне значення.

Отримані результати дозволяють сформулювати практичні рекомендації для використання моделей детекції у робототехнічних системах. Для задач, де ключовими є час обробки та робота в режимі реального часу, доцільно використовувати моделі сімейства YOLO. Натомість у випадках, коли пріоритетом є максимальна точність виявлення об'єктів, доцільно використовувати трансформерні архітектури, зокрема RT-DETR.

Таким чином, використання сучасних моделей глибокого навчання дозволяє суттєво підвищити ефективність систем комп'ютерного зору автономних роботів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію алгоритмів детекції об'єктів із методами підкріплювального навчання для побудови гібридних систем керування автономними робототехнічними платформами.

I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, **Deep Learning**, MIT Press, Cambridge (2016).
2 V. Mishchuk, H. Fesenko, V. Kharchenko, **Deep Learning Models for Detection of Explosive Ordnance Using Autonomous Robotic Systems: Trade-off Between Accuracy and Real-Time Processing Speed**, Radioelectronic and Computer Systems (2024).
3 J. Redmon, A. Farhadi, **YOLOv3: An Incremental Improvement**, arXiv:1804.02767 (2018).
4 https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767
5 N. Carion et al., **End-to-End Object Detection with Transformers**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (2022).

Comparative Analysis of Deep Learning Models for Detection of Hazardous Objects using Autonomous Robotic Systems

K. Berkhmiller, S. V. Khoroshylov

[a]Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[1] xhatter7@gmail.com

[2] khoroshylov.s.v@nas.gov.ua

The work presents a comparative analysis of modern deep learning models used for object detection in autonomous robotic systems. The study focuses on evaluating the performance of two object

detection architectures: YOLOv8 and RT-DETR. The comparison is based on experimental results considering several important parameters, including input image resolution, detection accuracy, and processing time. Standard computer vision metrics such as mean average precision (mAP), precision, and recall are used to evaluate model performance. The analysis demonstrates that transformer-based models such as RT-DETR provide higher detection accuracy, particularly for small objects, while YOLOv8 models offer significantly faster processing speed, which makes them more suitable for real-time robotic applications. The obtained results highlight the importance of selecting an appropriate detection architecture depending on system requirements and computational constraints.

Keywords: deep learning, object detection, autonomous robotic systems, YOLOv8, RT-DETR.

Щодо проєктування угруповання комерційних супутників дистанційного зондування Землі

О.О. Пироженко, А.І. Маслова, О.В. Пироженко[1]

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1] alex.pirozhenko@ukr.net

Ключові слова: супутник дистанційного зондування Землі, угруповання супутників, ширина смуги сканування, ширина смуги огляду.

Розглядається задача вибору орбіт супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у складі угруповання супутників. Угруповання супутників створюється для вирішення конкретних прикладних задач. У доповіді розглядаються задачі сільського та лісового господарств України, для вирішення яких використовуються методи ДЗЗ.

Аналіз необхідної інформації для вирішення переважної більшості задач сільського та лісового господарств дозволив сформулювати вимоги до даних, що отримуються під час зйомки поверхні Землі, в залежності від їх типу:

– оптичні дані повинні бути з просторовою роздільною здатністю 2-3 метри, періодичністю зйомки 3 доби та шириною смуги захоплення 20-30 км;

– теплові дані повинні бути з просторовою роздільною здатністю 20 метрів, періодичністю зйомки 3-5 доби та шириною смуги захоплення 20 км;

– радарні дані повинні бути з просторовою роздільною здатністю 3-5 метрів, періодичністю зйомки 3-6 діб та шириною смуги захоплення 20-30 км.

Передбачається, що супутники угруповання є відносно недорогими супутниками з масою до 200 кг, а саме угруповання розгортається на низькій навколоземній орбіті.

В якості робочих орбіт супутників угруповання розглядаються сонячно-синхронні, стійкі орбіти повторюваного наземного маршруту.

Важливими характеристиками систем спостереження супутників для формування їх угруповання є:

ширина смуги сканування – ширина ділянки Землі, що потрапляє в миттєвий кадр сканера;

ширина смуги огляду – ширина ділянки поверхні Землі, яка може потрапити в миттєвий кадр сканера з урахуванням змін кутового положення супутника (обертання за кутом крену).

Угруповання супутників з оптичною системою спостереження розгортається на орбітах «день-ніч». Показано, що смуги огляду одиночного супутника не перекривають всю поверхню України і огляд всієї території України потребує створення угруповання супутників. Розроблено алгоритм визначення фазового зсуву супутників вздовж орбіти для покриття території України смугами огляду та смугами сканування супутників. На прикладі орбіти наземного повторюваного маршруту з трьома добами замикання (середня висота орбіти ≈ 470 км) показано, що достатньо двох супутників з шириною смуги огляду, що визначається відхиленням оптичної осі на 20 градусів від напрямку на надир, для зйомки будь-якої ділянки на поверхні України. Розроблено алгоритм визначення кількості супутників угруповання для

покриття всієї території України зонами сканування. Показано, що кількість супутників прямо пропорційна ширині смуги сканування.

Угруповання супутників з радарною системою спостереження доцільно розміщувати на орбітах «світанок-захід Сонця». На відміну від супутників з оптичною системою спостереження, зйомка Землі супутниками з радарною системою спостереження може здійснюватися цілодобово. Показано, що вибір орбіти для угрупування супутників з радарною системою спостереження, як і розрахунок характеристик їх угруповання, для виконання вимог щодо одержуваних даних під час зйомки Землі можна виконувати на основі розробленого алгоритму для супутників з оптичною системою спостереження. Відмінність полягає лише в тому, що зйомка радарних супутників не пов'язана з освітленістю поверхні та може здійснюватися у заданому районі через половину доби. На прикладі орбіти повторюваного наземного маршруту із замиканням траєкторії через 5 діб (середня висота орбіти ≈ 507 км) показано, що один супутник покриває смугами огляду всю поверхню України за 5 діб. Відповідно, два супутники, що розташовано на орбіті зі зміщенням 180 градусів вздовж орбіти, зможуть спостерігати будь-яку поверхню за 2,5 доби; п'ять супутників – щодня.

On the design of a constellation of commercial Earth remote sensing satellites

O. Pyrozhenko, A. Maslova, O. Pirozhenko[1]

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] alex.pirozhenko@ukr.net

The problem of selecting orbits for Earth remote sensing (ERS) satellites within a constellation is considered. Satellite constellations are created to solve specific applied problems. The report examines the challenges facing agriculture and forestry in Ukraine, which are addressed using ERS methods. The satellites in the constellation are planned to operate in sun-synchronous, stable orbits that follow a repeating ground track. The features of the formation of satellite constellations with optical and radar observation systems are considered.

Keywords: Earth remote sensing satellite, satellite constellation, swath width**,** viewing swath width.

Щодо вибору робочої орбіти супутників дистанційного зондування Землі

О.О. Пироженко, А.І. Маслова, О.В. Пироженко[1]

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1] alex.pirozhenko@ukr.net

Ключові слова: супутник дистанційного зондування Землі, робоча орбіта, ширина смуги огляду, кут нахилу орбіти, форма орбіти.

Розглядаються низькі майже кругові орбіти супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Ставиться задача вибору робочої орбіти, що найбільш підходить для конкретної місії супутника. Зокрема, розглядається задача приблизного визначення параметрів орбіт, що дозволяють здійснювати задовільний огляд супутником цільової поверхні Землі. Розглянуто основні побажання розробників систем спостереження відносно умов зйомки поверхні Землі. Узгодженню цих побажань із закономірностями орбітального руху супутників на низьких навколоземних орбітах допомагає, як представляється, використання простих моделей, що описують ці закономірності. При цьому бажана візуалізація смуг огляду на Землі. Компромісним рішенням між побажаннями розробників системи спостереження та закономірностями руху супутників є відбір орбіт, які найбільше відповідають характеристикам супутника та його системі спостереження. Мета доповіді полягає у викладенні простої моделі та алгоритму, що дозволяють здійснити попередній вибір робочих орбіт супутників ДЗЗ. Пропонована модель спирається на відомі співвідношення, а новизна матеріалу полягає у компактному та узагальненому викладенні моделі для попереднього вибору робочих орбіт супутників ДЗЗ. У доповіді наведено моделі, що дозволяють здійснити: оцінку ширини смуги огляду супутника; вибір кута нахилу орбіти; вибір стійкої форми орбіти; вибір висоти орбіти; вибір періоду орбітального руху. Розглянуто переваги та недоліки сонячно-синхронних орбіт. Побудовано аналітичні вирази, що дозволяють досить просто оцінити відхилення супутника від робочої орбіти під дією аеродинамічного гальмування, оцінити швидкість відновлення параметрів орбіти під дією постійного управляючого трансверсального прискорення і визначити допустимі інтервали часу між включеннями двигунів і інтервали їх роботи. Показано переваги орбіт наземного маршруту, що повторюється. Побудовано найпростішу модель для розрахунку та візуалізації смуг огляду супутником поверхні Землі. Таким чином, запропоновано простий алгоритм попереднього вибору робочих орбіт супутників ДЗЗ на низьких навколоземних орбітах, які забезпечують задовільний огляд цільової поверхні Землі.

On the selection of the reference orbit of Earth remote sensing satellites

O. Pyrozhenko, A. Maslova, O. Pirozhenko[1]

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] alex.pirozhenko@ukr.net

A simple model of satellite motion in low near-earth orbit is proposed, which takes into account the main regularities of this motion. The features of the choice of the inclination angle, shape, altitude and period of the orbit have been considered. The simple model for calculating the coverage of the Earth's surface with viewing swaths and their visualization has been proposed. In general, a simple algorithm is proposed for the preliminary orbit selection for remote sensing satellites in low near-earth orbit, which provide a satisfactory view of the target Earth's surface.

Keywords: Earth remote sensing satellite, reference orbit, viewing swath width, inclination angle, orbit shape.

Вибір параметрів неоднорідності матеріалу для зниження концентрації напружень у циліндричній оболонці з круговим отвором

Е. Л. Гарт[a1], Б. І. Терьохін[б]

[a]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна
[б]Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1] hart.eteri@gmail.com

Ключові слова: циліндрична оболонка, круговий отвір, функціонально-градієнтний матеріал, напружено-деформований стан, коефіцієнт концентрації напружень, комп'ютерне моделювання.

Завдяки сучасним технологіям виготовлення неоднорідних матеріалів, зокрема методам адитивного виробництва (3D-друку), з'являються нові можливості створення матеріалів зі складною мікроструктурою та заданим градієнтом властивостей. До таких матеріалів належать функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ), для яких характерна неперервна просторова зміна фізико-механічних характеристик. Використання ФГМ дає змогу цілеспрямовано впливати на напружено-деформований стан (НДС) елементів конструкцій і може сприяти зниженню концентрації напружень поблизу отворів у тонкостінних конструкціях [1, 2]. Завдяки цим властивостям ФГМ мають суттєві переваги порівняно з однорідними та традиційними композиційними матеріалами і знаходять застосування в різних галузях, зокрема в аерокосмічній техніці, машинобудуванні, медичній імплантології, енергетиці та військовій сфері.

Проблема зниження концентрації напружень, що виникає поблизу отворів, є однією з важливих задач механіки деформівного твердого тіла [3]. На сьогодні виконано значну кількість досліджень, присвячених аналізу впливу ФГМ на концентрацію напружень у тонкостінних конструкціях з отворами. Показано, що градієнт модуля пружності суттєво впливає на величину коефіцієнта концентрації напружень (ККН), причому його зниження досягається за рахунок монотонного зменшення модуля пружності поблизу отвору. Водночас у багатьох роботах недостатня увага приділяється впливу типу ФГМ на розподіл інтенсивності деформацій. Градієнт властивостей матеріалу, за якого відбувається зменшення модуля пружності в околі отвору, може призводити до зростання максимальних деформацій. У зв'язку з цим параметри неоднорідності ФГМ доцільно обирати таким чином, щоб забезпечити не лише зниження ККН, але й обмеження рівня максимальних деформацій, збільшення яких може істотно впливати на міцність і довговічність конструкції.

У результаті комп'ютерного моделювання НДС циліндричної оболонки із ФГМ з круговим отвором авторами запропоновано кусково-лінійний закон зміни модуля пружності оболонки. Встановлено, що використання такого закону дає змогу зменшити величину ККН та відповідні деформації в оболонці поблизу отвору більш ніж на 50 % для розглянутих параметрів задачі.

1. E.L. Hart, and B.I. Terokhin, Methods for reducing stress concentration around holes in thin plates and cylindrical shells with annular radially inhomogeneous inclusions, *International Applied Mechanics*, **61**, No. 3, 359–368 (2025).

https://doi.org/10.1007/s10778-025-01359-0
2. V.S. Hudramovich, E.L. Hart, and B.I. Terokhin, Stress concentration around a circular hole in thin plates and cylindrical shells with a radially inhomogeneous inclusion, *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials: Collected Work*, Springer Cham, **204**, Chapter 18, 249–264 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_18
3.W.D. Pilkey, D.F. Pilkey, and Z. Bi, *Peterson's Stress Concentration Factors*, Wiley (2020).

Selection of material heterogeneity parameters to reduce stress concentration in a cylindrical shell with a circular hole

E. L. Hart[a1], B. I. Terokhin[b]

[a]Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
[b]Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] hart.eteri@gmail.com

We performed computer simulations to analyze the stress-strain behavior of a cylindrical shell made of a functionally graded material (FGM) containing a circular hole. The results show that the gradient of the elastic modulus significantly affects the stress concentration factor (SCF). Specifically, a decrease in the elastic modulus near the hole leads to a decrease in the SCF. However, it is important to study not only the effect of changes in the FGM properties on the SCF but also their impact on maximum strains, as increased strain can have a decisive impact on the strength and durability of the structure. The authors proposed a piecewise linear law for changing the elastic modulus of the shell. This approach allows for a reduction in the stress concentration factor and corresponding strains in the shell near the circular hole by more than 50% for the considered problem parameters.

Keywords: cylindrical shell, circular hole, functionally graded material, stress-strain state, stress concentration factor, computer simulation.

Планування міжорбітальних перельотів багатоцільових низькоорбітальних місій видалення космічного сміття

Ю. М. Гольдштейн[1]

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна.

[1] jurag66@gmail.com

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, генетичний алгоритм, орбітальна задача комівояжера, метод усереднення, мала тяга

Задачу планування міжорбітальних перельотів СКА малої постійної за модулем тяги багатоцільових місій активного видалення сміття (АВС) з використанням модулів відведення з орбіти сформульовано у вигляді двокритеріальної орбітальної задачі комівояжера. В якості критеріїв оптимальності місії обрано енергетичні витрати і безпеку міжорбітальних перельотів. Задачі планування міжорбітальних перельотів СКА багатоцільових місії АВС присвячено багато робіт. В роботах [1–5], для розв'язання цієї задачі використано три основні методи: явний перебір, неявний перебір методом гілок і меж і методи стохастичної оптимізації.

В розглянутій задачі вважається, що цільові орбіти місії близькі до кругових і мало відрізняються за нахилом, але можуть суттєво відрізнятися за висотою і довготою висхідного вузла (ДВВ). Орбітальні параметри цільових орбіт і матриці коефіцієнтів безпеки міжорбітальних перельотів між цільовими орбітами задано. Для зміни висоти і нахилу орбіти СКА використовуються активні маневри, а для зміни ДВВ – природний дрейф орбіт. Матриці характеристичних швидкостей просторових міжорбітальних перельотів між цільовими орбітами розраховуються з використанням спрощеного і швидкого алгоритму [6].

В таблиці 1 наведено результати двокритеріальної оптимізації за Парето [7]. маршруту послідовного обходу семи цільових орбіт космічного сміття. Оптимальний маршрут і його характеристики позначено кольором. При розрахунках вважалось, що маса СКА з модулями відведення космічного сміття з орбіти дорівнює 1000 кг і СКА обладнаний іонним електроракетним двигуном XIPS-25 з силою тяги 165 мН і питомим імпульсом тяги 35 км/с.

Таблиця 1.

Точки границі Парето і відповідні маршрути багатоцільової місії АВС.

№ маршрута	Сумарна характеристична швидкість маршрута, м/с	Середній коефіцієнт безпеки маршрута	Маршрут
1	900,89	0,74	1 4 7 6 5 3 2 1
2	902,06	0,77	1 5 6 7 4 3 2 1
3	912,75	0,78	1 2 6 7 5 4 3 1
4	914,31	0,8	1 2 3 4 6 7 5 1
5	1031,54	0,81	1 5 6 7 4 2 3 1
6	1040,61	0,82	1 3 2 6 7 5 4 1
7	1176,45	0,85	1 5 7 4 6 2 3 1

1. M. Cerf. Multiple Space Debris Collecting Mission Debris Selection and Trajectory Optimization, *Journal of Optimization Theory and Applications*, **156, 3, 761–796** (2013). https://doi.org/10.1007/s10957-012-0130
2. M. K. Jorgensen, I. Sharf, Optimal planning for a multiple space debris removal mission using high-accuracy low-thrust transfers, *Acta Astronautica*, **172, 56–69 (2020).** https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.031
3. H. X .Shen, T.-J. Zhang, L Casalino and D, Pastrone. Optimization of Active Debris Removal Missions with Multiple Targets, *Journal of Spacecraft and Rockets,* **55, 1, 181-189 (2018)**. https://doi.org/10.2514/1.A33883
4. Di Carlo, M. Romero, J. M Martin and M. Vasile, Automatic trajectory planning for low-thrust active removal mission in low-earth orbit, *Advances in Space Research,* **59, 5, 1234–1258 (2017)**. https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.033
5. J.Yang, Y. H. Hu, Y, Liu and Q. Pan, A maximal-reward preliminary plan ning for multi-debris active removal mission in LEO with a greedy heuristic method, *Acta Astronautica,* **149, 123–142 (2018).** https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576518303229
6. J. Kechichian, A. Reformulation of Edelbaum's Low-Thrust Transfer Problem Using Optimal Control Theory, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics,* **20, 5, 988-994 (1997).** https://doi.org/10.2514/2.4145
7. N Popovici. Pareto reducible multicriteria optimization problems. *A Journal of Mathematical Programming and Operations Research,* **54, 3, 253–263. (2005).** https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02331930500096213

Yu. Holdstein[a1].

[a] Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] jurag66@gmail.com

The aim of the work is to develop an operative method for two-criteria optimization of sequential marsh-routes for multi-purpose missions of ADR, performed by servicer with propulsion units of low constant thrust. The problem is formulated as a two-criteria orbital traveling salesman problem. The methods of solving the problem are multi-criteria genetic Pareto optimization, averaging of differential equations, and analytical modeling of service interorbital flights. The use of the genetic Pareto optimization algorithm allowed avoiding local optimal solutions and determined the adopted computational costs. A significant reduction in computational costs was also achieved by using analytical modeling of servicer interorbital flights with propulsion systems of low constant modulus thrust. The novelty of the obtained results lies in the development of an operational method for two-criteria optimization of consecutive routes of multi-purpose ADR missions The results of this work may be used in the justification and preplanning of ADR missions in low-Earth orbits.

Keywords: multi-criteria optimization, genetic algorithm, orbital traveling salesman problem, averaging method, low thrust.

Про специфіку формування стартових акустичних навантажень під обтічником головної частини ракети

В. Н. Олійник[a1], Т. Я. Батутіна[б]

[a]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна
[б]ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

[1] v_oliynik@yahoo.com

Ключові слова: обтічник, акустичні навантаження, тонкостінна пружна оболонка, локально-масовий шар, резонанс, рівень звукового тиску

За наявними даними до 60% виходів з ладу супутників на орбіті в першу добу функціонування спричиняються надмірними польотними акустичними навантаженнями підобтічникових камер ракет-носіїв [1]. Особливо небезпечний з цієї точки зору стартовий етап польоту, на якому екстремальних значень досягають зовнішні акустичні навантаження, генеровані реактивним струменем ракетного двигуна, відхиленим убік після відбиття від дефлектора стартового столу.

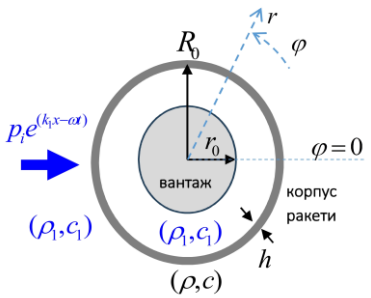


Рис. 1. Модель обтічника при дії стартових акустичних навантажень

У роботі [2] розглянуто двовимірну фізико-математичну модель падіння з нескінченності плоскої звукової хвилі (зовнішніх навантажень) на заповнену повітрям тонкостінну пружну циліндричну оболонку (обтічник) з концентричною акустично жорсткою вставкою (корисним вантажем), див. рис. 1. Таке спрощення дало змогу зосередитись на ефектах кутової асиметрії акустичного поля при збереженні важливих рис конфігурації системи.

Аналіз частотних і просторових розподілів акустичних полів всередині оболонки виявив їхню практичну інваріантність щодо величини згинальної жорсткості. Це дозволило припустити, що в даній системі оболонка радше відіграє роль приєднаної маси. Для перевірки коректності цього висновку пропонується порівняти кількісні дані для обтічника у вигляді тонкостінної оболонки та обтічника з нульовою згинальною жорсткістю, «виродженого» в масовий шар з тією ж поверхневою густиною.

На рис. 2 зображені розраховані за обома моделями амплітудно-частотні залежності максимального по окружній координаті відносного рівня звукового тиску на поверхні вставки. Слід відзначити практично повну тотожність резонансних частот для випадків наявності відносно жорсткої оболонки з вуглепластику й локально-

реагуючого шару в широкому діапазоні частот. Вони визначаються насамперед умовою існування стоячих хвиль у підобтічниковій камері. Ключова відмінність спостерігається в частотній смузі нижче першого резонансу осциляцій оболонки. Тут при наявності локально-масового шару існує додатковий пульсаційний резонанс.

Зауважимо, що заміна пружної оболонки на локально-масовий шар суттєво спрощує розрахункову модель, яку можна узагальнити на тривимірний випадок.

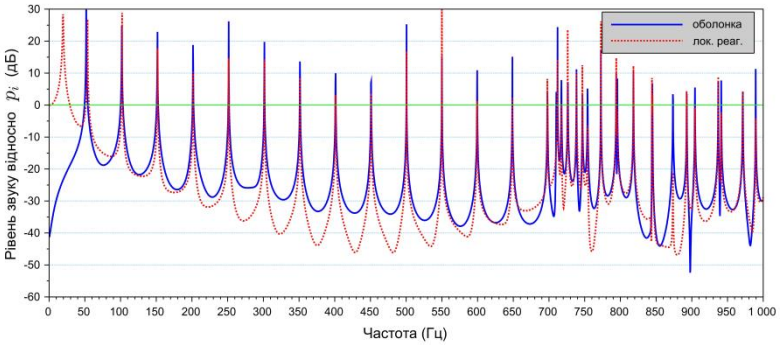


Рис. 2. Амплітудно-частотна залежність максимального рівня звукового тиску на поверхні вставки для оболонки з вуглепластику ($R_0 = 1{,}2$ м, $h = 0{,}03$ м) – неперервна – та локально-масового шару з тією ж густиною – штрихова. Для повітря ρ_1, c_1 взяті за нормальних умов.

1. S. Griffin, S. Lane, D. Leo, Innovative vibroacoustic control approaches in space launch vehicles. *Proceedings of Inter-noise 2000, 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*. Nice, France, 737 (2000).
2. В. М. Сіренко, Т. Я. Батутіна, В. Н. Олійник, Вплив акустопружної взаємодії на формування акустичних навантажень під обтічником головної частини ракети, *Гіродинаміка і акустика*, **3(93)**, 223–244 (2024). https://doi.org/10.15407/jha2024.03.223

On specifics of the formation of the lift-off acoustic loads under the rocket head's fairing

V. Oliynik[a1], T. Batutina[b]

[a]Institute of Hydromechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]M. K. Yangel Pivdenne Design Office, Dnipro, Ukraine.

[1] v_oliynik@yahoo.com

We consider the simplified two-dimensional model of the formation of the acoustic field under the fairing of the rocket head under the action of the spectral component of external acoustic loads. The fairing itself is modeled by a shell or a massive layer with zero bending stiffness. The resonant frequency distributions of acoustic pressure on the surface of the internal insert (payload) for these two approximations are very similar. This indicates that the elastic characteristics can be ignored in a wide frequency range above the first resonance associated with shell oscillations.
Keywords: fairing, acoustic load, thin-walled elastic shell, local massive layer, resonance, sound pressure level.

Проблемні задачі використання ройової технології для керування відносним рухом об’єктів орбітального сервісу

О. А. Фоков[а1], Д. С. Своробін[а], Д. А. Резця[б]

[а]Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна
[б]Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

[1] oafokov@gmail.com

Ключові слова: ройові технології, керування відносним рухом, орбітальний сервіс, некооперований об’єкт сервісу, проблемні задачі.

У сучасній космонавтиці відбувається перехід від використання складних монолітних апаратів до застосування ройових технологій. Цей підхід передбачає використання простіших, дешевих роботизованих апаратів (агентів), які колективно працюють над вирішенням задачі. Рої апаратів мають критичне значення для обслуговування на орбіті. Переваги технології полягають у гнучкості ройових систем, їх адаптивності до різних ситуацій. Разом з тим відмічається недостатня розробленість підходів до розгортання й керування групою агентів (наносупутників). Виконанню сервісної операції, як правило, передує погашення відносного руху об'єкта орбітального сервісу. Цим обумовлено тенденцію у проведенні досліджень, пов'язаних з вдосконаленням методів визначення параметрів руху об’єкта, зокрема некооперованого та/або невідомого, та методів керування його рухом. У роботі [1] розглядаються два етапи захоплення об’єкта, тобто закріплення на поверхні об’єкта наносупутників, що мають рушійні системи. Перший етап – оточення об’єкта «зграєю» наносупутників, що розгортається з материнського сервісного апарата. Задачею етапу є визначення руху об’єкта сервісу відносно апарата та вибір точок кріплення наносупутників на поверхні об’єкта. Другий етап – безпосереднє захоплення об’єкта наносупутниками з метою керування його рухом. У [1] запропоновано вирішувати задачі обидвох етапів з використанням переваг ройових технологій, заснованих на стратегіях поведінки природних систем, таких як зграї птахів тощо, вводячи в алгоритми керування рухом агентів штучні потенційні поля, що залежать від відстаней між наносупутниками та між ними й точками кріплення. Наступним етапам керування рухом об’єкта за допомогою приєднаних до нього агентів – ідентифікації інерційних параметрів об’єкта та керування його орієнтацією – присвячено ряд робіт, наприклад [2], [3], де запропоновано відповідні методи ідентифікації та керування.

В літературі висвітлено також близька за змістом до ройової технології концепція керування рухом об’єкта сервісу за допомогою стільникового космічного робота [4]. У [5] запропоновано застосувати концепцію стільникової архітектури до побудови автономної системи уповільнення обертового руху некооперованого об'єкта орбітального сервісу. У роботі [6] відмічається, що підхід оснований на кріпленні агентів на поверхні об’єкта за допомогою пристроїв з геконо-подібними присосками, є найпоширенішим серед потенційних роботизованих рішень проблеми захоплення супутників.

На основі аналізу публікацій з проблеми застосування ройової технології пропонується наступна оцінка рівня вирішення задач етапів керування рухом об’єкта орбітального сервісу. Перший етап – оточення. Підхід, що спирається на закони поведінки природних систем є цілком прийнятним, як такий що забезпечує рівномірне розподілення агентів на безпечній відстані від об’єкта, та сприяє вирішенню визначення параметрів руху об’єкта та вибору точок кріплення. Критерій вибору точок

кріплення потребує подальших досліджень. Другий етап – захоплення. Підхід, що спирається на закони поведінки природних систем не є цілком прийнятним, як складний у реалізації та такий, що не мінімізує витрати енергоресурсів агентів. На наш погляд цей підхід має бути замінений або доповнений підходом, що спирається на принципи рухомого керування [7], як такого що може забезпечити почергове кріплення агентів до найближчої у певний час точки кріплення. Третій та четвертий етапи – ідентифікація інерційних параметрів та керування рухом об'єкта. Увага дослідників сконцентрована на інтегрованому вирішенні задач цих етапів і спрямована на енергозберігаючий розподіл керуючих впливів з боку агентів. При використанні агентів з геконо-подібними пристроями потрібно враховувати допустимі значення силових впливів від напрямку їх прикладення відносно поверхні об'єкта.

1. El Ghali Asri , Zheng Hong Zhu, Bioinspired consensus-based spacecraft swarm control for autonomous capture of uncooperative targets, *Acta Astronautica*, 234, 419-428 (2025). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.05.009
2. Nan Han, et al., Integrated identification and control for nanosatellites reclaiming failed satellite, *Acta Astronautica*, 146, 387–398 (2018). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.03.006
3. Shaoyan Fan, et al., Quick-response attitude takeover control using multiple servicing spacecraft based on inertia properties identification, *Advances in Space Research*, 70, (7), 1890–1916 (2012). https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.049
4. H. Chang, et al., Cellular Space Robot and Its Interactive Model Identification for Spacecraft Takeover Control, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea, 2016, 3069–3074 (2016). doi: 10.1109/IROS.2016.7759475
5. А. А. Фоков, А. П. Савчук, Алгоритмы функционирования автономной системы замедления вращательного движения некооперированного объекта орбитального сервиса, *Технічна механіка*, 4, 44–58 (2019). https://doi.org/10.15407/itm2019.04.044
6. M. Spenko, Making contact: a review of robotic attachment mechanisms for extraterrestrial applications, *Advanced Intelligent Systems*, 5, 1–11 (2023). https://doi.org/10.1002/aisy.202100063
7. А. П. Алпатов, Подвижное управление механическими системами, Київ, Наукова думка (1998).

Problematic tasks of using swarm technology to control the relative motion of orbital service objects

O. A. Fokov[a1], D. S. Svorobin[a], D. A. Reztsja[b]

[a]The Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b]Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine

[1] oafokov@gmail.com

An overview of publications devoted to the problem of applying swarm technology to control the relative motion of orbital serviced objects is presented. Based on the analysis of publications, the level of solving object motion control problems for each stage of solving the problem is determined: encapsulation, capture, identification of inertial parameters, and control of relative motion. Proposed ways to solve problematic issues.
Keywords: swarm technologies, relative motion control, orbital service, uncooperative serviced object, problem tasks.

Особливості математичного моделювання запуску рідинного ракетного двигуна, що включає гідравлічні системи змінної структури

О. С. Чернявський[а1], С. І. Долгополов[б], С. А. Шевченко[в]

[а]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна
[б]Інститут технічної механіки НАН України і Державного космічного агенства України, Дніпро, Україна
[в]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] o.s.cherniavskyi@gmail.com

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, система живлення змінної структури, математичне моделювання, імпедансний метод, частотна характеристика

Запуск рідинних ракетних двигунів (РРД) супроводжується рядом різноманітних складних фізичних процесів та явищ. До них належать заповнення гідравлічних трактів кріогенними компонентами палива, накопичення та займання компонентів палива в газогенераторі та камері згоряння, процеси динамічної розкрутки турбонасосного агрегату, хвильові процеси у протяжних розгалужених гідравлічних трактах РРД, кавітаційні явища в насосах та явища запізнення газоутворення компонентів палива і перебування продуктів згоряння у камері згоряння та газогенераторі. Раніше було сформульовано задачу опису динамічних процесів у гідравлічній системі змінної структури та запропоновано підхід до її розв'язання на основі імпедансного методу [1]. Цей підхід було розглянуто для тестового фрагмента повної гідравлічної системи живлення РРД. Метою даної роботи є дослідження динамічних процесів при запуску РРД у гідравлічній системі змінної структури, що входить до складу повної системи живлення двигуна.

Об'єктом дослідження є тестовий РРД багаторазового включення з допалюванням генераторного газу. Для багаторазового займання компонентів палива в газогенераторі і камері згоряння застосовується спеціальна гідравлічна система змінної структури, яка використовує газодинамічні запалювачі (ГДЗ), засновані на ефекті Гартмана-Шпренгера.

До складу математичної моделі запуску РРД входять рівняння динаміки кавітаційних каверн. Урахування кавітації в насосах проводилось за гідродинамічною моделлю з використанням напівемпіричних коефіцієнтів. При описі робочих процесів у газогенераторі та камері згоряння тільки в газогенераторі враховувалися запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у вогневих порожнинах. Робочі процеси в газоводі описувалися з урахуванням часу перебування газу в його об'ємі. Для досягнення необхідної точності опису цих запізнювань використовувалися апроксимації ланки запізнення звичайними диференціальними рівняннями. При описі роботи турбонасосного агрегату враховувався баланс наявних і споживаних потужностей при запуску.

Опис динаміки гідравлічної системи змінної структури лінії пального здійснювався у два етапи, як у роботі [1]. На першому етапі визначаються частотні характеристики досліджуваної гідравлічної системи як системи з розподіленими параметрами. Далі складається математична модель із зосередженими параметрами,

коефіцієнти якої задаються таким чином, щоб частотні характеристики систем з розподіленими та зосередженими параметрами узгоджувалися із заданою точністю у певному частотному діапазоні.

На основі математичного моделювання продемонстровано задовільну роботу системи живлення окислювачем та пальним тестового двигуна при його запуску. Показано, що запуск здійснюється без закидів, пульсацій та суттєвих провалів основних параметрів за відносно короткий час. Також проведено математичне моделювання динамічних процесів у системі газодинамічного займання компонентів у газогенераторі та камері згоряння . Показано стабільну подачу компонентів палива в газогенератор і камеру згоряння при перемиканні живлення від пускового бачка на живлення від насоса для обраної циклограми запуску. Запропоновано конструктивні та схемні рішення для оптимізації роботи зворотних клапанів у гідравлічній системі живлення змінної структури.

1. Dolgopolov S., Cherniavskyi O., Shevchenko S. Mathematical modeling of dynamic processes in the branched reconfigurable fuel feed system of a liquid-propellant rocket engine. CEAS Space Journal. 2025. p. 14. https://doi.org/10.1007/s12567-025-00691-y

Specific Aspects of Mathematical Modeling of Liquid-Propellant Rocket Engine Start-Up Involving Reconfigurable Hydraulic Systems

O. Cherniavskyi[a1], S. Dolgopolov[b], S. Shevchenko[c]

[a]Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
[b]Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[c]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] o.s.cherniavskyi@gmail.com

Based on mathematical modeling, satisfactory operation of the oxidizer and fuel feed systems of a test engine during start-up is demonstrated. It is shown that the engine start-up proceeds without overshoots, oscillations, or significant drops in key engine parameters within a relatively short time. Mathematical modeling of dynamic processes in the system of gas-dynamic ignition of propellant components in the gas generator and combustion chamber during engine start-up has been carried out. Stable propellant supply to the gas generator and combustion chamber during the transition from the start-up tank to pump-fed operation is demonstrated for the selected start-up sequence. Design and schematic solutions are proposed to optimize the operation of check valves in the reconfigurable hydraulic fuel feed system.

Keywords: liquid-propellant rocket engine, reconfigurable propellant feed system, mathematical modeling, impedance method, frequency response.

Визначення похибок апроксимації параболічної поверхні при використанні металевого тканого полотна та опорних пластин

В. К. Шамаханов, С. В. Хорошилов

Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ, Дніпро, Україна

vladshamakhanov@gmail.com

Ключові слова: параболічна поверхня, похибки апроксимації, металеве полотно.

Сучасні вимоги до космічних систем дистанційного спостереження Землі з використанням радіолокатора з синтезованою апертурою (РСА) [1] зумовлюють перехід від офсетних рефлекторних антен до симетричних відносно опромінювача рефлекторів. Використання таких симетричних конструкцій дозволяє підвищити маневреність космічного апарата завдяки зменшенню його моментів інерції. Проте ключовою проблемою залишається забезпечення точності параболічної поверхні при використанні металевого сітчастого полотна, яке натягується за допомогою опорної конструкції, що розгортається.

У роботі [2] для формування відбиваючої поверхні використовується комбінований підхід. Центральна радіальна частина рефлектора реалізована у вигляді радіальних пелюсток (опорних пластин) з параболічним профілем, виготовлених із тонкого листового дюралюмінію. Периферійна радіальна частина реалізована у вигляді тросово-стержневої системи, де стрижні знаходяться у стиснутому стані, а троси — у натягнутому стані [3].

Завдяки наявності відомого “подушкового” ефекту [4] існує похибка апроксимації параболічної поверхні металевим полотном, що натягнуте на опорний каркас. Для забезпечення задовільної похибки необхідно визначити довжину та кількість радіальних пелюсток. Вирішенню саме такої задачі присвячена ця робота.

Для отримання результатів із зміни параболічної форми поверхні металевого полотна було створено спрощену модель, яка складається лише із двох опорних пластин та фрагмента полотна.

З використанням лінійної теорії мембран отримано наближені аналітичні вирази для визначення похибок апроксимації поверхні. Ці результати порівняно з результатами скінченно-елементного моделювання (СЕМ). Для СЕМ для поверхні було побудовано трикутну сітку із елементів типу SHELL181 (рис. 1). Симуляція натягу металевого полотна виконана шляхом прикладання до поверхні від’ємної температури.

Результати СКМ підтверджують можливість використання спрощених аналітичних виразів для аналізу точності поверхні симетричного рефлектора. В цілому, результати дослідження демонструють доцільність комбінування тросово-стрижневих структур із жорсткими формоутворюючими елементами для досягнення необхідних характеристик при обмежених габаритах ферми у складеному стані.

Висновки. У роботі проведено аналіз похибок апроксимації параболічної поверхні для симетричної антени з комбінованою відбиваючою конструкцією. Отримані результати підтверджують ефективність використання опорних пластин для забезпечення необхідної форми в центральній зоні рефлектора. Враховуючи

складність процесів взаємодії сітчастого полотна з тросово-стрижневою системою та температурні деформації елементів, доцільним є дослідження питання оптимізації параметрів натягу та детальний аналіз похибок з урахуванням усіх особливостей конструкції.

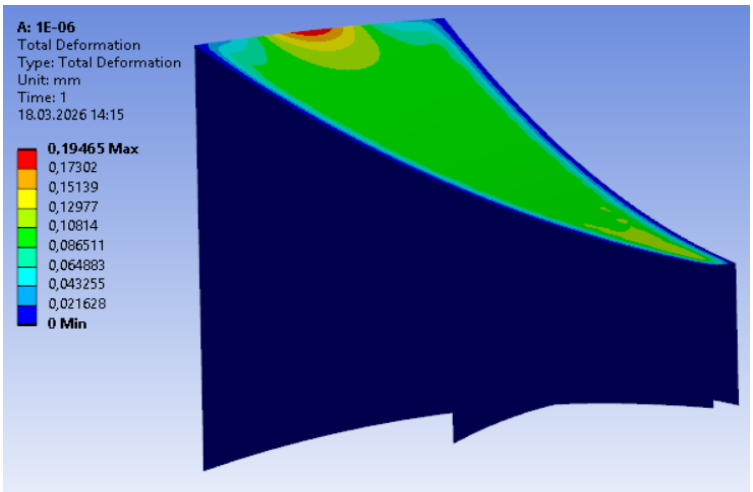


Рис. 1. Деформації фрагмента металевого полотна рефлектора

1. Medzmariashvili, E., Tserodze, S., et al. Structure, structural features, assembling, and bench testing of the deployable space reflector. *CEAS Space J* 17, 421–429 (2025).
2. Khoroshylov, S., Medzmariashvili, E., et al. Design and analysis of symmetrical deployable antenna consisting of unified ring truss and cable-rod pre-stressed structure with radial petals. *43nd ESA Antenna Workshop*, Noordwijk (2025).
3. Zhang, Y., Zhang, J., et al. Design of deployable mesh reflector antenna based on cable-dome tensegrity structure. *Structures*, Vol. 68, 107150 (2024).
4. Y. Tang, T. Li and X. Ma, Pillow distortion analysis for a space mesh reflector antenna, AIAA Journal, 55-9 (2017), 32063213.

Determination of approximation errors of a parabolic surface formed by knitted metal mesh and supporting plates

V. Shamakhanov, S. Khoroshylov

Institute of Technical Mechanics NASU and SSAU, Dnipro, Ukraine.

vladshamakhanov@gmail.com

Keywords: parabolic surface, approximation errors, metal sheet.

Аналіз ефективності різних систем демпфування поздовжніх коливань рідинних ракет-носіїв

С. І. Долгополов, Н. В. Хоряк[1]

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

[1] khoryak@i.ua

Ключові слова: рідинна ракета-носій, рідинна ракетний двигун, динамічні процеси, поздовжні коливання, поздовжня стійкість, системи демпфування, критерій Найквіста.

При створенні рідинних ракет-носіїв (РН) середнього, важкого та надважкого класу виникає проблема забезпечення їх поздовжньої стійкості на ділянці активного польоту. Різке зростання амплітуд поздовжніх коливань корпусу РН і режимних параметрів рідинної ракетної двигунної установки (РРДУ), яке відбувається при втраті поздовжньої стійкості РН, здатне призвести до порушення нормальної роботи системи управління і агрегатів РРДУ, пошкодження корисного вантажу, руйнування елементів конструкції та РРДУ. Це явище (явище POGO) має автоколивальну природу. Воно виникає при певних умовах в результаті взаємодії пружних поздовжніх коливань (стиск – розтягування) корпусу РН і низькочастотних (до 50 Гц) процесів в маршовій РРДУ. Найбільш сприятливі умови створюються в області резонансної взаємодії корпусу РН і РРДУ, і насамперед, при зближенні і збігу власних частот коливань корпусу РН і рідини в живильних магістралях.

Аналіз поздовжньої стійкості нових рідинних РН і розробка заходів для усунення виявленої нестійкості проводиться ще на етапі їх ескізного проектування. Одним із дієвих засобів усунення POGO є встановлення демпферів поздовжніх коливань. Метою даної роботи є дослідження ефективності найчастіше застосовуваних систем демпфування, виконане для рідинної РН середнього класу.

Аналіз поздовжньої стійкості РН виконувався на основі лінійної математичної моделі замкненої динамічної системи «РРДУ – корпус РН», яка описує взаємодію поздовжніх коливань корпусу РН, низькочастотних процесів в рідинному ракетному двигуні (РРД) та коливань рідини в системі живлення РРД окислювачем і пальним. Зворотний зв’язок між коливаннями корпусу РН і РРДУ здійснюється в системі «РРДУ – корпус РН» через тягу маршової РРДУ. Стійкість замкненої системи «РРДУ – корпус РН» визначалась за критерієм Найквіста. Його використання потребує розрахунку частотної характеристики розімкненої системи, а отже, певних частотних характеристик живильних магістралей, маршових ЖРД і корпусу РН. Для порівняльного аналізу ефективності різних систем демпфування поздовжніх коливань застосувався модуль частотної характеристики розімкненої системи «РРДУ – корпус РН» з різними демпферами поздовжніх коливань і без демпферів.

При розробці моделі поздовжніх коливань корпусу РН його конструкцію було схематизовано пружним тонкостінним стрижнем змінного перерізу з вільними кінцями і геометрично незмінним контуром. На поздовжній осі стрижня розташовувались осцилятори – пружно приєднані зосереджені маси, що імітують поздовжні коливання двигуна і рідини в паливних баках при поздовжніх коливаннях

ракетної конструкції. В динамічній системі «РРДУ – корпус РН» використовувалась усічена модель вимушених поздовжніх коливань корпусу РН, в якій було ураховано лише чотири нижчі тони його поздовжніх коливань, описаних рівняннями в узагальнених нормальних координатах

Математична модель динаміки живильних магістралей маршових РРД містила рівняння неусталеного руху рідини, нерозривності і стану. Моделювання виконувалось із застосуванням імпедансного методу. При розробці математичної моделі низькочастотної динаміки РРД особа увага приділялася урахуванню кавітації в насосах та запізнювань – затримок газоутворення і часу перебування продуктів згоряння в газогенераторі та газоводі.

Для забезпечення поздовжньої стійкості РН запропоновано встановлення газорідинного демпфера або газорідинного демпфера з сильфонним розподілом середовищ, які є найбільш використовуваними і надійними засобами усунення POGO. Розглянуто три локації цих демпферів в системі живлення двигуна окислювачем: у розгалуженні живильної магістралі; на вході в бустерні насоси (БНО); в двигуні між бустерними і основниим насосами (НО). Показано, що газорідинний демпфер ефективніше за сильфонний на 14%. Визначено, що сильфонний демпфер, встановлений на вході в БНО, ефективніше за демпфер, встановлений в розгалуженні магістралі, на 33%. Для газорідинного демпфера ця різниця становить 25%. Але найбільш ефективним є встановлення демпфера поздовжніх коливань між БНО та НО: навіть при малому об'ємі газової порожнини (0,2 л) демпфер забезпечує поздовжню стійкість розглянутої РН із достатнім запасом.

Effectiveness Analysis of Damping Systems for Longitudinal Oscillations in Liquid-Propellant Launch Vehicles

S. Dolgopolov, N. Khoriak[1]

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1]khoryak@i.ua

Based on mathematical modeling of longitudinal vibrations of a medium-class liquid launch vehicle (LV), the efficiency of a gas-liquid damper (GLD) and a gas-liquid damper with bellows separation (GLDPS), which are the most widely used and reliable means of eliminating POGO, has been investigated. Three locations of these dampers in the oxidizer feed system were considered: at the branching point of the main feedline; at the inlet to the ***low-pressure pumps (LPPs)****; within the engine between the LPPs and the high-pressure pumps (GLDs). It was shown that the GLD was 14% more effective than the GLDPS. Also it was found that the GLDPS installed at the LPP inlet was 33% more effective than the same installed at the branching point. For the GLD, this difference was 25%. But the most effective configuration was the installation of a GLD between the LPPs and the HPPs: even with a small gas cavity volume (0.2 L) dampers ensured longitudinal stability of the considered LV with an adequate stability margin.*

Keywords: *liquid launch vehicle****, liquid-propellant rocket engine,*** *dynamic processes****,*** *longitudinal vibrations****, longitudinal stability, damping systems, Nyquist criterion***.

Проблеми та методи забезпечення охолодження теплонапружених деталей реактивних двигунів

М. А. Асєєв[1], О. П. Лобунько

[a]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

[1]asieiev.m.a.-ak51f@edu.kpi.ua

Аннотація: Розглянуто основні стратегії охолодження теплонапружених елементів конструкцій реактивних двигунів, узагальнено їх переваги та недоліки. Однією з головних науково-технічних задач при проектуванні однорежимних і багаторежимних двигунних установок одноразових і багаторазових транспортних засобів є забезпечення структурної цілісності при зростаючих максимальних температурах робочих процесів. Ефективність конструкції системи охолодження теплонапружених деталей реактивних двигунів безпосередньо впливає на питомий імпульс, масу, функціональну стійкість системи та інші критерії.
Ключові слова: термодинамічний процес, регенеративне охолодження, плівкове охолодження, транспіраційне охолодження, стінка, конструкційні матеріали, стійкість, захист.

Вступ. Для сучасних реактивних двигунів характерні широкі спектри зовнішніх факторів, різноманіття течії термодинамічних процесів, змін режимів роботи, висот і швидкостей, еволюції літального апарата та інші чинники. Труднощі проєктування компонентів двигуна обумовлені тим, що в процесі роботи вони піддаються істотним механічним і тепловим навантаженням при високих температурах, мають складну форму, і виготовляють їх з матеріалів, оброблення яких потребує спеціальних технологічних процесів. Дослідження нових можливостей забезпечення кращого охолодження стимулюють розвиток складних термодинамічних систем. Поява нових фізичних моделей деформування та уявлення про ієрархію процесів руйнування дають можливість коригувати відомі підходи, спонукають до сучасного погляду на міцність матеріалів як на втрату локальної і загальної стійкості термодинамічної системи [1]. Тепловий аналіз компонентів систем охолодження, їх термічної стійкості матеріалів та прогнозування їх працездатності можливі за рахунок нових підходів до розрахунку та сучасних CFD моделей.

Відомим методом теплового захисту камер рідинних ракетних двигунів (РРД) є реалізація *регенеративного* охолодження, де один із компонентів палива рухається в структурі криволінійних каналів складної форми вздовж «гарячої» стінки камери. Однак для маршових двигунів з тягою $P > 10$ кН актуальною є проблема використання низькокиплячих компонентів (H_2), що вимагає складних структур кріогенних систем на борту. При глибокому дроселюванні сили тяги ($K_{dr} \geq 8...10$) умови охолодження стінок суттєво погіршуються ($\dot{m}_{cool\ dr} < \dot{m}_{cool\ max}$) та ризик виникнення низькочастотних коливань тиску. Для РРД малої тяги P = 1-200 Н, де активне охолодження компонентом палива часто неможливе, частина тепла відводиться за рахунок *випромінювання*. У таких конструкціях використовуються жароміцні сплави (ніобієві, спеціальні вуглецеві матеріали), що дозволяють камері згоряння працювати в умовах космічного середовища $t_{work} > 3000$ с (600 с – час безперервної роботи).

У ядерних двигунових установках (ДУ) система охолодження *інтегрована* в робочий цикл. Холодоагент H_2 проходить через структуру криволінійних каналів системи охолодження реактивного сопла, здійснюючи регенерацію тепла, перш ніж потрапити в реактор для нагріву до температур $T_M > 3000$ °С. Це дозволяє досягти I_{SP} = 9100-9800 м/с. Для апаратів із ядерними ДУ критичним є відведення первинної енергії, яка не перетворилася на електричну (η = 0,25-0,3). Близько 70–75% енергії

розсіюється у довкілля через теплообмінники-випромінювачі, що конструктивно виконані у вигляді оребрених трубок, з'єднаних у циліндричні або конічні панелі [2].

Використання унітарного пастоподібного палива дозволяє впровадити оригінальний метод теплового захисту. Внутрішня поверхня стінки камери згоряння захищається прошарком низькотемпературного твердого палива. За рахунок низької теплопровідності цей шар вигорає поступово, захищаючи основний матеріал стінки від високотемпературних продуктів згоряння протягом заданого часу роботи t_{work} двигуна. В окремих конструкціях двигунів на пастоподібному паливі застосовуються «теплові труби» з термоелементами, що розміщуються біля зовнішньої поверхні стінки камери згоряння. Це дозволяє частково використовувати тепло від камери згоряння для фазового перетворення охолоджувача (H_2), що одночасно дозволяє знизити теплонапруженість конструкції та підвищує енергетичну ефективність системи.

Плівкове охолодження полягає у введенні невеликої кількості $\dot{m}_{cool}$ теплоносія через спеціально спрофільовані отвори безпосередньо на внутрішню поверхню стінки камери згоряння. Теплоносій утворює тонку ізоляційну плівку, яка захищає основних метал від прямого контакту з високотемпературним потоком продуктів згоряння. У багатьох двигунах інжектори спеціально проектуються так, щоб біля внутрішньої поверхні стінок створювалася збагачена суміш. Температура такого «пристінного шару» значно нижча за температуру основного ядра факела, що зменшує інтенсивність процесів окислення металу та теплове навантаження [3]. Температуру горіння можливо регулювати через стехіометричне співвідношення, тобто через зміну кількості окислювача, що необхідна для повного спалювання m_{fuel} = 1 кг. За рахунок підвищення точності розрахунку можливо регулювати стехіометричне співвідношення і створити меншу температуру $T_{wg} \rightarrow T_{wgmin}$ на внутрішній поверхні стінки.

Методи транспіраційного охолодження передбачають виготовлення стінок з пористого матеріалу, через який охолоджувач під тиском «просочується» всередину. Теплоносій створює рівномірну ізоляційну плівку по всій поверхні. Цей метод вважається найбільш термодинамічно ефективним, оскільки дозволяє суттєво знизити температуру стінки при $\dot{m}_{cool} \rightarrow$ 0,015-0,02($\dot{m}_{flow}$). Головна перешкода для впровадження – складність виготовлення пористих конструкційних матеріалів, здатних витримувати силу робочого тиску, та ризик засмічення пор.

Метод охолодження через випромінювання ґрунтується на здатності тіл випромінювати енергію. Найефективніше такий метод охолодження працює в умовах вакууму, оскільки там відсутнє поглинання енергії навколишнім середовищем. Застосовується для малопотужних двигунів P = 5-200 Н, систем орієнтації, корекції орбіти супутників та охолодження корпусів допоміжних ДУ. Оскільки стінки повинні стійко працювати при екстремальних температурах, використовуються спеціальні тугоплавкі матеріали: система матеріалів Ir-Re, дозволяє працювати при T_M = 2200 °C, забезпечуючи вищу продуктивність і довший термін служби; ніобій та сплави, часто покривається дисиліцидом ($NbSi_2$) для захисту від окислення, стійкість при T_M = 1120–1370 К; Та-Мо використовуються завдяки високій міцності при нагріванні [4][5].

Спрощена методика розрахункового аналізу систем охолодження деталей реактивних двигунів ґрунтується на декомпозиції моделі на розрахункові шари для послідовного визначення температурних показників у системі «газ – стінка – охолоджувач». Для визначення локальних коефіцієнтів конвективної теплопередачі з боку гарячого газу застосовується кореляція Барца, а оцінка падіння тиску в охолоджувальних каналах здійснюється за законом Дарсі-Вейсбаха з урахуванням гідравлічного опору та шорсткості поверхонь. Математична модель, реалізована в середовищі MATLAB, дозволяє прогнозувати розподіл теплових потоків і температурних полів (T_{gw}, T_{cw}) уздовж осьової лінії двигуна в режимі реального часу.

Такий підхід забезпечує швидку ітераційну оцінку проектних рішень, що є критично важливим для запобігання тепловому руйнуванню конструкцій. Подальші обчислення передбачають перехід від одномірного моделювання до методів CFD, що дозволить верифікувати отримані результати, детальніше дослідити складні тривимірні ефекти теплообміну та вплив на структурну цілісність [6].

Висновок. Створення ефективних систем охолодження є ключовим фактором розвитку аерокосмічних транспортних систем. Поєднання методів регенеративного охолодження, використання нових матеріалів і методів виготовлення для комбінованого захисту дозволяє підвищити надійність ДУ для тривалих і багаторазових місій. Дослідження нових матеріалів і методів застосування транспіраційного охолодження забезпечить економію палива, та більший питомий імпульс, при тих же тактико-технічних характеристиках. Успішне застосування основних і захисних матеріалів в першу чергу залежить від того, наскільки детально вивчено поведінку та властивості матеріалів в очікуваних умовах термомеханічного впливу.

1. Б.С. Карпінос (2025). Фізико-феноменологічні засади енергетичних критеріїв руйнування матеріалів. *Проблеми міцності*, № 3, 46-60. https://strength.org.ua/journal/118
2. С.Г. Бондаренко, М.М. Дронь, Л.Г. Дубовик. Ракетні двигунові установки міжорбітальних транспортних апаратів в умовах запобігання засміченню космічного простору, Дніпро (2016). ISBN 978-966-383-784-0
3. D.P. Mishra Fundamentals of Rocket Propulsion (2017). https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/DESIGN%20SISTEM%20DAYA%20GERAK/Fundamentals%20of%20Rocket%20Propulsion.pdf
4. George P. Sutton, Oscar Biblarz (2013) Rocket propulsion elements Seventh Edition. https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/DESIGN%20SISTEM%20DAYA%20GERAK/Rocket%20Propulsion%20Elements%20by%20George%20P.%20Sutton.pdf
5. Brian D. Reed, James A. Biaglow, and Steven J. Schneider (1997) Iridium-coated rhenium radiation-cooled rockets National Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center Cleveland, Ohio 44135, NASA TM-107453 https://files01.core.ac.uk/download/pdf/76444198.pdf
6. Asieiev M.A., Lobunko O.P. (2025). Numerical tool for predicting heat flux distribution in cooled engine components. *XVII International Conference of Students and Young Scientists «Intelligence. Integration. Reliability»*, 6-10. https://philpapers.org/archive/KORIIR.pdf#page=6

Problems and methods of ensuring cooling of thermally stressed parts of jet engines

M. A. Aseev[a1], O. P. Lobunko[a]

[a]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

[1]asieiev.m.a.-ak51f@edu.kpi.ua

The main strategies for cooling thermally stressed elements of jet engine structures are considered, their advantages and disadvantages are summarized. One of the main scientific and technical tasks in the design of single-mode and multi-mode engine installations of disposable and reusable vehicles is to ensure structural integrity at increasing maximum temperatures of working processes. The effectiveness of the design of the cooling system for thermally stressed parts of jet engines directly affects the specific impulse, mass, functional stability of the system and other criteria.

Keywords: thermodynamic process, regenerative cooling, film cooling, transpiration cooling, wall, structural materials, stability, protection.

Особливості моделювання тонкостінних соплових насадків, виготовлених за адитивною технологією L-PBF

С. Ш. Векілов[а1], О. Д. Ніколаєв[а2], В. І. Ліповський[б3], Р. О. Пустовий[б4]

[а]Інститут технічної механіки НАН України, Дніпро, Україна
[6]Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара

[1] abst0@i.ua, [2] odnikolayev@gmail.com, [3] lealvi@ukr.net, [4] pustovoy1990@gmail.com

Ключові слова: рідинні ракетні двигуни, адитивні методи, laser powder bed fusion, 3Д друк, сопловий насадок, радіаційне охолодження, стійкість, жароміцні сплави, МКЕ.

Сучасний розвиток ракетного двигунобудування характеризується активним впровадженням нових технологічних підходів до проєктування та виготовлення рідинних ракетних двигунів. Одним із ефективних рішень є застосування соплових насадків радіаційного охолодження, які дозволяють збільшити ступінь розширення сопла без застосування складних систем охолодження. Разом з тим соплові насадки зазвичай мають значні геометричні розміри, що обумовлює їх значний внесок у масу камери двигуна. У зв'язку з цим актуальною є задача зниження маси насадків при збереженні їх роботоздатності та міцності [1]. Аналіз сучасного досвіду виробництва соплових насадків дозволяє виділити декілька основних технологічних підходів. Класичним є виготовлення насадків із листового металу [2]. Така технологія потребує значної кількості спеціального технологічного оснащення та накладає обмеження на мінімальну товщину конструкції сопла. Іншим напрямом є застосування композитних матеріалів [3]. Подібні конструкції мають значний потенціал завдяки низькій густині матеріалу та можливості роботи при більш високих температурах. Однак, широке впровадження композитних соплових насадків стримується рядом факторів, серед яких відсутність уніфікованої матеріальної бази, технологічні складнощі з'єднання композитного насадка з металевою камерою двигуна та необхідність відпрацювання ефективних теплозахисних покриттів. Перспективним напрямом є адитивне виробництво методом лазерного плавлення порошку на підстилаючому шарі (L-PBF) [4]. Дана технологія дозволяє зменшити товщину соплового насадка приблизно у два рази порівняно з класичними технологіями, використовувати жароміцні сплави (Inconel 718, Haynes 230) та забезпечувати зварне з'єднання з корпусом камери двигуна. Основним обмеженням методу є геометричні розміри виробів, що визначаються габаритами робочої камери 3D-принтера. Зменшення товщини конструкції може призводити до втрати їх стійкості під дією термомеханічних навантажень під час роботи двигуна.

Проведено чисельне моделювання стійкості соплових насадків для двох конструктивних варіантів: виготовленого за класичною технологією та за адитивною зі зменшеною товщиною удвічі. Результати показали суттєве зниження коефіцієнта запасу стійкості для тонкостінної конструкції, що обмежує її надійне застосування у рідинних ракетних двигунах. Для усунення цього недоліку запропоновано конструктивне рішення із впровадженням інтегрованих підсилюючих елементів, виконаних заціло з оболонкою насадка, що забезпечують локальне підвищення жорсткості у зонах максимальних деформацій. За результатами моделювання

запропонована конструкція забезпечує збільшення коефіцієнта запасу стійкості у 1.5 раза у порівнянні з насадком зі зменшеною товщиною стінки. Порівняно з класичним варіантом масова ефективність соплового насадку з інтегрованими підсилюючими елементами та зменшеною товщиною стінки була збільшена у 1.8 раза.

Застосування адитивної технології L-PBF дозволяє створювати більш досконалі конструкції соплових насадків радіаційного охолодження.

1. Шнякін В. М., Потапов А. М., Переверзєв В. Г., Коваленко А. М., Марчан Р. А. Випробування експериментальних камер ЖРД із сопловими насадками з ВВКМ / ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля. – Дніпро, 2006. – 5 с. – URL: https://lnk.ua/21ZsqVhCN
2. Воробєй В. В. Технологія виробництва рідинних ракетних двигунів / В. В. Воробєй, В. Є. Логінов. – М : MAI, 2001. – 496 с.
3. Gradl P. R., Valentine P. G. Carbon-Carbon Nozzle Extension Development in Support of In-Space and Upper-Stage Liquid Rocket Engines // Proceedings of the AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – Cincinnati, USA, 2017. – Paper AIAA-2017-5064. – URL: https://lnk.ua/aIwn2ajsE (дата звернення: 16.03.2026).
4. Design and Additive Manufacturing Considerations for Liquid Rocket Engine Development / N. Patel et al. AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN. Reston, Virginia, 2019. URL: https://doi.org/10.2514/6.2019-4392 (дата звернення: 27.03.2024).

Features of designing of thin nozzle extension produced with L-PBF additive technology

S. Vekilov[a1], O. Nikolayev[a2], V. Lipovsyi[b3], R. Pustovyi[b4]

[a]The Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b]Oles' Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

[1] abst0@i.ua, [2] odnikolayev@gmail.com, [3] lealvi@ukr.net, [4] pustovoy1990@gmail.com

The development of modern liquid rocket engines requires improved mass efficiency while maintaining structural reliability. Radiation-cooled nozzle extensions are widely used in upper-stage engines to increase the nozzle expansion ratio without complex cooling systems; however, their large size contributes significantly to engine mass. Additive manufacturing using laser powder bed fusion (L-PBF) offers a promising approach for reducing wall thickness and overall mass of nozzle extensions. Nevertheless, thinner structures may experience reduced stability under operational loads. In this work, a numerical stability analysis of radiation-cooled nozzle extensions manufactured by conventional methods and by L-PBF was performed. A reinforced design with integrated stiffening elements was proposed, increasing the stability safety factor by 1.5 times while reducing mass by 1.8 times compared with the classical configuration.

Keywords: liquid rocket engines, additive manufacturing, laser powder bed fusion, 3D printing, nozzle extension, radiative cooling, stability, refractory alloys, FEA.

Моделювання напруженого стану елементів кульшового суглоба людини при експлуатаційних навантаженнях

Д. В. Горобець, М. Б. Соболевська

Інститут технічної механіки НАН України і Державного космічного агентства України

sobolevskaya1609@gmail.com

Ключові слова: кульшовий суглоб людини, комп'ютерна томографія, скінченно-елементна модель, напружено-деформований стан, ендопротезування.

На теперішній час безальтернативним способом хірургічного лікування хворих із важкими дегенеративно-дистрофічними ураженнями кульшових суглобів є ендопротезування. Сучасними тенденціями в ендопротезуванні кульшового суглоба є розробка нових конструкцій ендопротезів на основі результатів біомеханічних досліджень стабільності фіксації ацетабулярних компонентів; удосконалення способів фіксації компонентів ендопротеза; розвиток технологій створення індивідуального ендопротеза шляхом побудови віртуальних 3D моделей тазових кісток з використанням результатів томографічних досліджень, що дозволяють визначити зосередження та розміри кісткових пошкоджень, оцінити якість кісткових тканин та розробити персональну ацетабулярну систему з урахуванням особливостей її фіксації [1 – 5].

Метою досліджень є розробка на основі даних комп'ютерної томографії скінченно-елементних моделей для оцінки напружено-деформованого стану (НДС) елементів кульшового суглоба до та після тотального ендопротезування при експлуатаційних навантаженнях.

Розроблено алгоритм побудови геометричної моделі кульшового суглоба людини з використанням даних комп'ютерної томографії. За цим алгоритмом побудовано 3D геометричну модель, яка включає крижову кістку хребтового стовпа, клубову, сідничу, лобову кістки, кульшову западину на бічній поверхні тазової кістки та головку стегнової кістки кульшового суглоба.

Розроблено скінченно-елементну модель 1 для дослідження НДС елементів здорового кульшового суглоба при стоянні людини на двох ногах. Скінченно-елементну схему для цієї моделі наведено на рис. 1.

Вона складається з 253673 об'ємних 4-х вузлових елементів тетраедральної форми з характерним розміром ребра 3 мм. В скінченно-елементній моделі 1 враховано безфрикційний контакт "поверхня-поверхня" між головкою стегнової кістки і поверхнею вертлюжної западини, а також контакт з сумісним переміщенням контактуючих поверхонь субхондральних, спонгіозних та хрящових тканин кульшового суглоба при їх взаємодії між собою. З використанням скінченно-елементної моделі 1 дано оцінку НДС елементів кульшового суглоба та проведено детальний аналіз контактної взаємодії кульшової западини з головкою стегнової кістки. Встановлено, що значення максимальних еквівалентних напружень як в субхондральній, так і в спонгіозній тканинах в зоні контактної взаємодії головки стегнової кістки з вертлюжною западиною дорівнюють відповідно 5 МПа та 0,3 МПа, що значно нижче допустимих напружень.



Рис. 1 – Скінченно-елементна схема для моделі 1



Рис. 2– Скінченно-елементна схема для моделі 2

Розроблено скінченно-елементні моделі 2 – 4 (далі моделі) для оцінки НДС елементів кульшового суглоба на різних стадіях після операції тотального ендопротезування з використанням безцементного ацетабулярного компонента, запресованого методом щільної посадки “Press-fit” у вертлюжну западину, яка немає дефектів. Скінченно-елементну схему для моделі 2 наведено на рис. 2. В моделях 2 – 4 враховано безфрикційний контакт “поверхня-поверхня” між головкою ендопротеза кульшового суглоба і вкладишем ацетабулярного компонента, фрикційний контакт між металевим корпусом і вкладишем, а також контакт з сумісним переміщенням контактуючих поверхонь кісткових тканин при їх взаємодії між собою. В моделях 2 – 3 контактну взаємодію між металевим корпусом та кістковими тканинами дна вертлюжної западини враховано як фрикційний контакт (коефіцієнт тертя дорівнює 0,2), а в моделі 4 як контакт з сумісним переміщенням контактуючих поверхонь.

Моделі 2 і 3 призначено для дослідження НДС елементів кульшового суглоба на початковій стадії після операції з урахуванням відповідно присутності або відсутності на дні вертлюжної западини фрагментів субхондральної тканини.

Модель 4 призначена для аналізу НДС елементів кульшового суглоба на стадії повного загоєння після встановлення ендопротеза.

В результаті проведених досліджень з використанням моделей 2 – 4 встановлено, що наявність фрагментів субхондральної тканини на дні вертлюжної западини є кращим варіантом ніж їх відсутність з точки зору менших напружень в елементах субхондральної тканини при стоянні людини на двох ногах на початковій стадії після операції. Показано, що на стадії повного відновлення після операції НДС елементів кісткових тканин кульшового суглоба при розглянутому навантаженні наближається до НДС здорового суглоба.

1. Exploring Recent Trends and Innovations in Total Hip Arthroplasty. https://orthospinenews.com/2025/ 06/23/exploring-recent-trends-and-innovations-in-total-hip-arthroplasty/
2. О. Є. Лоскутов, О. Є. Олійник, О. О. Лоскутов, Д. А. Синєгубов, Розвиток національного ендопротезування суглобів (результати 30-річних досліджень), *Трансплантація та штучні органи*, № 2 (03), 37–50 (2021). https://doi.org/10.30702/transpaorg/10_21.2710/0437-50/451.30(477)

3. І. А. Лазарев, В. Ю. Костюк, А. Г. Дєдков, М. В. Скибан, Біомеханічне комп'ютерне моделювання поведінки системи «кістка – фіксатор – ендопротез» при різних видах внутрішньої геміпельвектомії, *Травма,* 19, № 6, 28–36 (2018). https://doi.org/10.22141/1608-1706.6.19.2018.152218
4. С. Є. Бондаренко, Ендопротезування в разі наслідків травм кульшової западини та проксимального відділу стегнової кістки: дис. … д-ра мед. наук, 382 (2018). https://sytenko.org.ua/wp-content/uploads/thesis/Bondarenko_SE_Thesis.pdf.
5. C. Ma, T. Du, X. Niu, Yu. Fan, Biomechanics and mechanobiology of the bone matrix, Bone Research, № 10, 59 (2022). https://doi.org/10.1038/s41413-022-00223-y/

Simulation of the stress state of human hip joint elements under operational loads

D. Horobets, M. Sobolevska

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine

sobolevskaya1609@gmail.com

The purpose of this research is to develop finite element models based on computed tomography data to evaluate the stress-strain state (SSS) of hip joint elements before and after total hip arthroplasty at operational loads. An algorithm has been developed to create a human hip joint geometric model using computed tomography data. A 3D geometric model has been developed with this algorithm. Finite element model 1 has been developed to study the SSS of healthy hip joint at static loads and the evaluation of its elements strength has been given. Finite element models 2 – 4 have been developed to evaluate the SSS of hip joint elements on different stages after total hip arthroplasty using a cementless acetabular component pressed into the acetabulum without defects. Models 2 and 3 are intended to study hip joint elements SSS at the initial stage after surgery taking into account the presence or absence of subchondral tissue fragments at the acetabulum bottom. Model 4 is intended to analyze the hip joint elements SSS on the stage of complete healing after the endoprosthesis installation.

Keywords: human hip joint, computed tomography, finite element model, stress-strain state, endoprosthetics.

Проблема розробки аеростатних систем для захисту об'єктів критичної інфраструктури України від небезпечних літальних апаратів

Е. О. Лапханов

Інститут технічної механіки НАН України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

ericksaavedralim@gmail.com

Ключові слова: аеростатні системи, керовані дирижаблі, протиповітряна оборона, небезпечні безпілотні літальні апарати, критична інфраструктура

Застосування літальних апаратів (ЛА), які є легшими за повітря, в різних сферах науки і техніки має досить довгу історію. Починаючи з братів Монгольф'є, які 5 червня 1783 року запустили перший в світі аеростат, інтерес до цього класу ЛА не зникає і сьогодні. Ці ЛА активно застосовуються у таких сферах як метеорологія і дослідження атмосфери Землі [1], а також використовуються у якості носіїв апертур антен в радіолокації, фотоапаратури в аерофоторозвідці і задач дистанційного зондування Землі [2], банерів реклами, тощо. Однак, найбільшого науково-технічного інтересу здобули керовані дирижабельні системи, що розвивалися з початку XX ст. [3] до сьогодні [4-6]. У військовій сфері такі системи застосовувалися активно під час Першої і Другої світових війн як активні (керовані пілотовані дирижаблі-носії бомб) та пасивні (пасивні аеростати у формі еліпсоїда з аеродинамічними стабілізаторами, що кріпилися тросах до земної поверхні і створювали перешкоди для ворожих авіа угруповань). Проте, враховуючи низьку швидкість у порівнянні з літаками такі системи поступово стали відходити на другий план і замість ударних стали застосовуватися у якості розвідувальних та радіолокаційних.

В свою чергу, із розвитком безпілотних систем застосування дирижаблів, як засобів оборони стає знову актуальним. Повномасштабна російсько-українська війна показала, що безпілотні ударні системи відіграють одну з вирішальних ролей, як на полі бою, так і у якості засобів знищення тилової транспортно-логістичної, складської та енергетичної інфраструктури сторін протистояння. З огляду на це, актуальною проблемою для України є розробка ефективних засобів знешкодження ударних безпілотних систем супротивника, що застосовуються на лінії фронту та для ураження об'єктів критичної інфраструктури у тилу. Одним із таких варіантів в дослідженні пропонується розглянути застосування дирижабельних активних і пасивних систем, як сегменту проти-повітряної оборони України. Враховуючи низьку маневреність і швидкість дирижаблів, що дає високу імовірність бути ураженими ударними авіаційними та протиповітряними ракетними засобами супротивника, такі системи доцільно застосовувати для захисту тилових об'єктів критичної інфраструктури України. Так, пропонується розглянути два типи дирижабельних систем для захисту критичної інфраструктури України:

1) пасивні аеростатні системи з тросовими кріпленнями, що створюють перешкоди на потенційних трасах підльоту ударних безпілотних ЛА до об'єктів критичної інфраструктури;

2) активні безпілотні керовані дирижаблі-носії легких ракет класу повітря-повітря для знешкодження роїв ударних безпілотних ЛА супротивника.

В свою чергу, виділено проблемні аспекти проєктування таких систем, що потребують досліджень і обґрунтування, а саме:

a) раціональний вибір форми аеростатної системи з урахуванням мінімізації впливу вітрових збурень при виконанні довготривалих польотів патрулювання;

b) оптимізація геометрії гондол, вибір оптимальних параметрів двигунів та аеродинамічних керм для керування поступальним і кутовим рухом;

c) вибір матеріалів та рішення задачі оптимізації у відношеннях маса корисного навантаження / розміри і аеродинамічні збурення / маса допоміжних систем і льотного обладнання / вартість.

Таким чином, запропоновано застосування аеростатних систем для захисту об'єктів критичної інфраструктури України від небезпечних ЛА та сформовано проблемні аспекти, що мають бути вирішені при розробці даних систем.

1. F. Madonna, D. Rosoldi, A. L. Lupi, et al., The tethered balloon system for the study of the atmospheric boundary layer, Atmospheric Measurement Techniques, 12, 6845–6868 (2019). https://doi.org/10.5194/amt-12-6845-2019
2. L. A. Vierling et al., The short wave aerostat-mounted imager (SWAMI), Remote Sensing of Environment, 103, 255–264 (2006). https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.021
3. В. П. Гусинін, А. В. Гусинін, Кероване повітроплавання, К:Кафедра (2012) Pai and M. Manikandan, A comparative study of aerodynamic characteristics of conventional and multi-lobed airships, The Aeronautical Journal, 129, 2435–2459 (2025). https://doi.org/10.1017/aer.2025.39
4. M. Manikandan and S. Rajkumar Pant, Research and advancements in hybrid airships—A review, Progress in Aerospace Sciences, 127, 100741 (2021). https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100741
5. Y. Wei, D. Zhang, J. Xie, J. Ren, and Z. He, Lateral stability analysis of tethered aerostat system, Aerospace, 13(1), 19 (2026). https://doi.org/10.3390/aerospace13010019

Development challenges of aerostat-based systems for the protection of critical infrastructure in Ukraine against hazardous aerial threats

E. O. Lapkhanov

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine

ericksaavedralim@gmail.com

This study addresses the problem of developing aerostat-based systems for the protection of critical infrastructure in Ukraine from hazardous aerial vehicles. The growing threat of unmanned aerial systems and other airborne hazards necessitates the development of persistent and cost-effective monitoring and defense solutions. Aerostats and controlled airships are considered as promising platforms due to their long endurance and operational flexibility. The study outlines key design challenges, including aerodynamic efficiency, stability in wind conditions, and payload integration. The proposed approach aims to enhance the effectiveness of air defense and surveillance systems for critical infrastructure protection.

Keywords: aerostat systems, controlled airships, critical infrastructure protection, air defense, unmanned aerial vehicles, aerodynamic design, stability

Спосіб керування літальним апаратом на позаатмосферній ділянці польоту

Д.О. Литовченко[1], В.І. Конох, В.М. Сіренко

ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, Дніпро, Україна

[1] Litovchenko1611d@gmail.com

Ключові слова: літальний апарат, сопло, балон, орієнтація, стабілізація, керованість, робоче тіло, тангаж, рискання, крен, клапан

Для забезпечення стійкого керованого руху літального апарату (ЛА) зазвичай застосовують аеродинамічні органи керування і стабілізації. При збільшенні висоти польоту ефективність таких органів знижується і, якщо траєкторія піднімається до висот ~50км і вище, доводиться вводити додаткові системи стабілізації по тангажу, рисканню і крену. Основна ціль при цьому, крім стабілізації ЛА, полягає в забезпеченні необхідних умов при зворотному вході в щільну атмосферу, які виключають руйнування ЛА під дією нерозрахункових навантажень.

Для розв'язання цих задач зазвичай використовують газодинамічні системи керування, які основані на застосуванні сопел малої тяги і працюють на холодному газі. Конструктивно система складається із сопел, які створюють керуючі сили і моменти по тангажу, рисканню і крену, з клапанів, які забезпечують подачу газу на сопла, і балону з газом – робочим тілом.

При створенні такої системи стабілізації вирішуються наступні задачі:

- вибирається конструкція системи, яка забезпечує вимоги вагової досконалості за рахунок застосування мінімальної кількості сопел;
- оцінка ефективності вирішення задач керування для всіх можливих умов застосування;
- визначення мінімальної кількості робочого тіла, яка забезпечує гарантоване вирішення задач.

У доповіді на прикладі опису одної з таких систем стабілізації на позаатмосферній ділянці розглянуті всі три вказані задачі та приведені кінцеві характеристики.

1. Игдалов И.М. Ракета как объект управления. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. 541 с.
2. Новиков А.В. Динамика полёта. Основные задачи динамического проектирования ракет / А.В. Новиков, Н.Ф. Герасюта, Н.Г. Белецкая // Учебник для ВУЗов. – Днепропетровск, 1988.-366 с.
3. Абгарян К.А. Динамика ракет / К.А. Абгарян, И.М. Рапопорт. – М.: Машиностроение, 1969. - 378 с.

Method of aircraft controlling in the exo-atmosphere flight phase

D. Lytovchenko[a1], V. Konokh[a], V. Sirenko[a]

[a]G.S. Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine.

[1] Litovchenko1611d@gmail.com

To ensure the stable controlled movement of an aircraft, the aerodynamic control and stabilisation unit is usually used. As flight altitude increases, the effectiveness of such a unit decreases, and if the trajectory reaches altitudes of ~50 km and more it becomes necessary to involve additional pitch, yaw and roll stabilisation systems. In this case, the primary goal, in addition to stabilising the aircraft, lies in providing the necessary conditions during re-entry into the dense layers of the atmosphere, which exclude the destruction of the aircraft under the influence of uncalculated loads.

To solve these tasks, gas-dynamic control systems are commonly used, which are based on the application of low-thrust nozzles and are operating with cold gas. Constructively, the system consists of nozzles, which create pitch, yaw, and roll control forces and moments; valves which provide the gas supply to the nozzles; and a tank containing the gas which serves as the working fluid.

When designing such a stabilisation system, the following tasks must be solved:

- selecting a system construction that satisfies mass-efficiency requirements through the use of the minimum possible number of nozzles;
- evaluating the efficiency of the control tasks solving under all potential operating conditions;
- determining the minimum quantity of working fluid required to ensure a guaranteed solution of the control tasks.

The report, using one of such stabilisation systems in the exo-atmosphere section as an example, all the three above-mentioned tasks are considered, and the final characteristics are presented.

Keywords: aircraft, nozzle, tank, orientation, stabilization, controllability, working fluid, pitch, yaw, roll, valve

Аналіз надійності паливних баків ракет-носіїв під час експлуатації: транспортування, заправлення та старт

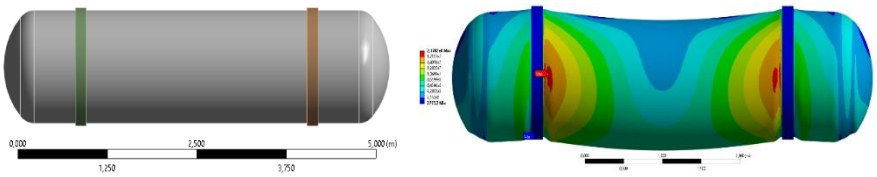
Д. Акімов[а], К. Дегтярьов[б,в], В. Гнітько[б], Д. Крютченко[б], М. Міщенко[в], О. Стрельнікова[б,в,г1]

[а]Державне підприємство «Конструкторське бюро “Південне” імені М. К. Янгеля», м. Дніпро,
[б]Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків,
[в]Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна
[г]Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

[1] elena15@gmxl.com

Ключові слова: структурна цілісність, тріщини, вітрове навантаження, плескання, перевантаження.

Розглянуто питання надійності та динаміки паливного бака ракети-носія під час передстартової підготовки і старту: тріщиностійкість під час транспортування, стійкість під час заправлення під дією вітрових навантажень та визначення власних частот коливань заповнювача при перевантаженнях. Перша задача полягає в оцінці кількості циклів навантаження під час транспортування, що можуть спричинити руйнування. Досліджується горизонтальний бак, повністю заповнений окисником, у вигляді спрощеної тривимірної моделі: циліндр діаметром 2 м, довжиною 7,5 м і товщиною 1,5 мм із замкненими торцями та двома симетричними кільцевими кріпленнями, рис.1(а). Матеріал - алюмінієвий сплав AMg6.



а *б*

Рис. 1. Модель паливного бака (а) та еквівалентні напруження за критерієм фон Мізеса (б)

Для аналізу методом скінченних елементів бездефектної конструкції використано тетраедричну сітку з 464200 елементів. Максимальні напруження за Мізесом (19,3 МПа) виникають біля кріплень, рис. 1(б). Втомний аналіз показав ресурс понад 10^8 циклів, що свідчить про високу надійність. При введенні кругової тріщини (R = 3мм) в зоні кріплень спостерігається локальна концентрація напружень до 217,82 МПа. Мінімальний ресурс зменшується до 18430 циклів у найбільш навантаженій зоні, що робить транспортування бака з таким дефектом недопустимим.

Далі досліджено коливання вільної поверхні в циліндричному паливному баку ракети-носія з округленими торцями при різних рівнях заповнення під дією вітрових навантажень під час передстартового заправлення. Домінуюча частота вітру становить 0,07 Гц і змінюється в межах 0,025–2,5 Гц, що моделюється трикутним нечітким числом [1]. Спектральний аналіз виконано в цьому діапазоні для нульового та першого хвильових чисел. Крайову задачу розв’язано методом граничних елементів [2]. Вітрове навантаження та початкову швидкість задано нечіткими числами. Оцінено параметри, за яких виникають значні плескання, що можуть спричинити втрату стійкості, тому за

таких умов заправлення доцільно призупиняти. Визначені також власні частоти коливань рідини в баку з метою оцінки потенційного резонансу під час запуску або перевантажень. Показано їх монотонне зростання зі збільшенням рівня гравітації, що відповідає умовам підйому ракети-носія. Встановлено, що надійність паливного бака визначається наявністю тріщини у зварних швах, параметрами вітрового навантаження та зміщенням власних частот при перевантаженнях. Підкреслено важливість урахування невизначеності і плескання рідини при оцінці надійності. Подальші дослідження будуть спрямовані на уточнення моделей з нечіткими параметрами та взаємодію рідини й конструкції в умовах мікро-гравітації.

1. O. Sierikova, E. Strelnikova, D. Kriutchenko, K. Degtyarev, V. Gnitko, V. Doroshenko Aeolian Liquid Vibrations in Conical Tanks with Baffles under Wind Loading with Fuzzy Parameters. *WSEAS Transactions on fluid mechanics*. **18**, 295-300 (2023). https://doi.org/10.37394/232013.2023.18.28
2. Gnitko V.I., Karaiev A.O., Degtyariov K.G., Vierushkin I.A., Strelnikova E.A. Singular and hypersingular integral equations in fluid–structure interaction analysis. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, **134**, 67 – 79 (2022). https://doi.org/10.2495/BE450061.

Reliability Analysis of Launch Vehicle Propellant Tanks: Transportation, Fuelling, and Launch Phases

D. Akimov[a], K. Degtyariov [b,c], V. Gnitko [b], D. Kriutchenko[b], M. Mishchenko[c], E. Strelnikova[b,c,d1]

[a]M. K. Yangel Yuzhnoye State Design Office, Krivorozhskay St., 3, 49008, Dnipro, Ukraine.
[b]Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems NAS of Ukraine, Komunalnykiv, 2/10, 61046, Kharkiv, Ukraine
[c] V.N. Karazin Kharkiv National University, maidan Svobody, 4, 61022, Kharkiv, Ukraine
[d]Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave, 14, 61166, Kharkiv, Ukraine

[1] elena15@gmx.com

A methodology is developed to evaluate the strength and dynamic behavior of a launch vehicle fuel tank at different operational stages. It examines the feasibility of transporting a tank with a pre-existing microcrack, analyzes fuel filling under uncertain wind loads using fuzzy logic, and studies liquid oscillation stability with fuzzy-represented wind amplitudes and frequencies. Natural frequencies and mode shapes under launch-induced overloads are determined. Boundary-value problems, derived from continuum mechanics, are solved using a combination of the finite element method for structural analysis and the boundary element method for liquid dynamics. The novelty lies in providing a unified framework to assess both structural integrity and dynamic characteristics, including critical defect sizes, wind conditions requiring filling suspension, and sloshing frequencies under launch loads.

Keywords: structural integrity, cracks, wind loading, sloshing, overloads.

Проблемні задачі вагової оптимізації складених неоднорідних оболонкових конструкцій

Д.В. Грищак[1], А.П. Дзюба[1,2], В.М. Сіренко[1]

[1]ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля», Дніпро, Україна
[2] Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Дніпро, Україна

[2] dzb@ua.fm

Ключові слова: вагова оптимізація, складена конструкція, інтерактивний алгоритм

Складовими елементами багатьох машинобудівних конструкцій, зокрема в аерокосмічній галузі, є система з`єднаних між собою підкріплених силовим набором неоднорідних оболонок обертання з нерегулярними фізичними і геометричними параметрами, серед яких можуть бути оболонки змінної геометрії та товщини стінки, вафельні, багатошарові, композитні та ін. Розв`язування задач вагової оптимізації таких складених оболонкових конструкцій пов'язано з необхідністю виконання не лише вимог міцністної надійності, жорсткості і стійкості для кожної із складових та конструкції у цілому, але і умов спільного деформування оболонок з неоднорідними параметрами та підсилюючих їх жорстких одновимірних стержнів [1].

При цьому варійованими параметрами для оболонкових елементів приймається змінна уздовж меридіану і (або) в окружному напрямку товщини їх стінок, форма серединної поверхні, механічні характеристики матеріалу, які фактично є кусково-неперервними функціями. Ефективне вирішення такої задачі потребує застосування методів континуальної оптимізації теорії оптимальних процесів [2]. Задача визначення оптимальних розмірів поперечних перерізів стержневих силових елементів є, як правило, задачею дискретної скінченно-вимірної оптимізації [3].

Слід зазначити, що незважаючи на потужні можливості сучасних засобів скінченно-елементного аналізу та існуючих оптимізаційних алгоритмів, спроби одночасного вирішення задачі для усієї сукупності таких оболонково-стержневих підконструкцій, у поєднанні з методами скінченно-вимірної оптимізації підсилюючих елементів, з'єднувальних фрагментів та ін., наштовхуються на суттєві труднощі, зважаючи на складність виникаючої багатопараметричної та суттєво нелінійної оптимізаційної задачі.

У поданій роботі вирішення такої проблемної задачі пропонується здійснювати з використанням інтерактивного дискретно-континуального алгоритму [4]. Суть такого підходу до вирішення задачі вагової оптимізації складених конструкцій полягає в їх поділі (декомпозиції) на окремі складові (підконструкції) у вигляді оболонок обертання та силових стержневих елементів з наступною оптимізацією їх параметрів. Для оболонок задача визначення оптимальних змінних параметрів (товщини стінки, фізико-механічних характеристик) розв'язується з використанням необхідних умов оптимальності принципу максимуму Л. С. Понтрягіна за наявності фазових обмежень [2], а геометричні розміри поперечних перерізів силових елементів – методами скінченно-вимірної оптимізації [3].

В сучасних конструкціях, фрагменти яких виготовляються із застосуванням 3D-технологій, хімічного фрезерування, композитних матеріалів та ін., зазначена методика декомпозиції на окремі складові може виявитись недостатньо очевидною. У цьому випадку декомпозиція конструкції здійснюється шляхом її поділу на покрокові фрагменти, отримані за результатами інтерактивного скінченно-елементного аналізу, за діапазонами значень основних параметрів її нерівномірного напружено-деформованого стану [5].

Уточнення зусиль спільного деформування та синтез оптимальних підконструкцій здійснюється методом послідовних наближень з залученням ефективних алгоритмів прискорення збіжності, що ґрунтуються на екстраполяційному (імітаційному) прогнозуванні основних параметрів процесу [6].

Можливості підходу апробовані розв'язуванням задач зниження матеріалоємності спряжених шпангоутом пучка оболонок обертання при несиметричному навантаженні та хвостового відсіку ракети-носія.

Отримані числові результати демонструють ефективність такого підходу для задач вагової оптимізації складених оболонково-стержневих конструкцій.

1. V.I. Myachenkov, I.V. Grigoryev, *Calculation of compound shell structures on a computer: Reference.* Mashinostroenie, Moscow (1981).
2. A.E. Bryson, Ho Yu-Shi, *Applied theory of optimal control*. Blaisdell Publ. comp. (1969).
3. D. Himmelblau, *Applied Nonlinear Programming,* McGrow-Hill Book Comp. (1972)
4. А.П. Дзюба , І.А. Сафронова , В.М. Сіренко, А.Р. Торський, Алгоритм декомпозиції та синтезу для оптимізації параметрів сполученого шпангоутом пучка оболонок обертання, *J. Mathematical modeling and computing,*. **10(**3), 976–987 (2023). https://doi.org/10.23939/mmc2023.03.976.
5. M.O. Dehtiarov, A.P. Dzyuba, K.V. Avramov, V.N Sirenko, Methods to Reduce Material Intensity of Tail Sections of Launch Vehicles, *Journal of Mechanical Engineering,* **23**(3), 27–36 (2020). https://doi.org/10.15407/pmach2020.03.027 .
6. A.P. Dzyuba, I.A. Safronova, L.D. Levitina, Algorithm for computational costs reducing in problems of calculation of asymmetrically loaded shells of rotation, *Strength of Materials and Theory of Structures*, № 105, 99–113 (2020). https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.99-113 .

Problematic tasks of weight optimization of compound inhomogeneous shell structures

D. Grischak[a], A. Dziuba[b1], V. Sirenko[a]

[a] Design Office Yuzhnoye, Dnipro, Ukraine.

[b] Oles Honchar Dnipro National Uni*vers*ity, Dnipro, Ukraine

[1] dzb@ua.fm

An interactive discrete-continuous algorithm is proposed for solving the weight optimization problem of interconnected inhomogeneous shells of rotation reinforced by frames.. The essence of the approach is to decompose the design into simpler components, optimize their parameters, and then synthesize them to coordinate the efforts of their interaction in an iterative manner. This approach allows for the best use of the possibilities of the methods of the theory of optimal processes and finite-dimensional optimization. Numerical results are presented for reducing the material consumption of a bundle of shells of rotation connected by a frame and the tail section of a launch vehicle

Keywords: weight optimization, compound construction, interactive algorithm.

Аеродинамічне вдосконалення форми лопаток направляючого апарата надзвукового компресорного ступеня

Ю. О. Кваша, Н. А. Зіневич[1]

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1] zinevich7385@gmail.com

Ключові слова: аеродинамічна оптимізація, направляючий апарат компресорного ступеня, просторова форма лопатки, чисельне моделювання, коефіцієнт втрат.

Підходи до аеродинамічної оптимізації лопаток турбомашин з використанням сучасних методів чисельного моделювання безперервно вдосконалюються. У роботі [1] запропоновано економічну методику аеродинамічної оптимізації лопаток робочих коліс осьових компресорних ступенів на основі чисельного моделювання просторових турбулентних газових течій. Особливості цієї методики полягають у наступному.

1. Варіювання просторової форми лопатки здійснюється з використанням невеликого числа параметрів без попередньої апроксимації її вихідної форми.

2. Пошук оптимальних геометричних параметрів робочого колеса полягає у систематичному перегляді багатомірної області незалежних змінних у точках, що утворюють рівномірно розподілену послідовність.

У даному дослідженні цю методику використано для аеродинамічного вдосконалення направляючого апарата компресорного ступеня Stage 37 [2].

Форма лопатки була задана сукупністю профілів у перерізах лопатки. Варіювання геометричної форми профілю здійснювалося шляхом зміни функції, що описує середню лінію профілю, а також введенням тангенціального навалу, який задавав відхилення лінії стекінгу лопатки. У ролі критерію якості прийнято коефіцієнт втрат повного тиску у направляючому апараті.

Отримані результати приведено на рис. 1.

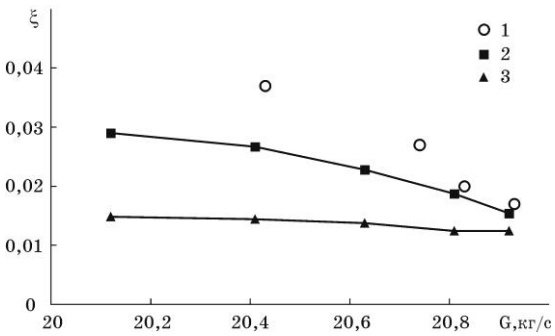


Рис. 1. Залежності коефіцієнта втрат в направляючому апараті від витрати повітря: 1 – експериментальні значення [2]; 2 – розрахункові значення при вихідній формі лопаток апарата; 3 – розрахункові значення при оптимізованій формі лопаток.

Результати чисельного моделювання показують, що значне зменшення втрат в направляючому апараті при переході від вихідної форми лопаток (залежність 2 на рис. 1) до оптимізованої форми (залежність 3) обумовлено зникненням відриву потоку на стороні розрідження лопатки, що ілюструє рис 2.

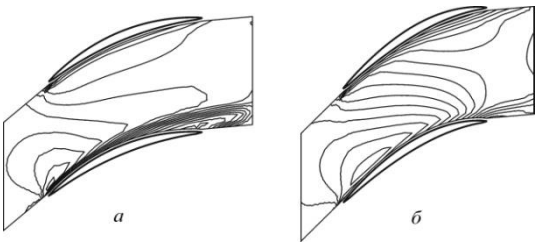


Рис. 2. Ізолінії чисел Маха потоку на розгортках циліндричних перерізів проточної частини направляючого апарата, розташованих на 33% висоти лопаток, при витраті повітря 20,63 кг/с: *а* – для вихідної форми лопаток направляючого апарата; *б* – для оптимізованої форми лопаток.

Таким чином, на прикладі направляючого апарата надзвукового компресорного ступеня розрахунковим шляхом показано, що застосування зазначеної методики оптимізації дозволяє суттєво зменшити втрати повного тиску в досліджуваному апараті в робочому діапазоні зміни витрати повітря через апарат.

1. Кваша Ю.А., Зиневич Н.А. Аэродинамическая оптимизация пространственной формы лопатки рабочего колеса сверхзвуковой компрессорной ступени, *Техническая механика,* № 3, 35–42 (2016).

2. Design and Overall Performance of Four Highly Loaded, High-Speed Inlet Stages for an Advanced High-Pressure-Ratio Core Compressor : NASA Technical Paper 1337, 1978. 132 p.

Aerodynamic improvement of the shape of supersonic compressor stage guide blades

Yu. Kvasha, N. Zinevich [1]

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] zinevich7385@gmail.com

The research aim was to verify the workability of the authors' technique for the aerodynamic optimization of the shape of compressor rotor blades as applied to the optimization of supersonic compressor stage guide blades. The investigation conducted has made it possible to find 3D blade shapes for the guide blading under study such that the loss coefficient is far lower in comparison with the prior art.

Keywords: aerodynamic optimization, compressor stage guide blading, 3D blade shape, numerical simulation, loss coefficient.

Оцінка міцності навантажених елементів ракетно-космічної техніки з урахуванням специфіки їх структури та деформування

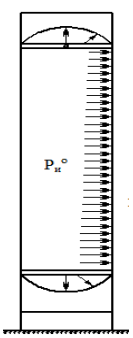
М. В. Марчук[a1], Б. Д. Дробенко[a], В. С. Пакош[a], В. М. Сіренко[б], Д. В. Клименко[б], В. М. Харченко[б]

[a]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[б]Державне підприємство «Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля», Дніпро, Україна

[1]mv_marchuk@ukr.net

Ключові слова: ракетно-космічна техніка, міцність, великогабаритна оболонкова конструкція, твердопаливний двигун, стик, сопло, заряд твердого палива

Оцінка міцності конструкції будь якого функціонального призначення істотно залежить від точності та достовірності даних про її напружено-деформований стан (НДС) за умов експлуатації. Тонкостінні й об'ємні елементи конструкцій сучасної ракетно-космічної техніки (РКТ), як правило, мають екстремальний характер. Це зумовлює їхню підвищену напруженість, що потребує найбільш досконалих математичних і точних розрахункових моделей. До недавнього часу дослідження таких складних конструкцій як елементів РКТ проводили на основі спрощених математичних моделей. Однак, можливості дослідження поведінки конструкцій РКТ при такому підході є доволі обмеженими, що зумовило розроблення методології комп'ютерного моделювання руйнівних випробувань великогабаритних тонкостінних елементів конструкцій в рамках загальної моделі геометрично нелінійного пружно-пластичного тіла. Це дало змогу визначити руйнівне навантаження й місце ймовірного руйнування бака окиснювача рідинного двигуна (РД) (рис. 1).



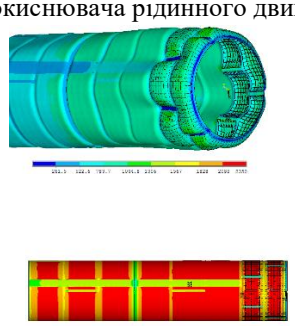


Рис. 1. Бак окиснювача РД

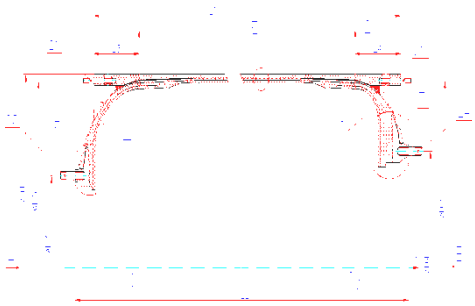


Рис. 2. Конструктивна схема корпусу РДТП

Нова змішана схема методу скінченних елементів покладена в основу розроблення методики розрахунку корпусів типу «кокон» на міцність (рис. 2). Створена математична модель для визначення НДС стиків ракетних двигунів на твердому паливі (РДТП) із суміжними відсіками РКТ (рис. 3). За використання теорії теплопровідності та термопружнопластичності анізотропних термочутливих тіл розроблена методика розрахунку міцності деталей сопел РДТП (рис. 4).

Запропонована математична модель поведінки зарядів твердого палива з урахуванням його реологічних властивостей (див. рис. 5).

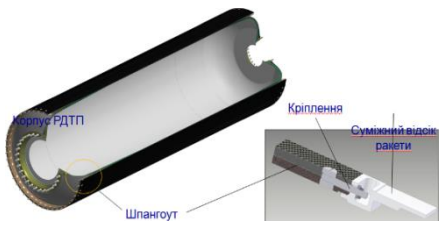


Рис. 3. Стик корпусу РДТП із суміжними відсіками

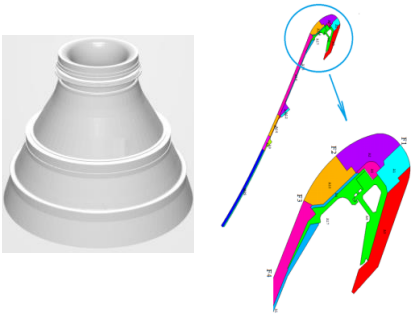


Рис. 4. Сопло РДТП

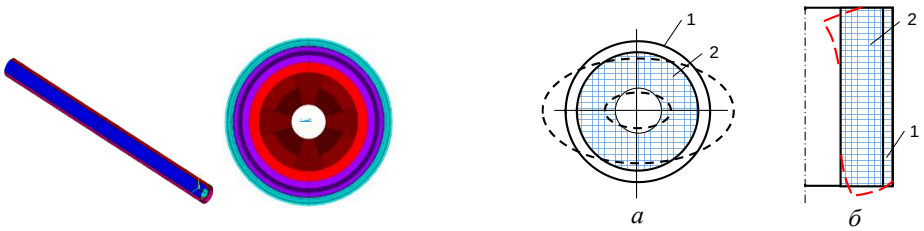


Рис. 5. Модель заряду в корпусі твердопаливного двигуна. Етапи деформацій заряду в горизонтальному (а) та вертикальному (б); 1 – корпус; 2 – заряд

Strength assessment of loaded elements of rocket and space technique taking into account the specifics of their structure and deformation

M. Marchuk[a], B. Drobenko[a], V. Pakosh[a], D. Klymenko[b], V. Kharchenko[b], V. Sirenko[b]

[a]Ya.S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, L'viv, Ukraine.
[b]State Enterprise «M.K. Yangel Design Bureau "Pivdenne"», Dnipro, Ukraine.

[1]marchuk_mv@ukr.net

Refined and new mathematical and computer models of the mechanical behavior of the main loaded elements of rocket and space technique (RST) structures has been proposed. This has made it possible to solve a number of important scientific and technical problems in improving existing and designing new promising RST models. In particular, the foundations are developed and a methodology are created for assessing the mechanical condition and determining the actual destructive loads of large-sized shell structures based on the results of computer modeling and non-destructive experimental tests. The specified methodology and developed methods for assessing the strength of solid-propellant engine housings and their joints with adjacent compartments under the complex action of loads, the strength of nozzle parts in such engines and the solid fuel charge in the housings have significantly influenced the speed and quality of design developments.

Keywords: rocket and space technique, strength, large-sized shell structure, solid-propellant engine, joint, nozzle, solid fuel charge.

Місячний лендер на екологічних компонентах палива

О. І. Бердник[1], М. Г. Литвин, О. О. Голобородько

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», Дніпро, Україна

[1] spacer.a@i.ua

Ключові слова: дослідження Місяця, посадковий апарат, політ на Місяць, навколомісячна орбіта, м'яка посадка

Враховуючи значне зростання цікавості до дослідження та освоєння Місяця, що проявляється у світі за останнє десятиріччя, в ДП «КБ «Південне» був розроблений ряд варіантів місячних посадкових апаратів (лендерів), які відрізняються масою, профілем місії, задачами, конструкцією та іншим. Зокрема, одна з останніх розробок була створена на базі рушійної установки, що працює на екологічно безпечних, але при цьому висококиплячих (гіперголічних) компонентах палива. В цій статті розглянутий саме такий варіант місячного лендера.

В матеріалах статті показані основні принципи, закладені в розробку даного лендера, а саме: призначення, обрані технології, профіль місії та її основні етапи, а також вимоги, які накладає місія на можливості та основний структурний склад лендера. Наведені отримані в результаті розробки вигляд лендера і його основні характеристики, а також енергетичні можливості.

1. Cargo Spacecraft for Supply Moon Industrial Research Base – A. Pustovharov, H. Osinovyj – Journal of Rocket-Space Technology. https://doi.org/10.15421/452323.
Многоразовый лунный лендер / Reusable Lunar Lander – О. Бердник, М. Каляпін, Ю. 2.Лисенко, Т. Бугаєнко – Космічна наука і технологія (Space Science and Technology) Том 25, №5, 2019.
3.Planetary Landers and Entry Probes – Andrew Ball, James Garry, Relph Lorenz, Viktor Kerzhanovich. Cambridge University Press, 2009, https://doi.org/10.1017/CBO9780511536052.

Lunar lander with ecological propellants

O. Berdnyk[a1], M. Lytvyn[a], O. Holoborodko[a]

[a]Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine.

[1] spacer.a@i.ua

Aspects of working out lunar lander with propulsion system based on ecologically safe propellant components, in particular the main principles put in working out, the chosen technologies, a profile of mission and its basic stages, and also requirements to lander are shown from mission. The shape of the device, its basic characteristics and power possibilities are shown received as a result of working out.

Keywords: Moon research, landing probe, flight to the Moon, cislunar orbit, soft landing.

Моделювання в програмному комплексі ANSYS випробування зразків гуми на зсув

В. М. Харченко[1], Д. В. Клименко

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

[1] volodymyrmx@gmail.com

klymenko_dv@hotmail.com

Ключові слова: метод скінчених елементів, математичне моделювання, випробування на зсув, гіперпружність, гума

В техніці при розробці пружних елементів конструкцій, таких як демпфери, віброізоляторів, пружних опор, пружних шарнірів, торсіонів, широко використовується гума як гіперпружний майже нестисливий матеріал. Діаграми деформування гуми мають нелінійний вигляд, особливо при великих деформаціях. Для проєктування конструкцій з пружними елементами необхідні дані щодо фізико-механічних характеристик гуми. Для визначення цих характеристик і побудови моделі матеріалу гуми проводять різні види випробувань зразків, одним з яких є випробування на зсув.

В даній роботі наведені результати розрахункового моделювання випробування зразків гуми на зсув, та порівняння результатів розрахунку параметрів напружено-деформованого стану гуми з результатами експерименту.

Виготовлення зразків для випробувань та експериментальне визначення модуля зсуву гуми проводилось за методикою міжнародного стандарту [1]. Випробування зразків проводилось за допомогою машини Tiratest 2300. При випробуванні зразків в процесі навантаження вимірювались сила та переміщення. За результатами випробувань трьох зразків одержані модулі зсуву гуми при деформаціях зсуву до 100% (табл. 1).

Таблиця 1.

Значення модуля зсуву при деформації зсуву 100%

Номер зразка	Значення модуля зсуву при деформації зсуву 100%, МПа					
	Підготовчі навантаження					Випробування
	№1	№2	№3	№4	№5	
1	0,320	0,316	0,320	0,321	0,325	0,318
2	0,321	0,319	0,327	0,320	0,320	0,320
3	0,325	0,321	0,323	0,330	0,332	0,325

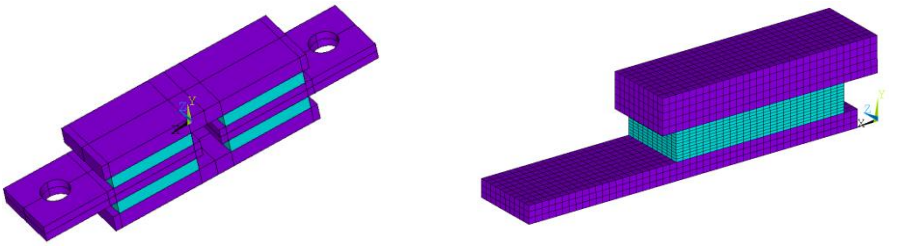
Геометрична і скінчено-елементні моделі (рис. 1) випробувального зразка побудовані в системі ANSYS [2]. З урахуванням симетричності конструкції випробувального зразка і випробувального навантаження розглядалась 1/8 частина конструкції. До моделі прикладались граничні умови симетрії і навантаження до середньої пластини в переміщеннях (Ux=4 мм). Механічні характеристики гуми задавались ті, які одержані за результатами випробувань.

За результатами розрахунків в системі ANSYS одержані параметри напружено-деформованого стану (НДС) зразка гуми для умов випробувань (рис. 2):

– відносні деформації зсуву, при середній деформації 100%, на вільній поверхні гуми біля місця скріплення з пластинами склали 131%;

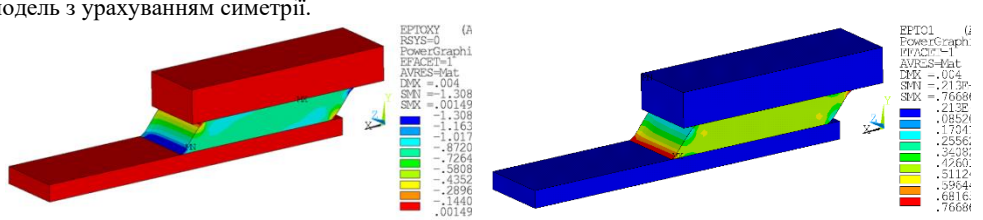
– відносні максимальні головні деформації також сконцентровані біля місця скріплення з пластинами і склали 76,7%;

– значення сили реакції відповідає силі, яка прикладалась при випробуванні зразків.



а *б*

Рис. 1. Випробувальний зразок гуми: *а* – повна геометрична модель; *б* – скінчено-елементна модель з урахуванням симетрії.



а *б*

Рис. 2. НДС зразка гуми: *а* – відносні деформації зсуву; *б* – відносні максимальні головні деформації.

Розрахункове моделювання випробування зразків гуми на зсув в системі ANSYS показало збіжність з результатами експерименту.

1. ISO 1827-76 «Гума. Визначення модуля зсуву. Метод зсуву чотириелементного зразку».

2. ANSYS 21.1 Mechanical APDL / ANSYS Inc., 2021.

Modeling in the ANSYS software package of shear testing of rubber samples

V. Kharchenko[a1], D. Klymenko[a]

[a]Yuzhnoye State Design Office, 3 Kryvorizka street, Dnipro, 49008, Ukraine

[1] volodymyrmx@gmail.com

klymenko_dv@hotmail.com

In the yielded work the resulted results of settlement modelling of test of samples of rubber on shift, and comparison of results of calculations of parametres of the is intense-deformed camp of rubber with results of experiment. Manufacturing of test pieces and experimental definition of the module of shift of rubber was spent by a technique of international standard ISO 1827-76. Settlement modelling of test of samples of rubber on shift was spent by a method of the ended elements in system ANSYS and has shown convergence of calculations with results of experiment.

Keywords: finite element method, mathematical modeling, shear test, hyperelasticity, rubber.

Контрольоване моделювання контактних елементів для мінімізації обчислювальних похибок і часу розрахунку

В.В. Сатокін

Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля

ofasle@gmail.com

Ключові слова: контактні елементи, регулярні сітки, структурні сітки, фізична відповідність.

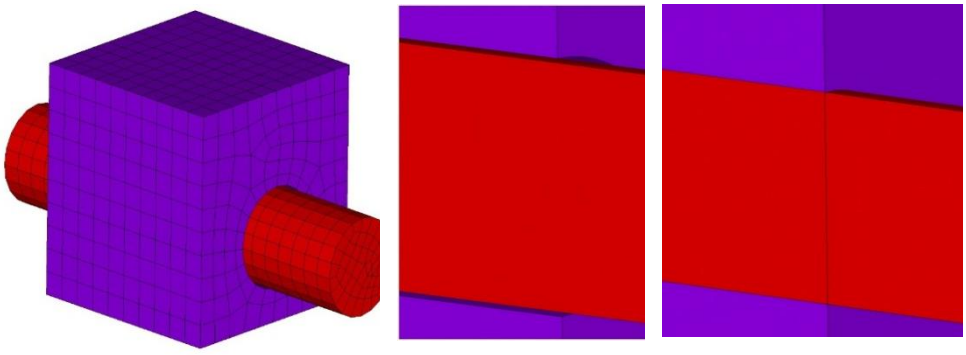
Сучасний розвиток техніки дозволив, в межах адекватної оцінки, при скінченно-елементному моделюванні нехтувати кількістю скінченних елементів в моделі і відповідно тривалістю часу розрахунків.

В гонитві за максимальною деталізацією контактної взаємодії основне покладання відбувається на мінімізацію розмірів елементів. Що призводить до непомірного збільшення часу розрахунку і втрати контролю точності і сходження.

Побудова регулярних і структурованих сіток скінченних елементів типу «цеглина» покращує моделювання і сходження контактної взаємодії, але залишає багато питань по фізичній відповідності моделі і реальної конструкції. Скінченно-елементне створення вільних сіток з тетраедрів при моделюванні контактних взаємодій значно погіршує сходження, збільшує час розрахунку і зменшує відповідність з реальними напружено-деформованими станами (НДС).

Автором пропонується принципово інший підхід до скінченно-елементного моделювання конструкцій, в яких буде відбуватись контактна взаємодія.

Розглянемо напружено-деформований стан з контактною взаємодією на прикладі циліндра у отворі, показаного на рисунку 1.



а *б* *в*

Рис. 1 – Скінченно-елементна модель об’єкта досліджень – *а*, з зазором – *б*, та без зазору – *в*.

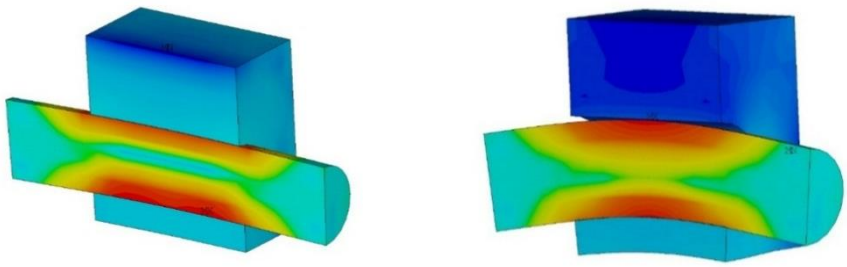
Роки проведених розрахунків і порівняння з реальністю показали, шо при скінченно елементному моделюванні зазорів між контактуючим об’єктами (поверхнями) не повинно бути – зазор треба робити нульовим.

Для повної відповідності контактуючи об’єкти об’єднуються в один, потім між ними будується поверхня розмежування, потім будуються окремі об’єми, які

залишаються об’єднаними. Після побудови сітки скінченних елементів проводиться розділення об’ємів шляхом копіювання одного з них в будь-який бік і переміщення назад. Це дозволяє створити окремі об’єми, які мають повне співпадіння по сітці скінченних елементів в області контакту, якій згодом і будується.

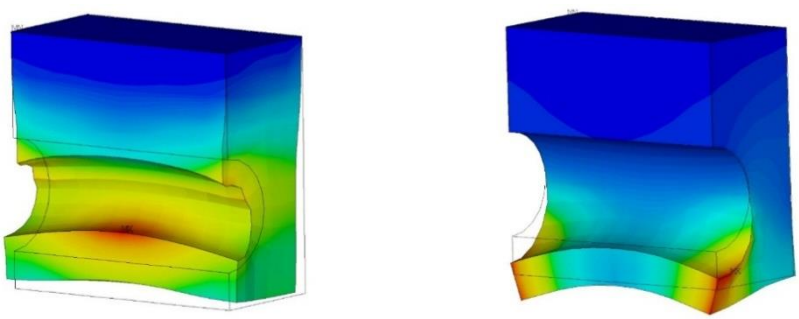
Для аналізу НДС використовувалась половина моделі, з накладанням відповідних граничних умов. Також куб був закріплений по верхній грані. На бічні грані циліндру прикладались сили, діючи вертикально вниз.

На рисунках 3 і 4 показаний напружено-деформований стан досліджуваної конструкції. Масштабний фактор 10. Контуром показаний початковий стан.



а *б*

Рис. 3 – НДС моделі з зазором – *а*, та без зазору – *б*.



а *б*

Рис. 4 – НДС в моделі з зазором – *а,* та без зазору – *б*.

Як бачимо з аналізу і порівнянні НДС на рисунках 3 і 4 саме моделювання без зазору відповідає реальному НДС. Тоді як моделювання контактної взаємодії з зазором ні. Сили, розміри, властивості однакові. При використання не елементів типу «цеглина», а тетраедрів ситуація стане набагато гірше, адже контактні поверхні створені гранями елементів будуть мати безліч не відповідних особливостей.

Запропонований підхід дозволяє не тільки значно зменшити кількість скінченних елементів, а відповідно і час розрахунку. Він дозволить повністю контролювати контактну взаємодію. Ба більше, роки застосування запропонованого підходу вказують на максимальну відповідність віртуального моделювання з реальним напружено-деформованим станом, та натурною поведінкою різноманітних конструкції при їх експлуатації.

The controlled design of contact elements for minimization of calculable errors and checkout

V.V. Satokin[1]

Yuzhnoye State Design Office, 3 Kryvorizka street, Dnipro, 49008, Ukraine,

[1] ofsale@gmail.com

Modern development of technique allowed, within the limits of adequate estimation, at a finite-element design to ignore the amount of finate elements in a model and accordingly by duration of time of calculations.
In pursuit after the maximal working out in detail of contact co-operation a basic laying-on takes place on minimization of sizes of elements. What results in the excessive increase of checkout and loss of control of exactness and ascent.
Construction of regular and structured nets finite elements type a "brick" improves a design and ascent of contact co-operation, but abandons many questions on physical accordance of model and real construction. Finite-element creation of free nets from tetrahedrons at the design of contact co-operations is considerably worsened by an ascent, increases a checkout and diminishes accordance with the real tensely-deformed states.
An author is offer fundamentally other going near the finite-element design of constructions which contact co-operation will be in.

Keywords: contact elements, regular nets, structural nets, physical accordance.

Комплексна оцінка міцності кронштейнів кріплення шаробалонів при статичних та вібраційних навантаженнях

Д.В. Акімов

Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля

akimoff2017@gmail.com

Ключові слова: напружено-деформований стан, кронштейн, шаробалон, метод скінченних елементів, втомна міцність, віброміцнісні випробування, ракетно-космічна техніка.

При розробці конструкцій ракетно-космічної техніки критичне значення має етап відпрацювання їхньої міцності. Враховуючи стислі терміни та обмежений обсяг фінансування, актуальним завданням є визначення мінімально необхідного обсягу наземного експериментального відпрацювання (НЕВ). Класичний обсяг НЕВ планується виходячи з умов експлуатації та специфіки навантаження конструкції.

Розглянемо рішення даної задачі на прикладі розробки конструкції кронштейну кріплення шаробалону.

Першочергово для кронштейнів кріплення шаробалонів паливного відсіку третього ступеня було проведено випробування на статичну міцність, які показали позитивні результати. Проте під час наступного етапу – віброміцнісних випробувань – відбулося руйнування кронштейна, що зумовило необхідність проведення додаткових розрахунково-експериментальних досліджень.

У даній роботі представлено результати визначення напружено-деформованого стану (НДС) та втомної міцності конструкції. При проведенні розрахунків використовувався метод скінченних елементів і оснований на ньому програмний комплекс MSC.NASTRAN [1, 2].

Результати оцінки НДС при статичних навантаженнях підтвердили, що максимальні напруження близькі до допустимих меж, визначених умовою відсутності пластичних деформацій. Оцінка втомної міцності виконувалася за теорією лінійного накопичення втомних пошкоджень [3]. Порівняння максимальних реалізованих напружень із границею витривалості матеріалу АМг6М для симетричного циклу показало, що втомна міцність вихідної конструкції кронштейна не забезпечується.

Для усунення виявлених недоліків у конструкцію було введено доопрацювання (Рисунок 1). Повторні розрахунки та контрольні віброміцнісні випробування підтвердили, що після модернізації втомна міцність вузла кріплення повністю забезпечується.

Висновки:

1. Пріоритетність режимів навантаження: Доведено, що успішне проходження статичних випробувань не є гарантією надійності вузлів кріплення в умовах інтенсивної вібрації. Для елементів ракетно-космічної техніки віброміцнісний аналіз має бути обов'язковою складовою.

2. Аналіз втомної довговічності: Виявлено, що причиною руйнування кронштейна з матеріалу АМг6М стала невідповідність реалізованих циклічних напружень границі витривалості матеріалу, що було підтверджено розрахунками в MSC.NASTRAN.

3. Ефективність конструкційних змін: Впровадження локального підсилення дозволило оптимізувати розподіл напружень у зонах концентрації та забезпечити необхідний ресурс конструкції.

4. Методологія НЕВ: При плануванні мінімального обсягу випробувань необхідно враховувати синергію статичних та вібраційних факторів, особливо для тонкостінних елементів та кронштейнів важких агрегатів.

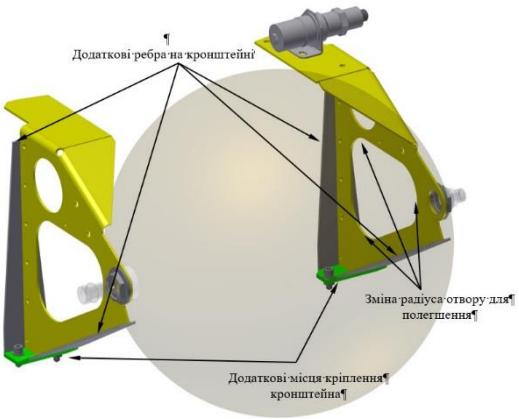


Рис. 1. Зміни в кронштейне в забезпечення його втомної міцності.

1. В Рычков С.П., *Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran*, москва: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
2. М Шимкович Д.Г., *Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows*, москва: ДМК Пресс, 2003. 448 с.
3. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А., *Сопротивление усталости металлов и сплавов*. Наукова думка., 1987г.

Comprehensive strength assessment of spherical high-pressure tank mounting brackets under static and vibration loading

D.V. Akimov[a1]

[a]Yuzhnoye State Design Office, 3 Kryvorizka street, Dnipro, 49008, Ukraine,

[1] akimoff2017@gmail.com

Presents the results of a comprehensive study of the stress-strain state (SSS) and strength of the brackets used for mounting spherical high-pressure tanks to the fuel compartment of a launch vehicle's third stage. Based on finite element numerical modeling in the MSC.NASTRAN software package, a comparative analysis of the static and fatigue strength of the structure was conducted. A discrepancy was identified between the positive results of static tests and the failure of the units during vibration strength testing. It was established through calculations that the critical factor is the fatigue life of the AMg6M alloy under cyclic loading. Structural modifications were proposed and justified to reduce stress concentration and ensure the fatigue strength of the brackets, which was subsequently confirmed by successful verification tests.

Keywords: stress-strain state, bracket, spherical high-pressure tank, finite element method, fatigue strength, vibration testing, aerospace engineering.

До аналізу напружено-деформованого стану та міцності складених контактних конструкцій

В. В. Бабуров

Державне підприємство Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро, Україна

literator11@i.ua

Ключові слова: скінченно-елементна модель, напружено-деформований стан, міцність, контактна взаємодія, нелінійний аналіз.

В конструкціях сучасного машинобудування, ракетно-космічної й авіаційної техніки та інших галузях мирної економіки широкого застосування набувають складені конструкції, робота яких заснована на умовах контактної взаємодії її складових елементів.

За рахунок зміни геометрії та контактної взаємодії елементів таких конструкцій при їх навантаженні, аналітичні, у тому числі наближені, методи дослідження напружено-деформованого стану пов'язані із значними труднощами чисельного аналізу математичних моделей. Цим моделям відповідає складна система диференціальних рівнянь в частинних похідних, у загальному випадку із змінними коефіцієнтами, при розв'язанні якої може спостерігатися нестійкість чисельного процесу. З іншого боку, як показує практика останніх років, застосування асимптотичних, у тому числі гібридних підходів, дає можливість здобути ефективні рішення на стадії проектування реальних систем з подальшим уточненням руйнівних навантажень із застосуванням чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів та його модифікацій.

Розглянемо рішення даної задачі на прикладі визначення напружено-деформованого стану (НДС) та міцності затискачу для встановлення оптоволоконного кабелю.

В даній роботі представлені результати розрахунків напружено-деформований стану та міцності затискача.

При проведенні розрахунків використовувався метод скінченних елементів і оснований на ньому програмний комплекс MSC.NASTRAN [1, 2].

Затискач складається з корпусу, встановленого в скобі, яка закріплена на жорсткій опорі та фіксуючих кабель клинів. Загальний вигляд конструкції представлено на рисунку 1. Матеріал корпусу та клинів – полиамид ПА 66 КС, матеріал скоби – сталь 1. Кабель представляє собою центральну трубку із полібутилентерефталату (ПБТ), через яку проходить оптичний передавач, два силових елементи, які виконані зі склопластикового прутку та поліетиленову оболонку, в яку вмотані ці складові елементи.

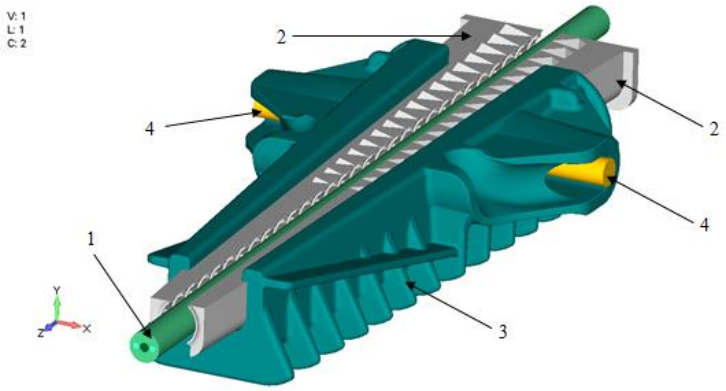
Аналіз НДС проводився з врахуванням фізичної та геометричної нелінійності та контактної взаємодії відповідних елементів конструкції (тип аналізу Multi-Step Structural):

– між клинами та оболонкою кабелю (шипи та внутрішня частина кліньїв – поверхня оболонки), з врахуванням зазорів в конструкції, тип взаємодії Contact, коефіцієнт тертя прийнято $\mu = 0{,}5$;

– між клинами та корпусом, з врахуванням зазорів в конструкції, тип взаємодії Contact, коефіцієнт тертя прийнято μ = 0,5;

– між складовими елементами кабеля та оболонкою задана «склейка» Glued;

– між імітаторами скоби та корпусом задана «склейка» Glued.



1 – кабель; 2 – клини; 3 – корпус; 4 – імітатор скоби

Рис. 1. Загальний вигляд конструкції затискача з кабелем.

Навантаження затискача проводилось прикладенням експлуатаційної осьової розтягувальної сили N = 100 кгс по торцю силових елементів кабелю по 50 кгс на кожний елемент). При навантаженні враховувалось зусилля від «руки» значенням Nвст = 1 кгс прикладеного по торцю клинів (по 0,5 кгс на кожний клин).

Закріплення затискача проводилось защемленням торців імітаторів скоби через жорсткий елемент типу Rigid. Конструкції затискача та кабелю моделювались скінченими твердотільними елементами типу – Solid Tetra.

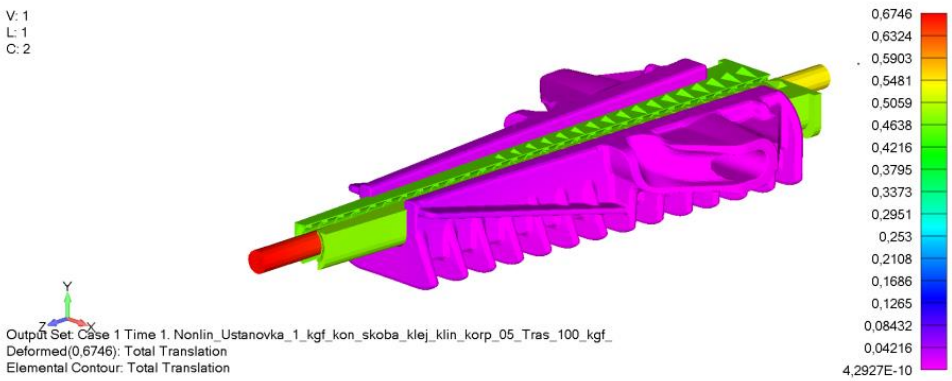


Рис. 2. НДС, розподіл загальних переміщень (см) в конструкції затискача з кабелем.

Аналіз отриманих результатів показав:

5. Максимальні напруження в корпусі отримані в зоні його переднього торцю, що відповідає зоні руйнування подібних конструкцій, а їх значення задовольняє умовам міцності.

6. Максимальні напруження в оболонці кабелю реалізовуються в зоні «заходу» шипів клинів. Враховуючи, що оболонка виконана з пластичного матеріалу та допустимість наявності «слідів», тому її міцність оцінювалась за критерієм Мізесу.

7. Максимальні напруження «здавлювання» центральної частини кабелю реалізовуються в зоні переднього торцю корпусу та не перевищують допустимих значень.

8. Максимальні осьові розтягуючі напруження силових елементів кабелю реалізовуються в зоні переднього торцю корпусу та не перевищують допустимих значень.

9. Основне навантаження ≈99% від осьової розтягувальної сили сприймається шипами клинів. Навантажуються три ряди шипів із п'яти, що обумовлено меншим діаметром кабелю по відношенню до внутрішнього діаметра клинів та тим, що при «заході» шипів в оболонку на 0,2 мм, що відповідає допустимому значенню, не відбувається повного притиснення оболонки до внутрішньої поверхні клинів поза шипами. Шипи клинів зрізує, що може привести до непрацездатності затискача в цілому за рахунок проковзування кабелю в клинах.

В подальшому доцільно провести розрахунки міцності затискача для максимально допустимого діаметру кабелю та розглянути варіанти зміни конструкції клинів в частині їх шипів.

1. В Рычков С.П., *Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran*, москва: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
2. М Шимкович Д.Г., *Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows*, москва: ДМК Пресс, 2003. 448 с.

To the analysis of the stress-strain state and strength of modular contact structures

V. Baburov[a1]

[a]G.S. Yuzhnoye" State Design Office, 3 Kryvorizka street, Dnipro, Ukraine.

[1] literator11@i.ua

In modern mechanical engineering, rocket and space technology, aviation, and other sectors of the civilian economy, modular structures are becoming widely used; their operation is based on the contact interaction of their constituent elements. An analysis of the stress-strain state and strength calculations for a cable clamp were performed, taking into account geometric and physical nonlinearities and contact interaction.

Keywords: finite element model, stress-strain state, strength, contact interaction, nonlinear analysis

Оптимізація структури та параметрів космічної індустріальної платформи

О. С. Палій [1], С. В. Сюткіна-Дороніна

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

[1] jerr_5@ukr.net

Ключові слова: космічна індустріальна платформа, концептуальне проєктування, технологічні процеси, комплекс параметрів, багатокритеріальна оптимізація, космічне сміття.

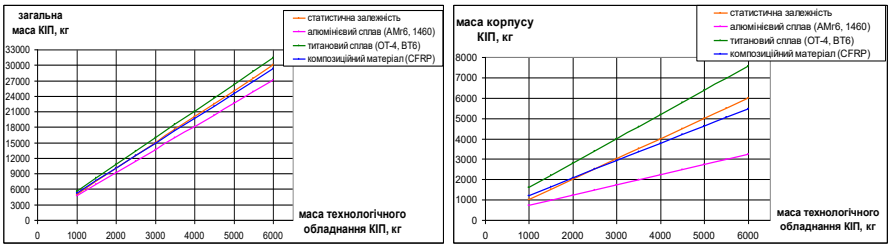
Початковим етапом індустріалізації космосу є створення на орбіті Землі космічних індустріальних платформ. В даний час виконуються роботи, пов'язані з реалізацією низки технологічних процесів для переробки космічного сміття в елементи об'єктів космічної техніки в умовах вакууму та невагомості. Процес проєктування нової складної космічної системи, такої як індустріальна платформа, є багаторівневим ітераційним і оптимізаційним процесом, під час якого визначаються і уточняються її характеристики і масове зведення.

На передескізному етапі проєктування космічної індустріальної платформи розглядається задача визначення оптимальних значень проєктних параметрів (вектор $\bar{p}$) за умови мінімізації цільової функції – маси космічної індустріальної платформи $m_{КІП}\ (\bar{x}, \bar{p}) \to min$, що залежить від властивостей конструкційних елементів та початкових даних, які характеризують умови функціонування платформи (вектор $\bar{x}$).

Розроблено науково-методичне забезпечення для оптимального синтезу структури та вибору проєктних параметрів космічної індустріальної платформи.

Методичне забезпечення для оптимізації проєктних параметрів космічної індустріальної платформи дозволяє: обрати форму конструкції, виходячи з компонування технологічного обладнання; обрати найбільш легку та міцну конструкцію, здатну витримати навантаження під час виведення на орбіту; проводити комплексне проєктування систем енергопостачання та терморегулювання з можливістю оптимізації масових параметрів (обрати основні характеристики систем енергопостачання та терморегулювання, враховуючи їх взаємний вплив та залежність від ККД технологічного обладнання).

На першому етапі концептуального проєктування КІП розраховуються маси модулів за середньостатистичними значеннями залежно від початкової маси технологічного обладнання. Далі проводиться оптимізація маси, об'єму та площі поверхні корпусу КІП з обмеженнями на масо-габаритні розміри конструкції платформи. **На другому етапі** проєктування КІП оптимізується маса термоізолятора завдяки мінімізації площі поверхні корпусу КІП і вибору щільності та товщини шару теплоізолятора. При оптимізації враховується зовнішній тепловий потік і власне випромінювання на борту КІП. Основну роль відіграє те, що теплоізолятор алюмінізований каптон поглинає мало тепла і ще менше випромінює. **На третьому етапі** проєктування КІП проводиться мінімізація маси корпусу КІП за умов міцності та стійкості конструкції під дією максимальних розрахункових навантажень під час виведення ракети-носієм на орбіту. Розраховується допустима напруга матеріалів силового корпусу КІП.



а *б*

Рис. 1. Залежності: *а* – загальної маси КІП; *б* – маси корпусу КІП від маси технологічного обладнання та матеріалу корпусу.

На четвертому етапі проєктування КІП за методикою визначаються основні параметри системи енергозабезпечення і терморегуляції та оцінюється їх реалізованість враховуючи масо-габаритні обмеження та вимоги.

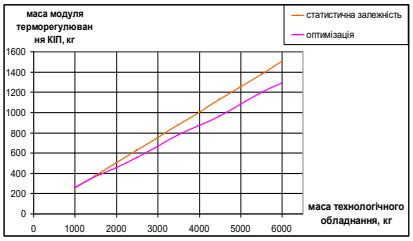


Рис. 1. Залежність маси модуля терморегулювання від маси технологічного обладнання КІП.

1.А. П. Алпатов, О. С. Палій, С. В. Сюткіна-Дороніна, Концептуальне проєктування космічної індустріальної платформи. Постановка задачі, *Космічна наука і технологія*, Т. 29, № 6 (145), 13–25 (2023). https://doi.org/10.15407/knit2023.06.013

2. О. С. Палій, Моделі для оцінки маси космічної індустріальної платформи та її модулів, *Технічна механіка*, № 3, 75–84 (2022). https://doi.org/10.15407/itm2022.03.075

3. О. С. Палій, Класифікація функціональних особливостей оболонки космічної індустріальної платформи, *Технічна механіка*, № 2, 64–73 (2023). https://doi.org/10.15407/itm2023.02.064

Optimization of Structure and Parameters of a Space Industrial Platform

A. Palii[1], S. Siutkina-Doronina

The Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] jerr_5@ukr.net

The overall goal of space industrialization is the development and utilization of near-Earth space for the benefit of humanity through the deployment of industrial production in space for the mass manufacturing of various types of products to meet the needs of the space industry. As raw materials for the space industry, the possibility of using space debris accumulated in near-Earth orbits is considered. Scientific and methodological support has been developed for the optimal synthesis of the structure and selection of parameters of a space industrial complex for recycling space debris into elements of space technology objects. The implementation of a space industrial platform will contribute to solving the problem of near-Earth space pollution. The developed methodological support can be used for the design of platforms for other purposes.

Keywords: space industrial platform, conceptual design, technological processes, parameter set, multi-objective optimization, space debris.

Estimation of satellite deorbit time from Low Earth Orbit

D. Lazuchenkov [1]

The Institute of Technical Mechanics of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] lazuch.dm@gmail.com

Keywords: orbital decay, space debris, spacecraft deorbit time estimation, atmospheric drag, atmospheric density model

The proposed procedure utilizes historical altitude data of spacecraft or space debris in near-circular Low Earth Orbit (LEO) to predict future orbital decay, thereby estimating the duration of both passive and active deorbiting.

During the observation phase, it is assumed that altitude data for the satellite is available. Among the natural perturbations acting on the body, this model considers gravity and aerodynamic drag; for active deorbiting scenarios, the applied thrust is assumed to be known. By adopting a specific atmospheric density model, the corresponding values of the model's ballistic coefficient, which characterizes orbital decay due to drag and is often unknown a priori, are calculated using orbital dynamics and total energy conservation equations [1]. The time dependence of model ballistic coefficient is then approximated by incorporating the 11-year solar activity cycle, provided the observation time is sufficiently large relative to this cycle.

In the estimation phase, the body's future orbital altitude is calculated using the same atmospheric density model and the extrapolated ballistic coefficient. Given the significant influence of solar activity on atmospheric density, relevant F10.7 data or forecasts are employed [2].

The procedure was validated using the passive deorbiting case of the ERBS spacecraft [3, 4], where the impact of various atmospheric density models and solar activity index approximations was analyzed. The deorbiting time was estimated with the relative error of approximately 10% using the NRLMSISE-00 model [4], and roughly 15% using tabulated altitude density profiles [5] paired with actual F10.7 data. While the NRLMSISE-00 model ensures a more precise estimation of the deorbit instant, it is comparatively resource-intensive. Conversely, tabulated density profiles perform slightly worse but significantly reduce calculation time. A direct approximation of the F10.7 index based on recent data and the 11-year solar cycle, combined with tabulated density profiles, enables deorbit time calculations with an error margin of 15–20%. Notably, a constant F10.7 value proved inapplicable across all density models.

The results demonstrate that the proposed approximation of the time-dependent ballistic coefficient over long observation periods provides more precise deorbit estimates than a constant ballistic coefficient approach. The procedure can also be implemented within an iterative framework to determine the precise acceleration required for active deorbiting within a specified timeframe.

1. O. Montenbruck, E. Gill. *Satellite Orbits: Models, Methods, and Applications.* Springer Berlin, Heidelberg (2000). https://doi.org/10.1007/978-3-642-58351-3

2. T. S. Kelso, *CelesTrak: Space Weather Data*. Available at: https://celestrak.org/SpaceData/
3.T. S. Kelso, *CelesTrak Orbital Data***.** Available at: https://celestrak.org
4.Earth Radiation Budget Satellite (ERBS) mission overview. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_Radiation_Budget_Satellite
5.J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob, A. C. Aikin, NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, **107**, 1–15, (2002). https://doi.org/10.1029/2002JA009430
6.Space engineering: Space environment (ECSS-E-ST-10-04C Rev.1), ECSS, Noordwijk (2020). Available at: https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10-04c-rev-1-space-environment-15-june-2020/

Оцінка терміну деорбітінгу супутника з низької навколоземної орбіти

Д. Лазученков [1]

Інститут технічної механіки НАН України та ДКА України, Дніпро, Україна.

[1] lazuch.dm@gmail.com

Розглянуто процедуру оцінки терміну зведення з низької майже кругової навколоземної орбіти космічних апаратів та об'єктів космічного сміття. На етапі спостереження, за даними про висоту орбіти та з використанням модельної густини атмосфери апроксимований модельний балістичний коефіцієнт тіла, значення якого на практиці майже завжди невідомо. На етапі оцінки проведено розрахунок процесу деорбітінгу з використанням раніше знайденої апроксимації балістичного коефіцієнта. Проведено аналіз точності розрахунку часу деорбітінгу для різних моделей густини атмосфери та індексу сонячної активності. Представлена процедура дозволяє також оцінити мінімально необхідне прискорення, яке забезпечує зведення тіла з орбіти протягом заданого часу.

Ключові слова: зниження орбіти, космічне сміття, оцінка терміну зведення космічного апарату з орбіти, атмосферний опір, модель густини атмосфери

Про підхід до визначення технічного рівня виробів ракетно-космічної техніки з урахуванням рівня компетентності групи експертів

Н.П. Сазина

Інститут технічної механіки ЕАЕ України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

sazinana@ukr.net

Ключові слова: компетентність експертів, ракетно-космічна техніка, технічний рівень.

При визначенні технічного рівня нових зразків виробів машинобудування з використанням методів бальних оцінок або ранжування для визначення значень вагових коефіцієнтів має місце високий рівень субєктивізму. Оцінка технічного рівня виробів ракетно-космісної техніки є задачею багатокритеріальної оптимізації. Розроблений метод оцінки технічного рівня є модифікацією метода аналізу ієрархій Т. Сааті. Маючи попередньо підотовлену модель оцінки ефективності функціонування технічно складного виробу, що оцінюється, експерти лише заповнюють матриці парних порівнянь показників (факторів). В такий спосіб виключається прямий вплив експерта на числове значення вагових коефіцієнтів.

Для виключення такого недоліка метода формування матриць парних порівнянь як можлива наявність порушення правил транзитивності, було введено допоміжні бінарні матриці на заданій множині факторів. Таким чином основна модифікація метода Т. Сааті полягає в створенні формалізованого способу виявлення та усунення можливої неузгодженості у заповнених екпертами матрицях парних порівнянь [1].

Розроблений метод оцінки технічного рівня дозволяє виключити можливі логічні протиріччна та помилки у даних, сформованих на основі експертних оцінок. Комп'ютерна реалізація розробленого відповідного алгоритмічного забезпечення значно прискорює та поленшує процес оцінки технічного рівня, надає можливість побачити які саме елементи матриці є некоретними, та виправити їх.

Відбір експертів для оцінювання проєктів складних виробів ракетно-космічної техніки лише за фактографічною інформацією про експерта явно недостатній і доцільний лише для попоереднього формування експертої групи. Для уточненого визначення рівня експертів у групі пропонується метод кількісної оцінки компетентності, заснований на оцінці кваліфікації експертів стосовно поставленої зачачі. За розробленою методикою коефіцієнт компетентності експерта являє собою кількісну міру рівня надійності результатів експертного оцінювання конкретного експерта [2]. Уточнена оцінка компетентності експертів проводиться безпосередньо перед проведенням експертизи технічного рівня, коли поставлено задачу та сформовано систему часткових показників (тактико-технічних характеристик виробу).

Серед основних положень методики розрахунку такі: склад оцінюваних експертами факторів (критерієв) визначається таким чином, щоб фактори не корелювали між собою; множина експертних оцінок стосовно заданого набору факторів може бути представлена у вигляді векторів евклідова простору [3], визначення значень коефіцієнтів компетентності експертів доцільно виконувати із

застосуванням ітераційних процедур [4]. Значення обмежень для оцінки рівня компетентності (прийнятної відносної похибки експертних оцінок, допустимого рівня компетентності, граничного рівня компетентності для визначення групи експертів з високим рівнем компетентності) задаються відповідно до поставленої задачі.

Укрупнений алгоритм розрахунку на основі розробленої математичної моделі оцінки рівня компетентності експертів у групі [2], містить такі кроки: формування матриці оцінок експертами значимості факторів; визначення початкових значень компонентів вектора "істинних" значень експертних оцінок; обчислення початкових значень коефіцієнтів компетентності експертів; обчислення із заданою точністю значення компонентів вектора "істинних" значень методом послідовних наближень; обчислення остаточних значень коефіцієнта компетентності експертів; визначення кортежу коефіцієнтів компетентності експертів групи.

Остаточне визначення інтегрального показника технічного рівня виробу ракетно-космічної техніки проводиться з урахуванням компетентності експертів.

Такий підхід до визначення технічного рівня дозволить більш обгрунтовано проводити відбір проєктів створення перспективної ракетно-космічної техніки.

1. Марченко В. Т., Хорольський П.П., Сазіна Н. П. О новом методе оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні «ІТММ 2018», м. Дніпро, 27-29 березня 2018 року, 2018. С. 19.
2. Марченко В. Т., Сазіна Н. П. Методичні особливості оцінки рівня компетентності експертів у групі при визначенні ефективності ракетно–космічних комплексів. Технічна механіка. 2024. № 1. С. 93 – 104. https://doi.org/10.15407/itm2024.01.093
3 Архипов А. Е. Оценивание уровня компетентности экспертов по результатам многообъектной экспертизы / А. Е. Архипов, С. А. Архипова // Економіка та держава. – 2015. – № 6. – С. 29–33.
4 Воронин А. Н. Системный анализ и многокритериальная оценка космических проектов экспертными методами / А. Н. Воронин // Проблемы управления и информатики. – 2004.– № 1. – С. 121–135.

On the approach to determining the technical level of rocket and space technology, taking into account the level of competence of the expert group

N.P. Sazina

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

sazinana@ukr.net

The approach to determining the technical level of rocket-space technology products being created is considered, using quantitative assessment of the level of competence of a group of experts using improved methods. The use of the presented modified method of T. Saati's hierarchy analysis allows to

identify and correct logical contradictions and errors when experts fill in matrices of pairwise comparisons of technical excellence indicators. A generalized sequence of conducting a quantitative assessment of the competence of experts and the main provisions of the methodology for determining competence are given. The methodology makes it possible to set the values of the restrictions in accordance with the task set for the expert group. This makes it possible to form a group of experts with a given level of competence. The final determination of the integral indicator of the technical level of a rocket-space technology product is carried out taking into account the coefficients of competence of experts. Such an approach significantly facilitates the process of conducting an examination of complex technical products. It allows for a more reasonable selection of projects for the creation of promising rocket-space technology.

Keywords: competence of experts, rocket-space technology, technical level.

Тенденції та перспективи систем контролю мехатронних модулів в авіаційній техніці

Т.М.Кадильникова, В.В.Сілін

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

kadilnikovatm@ukr.net

Ключові слова: експлуатаційна надійність, технічний стан, тестове діагностування, комп'ютерна обробка, неруйнівний контроль

Забезпечення експлуатаційної надійності і довговічності авіаційних конструкцій завжди була актуальною проблемою виробництва в авіаційній галузі. В даний час у практику експлуатації авіаційної техніки для забезпечення її високої готовності, безпеки польотів при заданій надійності, великих ресурсах та низьких експлуатаційних витрат поряд з традиційною системою експлуатації ресурсу впроваджуються нові системи експлуатації за технічним станом та надійністю. Однак реалізація цих систем окремо та в оптимальному поєднанні можлива лише за наявності в експлуатації ефективних інструментальних методів та засобів діагностування для оцінки контролю та прогнозування технічного стану мехатронних модулів [1].

Розглянемо тенденції та перспективи оцінки технічного стану мехатронних модулів у процесі їх обслуговування, ремонту та експлуатації.

1. Застосування засобів неруйнівного контролю елементів, деталей, вузлів. Методика вибору методів контролю базується на виявленні тріщин критичних розмірів та визначенні параметра форми дефекту та на обробці сигналів від датчиків первинної інформації засобів контролю. Враховуючи те, що при контролі деталей авіаційної техніки також, зазвичай, використовують ручний контроль, застосовується документальна реєстрація координат та розмірів виявлених дефектів та комп'ютерна обробка результатів.
2. Розробка методології визначення фізичними методами неруйнівного контролю напружено-деформованого стану об'єктів діагностування. Враховуються та вивчаються фактори, що впливають на напружено-деформований стан та втомну міцність, а також розробляються ефективні методи та засоби їх визначення [2].
3. Реалізація аналітичних методів прогнозування довговічності об'єктів діагностування можлива за наявності експериментальних даних про реальний стан об'єкта контролю. Створення методики тестового діагностування конструкції, заснованої на вимогах нормативно-технічної документації, кореляційних зв'язках між напруженим станом, розмірами та видом дефектів. Розроблена система тестового діагностування включає такі блоки: характеристики об'єкта діагностування; формалізована модель об'єкта; формалізовані моделі дефектів; математична модель системи, алгоритм діагностування; апаратурне забезпечення. Визначення кількісних значень показників, що застосовуються в оцінці технічного стану, здійснюють за допомогою комплексної системи контролю, створеної для конкретного об'єкта діагностування [3].
4. Побудова систем моніторингу з урахуванням розробок методів і засобів контролю. В якості основи моніторингу використовують тестове діагностування на стадії

виготовлення та експлуатації системи. Якщо враховуються функціональні зв'язки між конструктивними частинами системи, формалізована модель дозволяє досить повно проводити моніторинг відповідно до структурно-ієрархічної схеми. В процесі обчислення та порівняння показників ознак приймаються рішення щодо усунення негативних змін в елементах, обсягу ремонтно-відновлювальних робіт механічної системи.

5. Обґрунтування принципів оцінки результатів неруйнівного контролю під час сертифікації авіаційної техніки. Для проведення робіт із сертифікації систем якості технічної діагностики створюються незалежні органи – експертні центри. Центри визначають принципи оцінки рівня якості, розробляють правила сертифікації, методики та нормативні документи технічної діагностики.

Розглянуті підходи необхідно застосовуються під час проведення сертифікаційних робіт на підприємствах, що випускають, експлуатують, обслуговують та ремонтують авіаційну техніку.

1. Г.С. Тимчик. *Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій [Електронний ресурс] : монографія / Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова, М. О. Демченко. – Електронні текстові дані (1 файл: 9.32 Мбайт).* – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 168 с. – URI https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57978
2. В. Д. Мигаль *Вібраційна діагностика машин, проектування, виготовлення, експлуатація : монографія / В. Д. Мигаль, Щ. В. Аргун* ; Держ. біотехн. ун-т, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків: Мачулін, 2024. – 441с.URI https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20340
3. G.G.Shvachych,T.M. Kadylnykova, V.U.Hrygorenko, L.F. Sushko. *Computer system of comprehensive assessment of technical condition of functioning of mechanisms,* World science. (Multidisciplinary Scentific Edition) – 2019. – Vol. 1, No 9 (49). – P. 4-11. DOI:https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092019/6694

Trends and prospects of mechatronic module control systems in aviation technology

T. Kadylnykova, V. Silin

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

kadilnikovatm@ukr.net

An urgent problem of the stable functioning of complex technical objects is the development of a complex system of technical diagnostics and forecasting, which would allow, based on the results of the measured values of the determining parameters. The technical state of a mechatronic system is determined by the set of deviations from the nominal or limit values of structural parameters, therefore, when determining the technical state, diagnostic parameters should be used - indirect values associated with structural parameters that carry sufficient information about the object of diagnosis.

Keywords: *operational reliability, technical condition, test diagnostics, computer processing, non-destructive testing*

Забезпечення надійності і безпеки стартових комплексів ракет-носіїв на етапі проєктування

В. П. Пошивалов

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

vposhivalov@gmail.com

Ключові слова: надійність, безпека, стартовий комплекс, показники надійності, показники безпеки

Надійність та безпека стартових комплексів (СК) ракет-носіїв забезпечуються суворим дотриманням технічних регламентів на всіх стадіях життєвого циклу: проектування, випробування та експлуатації. Ключові заходи включають багаторазове резервування систем, автоматизований контроль, суворі норми пожежобезпеки та екологічний моніторинг, що критично важливо для захисту персоналу та збереження ракетно-космічної техніки.

У зв'язку з цим при проектуванні стартового комплексу велику увагу треба приділяти розрахункам агрегатів та систем обладнання на надійність та безпеку [1,2]. Надійність і безпека СК є, з одного боку, самостійними властивостями, а з іншого боку, досить близькими один до одного. Найбільший ступінь зближення цих властивостей відбувається в тому випадку, коли у вигляді загрози безпечному стану СК виступає відмова елемента, який обумовлений витратою ресурсу.

Нормативно-технічна документація включає вимоги, які подаються конкретними значеннями показників. Основними цільовими показниками СК є показники надійності, оперативності та продуктивності. Надійність СК визначається коефіцієнтом готовності, ймовірністю успішної підготовки ракети-носія РН до пуску і ймовірністю успішного проведення пуску.

Надійність стартових комплексів. Оскільки основна мета стартового комплексу є підготовка до пуску та пуск ракет носіїв (РН), основним показником надійності для них є ймовірність підготовки РН до пуску та пуску за час$\tau_n \le \tau_n^3$.

$$P_{СК}(\tau_n^3) = Iмв(\tau_n \le \tau_n^3), \quad (1)$$

де τ_n ,τ_n^3- відповідно фактичний час підготовки до пуску та час самого пуску і заданий час підготовки до пуску та пуску РН;

Виділимо задачі, які необхідно вирішувати при оцінці надійності СК:

- розрахунок ймовірності безвідмовної роботи систем з постійним резервуванням при рівнонадійних та нерівнонадійних елементах;

– аналіз надійності при резервуванні заміщенням із цілою кратністю та ненавантаженим резервом;

- розрахунок значень ймовірності безвідмовної роботи складових частин при виконанні технологічних операцій підготовки пуску ракети;

- розрахунок значень показників надійності складової частини в цілому та порівняння отриманих значень показників надійності з вимогами технічного завдання.

Надійність елементів, що становлять СК, характеризується ймовірнісними показниками, найважливішими з яких є час безвідмовної роботи та час відновлення.

Ці параметри мають ймовірнісний зміст та описуються відповідними законами розподілу.

СК відносяться до систем, що відновлюються, тобто характеризуються періодичними проміжками часу справної роботи і відновлення при відмовах. У силу цього показники надійності вибирають з таким розрахунком, щоб за їх допомогою можна було б оцінити надійність як окремих елементів, так і в цілому відновлюваної системи, яка складається з різнотипних елементів.

Для елементів СК, що відновлюються, виберемо наступні показники надійності:

- середній час безвідмовної роботи;
- середній час відновлення;
- інтенсивність відмов;
- ймовірність безвідмовної роботи за час; $(0, \tau)$
- ймовірність невідновлення за час$(0, \tau)$;

Безпека стартових комплексів. Небезпечними можна вважати як технологічний процес підготовки до пуску та сам пуск ракети космічного призначення, так і окремі операції, пов'язані з необхідністю роботи з компонентами ракетних палив, обладнанням, що знаходиться під тиском, електроустановками, роботами на великій висоті, роботами з важкими та великогабаритними вантажами тощо.

Як показник безпеки прийнято ймовірність того, що кожна з небезпечних ситуацій, що виникають за час t, буде ліквідована.

На основі формули повної ймовірності вираз для показника безпеки може бути представлений у вигляді

$$P_s = Iмв(\hat{A}) = \sum_{k=0}^{\infty} P(\hat{H}_k) P\left(\frac{\hat{A}}{H_k}\right), \tag{2}$$

де $\hat{H}_k$- подія, що полягає в тому, за час t в системі виникне рівноk небезпечних ситуацій;

$P(\hat{H}_k)$ - імовірність виникнення kнебезпечних ситуацій;

$\hat{A}$- подія, яка полягає в тому, що всі небезпечні ситуації, що виникають за час t, будуть ліквідовані;

$P\left(\frac{\hat{A}}{H_k}\right)$- умовна ймовірність ліквідації небезпечних ситуацій.

Для опису випадкового числа виникнення небезпечних ситуацій можна використовувати розподіл Пуассона для будь-яких цілісних значень $0,1,\dots,k$з ймовірністю ,

$$P(\hat{H}_k) = \frac{(vt)^k}{k!} exp(-vt), \tag{3}$$

де v - параметр (інтенсивність) потоку небезпечних ситуацій.

Якщо роботи з ліквідації небезпечних ситуацій є незалежними, то

$$P\left(\frac{\hat{A}}{H_k}\right) = \prod_{i=1}^{k} P_{s_i}. \tag{4}$$

Вираз для узагальненого показника безпеки у цьому випадку визначається як

$$P_s(t) = exp(-vt) \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(vt^k)}{k!} \prod_{i=1}^{k} P_{s_i}\right]. \tag{5}$$

1. А. В. Дегтярев, О. В. Пилипенко, В. С. Гудрамович, Ю. Ф. Даниев, Д,В, Клименко, В. П. Пошивалов / О классификации стартового оборудования ракетно-космических

комплексов при обосновании норм прочности, *Косм. наука і технологія*, **22**, №1. 3-13 (2016)
2. В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв, Л. В. Резниченко, І. І. Телегіна. Про забезпечення надійності об’єктів ракетно-космічної техніки на етапі проектування *Техническая механ*ика. – № 1. – С. 67 – 74 (2020).

Ensuring reliability and safety of launch complexes of carrier rockets at the design stage

V. P. Poshyvalov

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Academy of Sciences of Ukraine,
Dnipro, Ukraine

vposhivalov@gmail.com

Keywords: reliability, safety, launch complex, reliability indicators, safety indicators

The indicators of reliability and safety of the launch complex at the design stage are considered. The concept of "dangerous state" allows the use of indicators for safety assessment that are suitable for practical solutions to the tasks of substantiation and ensuring the specified safety requirements when developing launch complexes from possible threats. These indicators may include the probability of a dangerous state and its absence, the average and gamma-percentage time to a dangerous event, the intensity of dangerous events, the probability of protection from a threat of a certain type, etc.

Статистичний аналіз якості та стабільності в процесі ремонту виробів

О. О. Макарцев[1], Л. В. Кривобоков, А. В. Демченко, С. Б. Каліниченко

ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна

[1] makartsev2015@gmail.com

Ключові слова: стабільність процесу, метод найменших квадратів, поле розсіяння, середньоквадратичне відхилення, контроль якості.

В процесі проведення робіт по відновленню працездатності виробів шляхом ремонту важливим питанням є стабільність процесу, що впливає на якість, а також терміни і вартість ремонту. В доповіді це питання вирішується за допомогою методів математичної статистики, а саме – методу найменших квадратів [1, 2] і поля розсіяння [1].

Поле розсіяння – це зона, що знаходиться між крайніми значеннями параметру, який використовується в технологічному процесі для характеристики якості цього процесу. Згідно з теорією вірогідності крайні значення – це значення дисперсії (або середньоквадратичного відхилення параметру від його математичного очікування (середнього значення)).

З точки зору математичної статистики поле розсіяння – це зона, вірогідність виходу за межі якої настільки мала, що її на практиці можна не враховувати. Розрахувати таку зону можна за допомогою методу найменших квадратів. В основі цього методу лежить умова, що якщо вимірюваний параметр підкорюється нормальному закону розподілу, то між виміряними за деякий проміжок часу значеннями параметру існує лінійна залежність. Математично така залежність має вигляд [3]:

$$Y = at + b, \tag{1}$$

де Y – вимірюваний параметр;
t – проміжок часу, на якому здійснювалися виміри;
a, b – постійні величини, які характеризують вид залежності (1).

Далі в доповіді приведені математичні формули для обчислення значень «a», «b» за допомогою системи рівнянь, які використовують конкретні статистичні дані по вимірюваному параметру. Обчислена залежність (1) характеризує її середнє значення, а відхилення від цього значення вираховується за допомогою середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma \approx \left(1 + \frac{Z_\alpha}{\sqrt{2}n}\right) * S', \tag{2}$$

де

$$S' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{Y} - Y_i)^2}{n-2}};$$

$\overline{Y}$– середнє значення параметру Y; Y_i, i = 1÷n – значення параметру Y в конкретному вимірі; n – кількість вимірів; Z_α – коефіцієнт, який залежить від обраної довірчої вірогідності α.

В графічному вигляді залежності (1), (2) показані на рис. 1.

На рис. 1 поле розсіяння знаходиться в межах ±3σ. Вибір границь в таких межах пов'язаний з тим, що у випадку нормального закону розподілу параметра вірогідність його знаходження в межах ±3σ дорівнює ≈0,997, тобто практично 1. Тобто, як було позначено вище, необхідною і достатньою умовою побудови поля розсіяння становить знаходження параметрів в межах ±3σ.

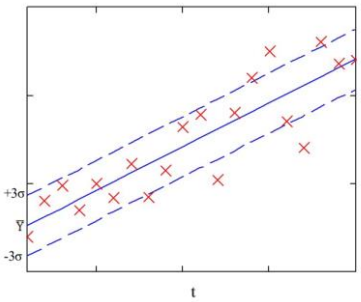


Рис. 1 – Поле розсіяння (ілюстративно)

Для якісного висновку про стабільність процесу ремонту необхідно, щоб більша частина значень вимірюваного параметра знаходилася в межах поля розсіяння. Для кількісного висновку про стабільність процесу ремонту пропонується підрахунок показника «$N_{ст}$» за формулою:

$$N_{ст} = \frac{N_1}{N_\Sigma}, \tag{3}$$

де N_1 – кількість значень «×», які знаходяться в межах поля розсіяння;

N_Σ – загальна кількість значень, які були отримані при вимірах.

В тому випадку, якщо $N_{ст} \geq 0.95$, то процес вважається стабільним з вірогідністю «α», якщо $N_{ст} < 0.95$ – процес нестабільний і необхідно додатково аналізувати наявну статистику, або використовувати додаткову інформацію.

Далі в доповіді приводиться приклад використання запропонованої методики на основі вихідних даних, отриманих в ДП «КБ «Південне» в процесі ремонту реальних виробів. Вихідні дані для параметру «Y» – величина електричного спротиву піропатрону, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Вихідні дані для параметру «Y»

t_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Y_i, Ом	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.9	1.7	1.7	1.8	1.8	1.5	1.8
t_i	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Y_i, Ом	1.8	1.6	1.7	2.5	1.6	1.7	1.6	1.7	1.6	2.1	1.7	1.8	1.8	1.6	1.6	1.6

За результатами обчислень маємо такий вид лінійної залежності (α = 0.95, Z_α = 1.96):

$$\bar{Y} = 0.00035\bar{t} + 1.729$$
$$\sigma = 0.224$$
$$3\sigma = \pm 0.672$$

Графічно залежність приведена на рис. 2, позначкою «×» позначені конкретні точки (t, Y) з табл. 1.

Аналіз графіка показує, що всі, крім однієї, точки параметру Y знаходяться в полі розсіяння, тобто $N_{ст} \approx 1$, тому результати розрахунків показують, що технологічний процес з ремонту виробів на основі розглянутих даних є суто стабільним.

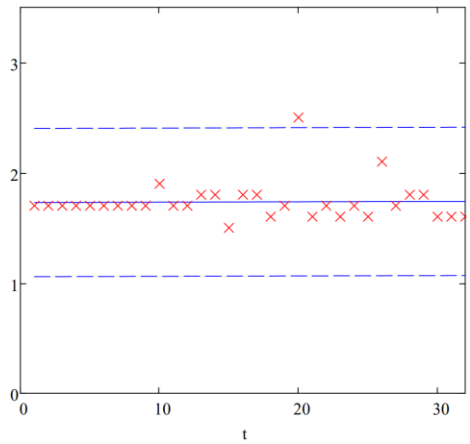


Рис. 2 – Поле розсіяння

1. М. В. Смирнов, І. В. Дунін-Барковський «Курс теорії вірогідностей і математичної статистики». вид. «Наука». 1969 р.
2. Є. С. Вентцель «Курс теорії вірогідностей». вид. «Наука», 1964 р.
3. R. Storm Wahrscheinlichkeitsprechnung. Mathematische statistik. Statistische qualitätetskontrole. Leipzig, 1967.
4. А. В. Демченко, Л. В. Кривобоков, Ю. М. Ус «Аналіз якості виробів методами статистичного конролю результатів ремонту» – збірник науково-технічних статей «Космічна техніка. Ракетне озброєння», №2 2025 р.
5. Л. В. Кривобоков, Д. В. Дунаев, А. В. Демченко «Определение адекватности условий отработки систем ракет космического назначения с использованием стохастического критерия подобия». Техническая механика, Днепр, ИТМ НАН и НКАУ Украины. №4, 2018.

Statistical analysis of quality and stability in the product repair process

O. Makartsev[1], L. Kryvobokov, A. Demchenko, S. Kalinychenko

State Enterprise "Yuzhnoye Design Office", Dnipro, Ukraine

[1] makartsev2015@gmail.com

The report considers the issue of evaluating the stability and quality of the product repair process using mathematical statistics methods, specifically by applying the dispersion zone [1]. The values of such a dispersion zone are calculated using the least squares method and the regression line [1, 2]. The dispersion zone is compared with the distribution of the controlled parameter values during the measurement process. If the majority of the parameter values are located within the dispersion zone (the ratio of the values within the zone to the total number of values should be ≥0.95), the process is considered stable and of high quality. Otherwise, additional information is required to refine the dispersion zone.The practical application of the developed algorithm is illustrated using an example with real data from the product repair process. The results can be useful and applied by quality control engineers, reliability experts, and specialists at manufacturing enterprises when implementing a control system in the manufacturing and repair of products.

Keywords: process stability, least squares method, scatter zone, standard deviation, quality control.

Застосування елементів теорії чутливості та результатів неруйнівних випробувань для підвищення достовірності числового прогнозування критичних навантажень конструкцій

А.П. Дзюба [а1,б], В.П. Пошивалов[б2] В.М. Сіренко[в]

[а] Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна
[б] Інститут технічної механіки НАНУ і ДКА України, Дніпро, Україна
[в] ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля», Дніпро, Україна,

[1]dzb@ua.fm
[2]vposhivalov@gmail.com

Ключові слова: оболонкові конструкції, критичне навантаження, числове прогнозування, достовірність розрахунку, теорія чутливості, неруйнівні випробування.

Створення несучих конструкцій нової техніки, незважаючи на використання адекватних розрахункових схем, достовірних математичних моделей, сучасних засобів скінченно-елементного аналізу, часто пов’язано з необхідністю проведення руйнуючих натурних випробувань створюваних фрагментів і (або) усієї конструкції у зв’язку з існуючими сумнівами в достовірності отримуваних розрахункових результатів, що істотно підвищує вартість розробки нових складних конструкцій машинобудування. Вирішення проблеми міцністної надійності таких конструкцій шляхом завищення коефіцієнта запасу міцності вочевидь погіршує вагові показники виробів, що також приводить до зниження їх конкурентоздатності. Вирішення цієї проблемної колізії є одним з пріоритетних завдань цієї галузі [1, 2].

Зважаючи, що єдиного достовірного критерію, який найкращим чином можна було б застосувати до визначення величини критичного навантаження складних конструкцій в усіх умовах їх експлуатації розрахунковим шляхом, не існує, логічною є необхідність розробки методології комп’ютерного моделювання кількісного впливу недостатньо точно визначених чи змінених в процесі виготовлення з різних причин вхідних параметрів на похибку результатів розрахунку міцності.

У поданій роботі досліджуються вплив відхилень вхідних даних складових елементів конструкції на достовірність прогнозування значень критичних навантажень Побудована методика ґрунтується на результатах системного інтерактивного комп’ютерного моделювання процесу накопичення похибки із залученням елементів теорії чутливості для оцінки залежності результатів розрахунку від варіювання вхідних параметрів та даних неруйнівного (в пружній області) експериментального дослідження поведінки конструкції [3, 4].

Суть підходу полягає у проведені порівняльного аналізу отримуваних числових результатів з даними неруйнівного випробування реального об'єкта з використанням засобів вимірювання деформацій та напружень. Такий підхід дозволяє виявити кількісний вплив відхилення певних вхідних розрахункових параметрів на результати числового аналізу, викликаних введенням вихідних спрощують гіпотез та припущень, вибором розрахункової схеми, математичної моделі, похибок числових засобів та ін.

Для виявлення неприпустимих відхилень результатів розрахунку і неруйнівних експериментальних даних проводиться числове моделювання шляхом ступінчатого змінювання вхідних даних для геометричних розмірів, фізико-механічних параметрів, технічних помилок людського фактору та ін., як значень вхідних параметрів на результати розрахунку міцності.

Після виявлення впливу неточності відповідних вхідних параметрів розрахунку проводиться дефектоскопія реального об'єкта для підтвердження реальних причин таких відхилень в розрахунку та внесення відповідних коректив в конструктивні параметри або числове моделювання стану конструкцій.

Далі числове моделювання продовжується за межами пружності до досягнення критичного стану і віртуального руйнування. Слід зазначити, що область нелінійного деформування, що включає великі переміщення з наступною втратою стійкості, пружно-пластичні деформації незворотної зміни форми елементів для конструкцій ракетно-космічної техніки обмежуються умовами забезпечення функціювання конструкції, тому можна вважати, що при збільшенні навантаження нелінійна складова не приведе до суттєвого накопичення помилок розрахунку.

Результати досліджень можуть бути використані для внесення коректив в проєктні і розрахункові дані та обґрунтування достовірності результатів числового аналізу без проведення або за суттєвого зменшення обсягу руйнуючих випробувань складних високовартісних конструкцій сучасного машинобудування.

1. А.В. Дегтерёв, *Ракетная техника. Проблемы и перспективы избранные научно-технич. публ.*, АРТ-ПРЕСС, Дніпро (2014).
2. Z. Song Test and Launch Control Technology for Launch Vehicles. *Beijing: Nat. Defence Industry Press*, China, / Singapore: Springer, (2018).
3. A. Dzyuba, V. Sirenko, Substantiation of Reliability of Calculation of Strength of Rocket and Space Technology Structures Without Destructive Tests. *Advances in Mechanics. Current Research Results of the NAS of Ukraine* / Ed. by A. N. Guz, H. Altenbach, V. Bogdanov, V. M. Nazarenko. Springer, Cham, Chapter **12**, 212–222, (2023) https://doi.org/10.1007/978-3-081-37313-8.
4. М.В. Марчук, В.М. Сіренко, Б.Д. Дробенко, Методологія визначення руйнівних навантажень на великогабаритні тонкостінні конструкції з урахуванням результатів неруйнівних випробувань. *Прикладні проблеми механіки і математики.*. **18,** 133–138 (2020).

Застосування елементів теорії чутливості та результатів неруйнівних випробувань для підвищення достовірності числового прогнозування критичних навантажень конструкцій

A. Dziuba[a1,b], V. Poshyvalov[b2], V. Sirenko[c]

[a]Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
[b]Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[c] Design Office Yuzhnoye, Dnipro, Ukraine.

[1]dzb@ua.fm
[2]vposhivalov@gmail.com

A methodology has been developed to study the impact of deviations of various origins of input design data on the results of forecasting critical loads of compound shell structures.. The approach is based on systematic interactive modeling of the calculation process for varying input data using elements of sensitivity theory and non-destructive testing data.. Research results can be used to substantiate the reliability results of numerical finite-element analysis..

Keywords: shell structures, critical load, numerical forecasting, reliability of calculation, sensitivity theory, non-destructive testing

Залежність шуканої точності системи з обсягом випробувань

П. Г. Хорольський

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне», Дніпро, Україна

e2.71@meta.ua

Ключові слова: точність, складна технічна система, статистична оцінка, випробування, статистична невизначеність

Точність, як правило, є однією з основних характеристик технічних систем. Вона визначає близькість шуканих характеристик до розрахункових або очікуваних значень. Має стохастичну природу і визначається числовими характеристиками, наприклад граничними, що відповідають заданій ймовірності.

Якщо заданий рівень точності складної технічної системи має ще не досягнуте технікою значення, то його забезпечення вимагає нетривіальних зусиль.

Результати розробки будь-яких систем повинні бути підтверджені випробуваннями.

Якщо вартість таких випробувань дуже велика, то їх обсяг намагаються скорочувати, впритул до одиничних (одного – двох). І тут, як наслідок, для Розробника системи виникає проблема, пов’язана з необхідністю забезпечувати точність вищу за задану із відповідним збільшенням зусиль.

Метою доповіді є виявлення причини необхідності завищення точності системи, що розробляється, та пошук можливих шляхів її вирішення.

Зазначена причина пов’язана з наступним.

Статистична оцінка завжди має внесок, складову, за рахунок статичної невизначеності, яка збільшується із зменшенням обсягу випробувань. Тобто отримана по експериментальним даним статистична оцінка має дві складові – реальну та невідоме значення оцінки статистичної невизначеності. І вона порівнюється саме із заданим значенням. Звідси Розробником повинна бути забезпечена точність, що дорівнює різниці заданого рівня характеристики і оцінки статистичної невизначеності.

Є два шляхи вирішення проблеми – збільшення обсягу випробувань до прийнятного рівня статистичної невизначеності або визначальне проектування системи для підвищеного рівня точності, що відповідає заданому Замовником обсягу випробувань. Вибір шляху визначається співвідношенням витрат на додаткові випробування і на розробку системи для нового, вищого рівня точності. І тут важливий розподіл витрат між Замовником і Виконавцем системи і хто з них приймає остаточне рішення.

Dependence of the searched accuracy of the system on the volume of tests

P. G. Khorolskiy

State Design Office Youzhnoye

e2.71@meta.ua

Accuracy, as a rule, is one of the main characteristics of technical systems. Its provision requires non-trivial efforts. The results of the development of any systems must be confirmed by tests. Given their high cost, this volume is tried to be reduced, close to a single one. And here, as a result, a problem arises for the System Developer, related to the need to ensure accuracy higher than the specified one with a corresponding increase in efforts.
The purpose of the report is to identify the reason for the need to overestimate the accuracy of the system being developed and to find possible ways to solve it.
The specified reason is associated with the presence of statistical uncertainty in the assessment, by the value of which the specified value must be reduced in order to achieve it during development.

Keywords: accuracy, complex technical system, statistical evaluation, testing, statistical uncertainty.

Методи, моделі та методики розрахунків та експериментальних досліджень акустичних випромінювань при стартах РКП

Г. І. Сокол

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

gsokol@ukr.net

Ключові слова: старт, ракети космічного призначення, джерела, акустичні поля, методи, методики, моделі, гасіння коливань.

В сей час актуальною стала тема впливу на корпуса ракет та навколишнє середовище акустичних коливань, що випромінюються при старті ракет космічного призначення (РКП). Відомі роботи [1], у яких розглянуті аспекти максимальних акустичних завантажень на ракету при старті. Застосовано аналітичні, експериментальні методи досліджень, а також проведено моделювання поширення акустичних коливань чисельними методами. Усі вони розглядають окремі конкретні завдання. В атмосфері виникають різні за характером випромінювання акустичні поля. Тому необхідно виявити особливості цих випромінювань, насамперед за частотним діапазоном. Це визначило напрямки досліджень з акустичного випромінювання при стартах РКП на основі уявлень, що існують про генерування та поширення звукових хвиль. Слід провести аналіз взаємозв'язку видів джерел акустичного випромінювання з характеристиками акустичних полів. Далі на основі результатів фізичного та математичного аналізу джерел акустичних коливань на стадії ескізного проектування можлива розробка активних та пасивних методів гасіння акустичних впливів. Тут важливі експериментальні перевірки, розробка програм та методик щодо вимірювань характеристик акустичних коливань.

Метою наукової роботи є розробки сучасних методів, моделей та методик дослідження акустичних джерел випромінювання та їх полів при старті ракет для космічного призначення (РКП).

Основними завданнями стали: огляд наукових праць щодо визначення типу джерел акустичних випромінювань при старті РКП; відомих опублікованих робіт, де описані фізичні і математичні моделі акустичних полів залежно від типу акустичних джерел випромінювання; огляд методик розрахунку та експериментальних досліджень. Методологія досліджень акустичного випромінювання при старті РКП містить виявлення первинних джерел акустичних коливань (тобто, коливань від працюючої рушійної установки, вібрацій оболонки корпусу, турбулентних вихорів в потоці, що обтікають корпус, ударних хвиль), і вторинних джерел акустичних коливань (що виникають внаслідок відбиття коливань, які генеруються первинними джерелами при зіткненні з перешкодами, наприклад, типу споруд стартового столу). Важливо також розглянути взаємодію між собою акустичних коливань від джерел різного виду. Проведений огляд наукових робіт з аналізу характеристик джерел акустичного випромінювання, що з'являються в різні моменти під час стартів РКП [1-5]. Для складання методик розрахунків використані аналітичні методи з акустики коливань з малими амплітудами, засновані на уявлень, що існують. Наведено аналіз взаємозв'язку характеристик джерел акустичного випромінювання з характеристиками

акустичних полів для випадку, коли струмінь рушійної установки РКП уявляється джерелом плоских хвиль, об\ємним випромінювачем, пульсуючим циліндром. Аналіз шуму від ракетного двигуна дозволив зробити висновок, що рівень шуму залежить від пари компонентів палива, їх витрати, коефіцієнтів співвідношення компонентів, якості робочого процесу в камері згоряння та її конструктивних даних, швидкості витікання продуктів згоряння. Амплітуда складових спектру сильно залежить від пари компонентів палива, на яких працює двигунна установка.

1. Батутина Т. Я., Бондарь Д. С., Гринченко В. Т., Олийник В. Н. Полуэмпирическая оценка внешних акустических нагружений в зоне полезной нагрузки при старте / Космическая техника. Ракетное вооружение. SpaceTechnology. MisslеArmaments. Научно-технический сборник. – Выпуск 1 (117). – Днепр: ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», 2019. – С. 73-76.
2. Сиренко В. Н., Сокол Г. И., Савчук В. Н., Котлов В. Ю., Савчук Т. Л. Моделирование акустического излучения струи ракеты «Циклон-4М» объемным источником / Космическая техника . Ракетное вооружение. Space Technology. Missle Armaments. Научно-технический сборник. – Выпуск 1 (117). – Днепр: ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», 2019. – С. 65-72.
3. Сокол Г. И. Метод определения вида источников акустического излучения в первые секунды старта ракет космического назначения / Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. -2018. – т. XVIII. — С. 10-22.
4. Фролов В. П., Сокол Г. И., Котлов В. Ю. Волновой параметр как критерий в основе метода исследования акустических источников при старте ракет / Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – 2018. – 3(147), май-июнь 2018. – Харьков: «ХАИ», 2018. – С. 3-12.
5. Galyna I. Sokol, Viktor P. Frolov, Vladyslav Yu. Kotlov, Angelica V. Davydova, Christina V. Geti. Research of acoustic emitting sources and calculation of their characteristics during the launch of the space rocket. / EGU2018-1760 – Vienna: EGU General Assembly 2018.

G. Sokol

Oles Honchar Dnipro National University Dnipro, Ukraine

gsokol@ukr.net

A review of scientific work has been carried out to analyze the characteristics of sources of acoustic emissions, which appear at various times around the hour of rocket launches. To create calculation methods used analytical methods for acoustics of vibrations with small amplitudes are based on ideas that are known.

Keywords: launch, space rockets, sources, acoustic fields, methods, techniques, models, vibration damping.

Математична модель системи реактивних двигунів малої тяги для розгінних блоків та космічних апаратів

Ю. В. Книшенко

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна

knyshenko@ukr.net

Ключові слова: розгалужена паливна магістраль, метод характеристик, реакційна камера двигуна, термогазодинаміний процес, електрокерований паливний клапан, імпульсний режим роботи

Двокомпонентна система рідинних реактивних двигунів малої тяги являє собою дві розгалужені трубопровідні магістралі (для пального і окислювача), якими компоненти палива з паливних баків під тиском газу подаються до електрокерованих клапанів на входах до двигунів малої тяги, призначених для керування рухом космічного апарата за тангажом, креном та рисканням. Після надходження командного сигналу від системи керування космічного апарата у вигляді електричної напруги на обмотки електромагнітів відбувається запуск відповідних двигунів. В результаті цього до реакційних камер двигунів надходять самозапальні компоненти палива (наприклад, несиметричний діметильгідразин та азотний тетраоксид) і відбувається реакція горіння з утворенням високотемпературних газів, які витікають через надзвукове сопло, створюючи тягове зусилля, що діє на КА. Після відпрацювання командного сигналу клапани на відповідних двигунах припиняють подачу палива до їх реакційних камер. Тобто двигуни працюють у імпульсних режимах з широкими змінами у часі роботи двигунів та пауз між вмиканнями.

Для однокомпонентної системи двигунів використовується одна паливна магістраль з одним електрокерованим клапаном на кожному з двигунів. Паливо (наприклад, гідразин, перекис водню), що надходить до реакційної камери взаємодіє з каталізатором з утворенням високотемпературних продуктів розкладання, які забезпечують необхідну тягу. В разі використання нових типів «зелених» палив, які являють собою розчини у воді суміші іонної речовини та пального після розкладання та випаровування на каталізаторах вступають у реакцію горіння з утворенням високотемпературних токсично безпечних газів для забезпечення необхідної тяги.

Для математичної реалізації роботи системи рідинних реактивних двигунів малої тяги розроблено комплексну математичну модель [1 - 4], що описує:

- неусталені гідравлічні процеси в розгалужених магістралях живлення від паливних баків до кожного з двигунів з урахуванням хвильових гідроударних процесів та лінійних і місцевих гідравлічних опорів;

- електромагнітні та гідравлічні процеси в паливних клапанах, що розміщуються на входах до реакційних камер двигунів і забезпечують запуски та зупинки відповідних двигунів за електричними сигналами від системи керування рухом космічного апарата у льотних умовах;

- неусталені газодинамічні процеси у реакційних камерах двигунів малої тяги і соплових пристроях з урахуванням хімічного складу палива та термохімічних перетворень;

- реалізацію заданих циклограм роботи кожного з двигунів при наземному відпрацюванні.

Для математичного опису руху рідинного палива в трубопровідній системі застосовано числовий метод характеристик. Для його реалізації проводиться дискретизація магістралей з виділенням відтинків трубопроводів, що мають сталий переріз, товщину стінки та матеріал

Для цих ділянок трубопроводів справедлива наступна система рівнянь для кожного з компонентів палива (КП)

$$\begin{cases} \frac{\partial\, p_i^j}{\partial\, t} + (a_i^j)^2\, \frac{\partial Q_i^j}{\partial\, x_i^j} = 0; \\ \frac{\partial\, Q_i^j}{\partial\, t} + \frac{\partial\, p_i^j}{\partial x_i^j} = \phi_i^j; \\ i = 1,\ 2, \dots N^j; \\ j = o \wedge\ n, \end{cases} \tag{1}$$

де верхній індекс $j = o$ відповідає системі окислювача, $j = n$– системі пального; x_i^j – координати за довжиною конструктивних ділянок; i – номери конструктивних ділянок; $Q_i^j = \rho^j U_i^j$ - масові швидкості; ρ^j, U_i^j – густина та швидкість руху; a^j - швидкості звуку, що візначаються за формулою Жуковського; $\phi_i^j = -\lambda_i^j Q^j{}_i^j \left|Q^j{}_i^j\right| (2D_i^j\ \rho\ ^j)^{-1}$; D_i^j – перерізи трубопроводу на конструктивних ділянках; λ_i^j - коефіцієнти гідравлічного опору у квазістаціонарній постановці, що залежать від чисел Рейнольдса КП та шорсткості стінок трубопроводів.

Розв'язання рівнянь (1) виконується за таких початкових та граничних умов. Вважається, що на момент часу $t = 0$ течія КП в трубопроводах відсутня - $p_i^j(x_i^j, 0) = p_{\text{вх}}^j$, $Q_i^j(x_i^j, 0) = 0$, $(i = 1,\ 2, \dots N^j,\ \ j = \text{о} \wedge\ \text{п})$. Крайові умови визначаються за співвідношеннями, що зв'язують значення тисків та витрат на стиках i -ої та $(i+1)$-ої конструктивних ділянок трубопроводів та входах до працюючих двигунів

$$p_{i+1}(t) = p_i(t) \pm \varsigma_{i,i+1} \frac{Q_{i+1}^2(t)}{2\rho_{i+1}}.$$

Дискретизовані ділянки трубопроводів та схеми їх з'єднань вписуються у матриці, які скануються в процесі розрахунків на кожному часовому кроці з урахуванням станів паливних клапанів для кожного з двигунів. Якщо якісь з двигунів у даний момент часу вимкнені, вхід до них моделюється великим коефіцієнтом місцевого опору. В разі початку роботи двигуна використовується коефіцієнт місцевого опору, отриманий для стаціонарних умов його роботи. Тиск у реакційних камерах кожного з двокомпонентних двигунів визначається з рівняння

$$\frac{dp_{\text{кз}}}{d\tau} + \varepsilon\Psi p_{\text{кз}} = \eta \frac{R_{\text{пз}} T_{\text{пз}}}{V_{\text{кз}}} [G_o(\tau - \tau_{кз}) + G_n(\tau - \tau_{кз})], \tag{2}$$

де $\Psi = A_n F_{\text{кр}} / V_{\text{кз}} \sqrt{R_{\text{пз}} T_{пз}}$; - $F_{\text{кр}}$- площа критичного перерізу сопла; $R_{\text{пз}}, T_{\text{пз}}$ -газова стала та температура продуктів згоряння, $A_n = \sqrt{\gamma (2/\gamma + 1)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ - показник адіабати; $\tau_{\text{кз}}$ - час затримки запалення КП у реакційній камері; $G_{\text{о}}, G_{\text{п}}$ - витрати окислювача і пального; ε, η – поправні експериментальні множники.

Розв'язання рівняння (2) проводиться числовим методом на часовому інтервалі метода характеристик системи (1). Працездатність пального (одно- або двокомпонентного) у залежності від хімічного складу у рівноважному наближенні

визначається з використанням відомих програмних комплексів NASA CEA, ACTPA [5]. Математична модель роботи електрокерованих паливних клапанів враховує затримки відкриття та зупинок у роботі двигунів, що є характерним для таких клапанів і обумовлено механічною та індуктивною інерційністю.

Дана модель реалізована у вигляді програмного забезпечення. З її використанням проводилось моделювання роботи двигунів малої тяги для космічного ступеня РКП «Циклон-4М», системи різномасштабних двигунів малої тяги на «зеленому» паливі марки LMP- 103S Шведської компанії ECAPS [1 - 2, 5].

1. В. И.Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, В. М. Дураченко., В. М. Анищенко Вопросы отработки управляющей жидкостной реактивной системы с питанием из магистралей маршевого двигателя последней ступени ракеты-носителя. *Космічна наука і технологія.* 2016. Т. 22, № 1. С. 20–35.
2. В. И. Тимошенко., Ю. В. Кнышенко Влияние газонасыщенности жидкости на особенности неустановившихся течений в сложных трубопроводах. *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91, № 6.– С.1506–1516.
3. В Книшенко., В. М. Дураченко. Математична модель роботи системи різномасштабних двокомпонентних реактивних двигунів малої тяги. *Технічна механіка*. 2022. № 3, С. 42–67. https//doi.org/10.15407/itm2022.03.047
4. Ю. В. Книшенко Динаміка електрокерованих паливних клапанів реактивних двигунів малої тяги на «зеленому» паливі. *Технічна механіка.* 2024. № 3. С. 50–68. https//doi.org/10.15407/itm2024 03.050
5. ПК АСТРА 4 / рс, версия 1:07 С. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах: описание применения. М.: МГТУ им. Баумана. 1991. 38 с.
6. В. І. Тимошенко, Ю. В. Книшенко, В. М. Дураченко Математична модель реактивних двигунів малої тяги на «зеленому» паливі та її верифікація. *Технічна механіка*. – 2025. – № 2. С. 17 – 34. https//doi.org/10.15407/itm2025.02.017

Mathematical model of a system of low-thrust jet engines for boosters and spacecraft

Yu. V. Knyshenko

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine
knyshenko@ukr.net

A description of the operation of two- and one-component systems of low-thrust jet engines as executive bodies of the spacecraft control system is presented. The components of such systems are branched fuel pipelines, electrically controlled valves and engines with reaction chambers and nozzle devices. The main components of the mathematical model are presented, describing the unsteady movement of fuel components along fuel pipelines, the operation of fuel valves and gas-dynamic processes in the reaction chambers and nozzles of engines. Examples of the use of the mathematical model in the development of one- and two-component systems are given

Keywords: branched fuel line, characteristic method, engine reaction chamber, thermogas-dynamic process, electrically controlled fuel valve, pulse operation mode

Статистичне визначення силового навантаження від газових струменів рушійних установок малої тяги на обтічні поверхні космічних апаратів

Л. Л. Печериця

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України

larisa.peche@gmail.com

Ключові слова: газові струмені, статистичне моделювання, силовий вплив, обтічні перешкоди, космічні апарати.

Ефективний контроль можливих забруднень приладів і систем космічного апарата (КА) є необхідним для успіху більшості космічних місій, оскільки їх наявність навіть у мінімальних дозах може значно погіршити характеристики бортового оснащення КА. Компоненти витоку струменів рушійних установок (РУ) є одним з джерел, що дають найбільший внесок у забруднення елементів орбітальних КА. Визначення потоків маси газу і силового навантаження від струминних потоків на етапі проектування КА дозволяє істотно знизити ризики часткової або повної втрати функціональності бортових приладів і, таким чином, подовжити терміни їх роботи [1].

Серед методів, придатних для аеродинамічного розрахунку процесів у розріджених течіях (в тому числі у перехідному режимі) найбільш відомим є статистичний метод прямого моделювання Монте-Карло (ПММК). Менш відомим є статистичний метод пробних частинок (МПЧ), суть якого полягає у стеженні за траєкторіями реальних молекул ("пробних частинок"), що рухаються по коміркам розрахункової області (РО) з заданими газодинамічними характеристиками і взаємодіють з обтічною поверхнею. На початковому етапі свого розвитку МПЧ використовувався для розрахунків газових потоків з незмінним напрямком вектора масової швидкості молекул, що набігають на перешкоду у вільномолекулярному, а потім – і у перехідному режимах течії, де зіткнення між молекулами газу моделювалося як взаємодія між пробною частинкою (молекулою) і частинками-мішенями газового фону [2].

Наступний принциповий етап розвитку МПЧ – це його застосування для розрахунку струминних течій. В газових струменях, на відміну від однорідного газового потоку, структура є досить складною і режими течії в них можуть варіюватися в широкому діапазоні. На базі алгоритму для однорідного потоку було запропоновано і розроблено алгоритм МПЧ для аеродинамічних розрахунків розріджених струминних течій [3]. Результати проведеної верифікації та розрахункові дані з визначення впливу розріджених струменів від ракетних РУ керування (з вільномолекулярним та перехідним режимами течії) на елементи конкретного космічного апарату і його власну зовнішню атмосферу наведено у [4] та [5].

Присутність в струминних факелах широкого спектру режимів течії, в тому числі можлива наявність зони континуальної течії, потребує подальшого вдосконалення МПЧ. Мета роботи – розвиток МПЧ для чисельного моделювання обтікання перешкод надзвуковими та звуковими газовими струменями, що мають щільне ядро поблизу сопла. Для розрахунку струменів, що витікають у вакуум і мають широкий діапазон

режимів течії (від континуального поблизу сопла до вільномолекулярного у дальньому полі течії), пропонується використання підходу [6], що є комбінацією методів континуальної аеродинаміки та статистичних розрахунків розрідженої газової динаміки. Першим етапом є прогнозування характеристик у щільній області на виході і зовні сопла (аж до меж щільного ядра), для чого застосовується алгоритми розв'язання рівнянь Ейлера та Навье-Стокса. Другим етапом є застосування МПЧ у зонах перехідної та розрідженої течії: траєкторії молекул розігруються випадковим чином з початкової поверхні, що є межею виходу зі щільного ядра струменю, а газодинамічні параметри у комірках старту молекул відповідають рішенням рівнянь континуальної газової динаміки всередині початкової поверхні.

Тестування алгоритму МПЧ у складі комбінованого підходу було проведене на задачах обтікання сильно недорозширеним газовим струменем перешкод простої форми (вісесиметричне надзвукове обтікання конуса та звукове натікання струменю на пластину). Отримано значення розподілених параметрів силового впливу на їх поверхні, а також дані про газодинамічну структуру течії навколо. Надійність результатів була підтверджена співставленням з розрахунковими даними ПММК [7], [8], та наявними експериментальними вимірюваннями [9], [10]. Проведене порівняння показало задовільну відповідність і дозволило зробити такі висновки:

– метод пробних частинок є методом розрідженої газової динаміки і тому найкращі результати за його допомогою можна здобути при витоку розрідженого струминного потоку;

– застосування МПЧ можна розширити на випадок перехідного режиму витоку струменю ($0{,}01 \leq Kn_a \leq 1$).

В разі використання МПЧ у складі комбінованого підходу, коли координати старту молекул розігруються зі зрізу сопла, а модуль масової швидкості і концентрація витоку відповідають рішенням рівнянь Нав'є-Стокса, отримані результати краще збігаються з наявними даними у всьому полі течії;

– при зменшенні числа Кнудсена за наявності зони континуальної течії поблизу сопла, спостерігається поява занижених розрахункових значень нормального тиску на пластину у дальньому полі струменя при тому, що розподіл тангенціального напруження повністю відповідає очікуваному. Застосування комбінованого підходу з МПЧ значно наближує розрахункові значення до даних ПММК.

Отже у вільномолекулярному ($Kn_a \geq 1$) та перехідному режимах ($0{,}01 \leq Kn_a \leq 1$) МПЧ дає задовільні результати як у складі комбінованого підходу, так і без нього. У випадку наявності на початковій ділянці струменя щільного ядра ($Kn_a << 0{,}01$), при розрахунках за межами континуальної зони метод стеження за траєкторіями пробних частинок слід застосовувати у складі комбінованого підходу.

Для демонстрації практичного значення комбінованого підходу за його допомогою проведено розрахунки розподілених навантажень від струменів керуючих двигунів РУ по відкидним панелям сонячних батарей типового КА складної геометричної форми.

Висновки. Застосування МПЧ дає широкі можливості у визначенні впливу струминних потоків на формування газодинамічних обставин навколо КА та розрахунку сумарних та розподілених аеродинамічних навантажень на їх поверхні. Протестовані алгоритми МПЧ у складі комбінованого підходу придатні для вирішення багатьох фундаментальних і прикладних задач струминної газової динаміки у

широкому діапазоні параметрів витоку Розроблені алгоритми реалізовані у вигляді власного програмного забезпечення, що спрощує їх практичне застосування.

1. Басс В.П. Газодинамические аспекты формирования собственной внешней атмосферы космических аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы. *Наблюдения искусственных спутников Земли. Публикация научных результатов сотрудничества*. *Интеркосмос*, **24**, 158–179 (1986).
2. Печерица Л.Л., Палий А.С. Применение метода пробных частиц к аэродинамическому расчету КА. *Техническая механика*, № 3, 53–63 (2017).
3. Печериця Л.Л., Сміла Т.Г. Застосування статистичного методу пробних частинок для моделювання розріджених струминних течій у вакуумі. *Космічна наука і технологія*, **29**, № 4 (143), 12 – 23 (2023).
4. Печериця Л.Л. Верифікація алгоритму методу пробних частинок на задачі вісьового обтікання конуса розрідженим газовим струменем. *Технічна механіка*, № 3, 86–96 (2024).
5. Печериця Л.Л. Статистичний розрахунок силового впливу продуктів згоряння двигунів малої тяги на поверхню космічного апарата. *Технічна механіка*, № 4, 41–51 (2024).
6. Lee K.H, Lee S.N., Yu M.J., Kim S.K., Baek S.W. Combined Analysis of Thruster Plume Behavior in Rarefied Region by Preconditioned Navier-Stokes and DSMC Methods. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, **52(**177),135–143 (2009).
7. Kannenberg K.C. Computational Methods for the Direct Simulation Monte Carlo Technique with Application to Plume. PhD Dissertation. Cornell University, 154 p. (1998).
8. Kannenberg K.C., Boyd I. D. Three-Dimensional Monte Carlo Simulation of Plume Impingement. *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, **13**, No. 2, 226 – 235 (1999).
9. Boyd I.D., Penko P.F., DeWitt K.J., Howell T.G. Preliminary Experimental and Numerical Studies of Plume Impingement on a 100 Degree. *AIAA Paper 94-3142, 30th AIAMASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Indianapolis, June 27-29,* 1–10 (1994).
10. Legge H. Plum Impingement Forces on Inclined Flat Plates. *Rarefied Gas Dynamics. VCH Press*, 955–962 (1991).

Statistical determination of the force load from gas jets of low-thrust propulsion systems on the streamlined surfaces of spacecraft

L. L. Pecheritsa

L. L. Pecheritsa Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

larisa.peche@gmail.com

The use of continuum aerodynamic equations significantly expands the capabilities of statistical methods of gas dynamics. To solve the problems of leakage of supersonic jets of arbitrary rarefaction, the use of the statistical test particle method (TPSM) as part of a combined approach is proposed. This approach combines the methods of solving the equations of continuum aerodynamics (inside and near the nozzle, where the continuum flow is realized) and TPSM (in areas where the motion of the medium is described at the molecular-kinetic level). The effectiveness of the TPSM algorithm as part of the combined approach was confirmed by testing and verifying the obtained results with direct Monte Carlo simulation data, analytical and available experimental measurements.

Keywords: gas jets, statistical simulation, force load, flow obstacles, spacecrafts

Релейне керування відносним рухом космічних апаратів з використанням навчання з підкріпленням

В. В. Сорочинський, С. В. Хорошилов

Інститут технічної механіки Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

vovas99@ukr.net

Ключові слова: релейне керування, навчання з підкріпленням, ковзний режим, робастність, збурювач

Вступ

Задачі орбітального сервісу потребують високоточного керування відносним рухом космічних апаратів поблизу цільового об'єкта [1]. У таких сценаріях навіть незначні похибки керування можуть призводити до зростання відхилень траєкторії, погіршення точності зближення або підвищення ризику небажаних динамічних ефектів під час виконання маневру. Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є поєднання навчання з підкріпленням (НЗП) з аналітичними методами, що дають змогу враховувати вимоги до стійкості та якості керування. Зокрема, використання НЗП дає можливість впливати не лише на точність стабілізації та зближення, а й на інші важливі практичні показники. Наприклад, витрати палива, кількість ввімкнень і вимкнень двигунів [2]. Це важливо, оскільки такі характеристики безпосередньо пов'язані з енергоефективністю системи, ресурсом виконавчих органів і загальною придатністю алгоритму до практичного застосування. Поряд із цим, окремий інтерес становлять підходи, у яких під час навчання цілеспрямовано вводяться збурення для ускладнення умов функціонування об'єкта керування. Це дає змогу формувати політики керування, які є менш чутливими до невизначеностей, варіацій параметрів та небажаних зовнішніх впливів, тобто більш робастними порівняно з моделями, навченими лише в номінальних умовах.

1. НЗП-керування з умовою стійкості

У доповіді розглянуто лінеаризовану та нормовану дискретну модель відносного руху космічних апаратів. Для руху в площині орбіти та поза нею використовуються два незалежні НЗП-агенти. Структура керування задається у формі ковзного режиму, а у функцію вартості введено додатковий член, який штрафує порушення умови спадання дискретної функції Ляпунова [3]. Завдяки цьому агент навчається не довільній політиці, а політиці, узгодженій з аналітично заданою структурою релейного керування. Перевагою підходу є пряме формування рішень про ввімкнення двигунів. Отримані числові результати показують досягнення прийнятної точності, монотонне спадання функцій Ляпунова та збереження працездатності при варіації маси апарата.

2. Навчання з модулем збурень

У цьому підході під час навчання вводиться модуль збурень, який формує збурення та навмисно ускладнює умови функціонування системи. Основна ідея полягає в тому, щоб навчати агент не лише в номінальному режимі, а й у середовищі, де присутні додаткові небажані впливи, невизначеності та відхилення від ідеалізованих умов. За рахунок цього агент у процесі навчання змушений знаходити

більш робастні стратегії керування, які зберігають працездатність не тільки в базовому сценарії, а й за наявності зовнішніх або внутрішніх збурень. Такий підхід орієнтований на формування політики керування, менш чутливої до варіацій параметрів системи, похибок моделі та непередбачуваних впливів, що в підсумку має забезпечити вищу робастність отриманого рішення.

Висновки

Отже, запропоновано два перспективні підходи до побудови керування відносним рухом космічних апаратів в умовах роботи реактивних двигунів у режимі ввімкнено / вимкнено. Перший підхід ґрунтується на поєднанні НЗП з аналітичними методами забезпечення стійкості. Другий підхід пов'язаний із введенням модуля збурень під час навчання, що дає змогу формувати більш робастні політики керування в умовах невизначеностей і збурень. Отже, використання НЗП у поєднанні з урахуванням фізичних особливостей системи та ускладненням умов навчання відкриває перспективи для побудови ефективних і робастних алгоритмів керування, орієнтованих на задачі орбітального сервісу.

1. V. Relative motion control system of spacecraft for contactless space debris removal. Science and Innovation, 14(4), 5–16 (2018)
2. Steinberger M., Horn, M., Fridman, L. Variable-structure systems and sliding-mode control: From theory to practice. Springer (2020).
3. Sorochinskii V. V., Khoroshylov, S. I., Levchuk, I. L., Dubovyk, T. M., Huz, H. M., Romanchuk, O. O. On-off spacecraft relative control in sliding mode via reinforcement learning. Technical Mechanics, 2025(4), 77–92 (2025).

On-off control of spacecraft relative motion using reinforcement learning

V. V. Sorochinskii, S. V. Khoroshylov

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

vovas99@ukr.net

Two research directions for the problem of relay control of spacecraft relative motion are considered, focused on conditions in which the actuators have only two states-on or off. The first direction is based on combining a reinforcement learning algorithm with an analytically specified sliding-mode structure and using a penalty for violating the decrease condition of a discrete Lyapunov function. The second direction is related to the introduction of a disturbance module that generates disturbances during training in order to complicate the operating conditions of the control object and improve its robustness. In this case, the emphasis is placed on forming a robust control policy capable of maintaining operability and acceptable control quality in the presence of uncertainties and undesirable external influences. Both directions are aimed at orbital servicing tasks that require precise, stable, and practically implementable control of spacecraft relative motion.

Keywords: relay control, reinforcement learning, sliding mode, robustness, disturbance generator.

Чисельне моделювання турбулентного обтікання роторів дар'є та савоніуса вертикально-осьових вітроенергетичних установок

Д.О. Редчиць[a1], С.В. Моісеєнко[б], У.М. Тучина[a], О.В. Акіменко[a]

[a]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

[1]dmytro.redchyts@gmail.com

Ключові слова: числові методи, вітроенергетична установка, ротор Дар'є, ротор Савоніуса, рівняння Нав'є-Стокса, модель турбулентності.

Залежно від орієнтації осі обертання стосовно напрямку потоку вітру вітроенергетичні установки (ВЕУ) можна розділити на два основних класи: горизонтально-осьові (ГО) і вертикально-осьові (ВО). Горизонтально-осьовою називається установка, вісь обертання якої збігається з напрямком потоку вітру. У вертикально-осьових ВЕУ вісь перпендикулярна потоку. Найбільш широко розповсюдженими представниками даного класу є ротори Дар'є та Савоніуса.

Ефективність роботи будь-якої ВЕУ визначається коефіцієнтом використання енергії вітру (коефіцієнтом потужності). Результати експериментальних досліджень свідчать, що високими значеннями коефіцієнта потужності володіють швидкохідні ГО ВЕУ пропелерного типу, а також ротори Дар'є з фіксованим і змінюваним кутом установки лопаті. І при належному аеродинамічному проектуванні вертикально-осьові ВЕУ фактично не уступають широко розповсюдженим ГО ВЕУ пропелерного типу.

Підвищення потужності вітроенергетичних установок (ВЕУ) та збільшення коефіцієнта використання енергії вітру робить задачу вибору раціональної аеродинамічної форми ротора дуже актуальною [1]. Провідну роль роботі ВЕУ грають нестаціонарні аеродинамічні процеси, тому основним напрямом досліджень має бути розробка нових універсальних методів розрахунку нестаціонарних процесів при обтіканні потоком роторів вітроагрегатів.

Відомі методики визначення аеродинамічних та енергетичних характеристик ротора ВЕУ засновані на експериментальних даних, імпульсній та вихровій теоріях, чисельному вирішенні рівняння потенціалу. Вони використовують певні припущення при постановці завдання (квазістаціонарність потоку, відсутність обліку в'язко-нев'язкої взаємодії тощо). Головними труднощами розрахунку нестаціонарних процесів при обтіканні роторів ВО ВЕУ є ефекти динамічного зриву потоку. Досі жодна з відомих спрощених моделей не давала можливості адекватно розрахувати аеродинамічні характеристики роторів у разі динамічного зриву потоку.

Рівняння Нав'є-Стокса є найбільш повною математичною моделлю механіки рідини та газу. Тому їх застосування спільно з моделлю турбулентності, рівнянням динаміки ротора дозволяє досліджувати особливості нестаціонарного обтікання, структуру поля швидкостей, динамічний зрив потоку, процеси формування та розпаду вихорів навколо самого ротора та слідом за вітроагрегатом.

У роботі розглянуто методику розрахунку чисельного моделювання нестаціонарного обтікання роторів вертикально-осьових вітроенергетичних

установок, що базується на спільному рішенні рівняння обертання ротора та динаміки рідини, що не стискається.

Для розрахунку аеродинамічних характеристик використано алгоритм на базі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) нестисливої рідини, записаних відносно довільної криволінійної системи координат на рухомих сітках. Узгодження полів тиску і швидкості здійснюється за допомогою методу штучної стисливості, модифікованого для розрахунку нестаціонарних задач. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса використовуються однопараметрична модель турбулентності Спаларта-Алмараса, а також її модифікації: з урахуванням обертання твердої поверхні та кривизни ліній струму (SARC); лінійна модель, адаптована до тензора швидкостей деформацій (SALSA). Розв'язання системи вихідних рівнянь отримано за допомогою неявного скінчено-об'ємного чисельного алгоритму, що базується на методі штучної стисливості та багатоблочних різномасштабних структурованих сітках [2, 3].

Наведено результати чисельного моделювання нестаціонарного обтікання ротора Дар'є. Проаналізовано контури завихреності, розподіл коефіцієнта тиску по поверхні лопаті, значення коефіцієнтів лобового опору, підйомної сили, моменту обертання, нормальної та тангенційної сил. Отримані результати задовільно узгоджуються з експериментальними даними. В'язкі та динамічні ефекти відіграють істотну роль у роботі ротора Дар'є. Встановлено, що збільшення коефіцієнта швидкохідності призводить до придушення процесу формування динамічного зриву потоку з лопатей ротора Дар'є. Показано, що основний момент, що крутить, створюється на навітряній ділянці траєкторії лопаті. Виконано аналіз поля течії навколо дво- та трилопатевого ротора Дар'є. Виділено основні стадії формування вихрової структури. Проаналізовано особливості аеродинаміки обтікання (відрив примежового шару, взаємодія лопатей, перебіг у сліді та поблизу гондоли вітроагрегату) при обертанні ротору. Розглянуто вплив чисел Рейнольдса, коефіцієнтів швидкохідності та заповнення на енергетичні характеристики ротора Дар'є. Зростання числа Рейнольдса призводить до збільшення значень коефіцієнта потужності. При зменшенні коефіцієнта заповнення ротора Дар'є значення коефіцієнта потужності стають менш чутливими до зміни коефіцієнта швидкохідності [4,5].

Проведено три типи обчислювальних експериментів з вивчення аеродинамічних та енергетичних характеристик дво- та трилопатевого ротора Савоніуса. Для більшості кутових положень нерухомого дволопатевого ротора Савоніуса середній за часом коефіцієнт статичного моменту, що крутить, позитивний. У разі трилопатевого ротора Савоніуса коефіцієнт крутного моменту завжди позитивний при будь-якому кутовому положенні ротора [5]. Збільшення числа Рейнольдса призводить до невеликого поліпшення аеродинамічних властивостей ротора. Виділено основні стадії формування вихрової структури при обертанні ротора Савоніуса. У дослідженому діапазоні визначальних параметрів у дволопатевого ротора Савоніуса значення енергетичних характеристик вище, ніж у трилопатевого. Отримані результати задовільно узгоджуються із відомими експериментальними даними. Вирішено зв’язану задачу динаміки та аеродинаміки трилопатевого ротора Савоніуса. Проаналізовано картину течії навколо ротора, наведено залежності коефіцієнтів лобового опору, підйомної сили та моменту обертання, а також кутову швидкість обертання від часу.

1. С.В. Тарасов, Д.А. Редчиц, О. Б. Польовий, Обчислювальна гідродинаміка на службі вітроенергетики, *Світогляд.* № 6, 33–40 (2010).
2. В.О. Дзензерський, С.В. Тарасов, Д.О. Редчиць, М.М. Хачапурідзе, Математическое моделирование аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса, *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій,* Вип. 19, 96–111 (2012).
3. С.В. Тарасов, Д.О. Редчиць., С.В. Моісеєнко, А.С. Тарасов, Численное моделирование процессов аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки, *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій,* Т. 24, № 5, Вип. 26, 153–167 (2017).
4. D. Redchyts, A. Gourjii, S. Moiseienko, T. Bilousova, Aerodynamics of the turbulent flow around a multi-element airfoil in cruse configuration and in takeoff and landing configuration, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No 7 (101), 36–41 (2019). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174259
5. D. Redchyts, S. Moiseienko, Y. Shkvar, E. Shiju, Vortical systems, generated by Darrieus and Savonius Rotors, 9*th International Conference on Vortex Flow Mechanics – ICVFM 2021*: abstracts (c. Patras, 11-14 October 2021 y.), Patras, Greece, 152-157 (2021). https://icvfm.upatras.gr/wp-content/uploads/sites/76/2022/09/ICVFM2021_Proceedings.pdf

Numerical simulation of turbulent flow around darier and savonius rotors of vertical-axis wind power plants

doctor of phys. and mathem. sc-s, professor D. Redchyts[a1], candidate of technical sc-s, associate professor S. Moiseienko[b], U. Tuchina[b], O. Akimenko[b]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b]Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

[1]dmytro.redchyts@gmail.com

The study of unsteady processes during the flow around the rotors of vertical-axis wind turbines was carried out based on the Navier-Stokes equations. General definition of the coupled problem on vertical-axis wind turbines rotors aerodynamics and dynamics is formulated. The solution to the system of initial equations is obtained using an implicit finite-volume numerical algorithm based on the method of artificial compressibility and multi-block structured grids. A code for the calculation of vertical-axis wind turbines rotors aerodynamic and power characteristics is developed on the base of Reynolds averaged Navier-Stokes equations for incompressible fluids. Two types of Darrieus and Savonius rotors with different geometric parameters and number of blades were calculated. The influence of Reynolds numbers, tip-speed-ratios and solidity on the power characteristics of the rotors has been established.

Keywords: numerical methods, wind turbine, Darrieus rotor, Savonius rotor, Navier-Stokes equations, turbulence model.

До питання оптимізації проточних частин радіальних вентиляторів

А. В. Зінченко[1], Д. О. Редчиць

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] zina@dsu.dp.ua

Ключові слова: чисельне моделювання, радіальні вентилятори, оптимізація проточної частини, рівняння Нав'є-Стокса, обчислювальна аерогідродинаміка

Розвиток промисловості постійно підвищує вимоги до турбомашин і вентиляторів, включаючи підвищення ефективності, зменшення розмірів і ваги, а також створення нових конструктивних схем.

Найважливішим елементом радіального вентилятора є робоче колесо (або імпелер), яке обертає повітря радіально від центру до країв. Конфігурація та профілі лопаток робочого колеса обираються залежно від конструкції та призначення вентилятора та мають визначальний вплив на його характеристики. Робочі колеса радіальних вентиляторів можуть мати: лопатки, загнуті вперед у напрямку обертання, лопатки, загнуті назад або прямі лопатки. Також робочі колеса можуть бути відкритого чи закритого типу, тобто мати покривний конічний диск, або обходитись без нього.

В даній роботі за допомогою чисельного експерименту з'ясовано як впливають форма та геометричні розміри лопаток на продуктивність робочого колеса радіального вентилятора фіксованого зовнішнього діаметру $D_н$ = 1105мм та ширини h = 480мм. Визначено ефективність робочих колес для різних кількостей лопаток, кутів їх установки β_1 та β_2 а також внутрішніх діаметрів $D_{вн}$. Також отримано картини течії для кожного з випадків. Порівняння варіантів, зведених у табл. 1, здійснюється шляхом аналізу отриманих інтегральних параметрів робочого колеса, таких як об'ємні витрати повітря Q_v, момент на валу M та коефіцієнт корисної дії η. Чисельні розрахунки проведено в пакеті програм з відкритим вихідним кодом OpenFOAM [1].

Таблиця 1.

Геометричні параметри та параметри продуктивності робочих колес за результатами моделювання розглянутих конфігурацій лопаток

Варіант	*n, кількість лопаток*	β_1	β_2	$D_{вн}$, *мм*	Q_v, $м^3/с$	*M, Н·м*	η, *%*
1	10	30,8°	30,0°	729,0	22,44	279,275	53,5
2	10	19,41°	46,0°	729,0	22,34	294,011	54,0
3	10	18,0°	18,0°	832,32	17,89	49,3198	47,2
4	10	40,0°	40,0°	832,32	19,91	97,64	44,1
5	10	26,3°	166,8°	832,32	19,67	749,658	34,2
6	7	20,0°	20,0°	783,74	19,71	122,373	62,0
7	8	25,0°	10,0°	950,5	14,52	41,438	28,0
8	12	30,8°	30,0°	869,94	24,73	152,675	57,2

Чисельне моделювання показало, що робочі колеса з лопатками, загнутими назад, забезпечують практично безвідривний потік в проточній частині. Крутний момент

робочого колеса з лопатками, загнутими вперед при тих же об'ємних витратах повітря, значно вищий, а потік в проточній частині є нестаціонарним та містить значні відривні зони.

Варіант 8 (табл. 1) забезпечує трохи більший об'ємний розхід повітря при більшому коефіцієнті корисної дії і меншому в 1,8 рази необхідному крутному моменті у порівнянні з початковим варіантом 1 [2]. Робоче колесо варіанту 6 забезпечує найбільший коефіцієнті корисної дії.

Збільшення радіусу розташування вхідної кромки лопатки хоча і веде до зменшення крутного моменту, але також призводить і до падіння коефіцієнту корисної дії та об'ємного розходу. Наприклад, робоче колесо варіанту 7 забезпечує найменший крутний момент, але одночасно має найменший коефіцієнт корисної дії і найменший об'ємний розхід.

Проведене чисельні експерименти показали можливість спроектувати робоче колесо, яке буде забезпечувати приблизно той же об'ємний розхід повітря, що і початковий варіант [2], при значно меншому крутному моменті і більш високому коефіцієнті корисної дії.

1. Greenshields, C. J. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox Programmers Guide. OpenFOAM Foundation Ltd, 2015. - 101 p.
2. Oakland Colony Grain Dryer, Airflow testing & balancing, File 20500. Winnipeg. // Air Movement Services Ltd, 2019. - 5 p.

On the question of optimization of the centrifugal fan flow part

A. Zinchenko[1], D. Redchyts

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1]zina@dsu.dp.ua

The comparative performance analysis of various design options of the centrifugal fan impellers is presented. Computational Fluid Dynamics (CFD) approach based on OpenFOAM program package is used to evaluate the performance of impellers and to optimize its design. Several impeller design options and blade configurations are considered. The details of the flow structure and integral performance parameters for each design configuration are investigated. The advantages of impellers with backward inclined blades are shown. The performed research improves the effectiveness of centrifugal fans engaged in various industrial facilities, and helps better understanding possible week points in different impeller design options.

Keywords: numerical simulation, centrifugal fan, flow part optimization, Navier-Stokes equations, computational fluid dynamics.

Оптимізація параметрів фазоперехідного теплового акумулятора методами нерівноважної термодинаміки

Р. С. Юрков[а], Л. І. Книш[б]

[а]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна

romayurkov@gmail.com

У дослідженні запропоновано підхід до оптимізації термодинамічних характеристик фазоперехідного теплового акумулятора «тверде тіло – рідина», в основу якого покладено чисельну оцінку швидкості виникнення ентропії за рахунок гідродинамічної та теплової складової. Підхід з використанням принципів нерівноважної термодинаміки дозволив визначити числа Рейнольдса для теплоносія, які забезпечують найвищі значення ефективності в елементі теплового акумулятора типу «труба в трубі». Запропонована методика особливо актуальна в теплових акумуляторах відповідної конструкції, які мають значну довжину.

Ключові слова: тепловий акумулятор, фазовий перехід «тверде тіло – рідина», теплоакумулювальний матеріал, теплоносій, нерівноважна термодинаміка, генерація ентропії

Акумулювання теплової енергії за рахунок використання теплоти фазового переходу «тверде тіло – рідина» стає дедалі затребуванішим через значну питому енергоємністі, екологічній безпеці, надійності, тривалому строку експлуатації, відсутності деградації. Архітектура таких систем найчастіше базується на кожухотрубному виконанні, в якому одиничні теплообмінні елементи розташовані у відповідній послідовності. В роботі досліджується одиничний теплообмінний циліндричний елемент типу «труба в трубі»: в середині шару теплоакумулюючого матеріалу (ТАМ) розмішений трубчастий канал з теплоносієм. На режимі зарядки теплоносій з температурою, яка перевищує температуру фазового переходу ТАМ, рухається в каналі та віддає своє тепло ТАМ.

Під час розрядки тепло, що було запасене в ТАМ за рахунок теплоємності та фазових змін, віддається теплоносію для подальшого перетворення або прямого застосування. Таким чином, фазоперехідні акумулятори проєктуються на відповідний температурний рівень, якій дорівнює температурі фазового переходу ТАМ. Це дозволяє підтримувати на виході постійну температуру та забезпечувати безперебійне функціонування системи перетворення.

Розробка таких комплексів супроводжується низкою складних науково-технічних задач, частина з яких була розв’язана методами комп’ютерного моделювання на основі створеної спряженої 3D математичної моделі [1], що поєднує задачу Стефана та задачу про рух нестислої рідини в трубчастому каналі. Така математична модель була розв’язана числовими методами з використанням розробленого власного програмного забезпечення [2]. Потребують подальшого уточнення аспекти термодинамічного вдосконалення параметрів фазоперехідних теплоакумуляторів, а саме вибору найраціональніших значень витрати відповідного теплоносія, які забезпечують найвищі показники ефективності системи. Ці питання особливо актуальні при проєктуванні теплообмінників значної довжини (більш ніж 100 м), які передбачаються для використання в сонячних термодинамічних станціях [3].

Оптимізація термодинамічних параметрів в одиничному теплоакумулювальному модулі типу «труба в трубі» проводилась на основі принципів нерівноважної термодинаміки, а саме виконувався аналіз балансу між тепловою та гідродинамічною складовими втрат. В роботі запропоновано методику з визначення кількісних показників під час генерації ентропії, яка збільшується в системі як за рахунок теплообміну, так і за рахунок гідродинамічної складової. Методика містить гідродинамічний аналіз системи, в якому враховується режим течії теплоносія, якість внутрішньої поверхні трубчастого каналу та властивості рідини. Параметри для аналізу особливостей теплообміну вибирались на основі даних комп'ютерного моделювання відповідної спряженої задачі.

В результаті проведеного дослідження були знайдені інтервали чисел Рейнольдса, які забезпечують мінімальні значення росту ентропії в системі. Дослідження проводились для силіконової олії Syltherm800, яка є класичним теплоносієм сонячних термодинамічних параболоциліндричних станцій. Як ТАМ під час розрахунків виступав нітрит натрію $NaNO_2$, температура фазового переходу якого узгоджується з температурним режимом систем перетворення параболоциліндричних станцій.

1. Юрков Р. С., Книш Л. І. Моделювання теплообміну в фазоперехідному тепловому акумуляторі сонячної термодинамічної установки, *XXIII Міжнародна науково-практична онлайн-конференція "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті",* м. Київ., 160−162 (2022).
2. Юрков Р. С., Книш Л. І. Верифікація математичної моделі задачі Стефана в рамках методу "Mushy layer", *Технічна механіка*, **3**, 119–125 (2021).
3. Michels H., Pitz-Paal R. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants, *Solar energy*, **81**, 829–837 (2007).

Раціональна структура керування зображуючою точкою стану механічної підсистеми маглев поїзда

В. О. Поляков

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна.

pva78125@gmail.com

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, механічна підсистема, зображувана точка стану, структура керування.

Побудова руху механічної підсистеми поїзда є її приведенням у послідовність станів до заданих моментів часу, або точок путі. Зазначеним вимогам відповідає термінальний принцип такої побудови [1, 2]. Але при традиційній термінальній побудові руху алгоритм керування виходить дуже складним. Уникнути цих труднощів дозволяє комбінована побудови динаміки підсистеми. Суть її – у гнучкій позиційній корекції поточного стану підсистеми відносно програмної траєкторії.

При виключно термінальній постановці задачі побудови руху, щодо її реалізації є суттєве конструктивне свавілля. Воно може бути використане для надання руху додаткових бажаних властивостей шляхом програмування його додаткових цілей.

Збурення прагнуть дестабілізувати програмну траєкторію зображуючої точки, а також відвести її з цієї траєкторії. Тому другою підзадачею побудови руху є розробка алгоритму позиційної корекції поточного положення зображуючої точки щодо її положення на програмній траєкторії. Для цього має виконуватися поточний вимір обох згаданих положень цієї точки. Складність і точність керування її позицією щодо необхідної істотно залежить від способу організації цього процесу. Обидва зазначені показники можуть бути покращені при скороченні кількості необхідних вимірювальних та обчислювальних операцій. Цій умові відповідає алгоритм аркана [3].

Підзадачі стабілізації програмної траєкторії та позиційної корекції щодо неї поточного положення зображуючої точки тісно взаємопов'язані. Однак, практичне вирішення їх частин може бути рознесене у часі завдяки наступному. Обстановка руху може бути класифікована за принципом дихотомії у вигляді рівнів класів. Натурне впізнання кожного з них можна здійснити за набором значень параметрів і вимагає виконання невеликого обсягу додаткової роботи. У той же час, кожному такому класу обстановки у відповідність можуть бути поставлені необхідний у ньому ансамбль програмних траєкторій і критерій їхньої оптимізації. Таким чином, базові програмні траєкторії а, отже, і керування, які їх стабілізують в класах очікуваної обстановки, можуть бути визначені і зафіксовані при створенні регулятора.

У процесі руху, після реалізації і упізнання певного класу його обстановки, буде зчитаний закон програмного керування необхідний для гарантованої стабілізації відповідної базової траєкторії . При цьому згадане стабілізуюче керування може мати континуальній характер. Такий порядок вибору та реалізації керування дозволяє підвищити пристосованість термінальної системи керування з жорсткою програмною траєкторією до побудови багатокритеріальних багаторежимних рухів без переходу до складних алгоритмів керування з гнучкими траєкторіями руху.

Інша справа зі здійсненням керування коригувального. Його синтез, як зазначено, є вимушено позиційним і тому принципово не може бути здійснений заздалегідь, до початку руху.

Повне керування механічною підсистемою поїзда на термінальному інтервалі її руху має будуватися за принципом дискретної позиційної корекції поточного стану щодо заздалегідь синтезованої, для обстановки руху, що реалізувалася, континуально стабілізованої програмної траєкторії зображуючої точки. Це дозволяє орієнтувати регулятор на стабілізацію сигналів, що задаються в умовах впливу збурень. Остання задача – значно простіша, ніж синтез безперервного позиційного термінального керування рухом у його процесі.

Генерація вказаного повного керування може трактуватися як реалізація керуючого зв'язку, який накладається на підсистему. Для збереження цілеспрямованості синтезованого руху, множина, що визначає цей зв'язок, має гарантовано бути атрактором моделі руху підсистеми, що й покликане забезпечити згадане керування. Спрощення його синтезу (без погіршення якості) може бути досягнуто після заміни зазначеної множини послідовністю атракційних множин розмірності яких знижуються [4, 5].

Основні переваги синтезованої методики комбінованої побудови руху механічної підсистеми полягають у можливості поділу задачі приведення в кінцевий стан на простіші підзадачі, значна частина з яких в основному вирішується на стадії проектування регулятора, а також підвищення точності цього приведення – за рахунок повнішого використання обчислювальних засобів системи, звільнених від вирішення ряду другорядних підзадач.

1. Bellman R. E. Adaptive control processes. New Jersey: Princ. Univ. Press. 1961. 255 p
2. Поляков В. А., Хачапуридзе Н. М. Терминальное управление движением магнитолевитирующего поезда с использованием линейного синхронного двигателя. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2006. Вип. 12. С. 138 – 145.
3. Zulu A., John S. A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors. *Open Journal of Applied Sciences*. 2014. V.4 №.14.P. 547-556. DOI: 10.4236/ojapps.2014.414053.
4. Baldwin J.T. Fundamentals of stability theory. Springer, New York, 1987. 466 p
5. Carvalho P. R., Savi M. A. Synchronization and chimer state in a mechanical system. *Nonlinear Dynamics.* 2020. V. 102. P. 907-925. URL:
6. https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-019-05441-4.

Maglev train’s mechanical subsystem’s state’s display point rational control structure

V. Polyakov

Ukraine’s National Academy’s of Sciences Institute Transport System’s and Technology's Institute

pva78125@gmail.com

The topic of the study was maglev train’s mechanical subsystem’s state’s display point's control. The aim of the work was to build a rational structure for such management. Possible types of such control were analyzed, among which the most suitable one was identified. The principle of terminal control and the state’s display point's positional correction algorithm were used. The result of the study was a synthesis of the technique for constructing the desired rational control's structure. The main advantages of the technique are the division of the task of bringing a subsystem to a final state into simpler sub tasks, as well as the creation of the possibility of increasing the accuracy of this bringing.

Keywords: maglev train, mechanical subsystem, state display point, control structure.

Вплив ітрію на механічні властивості та жароміцність магнієвого сплаву для елементів конструкцій літальних апаратів

В.А. Шаломєєв, В.Л. Грешта, Ю.О. Чушкіна[1], Г.В. Табунщик

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

[1]chushkina@zp.edu.ua

Ключові слова: магнієвий сплав, ітрій, модифікування, мікроструктура, механічні властивості, жароміцність, інтерметалідні фази.

Магнієві сплави, що використовуються в сучасному літакобудуванні, мають достатній комплекс механічних властивостей. У той же час подальший розвиток і вдосконалення їх конструкцій висуває нові, більш високі вимоги до фізико-механічних і спеціальних властивостей сплавів на основі магнію. Основним напрямком вирішення цього завдання є вдосконалення хімічного складу сплаву, одержання дрібнодисперсних структурних складових після модифікування та забезпечення стабільності жароміцних фаз, що значно підвищить запас міцності й надійність в експлуатації виробів. Перспективним модифікатором для поліпшення властивостей магнієвого сплаву може бути ітрій. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу ітрію на структуру та властивості сплаву системи Mg–Zr–Nd, що сприятиме підвищенню надійності та довговічності виробів і розширенню сфери їх застосування [1].

Магнієвий сплав системи Mg-Zr-Nd виплавляли в індукційній тигельній печі типу ІПМ-500 за серійною технологією. Рафінування сплаву проводили в роздавальній печі з порційним відбором розплаву, до якого вводили зростаючі присадки лігатури, що містила ітрій. Далі розплав заливали у піщано-глинисту форму для отримання стандартних зразків для механічних випробувань. Термічну обробку зразків проводили у печах типу «Бельв'ю» та ПАП-4М за режимом Т6 (гартування від 415±5 °С, витримка 15 год, охолодження на повітрі та старіння при 200±5 °С, витримка 8 год, охолодження на повітрі).

Тимчасовий опір розриву та відносне подовження зразків із робочим діаметром 12 мм визначали на розривній машині «INSTRUM» при кімнатній температурі. Випробування на тривалу міцність при різних температурах проводили на розривній машині AIMA 5-2 на зразках з робочим діаметром 5 мм.

Мікроструктура вихідного термообробленого сплаву, відлитого за стандартною технологією, являла собою δ-твердий розчин з наявністю евтектоїду δ+(MgZr)12Nd у вигляді областей сферичної форми. Введення ітрію сприяло збільшенню розмірів сферичних ділянок виділення евтектоїду. Зокрема, при вмісті понад 0,08 % Y розмір евтектоїдних областей збільшувався приблизно у 2,5 раза порівняно зі стандартним сплавом, тоді як розмір δ-фази залишався практично незмінним.

Мікротвердість δ-твердого розчину стандартного сплаву до термообробки більш ніж у 3 рази нижча за мікротвердість виділень у сферичних евтектоїдних областях. Зі збільшенням концентрації ітрію у сплаві спостерігалося зростання мікротвердості всіх структурних складових. Після проведення термообробки спостерігалося збільшення мікротвердості матриці та зниження значень твердості евтектоїду. Термічна обробка

сприяла підвищенню однорідності сплаву внаслідок перерозподілу елементів між осями та міжосьовими просторами дендритів, а також додаткового легування матриці за рахунок дифузії елементів із пограничних виділень фази (MgZr)12Nd.

Мікрорентгеноспектральний аналіз, виконаний на електронному мікроскопі «JSM-6360LA», показав, що сферичні області збагачені переважно цирконієм, неодимом та ітрієм. У модифікованих сплавах вміст ітрію в сферичних областях виділень евтектоїду δ+(MgZr)12Nd значно вищий, ніж у δ-твердому розчині.

При підвищенні концентрації ітрію в сплаві до 0,2 % спостерігалося подрібнення мікрозерен практично у два рази (до ~75 мкм). Подальше збільшення присадок модифікатора (до 1,0 % Y) призводило до збільшення розміру мікрозерен до 160 мкм [2].

Модифікування досліджуваного сплаву ітрієм до 0,05 % сприяло підвищенню міцнісних властивостей внаслідок додаткового зміцнення як твердого розчину, так і евтектоїду δ+(MgZr)12Nd. При цьому пластичність сплаву зростала майже вдвічі, що пов’язано з формуванням додаткових центрів кристалізації та подрібненням литого зерна. Подальше збільшення концентрації ітрію супроводжувалося певним зниженням комплексу механічних властивостей, що пояснюється утворенням пограничних виділень інтерметалідної фази.

Результати високотемпературних випробувань показали, що введення ітрію в кількості до 0,05 % забезпечує підвищення не лише механічних, але й жароміцних властивостей сплаву. При цьому жароміцність сплаву при 250 °С підвищувалася в 1,5 рази за рахунок утворення термостабільних інтерметалідів, збагачених ітрієм. Подальше підвищення температури випробувань призводило до розпаду евтектоїду. Аналіз мікроструктури показав, що під дією температури та тривалих витримок поряд із розпадом евтектоїду відбувалося його часткове розчинення в матриці з подальшим виділенням інтерметалідної фази типу (MgZr)12Nd, збагаченої ітрієм, у вигляді дрібнодисперсних частинок. Виявлено, що такі частинки виділялися нерівномірно, формуючи області смугастої структури, які характеризувалися підвищеними значеннями мікротвердості [3].

Встановлено, що більш інтенсивному розпаду евтектоїдної фази сприяє збільшення часу витримки при заданій температурі, а також прикладене навантаження. При температурі 270 °С спостерігалося огрубіння структури внаслідок інтенсивного виділення інтерметалідів, особливо по межах зерен, що зумовлювало зниження жароміцності матеріалу. Найбільш грубі пограничні виділення були виявлені в структурі зразків, що містили понад 0,09 % Sc, які призводили до швидкого руйнування зразків у процесі випробування на тривалу міцність.

Таким чином, встановлено, що введення ітрію у сплав системи Mg-Zr-Nd у кількості 0,03…0,05 % сприяє підвищенню його механічних властивостей і жароміцності, що забезпечує підвищену надійність і довговічність експлуатації елементів конструкцій літальних апаратів.

1. J. Tan, S. Ramakrishna, Applications of Magnesium and Its Alloys: A Review, Appl. Sci. 2021, 11, 6861, https://doi.org/10.3390/app11156861
2. Wenming Jiang, Qingqing Li, Development of Advanced Aluminum and Magnesium Alloys: Microstructure, Mechanical Properties and Processing, Materials, 2024, 17(19), 4811, https://doi.org/10.3390/ma17194811

3. Jingying Bai, Yan Yang, Chen Wen, Chen Jing, Applications of magnesium alloys for aerospace: A review, Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(8), https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.09.015

The influence of yttrium on the mechanical properties and heat resistance of magnesium alloy for aircraft structural elements

V. Shalomeev, V. Greshta, Yu. Chushkina, G. Tabunshchyk

National University "Zaporizhzhya Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

[1] chushkina@zp.edu.ua

The influence of yttrium on the structure and physical-mechanical properties of the Mg–Zr–Nd magnesium alloy used in aircraft construction was investigated. It was established that the addition of small amounts of yttrium promotes grain refinement, changes the morphology of eutectoid precipitates, and increases the microhardness of the alloy's structural components. It was shown that the optimal yttrium content (0.03–0.05%) provides an improvement in strength and heat-resistant properties of the material, in particular increasing heat resistance at 250 °C by up to 1.5 times. The obtained results confirm the effectiveness of modifying Mg–Zr–Nd system alloys with yttrium in order to increase the reliability and durability of aircraft structural components.

Keywords: magnesium alloy, yttrium, modification, microstructure, mechanical properties, heat resistance, intermetallic phases.

Модель маршрутизації перевезень у дискретному просторі за умов ресурсних обмежень

В. В. Огліх[а1], О. В. Шаповалов [б], В. В. Лісунова [в]

[а] Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

[б] Університет митної справи та фінансів, Дніпро, Україна

[в] Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

[1] ovv.ekdnu@gmail.com

Ключові слова: маршрутизація транспортних засобів, логістика, комбінаторна оптимізація, евристичні алгоритми, точні алгоритми, транспортна наука.

У транспортно-логістичній системі задано множини пунктів:

$$X^0 = \{x_r^0\}, r = 1, \dots, R; \quad X^1 = \{x_p^1\}, p = 1, \dots, P;$$
$$X^2 = \{x_t^2\}, t = 1, \dots, R; \; X^3 = \{x_s^3\}, s = 1, \dots, S$$

Сукупна траєкторія доставки, яка передбачає використання транспортних засобів трьох типів включає такі послідовні етапи:

– переміщення транспортного засобу першого типу з пункту $x_r^0, r = 1, \dots, R$, до термінала $x_p^1, r = 1, \dots, P$ де здійснюється перевалка на транспорт другого типу.

– рух транспортного засобу другого типу з термінала $x^1{}_p$, p=1,…,P до пункту $x_t^2, t = 1, \dots, T$ у якому формується нова структура вантажопотоків і здійснюється перехід на транспорт третього типу.

– об'їзд пунктів доставки $x_s^3, s = 1, \dots, S$ транспортним засобом третього типу з виконанням безпосередньої доставки вантажів. Відбувається поетапне розвантаження, що спричиняє дискретні зміни маси та динамічних параметрів руху.

Організація руху має забезпечити: мінімізацію сукупних витрат; мінімальну кількість задіяних транспортних засобів; дотримання встановлених строків доставки.

Обмеження за часом доставки та вантажністю визначають допустимість використання конкретного транспортного засобу на відповідній ділянці маршруту.

Задачу формування оптимальних маршрутів доцільно розглядати як задачу покриття спеціального орієнтованого графа ланцюгами заданої структури [1,2].

Нехай задано орієнтований зважений граф $G(X^0, X^1, X^2, X^3, U^0, U^1, U^2, U^3)$
де множини вершин відповідають пунктам $X^0 = \{x_r^0\},\ r = 1, \dots, R;\ X^1 = \{x_p^1\},\ p = 1, \dots, P;\ X^2 = \{x_t^2\},\ t = 1, \dots, R;\ X^3 = \{x_s^3\}, s = 1, \dots, S,$
а множини дуг: $U^0 = \{u_{rp}^0\} = \{x_r^0, x_p^0\},\ U^1 = \{u_{pt}^1\} = \{x_p^1, x_t^2\},\ U^2 = \{u_{ts}^2\} = \{x_t^2,\ x_s^3\};$

$$r = 1, \dots, R;\ p = 1, \dots, P;\ t = 1, \dots, R\ = 1, \dots, S.$$

З елементами множин $X^2 = \{x_t^2\}, t = 1, \dots, R;\ X^3 = \{x_s^3\}, s = 1, \dots, S$ асоційовані певні ваги $\{f_t^2\}, \{f_s^3\}$, що відображають, наприклад, обсяги вантажу або витрати обслуговування. Дугам графа призначено ваги які характеризують транспортні витрати $\{w_{rp}^0\}, \{w_{pt}^1\}, \{w_{ts}^2\}, r = 1, \dots, R;\ p = 1, \dots, P;\ t = 1, \dots, T\ s = 1, \dots, S,$

Необхідно покрити граф ланцюгами $Q_{ij}^{lk}v,\ l=1,\dots,R;\ \ k=1,\dots,P;\ \ i=1,\dots,T,\ \ j=1,\dots,S,$. так, щоб перша вершина кожного ланцюга належала X^0, друга — X^1, третя – множині X^2, наступні — множині X^3.

Ланцюги моделюють кусково-гладкі траєкторії та задовольняють обмеження:

$\sum_v I_v^1(x.u,f)=\sum_{t=1}^{T} f_t^2+\sum_{s=1}^{S} f_s^3+=I1 \qquad I_v^1(x.u,f)\le F_v$

Функції витрат вздовж ланцюга

$I_v^0(x.u,f)=w_{rp}^0+w_{pt}^1+\sum_{Q_{ij}v} w_{pt}^2 \qquad I_v^1(x.u,f)=f_t^2+\sum_{Q_{ij}v} f_{pt}^3$

Оптимізаційна постановка задачі передбачає мінімізацію як кількість маршрутів, так і сумарних витрат за умов виконання заданих обмежень:

$VX\to min \qquad \sum_v \ \ I_v^0(x.u,f)\to min$

Виходячи з того, що представлена модель класифікується як задача NP-складна, і отримання точного розв'язку можливе лише при невеликій кількості вузлів у графі G для розв’язання задач маршрутизації має бути розроблено евристичні або метаевристичні алгоритми, які відповідають конкретним значенням параметрів [3,4].

1. В. В. Огліх, О. В. Шаповалов, С. А. Разгонов, І. Ю. Леснікова Управління транспортними системами інтермодальних та мультимодальних перевезень, *Системи та технології*, No 1 (69), С.145-153 (2025)
2. https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.18
3. Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V., Cook, W. The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. *Princeton University Press*. 608p. (2011)
4. Toth, P., Vigo, D. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications SIAM. (2014). https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.
5. Freight Transport Modelling M. Ben-Akiva; H. Meersman; E. Van de Voorde; *Emerald Group Publishing*. (2013). :https://doi.org/10.1108/9781781902868-004.

Model of transportation routing in discrete space under resource constraints

V. Oglikh[a1], O. Shapovalov[b], V. Lisunova[v]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[b]University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine

[v]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] ovv.ekdnu@gmail.com

The paper develops a mathematical model for optimizing intermodal transportation using a directed graph with resource, technological and time constraints. The cost-minimization problem is formulated as an NP-hard combinatorial routing and network covering task. The study proposes integer programming, decomposition and metaheuristic approaches for forming efficient transport chains and demonstrates their applicability under conditions of logistics digitalization and transport system integration.

Keywords: *vehicle routing, logistics, combinatorial optimization, heuristic algorithms, exact algorithms, transportation science.*

Електромеханічні пристрої повороту лопатей вітроколеса вітроенергетичних установок з горизонтальною віссю обертання

В.С. Дудніков

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

dudvlad1944@gmail.com

Ключові слова: вітроенергетика, вітроустановки, поворот лопатей, електромеханічні приводи

Аналіз результатів патентно-інформаційних досліджень показує, що пошук альтернативних джерел енергії – основне завдання сучасної енергетичної галузі в усіх розвинених країнах світу.. Економічний розвиток промислових галузей і комфортне існування людини залежить від пошуку і розробки нових поновлюваних джерел енергії. Одним з таких поновлюваних джерел безперечно є вітер.

Ефективність вітроустановок залежить від системи регулювання. Регулювання частоти обертання здійснюється шляхом регулювання кута нахилу лопатей ротора.

Далі розглянути результати розробки вітчизняних електричних вітроустановок с горизонтальною віссю обертання вітроколеса, в яких для повороту лопатей були використані електромеханічні пристрої. Розробка цих пристроїв, виготовлення, іспити проводилися під керівництвом автора.

В модернізованому варіанті електромеханічного пристрою повороту лопатей (ліцензійна ВЕУ USW 56–100) замінено передачу гвинт-гайки тертя ковзання на кулькогвинтову передачу тертя кочення. Замість оригінальних елементів використовуються освоєні в серійному виробництві в Україні.

В альтернативному варіанті електромеханічного регулятора повороту лопатей ВЕУ USW 56–100 гайка кульковинтової передачі приводиться у обертання одноступінчастим хвильовим зубчастим редуктором.

Замість гідравлічних регуляторів повороту лопатей вітроколеса ВЕУ-250С, розробленої конструкторським бюро „Південне“, нами було запропоновано електромеханічний регулятор, що складається з двох ідентичних перетворювачів обертального руху на поступальне та системи управління ними. Кожен перетворювач включає асинхронний електродвигун, двоступінчастий циліндричний зубчастий редуктор, кулькогвинтову передачу, систему з двох герконових кінцевих вимикачів, що відключають живлення електродвигуна при досягненні штоком, що поступово переміщається, своїх граничних положень. На вхідному валу редуктора жорстко закріплений фрикційний диск нормально замкнутого електромагнітного гальма і чутливий елемент фотоелектричного датчика переміщень. Для збільшення кута повороту лопатей включається електродвигун, зменшення ж кута повороту лопатей відбувається під дією зусилля поворотної пружини і аеродинамічного навантаження на лопатях вітроколеса, при цьому двигун працює в режимі, що підгальмовує, при включеному гальмі. Після електричного відключення гальма він утримує шток перетворювача у будь-якому проміжному стані без підведення енергії. Відключення гальма відбувається у моменти нульової частоти обертання (моменти зміни частоти

обертання) ротора двигуна за показаннями фотоелектричного датчика переміщень, одночасно датчика швидкості.

Для вітчизняної ВЕУ–500 регулятор виконаний багатоблочним та співвісним. Він частково розташовується всередині пустотілого валу зубчастого мультиплікатора і, з одного боку, через підшипникову розділову муфту з'єднаний з штангою, що обертається, керуючої через важили поворотом лопатей вітроколеса, а, з іншого боку, за межами мультиплікатора, має шарнірно-кардане з'єднання.

Регулятор має фотоелектричні датчики кінцевих положень, що подають команди на відключення живлення та зупинки електродвигуна. Після спрацювання кінцевих вимикачів можливий лише реверс електродвигуна. Крім того, регулятор оснащений фотоелектричним датчиком переміщень, що є реверсивним лічильником імпульсів і дозволяє судити про поточне положення вихідного штока регулятора. На одному валу з датчиком переміщень встановлено електромагнітне безлюфтове нормально закрите фрикційне гальмо, яке при відсутності електроживлення, що синхронізується з відключенням електродвигуна, дозволяє утримувати лопаті вітроколеса в будь-якому положенні, яке визначається швидкістю потоку, що набігає. По команді від системи управління ВЕУ подається електроживлення на гальмо і електродвигун, що призводить до відповідної зміни положення лопатей, яке відповідає новому значенню швидкості потоку, що набігає. Для зручності експлуатації регулятор забезпечений ручним дублером приводу.

Необхідно переходити до модульного структурного принципу проєктування пристроїв повороту лопатей. Це дозволить краще відпрацювати конструкцію, підвищить надійність та довговічність, спростить та здешевить виготовлення, підвищить ремонтопридатність.

Electromechanical devices for turning the blades of wind turbines of wind power plants with a horizontal axis of rotation

V. Dudnikov

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine
Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
dudvlad1944@gmail.com

The paper examines the development of electromechanical drive designs for turning the blades of domestic wind turbines (WTs) with a horizontal axis of rotation. All drives utilize ball screws instead of friction-type screws, domestically produced electromagnetic clutches, brakes, and asynchronous electric motors. A transition to a modular structural design principle for WTs is proposed, i.e., assembling them from several standard modules, including blade turning devices. This will allow for better refinement of the design of each module, increase their reliability and durability, simplify and reduce the cost of manufacture, and improve maintainability. A series of standard sizes should be developed for each module for a specific range of WT power ratings.

Keywords: wind power, wind power plants, turning the blades, electromechanical drives

Спосіб проходки свердловин буровим снарядом з кавітаційним гідровібратором з урахуванням динамічних властивостей породи в вибої

Ю. О. Жулай[1], С.В. Комаров

Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

[1] juriyjly@gmail.com

Ключові слова: буровий снаряд, кавітаційний гідровібратор, породоруйнівний інструмент, звукове буріння, швидкість проходки.

У процесі безперервної експлуатації вуглеводних покладів спорудження нових свердловин у твердих та абразивних пласти на великих глибинах стає дедалі більш складним. Напрямком, який дозволяє підвищити продуктивність буріння в цих умовах, є створення високочастотних динамічних навантажень на буровому інструменті з використанням гідродинамічної кавітації. Створення таких пристроїв, для підвищення швидкості буріння, вивчення механізму їх роботи та ефекту руйнування породи є важливим **науково-технічним завданням.**

Такі роботи представлені на конференціях по геомеханіці й бурінню свердловин авторами із США, Великобританії, та Китаю, наприклад [1, 2].

Пріоритет у створенні нового напрямку заглибних ударних машин з динамічним навантаженням за рахунок періодично зривної кавітації повністю належить Україні. Так під керівництвом академіка НАН України Пилипенко В.В. в Інституті технічної механіки НАНУ було розроблено буровий снаряд з кавітаційним гідровібратором [3].

Цей напрямок був розвинутий Інститутом транспортних систем і технологій Національної академії наук України (далі - Інститут), де було розроблено математичну модель складної гідромеханічної системи «буровий снаряд з кавітаційним гідровібратором – гірська порода» [4]. В ній, окрім пружно-масових і дисипативних характеристик, враховувалися сили ваги та зовнішнього навантаження бурової колони, а також контактна взаємодія бурового інструменту з породою. Розвиток моделі у подальшому наведено у роботах [5] та [6]. Це дозволило узгодити розрахункові та експериментальні дані і провести теоретичне дослідження впливу конструктивних параметрів бурового снаряду на ключовий фактор, – швидкість проходки свердловини.

Дослідження виконані в Інституті вказують, що зростання швидкості проходки свердловин пояснюється наступними чинниками:

– **втомне руйнування**. Знакозмінні навантаження на долото створюють у породі втомні напруги, провокуючи розвиток мікротріщин. В результаті порода руйнується при енерговитратах значно нижче за межу її статичної міцності;

– **ефективне очищення вибою**. Пульсуючі струмені створюють ефект "гідравлічного удару", миттєво видаляючи шлам. Це виключає вторинне перетирання породи, знижує абразивне зношування долота і запобігає втраті коливальної потужності;

– **резонансний ефект**. При збігу частоти коливань бурового інструменту з частотою породи в зоні вибою виникає резонанс. Амплітуда напруг різко зростає, викликаючи лавиноподібне руйнування масиву за мінімальних зусиль (ефект Ребіндера). Максимальний ККД системи досягається через синхронізацію коливань снаряду та породи;

– **зниження тертя**. Вібрації знижують коефіцієнт тертя бурильної колони об стінки свердловини. Це покращує передачу осьового навантаження на забій, мінімізує ризик прихватів і знижує крутний момент на роторі. Таке буріння дозволяє значно знизити вартість проходки свердловини.

Результати одержані в Інституті мають велике **практичне значення**. Вони полягають в тому, що фактично запропонована методика, за якою можна спроектувати буровий снаряд під конкретний породоруйнівний інструмент та адаптувати його до фізико-механічних властивостей різних типів гірських порід.

1. S. Li, V. Vaziri, M. Kapitaniak, J. M. Millett, and M. Wiercigroch. Application of resonance enhanced drilling. *J. Petroleum Science and Engineering*. Vol. 188. P. 1÷9. Article ID 106866. http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2019.1068662. (2020)/
2. Zhao Y., Zhao D., Li B., Wang H., Zhang Z. (2021) Fatigue Damage Mechanism and Deformation Behaviour of Granite Under Ultrahigh-Frequency Cyclic Loading Conditions. *J. Rock Mech Rock Eng*. Vol. 54, P. 4723 ÷ 4739. https://doi.org/10.1007/s00603-021-02524-w. (2021).
3. А.с. 1496351 СССР, МКИ Е 21 В 10/18. Способ бурения скважин и устройство для его осуществления / В.В. Пилипенко, Н.М. Гавриленко, В.А. Задонцев, И.К. Манько, Н.А. Дзоз, А.Н. Давиденко, В.А. Дрозд, А.И. Шепель, С.Я. Сологуб, А.Т. Киселев и Ю.А. Меламед (СССР). –№4250212; заявл. 04.03.87; опубл. 07.01.91, Бюл. № 15.
4. O. Nikolayev, Yu. Zhulay, Yu. Kvasha, N. Dzoz. Evaluation of the vibration accelerations of drill bit for the well rotative-vibration drilling using the cavitation hydrovibrator. *J.Mining and Mineral Engineering (IJMME),* Vol. 11, No. 2. P. 102 ÷ 120. http://dx.doi.org/10.1504/IJMME.2020.108643. (2020).
5. Zhulay, Yu.O., Nikolayev O. D. Sonic Drilling with Use of a Cavitation Hydraulic Vibrator. Chapter In book: *Mining Technology. London. United Kingdom. IntechOpen*. P. 81 ÷ 98. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100336. (2022).
6. Yuriy Zhulay, Olexiy Nikolayev. Sonic drilling with a cavitation hydraulic vibrator - theoretical computation of the energy performance and rate of penetration. Chapter In book: *Exploring the World of Drilling. London. United Kingdom. IntechOpen*. P. 1 ÷ 27. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1142. (2024)

A method of drilling wells with a drilling rig with a cavitation hydrovibrator taking into account the dynamic properties of the rock in the face.

Yu. O. Zhulay1, S. V. Komarov

Institute of Transport Systems and Technologies of the National academy of sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] juriyjly@gmail.com

The cavitation hydrovibrator of fluid pressure oscillations is a promising device for productivity and efficiency improvement in the mining industry. Due to the periodic growth, separation and collapse of cavitation cavities into generator volume, shock pressure oscillations are realized with a frequency range from 1 to 20 kHz. The destroyed rock takes on a fatigue character under repeated alternating effects of force impulses. Due to the development of a network of microcracks in the rock, the discon tinuity of the rock mass occurs at stresses lower than the rock ultimate strength. This leads to an increase in the rate of penetration.

Keywords: drill bit, cavitation hydrovibrator, rock-breaking tool, sonic drilling, penetration rate.

Концептуальні основи створення вантажної магнітолевітаційної транспортної системи

Ю.М. Лаврич, С.В Плаксін, Л.М Погоріла , А.Ю. Підчасов.

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1]lavrich@westa-inter.com

Проведено аналіз сучасного стану та проблем транспортних систем в Україні, зумовлених як нестачею потужностей транспортної інфраструктури, низькою маршрутною швидкістю перевезень, так і рівнем організації руху та керування транспортними потоками. З огляду на відсутність вантажної магнітолевітаційної транспортної структури в країнах, що володіють левітаційними технологіями, запропоновано концептуальні засади її побудови.

Ключові слова: магнітна левітація, безпілотні технології, контейнерна платформа

Вступ

Постійне зростання експортно-імпортних вантажопотоків потребує інноваційного підходу до вирішення транспортної проблеми. Інноваційна транспортно-логістична система може бути сформована на основі будівництва магнітолевітаційної транспортної магістралі та впровадження сучасних логістичних технологій.

Вчені Інституту транспортних систем та технологій (ІТСТ) НАН України м. Дніпро провели низку фундаментальних досліджень з розробки вітчизняної магнітолевітаційної транспортної технології і накопичили великий НТД, розробили та виготовили макетний зразок магнітолевітаційного транспортного засобу, стенд чотирипунктного електродинамічного підвісу і транспортну естакаду, обладнану системою тяги на базі лінійного синхронного двигуна. Для розробки концептуальних основ вантажної магнітолевітаційної транспортної системи використано результати як зарубіжних наукових досліджень, так і власний НТД по створенню діючого макета і елементів високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи (МТС).

1 Основна частина

З урахуванням накопиченого вітчизняного НТД система магнітолевітаційних вантажних перевезень вимагає наявності таких складових:

– транспортно-логістичні магнітолевітаційні контейнерні термінали (МКТ), що забезпечують збирання, переробку і вивантаження контейнерів на магнітолевітаційну вантажну платформу (МВП) та їх переміщення в автоматичному режимі в тиловий контейнерний термінал;

– магістральні магнітолевітаційні лінії для переміщення магнітолевітаційних вантажних платформ між контейнерними терміналами.

– термінальні магнітолевітаційні лінії для переміщення та проведення вантажно-розвантажувальних операцій як усередині терміналу, так і між контейнерними терміналами.

– транспортна магнітолевітаційна вантажна платформа (МВП).

Як показує власний НТД, цілком допустимо і необхідно при створенні магнітолевітаційної вантажної транспортної системи використовувати існуючі та перевірені структурні одиниці пасажирської магнітолевітаційної системи, оскільки функціональне призначення та принципи функціонування пасажирської та вантажної магнітолевітаційних платформ є ідентичні. Конструктивно МВП повинна забезпечувати перевезення 1-2 контейнерів, бути реконфігурованою та керуватися в автоматичному режимі. Для мінімізації часу виконання вантажних операцій у складі МВП необхідно передбачити автоматизовану систему механічного закріплення та розкріплення контейнера на магнітолевітаційній платформі. Крім того, МВП має забезпечити режим повного автоматичного безпілотного застосування, що вимагає адаптивну систему управління безпілотного руху. Інформація щодо місцезнаходження МВП передається як до власної інформаційної системи, так і до інформаційних систем терміналу, диспетчера МТС та одержувача/відправника вантажу. МВП має бути оснащена вбудованою системою автоматичного контролю технічного стану як самої МВП, так і транспортного шляху [1,2]. Технологічне обладнання магнітолевітаційного терміналу вантажної станції повинно використовувати магнітолевітаційні принципи функціонування. Маневреність та висока швидкість переміщення вантажного контейнера магнітолевітаційною транспортною магістраллю може бути забезпечено за рахунок оснащення магістралі пристроями електромагнітного переведення зі шляху на шлях. МВП має стати елементом МТС, де всі структурні одиниці системи є багатофункціональними і призначені для реалізації технологій перевезення як вантажів, так і пасажирів.

Висновки. Створення магнітолевітаційного транспорту належить до небагатьох проектів національного масштабу, а побудова сучасної та перспективної транспортної інфраструктури країни неможлива без застосування магнітолевітаційного вантажного транспорту.

1. Ю. Н. Лаврич, С. В Плаксін, Л. М. Погоріла. Спосіб динамічного контролю стану шляхової структури високошвидкісного магнітолеветуючого транспорту. Патент України №133461. Бюл .№7. 2019 10.04.2019.
2. Ю. Н. Лаврич, С. В Плаксін, Л. М. Погоріла, А. Ю. Підчасов. Пристрій динамічного контролю стану шляхової структури високошвидкісного магнітолеветуючого транспорту// Патент України №140410. Бюл.№4. 25.02.2020.

Conceptual bases of a magnetolevitation freight transport system creating

Y.N. Lavrych[1], S.V. Plaksin[2], L.M.Pogorelaya[3] , A.Yu. Podchasov[4]

[1] email@gmail.com

An analysis of the transport systems current state in Ukraine and problems, such as the lack of demand for transport infrastructure, low route speed of transportation, as well as the level of traffic organization and the transport flows control was carried out. From the standpoint of the absence of a freight magnetic levitation transport system in countries, that posses levitation technologies, conceptual foundations for its construction are proposed.

Keywords: magnetic levitation, unmanned technologies, container platform.

Свинцево-карбоновий акумулятор для транспортних систем

В. Ю. Скосар[1], С. В. Комаров , Н. В. Бурилова , С. В. Бурилов

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] skosarslava@gmail.com

Ключові слова: транспортні системи і технології, свинцево-кислотні акумулятори, свинцево-вуглецеві акумулятори, гібридні автомобілі, електромобілі.

Вступ. На транспортних засобах як джерела живлення використовуються електрохімічні акумулятори. Свинцево-кислотні акумулятори завдяки постійним модифікаціям довгий час служили «робочим конячком», і сьогодні можуть продемонструвати чергове технологічне вдосконалення [1-3].

Основна частина. Розробка свинцево-вуглецевих акумуляторів (Pb-C) вдихнуло нове життя в свинцево-кислотні (Pb) моделі. У Pb-C акумуляторах використовують добавку 1-2% вуглецю у свинцевий електрод. Нові акумулятори добре зарекомендували себе в гібридних автомобілях, електромобілях [4-6]. Нами проведено дослідження зі створення Pb-C акумуляторів на основі Pb стартерних батарей 12 В виробництва МНПК «ВЕСТА». В пасту негативних свинцевих пластин ми додали 1,5 % порошку графіту марки ГП (особливо чистий). Електролітом був водний розчин сірчаної кислоти, густиною 1,28 г/см^3. Виготовлено три Pb-C батареї, а також три контрольних батареї без додавання графіту. Батареї піддали циклам неглибоких потужних розрядів та швидких зарядів, які імітують роботу батарей у гібридних автомобілях та електромобілях. Струм розряду на пару електродів становив 100 А. Струм заряду, віднесений до пари електродів, становив 50 А. Після кожних 200 циклів перевіряли ємність 20-годинного розряду, а також зарядну та розрядну напругу швидкого циклу (на акумулятор). Результати наведені у табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Залежність ємності С (А·год) від циклу розряд-заряд

Номер циклу	*200*	*400*	*600*	*800*	*1000*	*1200*	*1400*
Pb батареї	11,5	10,2	8,2	6,1	-	-	-
Нові Pb-C батареї	11,4	11,6	11,6	11,5	11,4	11,2	10,9

Таблиця 2

Залежність зарядної напруги Uз (В) і розрядної напруги Up (В) від циклу розряд-заряд

Номер циклу	*200*	*400*	*600*	*800*	*1000*	*1200*	*1400*
Pb батареї Uз	2,38	2,32	2,39	2,31	-	-	-
Up	1,92	1,89	1,73	1,68	-	-	-
Нові Pb-C батареї Uз	2,20	2,24	2,23	2,26	2,25	2,20	2,18
Up	1,98	1,96	1,92	1,86	1,82	1,79	1,76

Pb батареї вийшли з експлуатації після 800 циклів, тоді як нові Pb-C батареї витримали 1400 циклів. Зарядна напруга для Pb батарей вище, ніж для нових Pb-C батарей, а розрядна напруга, відповідно, нижче.

Висновки. Результати підтверджують переваги нових Pb-C батарей. Необхідні подальші дослідження із застосуванням різних форм вуглецю у свинцевих електродах.

1. В. Скосар, С. Бурилов, В. Дзензерський. Перспективи застосування електромагнітного транспорту. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 48–60 (2025). https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.048.
2. V. I. Yeliseyev, V.Y. Skosar, M.O. Katrenko. Numerical analysis of the effect of the design and manufacturing parameters of starter lead-acid batteries on their discharge characteristic. *Technical Mechanics*, 4, 93–101. (2025). https://doi.org/10.15407/itm2025.04.093.
3. Back to basics. URL: https://clubassist.com.au/Expert-Advice/News/Lead-acid-batteries (дата звернення: 02.03.2026).
4. K. Peters, D.A.J. Rand, P.T. Moseley. Performance-enhancing materials for lead-acid battery negative plates. *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*, P. 213-234. (2017). http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63700-0.00007-6.
5. Weijia Caia, Kai Qi, Zhenyu Chen, Xingpeng Guo, Yubing Qiu. Effect of graphene oxide with different oxygenated groups on the high-rate partial-state-of-charge performance of lead-acid batteries. *Journal of Energy Storage*. Volume 18, Pages 414-420. (2018). https://doi.org/10.1016/j.est.2018.06.004.
6. K. Yanamandra, D. Pinisetty, N. Gupta. Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113078 (2023). https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113078.

Lead-carbon battery for transport systems

V. Skosar[1], S. Komarov, N. Burylova, S. Burylov

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] skosarslava@gmail.com

We conducted an analysis of scientific and technical literature in the field of lead-acid batteries to identify new technological and design solutions. We have determined that the most promising improvement of the known electrochemical system is lead-carbon batteries. The new batteries differ from standard lead-acid batteries by the additional addition of 1-2% of various types of carbon: carbon black, graphite, activated carbon, graphene, carbon nanotubes - to the lead electrode. We conducted research on the creation of lead-carbon batteries with the addition of 1.5% graphite powder to the lead paste of negative electrode plates. Durability tests that simulate operating conditions in hybrid and electric vehicles confirm the advantages of new batteries and strengthen hope for the prospects of the developments. We will direct further development towards using other types of carbon in lead electrodes to optimize the composition of the active mass.

Keywords: transport systems and technologies, lead-acid batteries, lead-carbon batteries, hybrid cars, electric cars.

Низькошвидкісний магнітолевітаційний транспорт

В. Ю. Скосар[a1], Ю. В. Шкіль[a]

[a]Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

[1] skosarslava@gmail.com

Ключові слова: магнітна левітація, постійні супермагніти, лінійний асинхронний двигун, система управління транспортом, підсистема навігації.

Вступ. Перспективним видом міського транспорту є низькошвидкісний магнітолевітаційний електромагнітний транспорт [1, 2]. Тому розробки і вдосконалення такого виду транспорту є актуальними.

Основна частина. Нами проведено дослідження щодо створення низькошвидкісного електромагнітного транспорта, який здатний до левітації и руху уздовж звичайних залізничих колій. Аналогічні розробки вже проводяться за кордоном [3, 4]. Магнітний підвіс нашого транспортного засобу містить потужні постійні магніти, які взаємодіють із залізничними рейками і забезпечують ефект левітації (рис. 1).

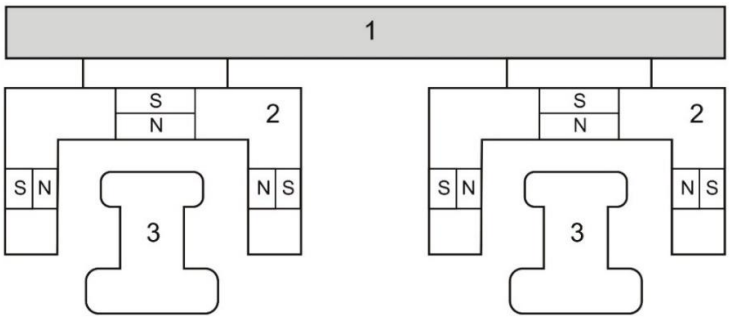


Рис. 1. Схема магнітного підвісу: 1 – вагон; 2 – слайдери з постійними магнітами; 3 – залізничні рейки.

Оскільки в такої конфігурації левітація буде нестійкою у горизонтальній площині, то передбачаються бічні ролики, здатні прокочуватися вздовж бічних поверхонь кожної рейки. Розгін, рух і гальмування забезпечуються лінійним асинхронним двигуном, який взаємодіє з рейкою. Керування транспортом здійснюється завдяки системі управління з підсистемою навігації, які створено, згідно [5, 6]. Наше дослідження є міждисциплінарним і здійснено співробітниками відділу «Електротехнічних комплексів та хімічних джерел струму транспортного призначення» та співробітниками відділу «Систем управління перспективними транспортними комплексами».

Висновки. Розроблено конструктивна схема низькошвидкісного магнітолевітаційного електромагнітного транспорту, який здатний до левітації і руху, використовуючи наявну залізничну інфраструктуру. Такий транспорт в перспективі може бути використано як міський електротранспорт. Експериментальний зразок

такого транспорту може продемонструвати переваги технології магнітної левітації та служити пропаганді нових енергоефективних транспортних систем.

1. В. М. Геєць, О. І. Волошин, В. О. Дзензерський, О. І. Никифорук. *Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління*. ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України»; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України; Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Київ (2020).
2. В. Скосар, С. Бурилов, В. Дзензерський. Перспективи застосування електромагнітного транспорту. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 48–60. (2025). https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.048.
3. Magnetic Levitation Made Simple And Affordable: A Revolutionary View On The Future Of Transportation. URL: https://www.ironlev.com/transport (дата звернення: 02.03.2026).
4. Nevomo – Into the future of rail. URL: https://nevomo.com/#:~:text=Nevomo%20is%20a%20company%20that%20develops%20technology,emissions%2C%20halved%20travel%20times%2C%20and%20doubled%20capacity (дата звернення: 02.03.2026).
5. O. Holota, S. Plaksin, Y. Shkil. Determination of the coordinates of the spatial orientation of the magnetoplan regarding the rail structure. *Transport Systems and Technologies,* 40, 159–169. (2022). https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14.
6. A. M. Mukha, S. Plaksin, L. M. Pohorila, D. V. Ustymenko, Y. Shkil. Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*, 1(97, 23–31. (2022). https://doi.org/10.15802/stp2022/265332.

Low-speed magnetic levitation transport

V. Skosar[a1], Yu. Shkil[a]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] skosarslava@gmail.com

World experience shows that magnetic levitation transport systems can be successfully used not only as a high-speed mode of transport, but also as low-speed electric transport. Using existing rail infrastructure for low-speed urban magnetic levitation transport can significantly simplify the implementation of the new technology. We have developed a design scheme for low-speed magnetic levitation transport, in which the magnetic suspension contains powerful permanent magnets that interact with railway rails. Acceleration, movement and braking are provided by a linear asynchronous motor. Control is carried out thanks to a control system with a navigation subsystem. Magnetic levitation transport can demonstrate the advantages of new transport systems and technologies. Such transport can be used in the future as urban electric transport, which can be seen by wide segments of the population, which will increase public interest.

Keywords: magnetic levitation, permanent supermagnets, linear induction motor, transport control system, navigation subsystem.

Приміський магнітолевітаційний транспорт

В. Ю. Скосар[1], С. В. Тарасов

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] skosarslava@gmail.com

Ключові слова: енергоефективність, пристрій бічної стабілізації магнітного підвісу, залізничні рейки, повітряний гвинт, двигун і гальмо.

Вступ. Одним із шляхів розвитку енергоефективного транспорту є створення приміських магнітолевітаційних поїздів [1]. Тому актуальним питанням є дослідження щодо розробки такого виду транспорту.

Основна частина. Нами запропоновано конструктивна схема приміського електротранспорта, який здатний до левітації и руху уздовж звичайних залізничих колій. Вже відомі аналогічні розробки за кордоном [2-4]. Магнітний підвіс транспорту працює за принципом «пасивної магнітної левітації» з бічною стабілізацією (рис. 1).

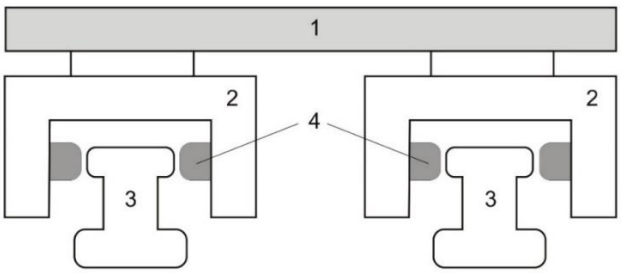


Рис. 1. Схема пристрою бічної стабілізації магнітного підвісу: 1 – вагон; 2 – слайдери з роликами 4 і постійними магнітами; 3 – залізничні рейки.

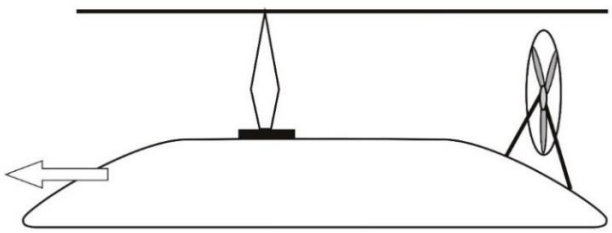


Рис. 2. Вигляд збоку магнітолевітаційного транспорту, який отримує електроживлення через бугель від лінії електромережі, а розгін, рух та гальмування - від повітряного гвинта.

Для створення тяги або гальмування використовується повітряний гвинт у задній частині транспорту, захищений сітчастим екраном (рис. 2). Принцип розрахунку технічних характеристик гвинта реалізовано, згідно [5, 6]. Дослідження є міждисциплінарним і здійснено співробітниками відділу «Електротехнічних комплексів та хімічних джерел струму транспортного призначення» та співробітниками відділу «Технічної механіки та енергетичних систем».

Висновки. Розроблено конструктивна схема транспорту, якій здатний до левітації уздовж приміських залізничних колій. Демонстраційний зразок такого транспорту може послужити залученню інтересів суспільства до розвитку нових транспортних систем і технологій.

1. В. М. Геєць, О. І. Волошин, В. О. Дзензерський, О. І. Никифорук. *Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління*. ДУ «Ін-т екон. та прогно-зув. НАН України»; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України; Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Київ (2020).
2. Ironlev Official. URL: https://www.youtube.com/@ironlevofficial2780 (дата звернення: 02.03.2026).
3. MagRail - a new, innovative technology by Nevomo. URL: https://youtu.be/fYvIAlWM_HY?si=x8tEveILQUO3cuVf (дата звернення: 02.03.2026).
4. World's first levitating train on existing infrastructure! MagRail by Nevomo. URL: https://youtu.be/CQOEP7_euXQ?si=HSoKfdJUS5fIRc55 (дата звернення: 02.03.2026).
5. С. В. Тарасов, Д. О. Редчиць, А. С. Тарасов, О. В. Дорош. Модель динаміки ротора Дар'є змінної конфігурації. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2023)*, 22 березня 2023 р. Зб. наук. праць. Дніпро: Український державний університет науки і технологій, С. 208–211. (2023). https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.057.
6. С. В. Тарасов, О. Н. Молотков. Алгоритми стабілізації швидкості обертів ротора Дар'є вітроенергетичної установки, керованого змінами довжини лопатей. *Технічна механіка*, № 4. С. 50–59. (2023). https://doi.org/10.15407/itm2023.04.050.

Suburban magnetic levitation transport

V. Skosar[1], S. Tarasov

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] skosarslava@gmail.com

Commuter maglev transport can serve as a good example for new energy-efficient transport systems. In addition, the creation of demonstration models of transport capable of levitating along railway tracks can contribute to attracting public interest in the development of new transport technologies. We have proposed a design scheme for such electric transport, in which magnetic levitation above railway rails is provided by means of permanent supermagnets arranged in the form of the greek letter "П" inside sliders with side rollers for stabilization. The magnets create fields that repel them from each other. The propulsion and braking system is made in the form of a propeller, which is located at the rear of the vehicle, below the power line. Preliminary results indicate the prospects of our technical development. We are planning to optimize the traction system.

Keywords: energy efficiency, magnetic levitation device, railway rails, propeller, engine and brake.

Перспективний напрямок технології очистки теплообмінників атомних електростанцій

Ю. О. Жулай[1], О. Д. Ніколаєв

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] juriyjly@gmail.com

Ключові слова: *кожухотрубчатий теплообмінник, очищення поверхонь трубопроводів, , кавітаційні коливання*, *системи діагностики ступеня забруднення.*

Зростаючі потужності електрогенеруючих систем спонукують шукати нові шляхи для підвищення ефективності їхніх теплообмінних апаратів. Більшість розроблювальних теплообмінників – це пластинчасті і кожухотрубчаті теплообмінники.. Кожухотрубчаті теплообмінники атомних електростанцій (на рис. представлена їхня принципова схема роботи) мають специфічні конструктивні особливості й витримують значно більші питомі теплові навантаження в порівнянні з теплообмінниками звичайних (теплових) електростанцій.

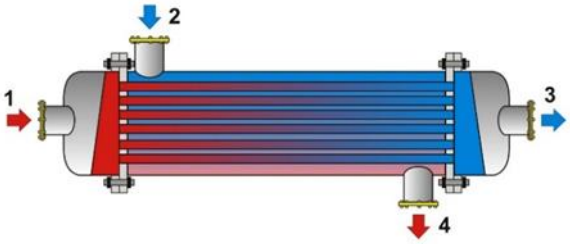


Рис.1 - Принципова схема кожухотрубчатого теплообмінника:- 1 і 3 вхідний і вихідний канали рідини що охолоджується;- 2 і 4 вхідний і вихідний канали охолоджувача

Разом з тим, відомо, що в кожухотрубчатих теплообмінниках електрогенеруючих систем відбуваються різні фізичні й хімічні процеси, такі як седиментація, кристалізація [1], хімічні реакції, корозія і біообрастання. Сполучення цих процесів приводить до забруднення внутрішніх поверхонь трубопроводів. Забруднення внутрішніх поверхонь теплообмінників знижує швидкість теплопередачі. При тривалій експлуатації це може стати надзвичайно критичним для реалізації робочого режиму - утворюючи тверді кірки й засмічуючи внутрішні трубки. Погіршення швидкості теплопередачі приводить до істотних технічних проблем у технологічному процесі теплообмінника. Забруднення викликає величезні втрати у виробництві електроенергії, пов'язані з погіршенням ефективності роботи електрогенеруючої системи. Ці втрати виробництва електроенергії можуть привести до незапланованих або планових зупинок роботи системи через забруднення, які в остаточному підсумку приводять до значних фінансових збитків.

Перспективним напрямком по розробці нової технології очищення поверхонь трубчастого теплообмінника є застосування кавітаційного генератора. Дослідження виконані в ІТСТ НАНУ [2], указують, що при багаторазовому знакозмінному впливі силових імпульсів тиску рідини (рис.2) й додаткового вібраційного впливу напружено-деформований стан відкладень набуває втомного характеру.

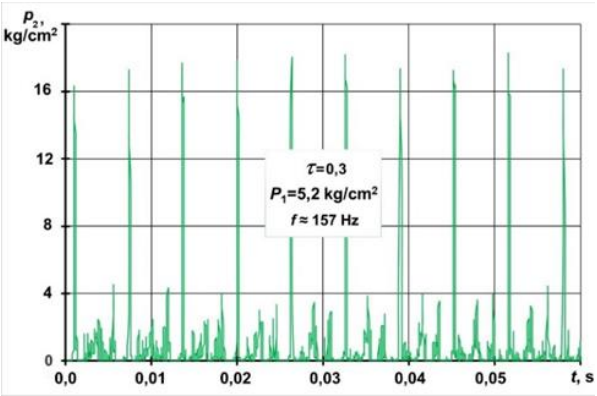


Рис.2 – Процес зміни в часі t експериментальної залежності тиску p_2 у проточній частині вихідного гідравлічного каналу

В наслідок цього, у жорстких забрудненнях інтенсивно розвивається мережа разнонаклонных мікротріщин і відбувається руйнація відкладень. Технологічні процеси очищення поверхонь трубчастого теплообмінника із застосуванням кавітаційного генератора приводять до підвищення швидкості і якості очищення при зниженні питомих енерговитрат до 30%;.

1. Kastner, H.. Featured Story – Field report: cleaning of shell & tube heat exchangers. Heat Exchanger World Publisher. Retrieved from https://dirv.org/wp-content/uploads/2021/04/210120-HEW-magazine-Beitrag-S.-37-41.pdf .(2021).

2. O. D. Nikolayev, Yu. O. Zhulay, A. Yu. Lysenko. Current state of technological processesfor high-performance cleaning of fouled heat exchangers: prospects and research directions. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, No. 1. 76 – 83. https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-1/076. (2026).

Promising direction of technology for cleaning heat exchangers of nuclear power plenty.

Yu. Zhulay[1], O. Nikolayev

Institute of Transport Systems and Technologies of the National academy of sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] juriyjly@gmail.com

Plate and shell-and-tube heat exchangers are widely used in the chemical and food industries, as well as in nuclear and thermal power generation. Physical and chemical phenomena such as sedimentation, crystallization, chemical reactions, corrosion, and biofouling, which occur during heat exchange processes, reduce heat transfer rates, form solid deposits, and foul the internal tubes of heat exchangers. These phenomena are extremely critical for industrial production and can lead to unprecedented financial losses.

Keywords: shell and tube heat exchanger, pipeline surface cleaning, cavitation vibrations, fouling degree diagnostic systems

Чисельний аналіз розрядних кривих для тягових акумуляторів типу AGM

В. І. Єлісєєв[аб1], В. Ю. Скосар[б2]

[а]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Інститут геотехнічної механіки НАН України ім. М. А. Полякова, Дніпро, Україна

[1] Yelisieiev@nas.gov.ua

Ключові слова: акумулятори, електроди, сепаратор, електроліт, потенціал, концентрація, електричний струм.

Для розвитку транспортних систем актуальною проблемою є удосконалення акумуляторних батарей [1]. Технологічні і конструктивні розробки батареї повинні бути погоджені з математичним моделюванням, яке проводиться у двох взаємно доповнюючих напрямках: електричному (побудовою еквівалентних електричних схем [2]) та кінетичному з використанням електрохімічних законів іонообміну в електролітах [3]. Для електромобілів інтерес становлять тягові акумуляторні батареї, в яких позитивні електроди мають два різні конструкції, які обумовлені двома різними станами електролітів: адсорбований в сепараторі (AGM) і гелеподібний (панцирні). У роботі розглянемо електрохімічну комірку для тягового акумулятора типу AGM, яка відрізняється від стартерної комірки тим, що електроди прилягають щільно до сепаратора, що є пористою пластиною. В основу математичного моделювання покладемо рівняння [4], де були проведені розрахунки для стартерного акумулятора. Розроблена в [3, 4] математична модель розряду акумулятора дозволяє визначити криві розряду при заданні геометричних параметрів комірки та електрохімічних параметрів електроліту та електродів. Ми дослідимо вплив величини електричного струму і ширини пластини сепаратора на розрядні криві. Основні рівняння мають вигляд, як і в [4]. Граничні умови враховують перенесення мас та електричних струмів з однієї пористої області до іншої. Приймається, що і вгорі над коміркою і внизу під нею в деяких вільних зонах є достатньо електроліту, тому на межі сепаратора і вільної зони приймається його постійна концентрація. Це припущення дозволяє виявити роль сепаратора у переносі зарядонесучого компонента. Усі параметри електролітів та електродів залишаються такими ж, як і в [4]. Розраховано криві розряду від безрозмірного часу ($\tau = t/T$; t – час; $T = 10^3$ с – масштаб часу) в електрохімічній комірці тягового акумулятора залежно від величини електричного струму та товщини сепаратора. Геометричні параметри пластин: для негативного електрода 1×150×150 мм, для позитивного 1.5×150×150 мм. Встановлено, що величини струмів істотно впливають на розрядні криві, оскільки це пов'язано; по-перше, з певними початковими запасами енергії і, по-друге, зі швидкістю надходження компонента, що заряджає, до електродів акумулятора. Товщина сепараторної пластини відповідальна за своєчасну подачу цього компонента до електродів, тому її товщина має впливати на характер розряду. У нашому граничному випадку (великий запас електроліту) встановлено, що товщина сепараторної пластини слабо впливає на характер розрядних кривих, оскільки електроліт дифузійно з торцевої грані пластини сепаратора встигає надходити із зовнішньої області електрохімічного осередку в потрібну частину електрода.

Характер зміни напруги в комірці за часом дещо інший, ніж у [4]. Нахил цих кривих трохи більший, але зона різкого падіння, характерна для стартерних акумуляторів, відсувається трохи далі за часом.

1. В. Скосар, С. Бурилов, В. Дзензерський. Перспективи застосування електромагнітного транспорту. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 48–60 (2025). https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.048.
2. В. О. Дзензерський, С. В. Плаксін, М. Я. Житник, О. І. Ширман. *Контроль стану хімічних джерел струму, Київ* (2014).
3. V. Esfahanian, P. Kheirhan, H. Bahramian, A. B. Ansori, G. Ahmadi. The Effects of Electrode Parameters on Lead-Acid Battery Perfomance. *Advanced Materials Research*, 651. 492–498. (2013). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.651.492.
4. V. I. Yeliseyev, V. Y. Skosar, M. O. Katrenko. Numerical analysis of the effect of the design and manufacturing parameters of starter lead-acid batteries on their discharge characteristic. *Technical Mechanics*, 4, 93–101. (2025). https://doi.org/10.15407/itm2025.04.093.

Numerical analysis of discharge curves for AGM traction batteries

V. I. Yelisieiev [ab1], V. Yu. Skosar [b2]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.
[b]Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine named after M. A. Polyakov, Dnipro, Ukraine.

[1] Yelisieiev@nas.gov.ua.

Improving batteries is a pressing issue for the development of transport systems and technologies. Battery technology and design are becoming more efficient with the use of mathematical modeling. The mathematical modeling is based on equations from a mathematical model of battery discharge, which allows determining discharge curves when specifying the geometric and electrochemical parameters of the electrolyte and electrodes. We have calculated the discharge curves of a traction AGM battery at different discharge currents and separator thicknesses. It has been established that the magnitude of currents has a significant effect on discharge curves.

Keywords: batteries, electrodes, separator, electrolyte, potential, concentration, electric current.

ORCID: [1]0000-0003-4999-8142; [2]0000-0002-2151-3417.

Визначення раціональних параметрів горіння турбулентних струменів пропану у камерах згоряння енергетичних установок

Г. Є. Дешко

Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

deshanya.itm@gmail.com

Ключові слова: чисельне моделювання, струминна течія, вуглеводневе паливо, турбулентне горіння, спрощені моделі горіння

Турбулентне горіння газоподібних палив відіграє важливу роль у робочих процесах енергетичних установок і газотурбінних двигунів. Математичне моделювання таких процесів є складною задачею, оскільки потребує одночасного опису турбулентного перенесення, тепломасообміну та хімічної кінетики у багатокомпонентних газових сумішах [1, 2]. Використання повної системи рівнянь Нав'є-Стокса з детальними механізмами хімічної кінетики для моделювання турбулентного горіння потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому для інженерних розрахунків широко застосовуються спрощені моделі горіння, що дозволяють зменшити обчислювальні витрати при збереженні прийнятної точності опису основних характеристик процесу [3, 4].

У даній роботі чисельні дослідження струминної турбулентної дозвукової нерівноважної течії в каналі виконані в рамках спрощених рівнянь Нав'є-Стокса – моделі «вузького каналу» [2]. Хімічні перетворення при горінні пропану в повітрі описуються за допомогою глобальної одностадійної кінетичної моделі [4].

Проведені дослідження струминного горіння пропану в супутньому потоці повітря дозволили встановити особливості процесів запалювання та горіння, що впливають на інтенсивність згоряння палива. Показано, що виникнення реакційної зони призводить до уповільнення процесу змішування неперемішаних компонентів пального та окисника. Для скорочення протяжності області горіння доцільно забезпечувати запалювання у зоні сформованої горючої суміші. Встановлено, що у випадку самозаймання раціональною є мінімальна температура окисника, достатня для ініціювання реакції. Для компонентів пропан-повітря така температура становить близько 300 ^{0}C. При течії холодних компонентів пального та окисника ефективним є зміщення перерізу підпалу на певну відстань від перерізу подачі компонентів, що сприяє покращенню змішування та запалюванню підготовленої суміші.

Отримані результати можуть бути використані при аналізі та оптимізації процесів горіння газоподібних палив у камерах згоряння енергетичних установок і газотурбінних двигунів.

1. Th. Poinsot, D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, second ed., Edwards, USA, 520 pp. (2005).
2. В.И. Тимошенко, Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов, Днепропетровск, Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 460 с (2003).

3. R.B. Bramlette, C.D. Depcik, Review of propane-air chemical kinetic mechanisms for a unique jet propulsion application. Journal of the Energy Institute. 93, 857 – 877 (2020). https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.07.010.
4. C.K. Westbrook, F.L. Dryer, Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. Combustion Science and Technology, 27, 31 – 43 (1981). https://doi.org/10.1080/00102208108946970.

Determination of Optimal Combustion Parameters of Turbulent Propane Jets in Combustion Chambers of Energy Systems

H. Deshko

Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

deshanya.itm@gmail.com

Numerical results on mixing, ignition, and combustion of a propane jet issuing into a coflowing air stream are presented. The turbulent subsonic nonequilibrium flow was simulated using two-dimensional steady narrow-channel equations with finite-rate chemical kinetics and a global combustion mechanism. The influence of ignition on the delay of the mixing process in initially unmixed fuel and oxidizer streams is demonstrated. Recommendations are proposed for selecting the rational temperature of the coflowing air and the location of the ignition cross-section to intensify the combustion process. The obtained results may be useful for improving combustion efficiency in energy systems and gas turbine combustion chambers

Keywords: numerical simulation, jet flow, hydrocarbon fuel, turbulent combustion, simplified combustion models.

Створення тривимірної моделі теплопереносу в теплоприймальному каналі з використанням нанорідини в якості теплоносія

А. Г. Борисенко[1], Р. С. Юрков, В. С. Бейцун

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] andrewb1456@gmail.com

Ключові слова: теплоприймальний канал, нанорідина, конвективний теплообмін, параболоциліндричний концентратор, тривимірне моделювання, метод контрольного об'єму.

Інтенсифікація теплообміну є ключовою технологічною проблемою, що виникає в різних галузях енергетики. Ця проблема особливо актуальна при проектуванні сучасних сонячних термодинамічних пристроїв, які набувають все більшого розвитку в рамках світової безвуглецевої концепції [1]. Низька щільність сонячного випромінювання значно ускладнює технологію його термодинамічного перетворення. Реалізація такого перетворення неможлива без використання додаткового наукоємного обладнання, що суттєво підвищує вартість кінцевого енергетичного продукту. Зокрема, для отримання високих температур (від 1000 °C) термодинамічні сонячні енергетичні системи повинні мати у своєму складі спеціальні пристрої – концентратори, які уловлюють сонячні промені та направляють їх на теплоприймач для подальшого перетворення. Геометрія концентратора та теплоприймача залежить від температурного рівня системи. Найбільш популярними є параболоциліндричні концентратори з трубчастими теплоприймальними каналами у фокусі [2]. Концентрований сонячний потік нагріває теплоносій, що рухається в каналі, й далі отримане тепло використовується для різних технологічних потреб або перетворюється в паротурбінному циклі в електрику. Інтенсифікація конвекції в каналі сприяє зменшенню його довжини та загальної площі концентратора. Таке зменшення призведе до зниження вартості найбільш коштовного елементу термодинамічної установки – її системи прийому.

Найбільш перспективним методом інтенсифікації конвективного теплообміну є використання нанорідин, які створюються шляхом додавання в базовий теплоносій наночастинок різної природи (чисті метали та їх хімічні сполуки, вуглецеві нанотрубки та ін.) [3]. Нанорідини мають специфічні термодинамічні властивості, що потребує нових підходів до їх моделювання та розрахунку. Крім того, використання нанорідин у теплоприймальних каналах параболоциліндричних станцій має додаткові особливості, пов'язані з нерівномірним розподілом концентрованого теплового потоку на поверхні каналу [4]. Саме таку 3D математичну модель було розроблено та реалізовано числовим методом на основі створеного Python-коду. В основу моделі покладено класичну систему рівнянь Нав'є–Стокса для нестисненої рідини, що рухається в каналі. Використання моделі тонкого шару дозволило спростити загальну систему рівнянь та сформулювати задачу у вигляді двох рівнянь – 3D рівняння енергії та рівняння руху. Ці рівняння доповнюються нелінійними граничними умовами на зовнішній поверхні теплоприймального каналу, які пов'язані з величиною концентрованого теплового потоку. Аналітичний вираз цієї величини як функції від кута на поверхні каналу було знайдено шляхом апроксимації відомих числових

розв’язків. Теплофізичні властивості нанорідини, що використовувалась як теплоносій, знаходились на основі апроксимації експериментальних даних.

Для побудови числового алгоритму обрано метод контрольного об’єму з процедурою розщеплення за координатними напрямами. Стійкість розрахункової схеми в радіальному та кутовому напрямах забезпечувалась умовами стійкості неявної схеми, а в аксіальному напрямі – вибором відповідного значення для локального числа Пекле. На основі створеного числового алгоритму проведено параметричні дослідження, що визначили перспективи використання обраної нанорідини як теплоносія.

1. Kim, H., Chinnasamy, V., Ham, J., and Cho, H., Parabolic trough collectors: A comprehensive review of design innovations, optimization studies and applications, Energy Conversion and Management, 327, 119534 (2025). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119534
2. Chaanaoui, M., Vaudreuil, S., Eddouibi, J., Ladouy, S., Abderafi, S., and Bounahmidi, T., A detailed 1D model of a parabolic trough solar receiver with a double-validation approach, Energy, 294, 130857 (2024). https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130857
3. Hussain, Z., Lee, M., and Cho, H., Thermophysical advancements and stability dynamics in nanofluids for solar energy harvesting: A comprehensive review, Renewable Energy, 248, 123052 (2025). https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123052
4. Ram, S., Ganesan, H., Saini, V., and Kumar, A., Performance assessment of a parabolic trough solar collector using nanofluid and water based on direct absorption, Renewable Energy, 214, 11–22 (2023). https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.06.016

Development of a Three-Dimensional Heat Transfer Model for a Solar Receiver Channel Using a Nanofluid as the Heat-Transfer Fluid

A. H. Borysenko[1], R. S. Yurkov, V. S. Beitsun

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] andrewb1456@gmail.com

This study addresses the intensification of convective heat transfer in a solar receiver channel of a parabolic-trough system by using a nanofluid as the working medium. Thermophysical properties of the nanofluid were represented by approximations of experimental data. A finite-volume algorithm with coordinate-direction splitting was used for the numerical solution, and parametric calculations were performed to assess the feasibility of the selected nanofluid as a heat-transfer fluid.
Keywords: solar receiver channel, nanofluid, convective heat transfer, parabolic-trough collector, three-dimensional modeling, finite volume method.

Розрахунки напружено-деформованого стану здвоєної прямокутної решітки свинцево-кислотного VLRA-акумулятора

С.В. Тарасов, О.В. Сухова, О.В.[1] Дорош[a]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] sukhovaya@ukr.net

Ключові слова: VRLA-акумулятори, здвоєні прямокутні решітки, числове моделювання, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан, максимальні напруження та зміщення.

Однією із особливостей конструкції VLRA-акумуляторів є використання сплавів Pb–Sn–Ca для виготовлення решіток-струмовідводів [1]. Переваги цих сплавів, а саме високі межа текучості і опір повзучості, забезпечують стійкість до знакозмінних навантажень. Крім того, завдяки природньому старінню, сплави Pb–Sn–Ca мають додатковий ресурс для поліпшення механічних властивостей і корозійної стійкості [2,3]. Однак під час виготовлення решіток на ливарних автоматах виникають численні проблеми, пов'язані з їх небажаною деформацією і викривленням. Ці проблеми можуть бути усунуті з урахуванням напружено-деформованого стану решіток. Вирішенню цієї актуальної задачі присвячена дана робота.

В роботі об'єктом дослідження слугувала здвоєна прямокутна решітка, конструкція, місця кріплення і навантаження якої показані на рис. 1. Визначали максимальні напруження і зміщення, а також місця їх розташування, за допомогою програм «Solid Works» і «Ansus». Для розрахунків використовували грубу сітку.



Рис. 1. Місця кріплення і навантаження здвоєної прямокутної решітки акумулятора

Встановлено, що зона напружень, максимальні значення яких досягають 16,6 кг/см^2, розташована в області затискання вушка. При переході через ребро на нижній грані вушка рівень напружень зменшується в 16,8 рази до 0,99 кг/см^2. По верхній і нижній гранях напруження знижуються в напрямку до середини грані. В центральній частині вушка спостерігається зворотна картина: в центрі напруження більші ніж по краях. Середній рівень напружень, прийнятий за складову напруження стиску, становить 0,352 кг/см^2. Складові напруження згину для середнього вертикального перетину дорівнюють 0,08 кг/см^2, а для горизонтального – 0,05 кг/см^2. Максимальні напруження згину виникають біля ребер вушок, перевищуючи напруження стиску в 1,2 рази, в інших перетинах домінують напруження стиску.

Середній рівень напружень в верхній перемичці, що з'єднує одинарні решітки в здвоєну, дорівнює 4,46 кг/см^2. Напруження згину вздовж середнього вертикального

перетину досягають 3 кг/см^2, тоді як вздовж горизонтального перетину зменшуються до 0,58 кг/см^2. В нижній перемичці середній рівень напружень становить 2,1 кг/см^2. Вздовж середнього вертикального перетину напруження згину дорівнюють 0,95 кг/см^2, а горизонтального – 0,19 кг/см^2. Напруження стиску в верхній перемичці в 2,4 рази перевищують напруження в нижній. Аналогічна картина спостерігається для напружень згину за виключенням горизонтального перетину в нижніх частинах перемичок. Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану перемичок і вушок показує, що рівень напружень у перемичках в рази перевищує напруження у вушках.

Максимальні зміщення в нижній і верхній перемичках мають близькі значення, відрізняючись на 5–10 мм. Максимальні переміщення спостерігаються в нижній частині решітки на ребрі, досягаючи 0,063 мм.

Послуговуючись результатами розрахунків напружено-деформованого стану решіток акумуляторів, був зроблений висновок, що для запобігання їх вибраковуванню, потрібно зміцнювати місце з'єднання одинарних решіток у здвоєну, встановивши додаткову третю перемичку. Цей висновок був повністю підтверджений в промислових умовах виготовлення VLRA-акумуляторів.

1. D. A. J. Rand, T. Moseley, J. Garche, and C. D. Parker, *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*, Elsevier, Amsterdam (2004).
2. O. V. Sukhova, V. A. Polonskyy, K. V. Ustinova, Corrosion-electrochemical properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe–(Si, B) and Al–Ni–Fe alloys in NaCl solution, *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, **124**(3), 46–52 (2019). https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-46-52
3. O. V. Sukhova, Solubility of Cu, Ni, Mn in boron-rich Fe–B–C alloys, *Physics and Chemistry of Solid State*, **22**(1), 110–116 (2021). https://doi.org/10.15330/pcss.22.1.110-116

Calculations of stress-deformed state of double rectangular grid of lead-acid VRLA-battery

S. Tarasov[a], O. Sukhova[a1], O. Dorosh[a]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] sukhovaya@ukr.net

In this study, numerical methods were employed to investigate the stress-deformed state of double rectangular grids made of Pb–Sn–Ca alloy for VRLA-batteries. The maximum values of stress and displacement were calculated using SolidWorks and ANSYS programs of finite element analysis. The recommendations were given to optimize design and prevent deformation and distortion of double grids, which were confirmed in production conditions.

Keywords: VRLA-batteries, double rectangular grids, numerical modelling, finite element method, stress-deformed state, maximal stresses and displacements.

Порівняння характеристик напружено-деформованого стану прямокутних і діагональних решіток свинцево-кислотних акумуляторів

С.В. Тарасов, О.В. Сухова[1], В.А. Іванов, О.Л. Видута

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] sukhovaya@ukr.net

Ключові слова: VRLA-акумулятори, здвоєні решітки, прямокутні та діагональні решітки, числове моделювання, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан, максимальні напруження та зміщення.

В роботі для зміцнення зони з'єднання одинарних решіток-струмовідводів у здвоєну решітку свинцево-кислотних VRLA-акумуляторів запропоновано встановити додаткову третю перемичку. Для аналізу доцільності такої зміни конструкції проаналізовано напружено-деформований стан двох типів здвоєних решіток за допомогою програмного комплексу «ANSYS». Розраховувано максимальні значення напруження і переміщення для решіток з прямокутною і діагональною геометрією.

Додавання третьої перемички до зони з'єднання прямокутних одинарних решіток у здвоєну зменшує максимальні значення напруження та переміщення в 1,46 та 1,51 разів, відповідно. Ці значення суттєво покращуються для діагональних решіток. Причому ефект більш помітний у випадку розташування вушок ближче до центру контуру діагональної решітки. Максимальні значення напруження і переміщення зменшуються відповідно в 2,84 та 6,43 разів порівняно з прямокутною решіткою з аналогічним розташуванням вушок.

Comparison of stress-deformed state of rectangular and diagonal double grids of lead-acid batteries

S. Tarasov[a], O. Sukhova[a1], V. Ivanov[a], O. Viduta[a]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] sukhovaya@ukr.net

In this work, numerical method was employed to investigate the effect of grid configuration and lug position on the stress-deformed state of double rectangular and diagonal grids for lead-acid VRLA-batteries. The maximum values of stress and displacement were calculated using ANSYS program of finite element analysis. The addition of a third jumper at the junction of single grids into the double grid decreased maximum values markedly, especially for the double grids with diagonal geometry and the lug located closer to the midpoint of the frame.

Keywords: VRLA-batteries, double grids, rectangular and diagonal geometry, numerical modelling, finite element method, stress-deformed state, maximal stresses and displacements.

Система магнітної левітації на основі обертового масиву Хальбаха

С.В. Тарасов, М.В. Куваєв[1], М.Г. Снєгірьов

Інститут траспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] kuvaevnv@ukr.net

Ключові слова: магнітна левітація, масив Хальбаха, вихрові струми, обертові масиви Хальбаха, сила відштовхування

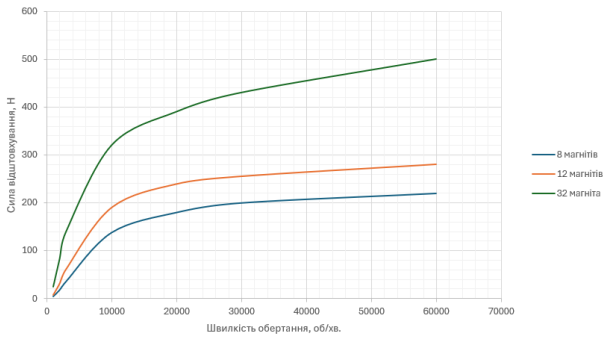
На відміну від традиційних систем магнітної левітації, масив Хальбаха дозволяє отримати потужне поле без застосування енергозатратних електромагнітних котушок, що зменшує експлуатаційні витрати та підвищує надійність. У такому масиві магніти розташовані таким чином, що з одного боку створюється потужне магнітне поле, яке швидко зменшується з ростом відстані від магнітної системи, а з іншого — майже нульове. Це забезпечує стабільну левітацію рухомої капсули, знижує рівень вібрацій і підвищує безпеку системи на високих швидкостях. Крім цього, завдяки асиметричному розподілу магнітного поля, масиви Хальбаха менш впливають на інші елементи транспортної системи з магнітною левітацією.

Водночас, загальним недоліком систем електродинамічних систем магнітної левітації, з нерухомими відносно транспортного засобу елементами, що генерують магнітне поле, є низька ефективність левітації на малих швидкостях та її відсутність під час стоянки.

Для усунення цього недоліку запропоновано застосувати масив Хальбаха у вигляді обертової системи: масив магнітів обертається за допомогою зовнішнього електродвигуна над електропровідною опорною поверхнею , у якості якої у тестовій системі левітації може застосовуватися мідна пластина або набір замкнених електропровідних контурів. Обертання створює змінне магнітне поле, яке індукує вихрові струми у опорній поверхні, які, у свою чергу, формують відштовхувальну силу і забезпечують стабільну левітацію транспортної системи навіть при нульовій поступальній швидкості [1].

Встановлено, що швидкість обертання та кількість полюсів магнітної збірки істотно впливають на величину сили відштовхування [2]. Зі збільшенням швидкості обертання і кількості полюсів спостерігається зростання сили відштовхування. Так на рис.1 надана діаграма залежності сили відштовхування від швидкості обертання для збірок Хальбаха з 8, 12 та 32 магнітів. Одночасно зі збільшенням швидкості обертання зростають і електромагнітні втрати, основна частка яких припадає на втрати від вихрових струмів у мідній пластині.

На практиці це може вимагати застосування систем примусового охолодження при тривалому знаходженні у нерухомому положенні, оскільки нагрів мідної пластини при відсутності зміщення цієї ділянки від магнітної системи спричиняє підвищення температури магнітів, що, у свою чергу, призводить до зниження індукції магнітного поля та, відповідно, до зменшення сили відштовхування.



Подальші дослідження у цьому напрямку планується продовжити для уточнення впливу геометричних параметрів і матеріальних властивостей елементів системи на її ефективність, визначення параметрів системи з іншими варіантами опорних поверхонь, та дослідження розподілу струмів та магнітного поля в системі й їх вплив значення сил відштовхування та потужності втрат.

1. J. Bird and T. A. Lipo, “Characteristics of an Electrodynamic Wheel Using a 2-D Steady-State Model,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 8, pp. 3395–3405, Aug. 2007.
2. Paudel, N., & Bird, J. X. (2012). General 2-D steady-state eddy current analysis of a rotating Halbach permanent magnet cylinder. IEEE Transactions on Magnetics, 48(11), 3037–3040.

Magnetic levitation system based on a rotating Halbach array

S. Tarasov, M. Kuvaiev[1], M. Snehirov

Institute of Transport Systems and Technologies NAS of Ukraine

[1] kuvaevnv@ukr.net

*This text examines the implementation of **Halbach arrays** in magnetic levitation systems. Unlike traditional electromagnetic coils, these arrays generate a concentrated asymmetric magnetic field, which enhances energy efficiency and operational safety.*

*A significant drawback of standard electrodynamic systems is the lack of lift at low speeds. To address this, the study proposes using **rotating Halbach arrays** driven by an external motor. This rotation induces eddy currents in a conductive surface (such as a copper plate), generating a stable repulsive force even at zero translational speed.*

Research indicates that the repulsive force increases with higher rotational speeds and a greater number of magnetic poles. However, prolonged levitation in a stationary position leads to electromagnetic losses and potential overheating, necessitating the use of cooling systems. Further research aims to optimize geometric parameters and material properties to improve overall system efficiency.

Keywords: *magnetic levitation, halbach array, eddy currents, rotating halbach arrays, repulsive force*

Ефективність керування обертанням ротора Дар'є змінами його конфігурації та гальмівного моменту генератора

С. В. Тарасов, О. Н. Молотков[1]

Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] olegmolotkov57@gmail.com

Ключові слова: вітроенергетичні установки, ротор Дар'є, стабілізація обертання, стійкість, ефективність, математичне моделювання

Будь-яка сучасна вітроенергетична установка (ВЕУ) має систему стабілізації, що підтримує її роботу поблизу точки оптимуму, яка відповідає поточній швидкості вітру. В роботі, що пропонується, моделюються перехідні процеси в замкнутій системі стабілізації обертів ротора Дар'є ВЕУ, що керується змінами його конфігурації – змінами довжини лопатей і траверс [1], а також гальмівного моменту генератора на постійних магнітах [2]. Розглядались наступні варіанти будови системи стабілізації: 1) із керуванням лише гальмівним моментом генератора; 2) із *пропорційно-інтегральним алгоритмом* з сумісними змінами довжини лопатей і моменту спротиву генератора; 3) із *пропорційно-інтегральним алгоритмом з корекцією за прискоренням* з сумісними змінами конфігурації ротора і моменту спротиву генератора.

Ефективність роботи систем стабілізації характеризувалась показниками якості регулювання. Аналіз наведених на рис. 1 результатів моделювання дозволяє зробити наступні висновки:

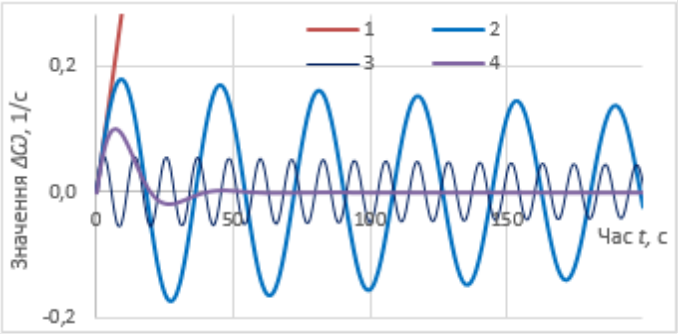


Рис. 1. Залежності $\Delta\omega$ від часу t із алгоритмами 1-3: залежність 1 – алгоритм 1; залежності 2 і 3 – алгоритм 2 із коефіцієнтами зворотного зв'язку -6*м* і -60*м* відповідно; 4 – алгоритм 3

– алгоритм стабілізації обертання ротора ВЕУ із використанням генератора на постійних магнітах найбільш простий в реалізації але має найгірші показники якості регулювання – малу ступінь стійкості і відповідно велику довжину перехідних процесів, не забезпечує відсутності статичної помилки регулювання за відхиленнями швидкості обертів ротора і керуючого струму генератора;

– *пропорційно-інтегральний алгоритм стабілізації* із сумісними змінами довжини лопатей і моменту спротиву генератора забезпечує відсутність статичної помилки регулювання, має проміжну серед трьох алгоритмів ступінь стійкості і

довжину перехідних процесів, значну коливальність і дуже малий декремент загасання; зменшення коефіцієнту зворотного зв'язку забезпечує зменшення перерегулювання, але збільшує коливальність системи, що несприятливо позначається на динамічних властивостях системи;

– *пропорційно-інтегральний алгоритм з корекцією за прискоренням* із сумісними змінами конфігурації ротора і моменту спротиву генератора забезпечує відсутність статичної помилки регулювання, має найкращі серед трьох алгоритмів ступінь стійкості, довжину перехідних процесів, незначні коливальність і перерегулювання, дозволяє роздільно керувати ступенем стійкості і коливальністю.

Висновок. Всі алгоритми стабілізації забезпечують стійкість замкнутої системи, а пропорційно-інтегральний і алгоритм з корекцією за прискоренням мають додаткову перевагу – наявність нульового кінцевого значення не тільки для змін швидкості обертів ротора, а і для змін керуючого струму генератора.

Анотація. *Проведено моделювання перехідних процесів в системі стабілізації швидкості обертів ротора вертикально-осьових ВЕУ, керованих змінами його конфігурації і гальмівного моменту генератора на постійних магнітах. Доведено, що пропорційно-інтегральний і алгоритм з корекцією за прискоренням мають перевагу – наявність нульового кінцевого значення не тільки для змін швидкості обертів ротора, а і для змін керуючого струму генератора.*

1. С. В. Тарасов, О.Н. Молотков, *Стабілізація обертання ротора Дар'є сумісними змінами довжини лопатей і траверс*. Технічна механіка, 2024, № 2, с. 92 - 105. https://doi.org/10.15407/itm2024.02.0 92.
2. R. Melício, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão. *Fractional order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology.* Energy Conversion and Management, June, 2010, p.1250-1258.

Efficiency of controlling the rotation of the Darier rotor by changing its configuration and the braking torque of the generator

S. Tarasov[a], O. Molotkov[a1]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] olegmolotkov57@gmail.com

Abstract. *The transient processes in the rotor speed stabilization system of vertical-axis wind turbines controlled by changes in its configuration and the braking torque of the permanent magnet generator have been simulated. It has been proven that the proportional-integral and acceleration-corrected algorithms have the advantage of having a zero final value not only for changes in the rotor speed, but also for changes in the generator control current.*

Keywords: wind power plants, Darier rotor, rotation stabilization, stability, efficiency, mathematical modeling

Вплив товщини постійного магніту на електромагнітний момент електричної машини з поперечним полем

М.В. Куваєв[1], О.В. Александров

Інститут траспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[1]kuvaevnv@ukr.net

Ключові слова: електрична машина з поперечним полем, Transverse flux motor(TFM), постійні магніти, момент, товщина магніту.

Електрична машина з поперечним полем (Transverse flux motor(TFM)) є синхронною електричною машиною зі збудженням від постійних магнітів, але має суттєву принципіальну відмінність від стандартних синхронних, асинхронних машин або машин постійного току. У стандартних електричних машин площина обертання є також площиною дії магнітного поля машини, тому стандартні машини ще називають машинами з продольним магнітним полем (нім. Longitudinalflussmaschinen), а магнітний потік TFM діє у площині, що поперечна площині обертання [1, 2, 3].

При проєктуванні TFM важливим є раціональний вибір товщини магніту.

Розмір постійного магніту впливає на момент електродвигуна $M_{\text{н}}$.

Для знаходження моменту TFM через геометричні параметри двигуна та його електромагнітні параметри зазвичай використовують наступну формулу [1]:

$$M_{н} = m \cdot p \cdot F_{рп} \cdot \alpha_{з} \cdot \alpha_{м} \cdot \frac{d_{\delta}}{2} \tag{1}$$

де m – кількість фаз, p - кількість пар полюсів, $F_{\text{рп}}$ - рушійна сила однієї пари полюсів (один статорний U-магнітопровід) фази, $\alpha_{\text{з}}$ – коефіцієнт полюсного перекриття зубця магнітопроводу, α_M - коефіцієнт полюсного перекриття постійного магніту, d_δ – діаметр повітряного зазору.

Електрорушійна сила однієї пари полюсів , згідно з [1], знаходяться наступним чином:

$$F_{рп} = 2 \cdot b_M \cdot 2 \cdot \Theta_M \cdot \frac{\mu_0 \cdot \Theta_1}{2 \cdot \left(\frac{l_M}{\mu_M} + \delta\right)} \cdot k, \tag{2}$$

де Θ_1 - ампер-вітки статорної обмотки, Θ_{M} - еквівалентні ампер-вітки постійного магніту, l_M – товщина постійного магніта, μ_{M} - магнітна проникність постійних магнітів, δ – довжина повітряного проміжку, μ_0 - магнітна стала, b_M – ширина зубця магнітопроводу статора, k – корегувальний фактор.

Залежність $F_{рп}$ від положення ротора спричиняє пульсації, тому для визначення її середнього значення вводять корегувальний фактор $k = 0{,}6–0{,}8$[1, 4].

Таким чином залежність обертового моменту M^* від товщини постійного магніту у напрямку повітряного проміжку l_M при незмінних інших параметрах наведена на рис.1. Обертовий момент M^* наданий у відносних одиницях та знаходиться, як відношення поточного значення моменту до номінального:

$$M^* = \frac{M}{M_{\text{н}}}. \tag{5}$$

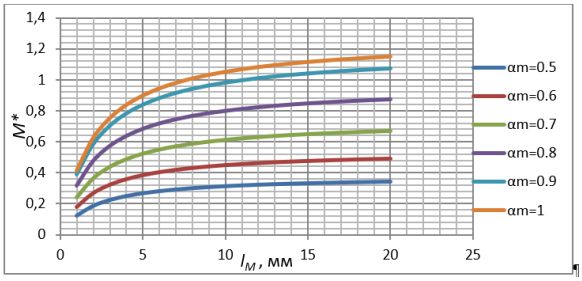


Рис. 1 Залежність обертового моменту M^* від довжина постійного магніту у напрямку повітряного проміжку

Наведена залежність отримана для електричної машини з поперечним полем потужністю 40 кВт; однак її характер зберігається для всіх машин цього типу. Як видно з рис. 1, раціональне значення l_M для високомоментного двигуна потужністю 40 кВт становить 6–10 мм. Подальше збільшення l_M не дає суттєвого приросту моменту, але значно підвищує вартість TFM через більшу кількість постійних магнітів.

1. E. Nolle und A. Beshta, Elektrische Maschinen und Antriebe, 1st ed. Dnipropetrovsk: Nationale Bergbauuniversität, 2013.
2. Transversalflussmaschine", De.wikipedia.org, 2017. [Online]. Available: ttps://de.wikipedia.org/wiki/Transversalflussmaschine. [Accessed: 10- Apr- 2017].
3. М.В. Куваєв, "Вибір конструкції електричної машини з поперечним полем для використання в приводі нового сервопреса", Гірнича електромеханіка та автоматика, № 97, с. 60-66, 2016.
4. R. Fischer, Elektrische Maschinen, 1st ed. München: Hanser, 2013.
5. E. Nolle and M. Kuvaiev, "Linear 3-phase transverse flux maschine with flux concentration", Науковий вісник Національного гірничого Університету, № 2, с. 79-83, 2015

Influence of Permanent Magnet Thickness on the Electromagnetic Torque of a Transverse Flux Electrical Machine

M. Kuvaiev[a1], O. Aleksandrov[a]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies NAS of Ukraine

[1] kuvaevnv@ukr.net

This study analyzes the design principles of Transverse Flux Motors (TFM), highlighting their fundamental difference from conventional longitudinal machines where the magnetic flux acts perpendicular to the plane of rotation. The research emphasizes that the rational selection of permanent magnet thickness is a critical design factor, as it directly dictates the motor's torque density and overall cost-effectiveness. By examining a 40 kW high-torque TFM, the analysis identifies an optimal magnet thickness range of 6–10 mm, noting that exceeding these dimensions leads to diminishing returns in torque while significantly increasing material expenses. Furthermore, while a higher pole coverage coefficient generally enhances torque, this relationship is physically constrained by magnetic leakage fields, necessitating a precise balance between the magnetic circuit's geometric parameters and the motor's energy efficiency.

Keywords: transverse flux electrical machine, Transverse Flux Motor (TFM), permanent magnets, torque, magnet thickness.

Визначення осьової сили потоку в імпульсних моделях Н-ротора Дар'є

С. В. Тарасов[1], І. Ю. Костюков, С.В. Мойсеєнко, В. С. Бейцун

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] tsv.transmag@gmail.com

Ключові слова: імпульсна модель, вертикально-осьовий Н-ротор Дар'є, осьова сила, коефіцієнт індукції потока, емпіричне співвідношення Глауерта.

В імпульсних моделях Н-ротора Дар'є відповідно до класичної імпульсної теорії ідеального вітродвигуна, аналогічно горизонтально-осьовим роторам, коефіцієнт осьової сили вертикально-осьового Н-ротора обчислюють по рівнянню (1). При значенні коефіцієнта індукції потоку a = 0,5 коефіцієнт осьової сили досягає максимального значення C_q = 1,0

$$C_q = 4a(1-a). \qquad (1)$$

При збільшенні коефіцієнта індукції потоку від 0,5 до 1,0, коефіцієнт осьової сили потоку C_q згідно з рівнянням (1) повинен зменшуватися до нуля. Однак, у реальному потоці коефіцієнт C_q збільшується до значення 2,0. Така невідповідність теорії і практики пов'язана з обтіканням ротора реальним потоком на відміну від прийнятого в теорії потенційного потоку ідеальної рідини. Для подальшого розгляду обираємо залежність Глауерта, яка була отримана експериментальним шляхом

$$C_q = 0{,}86 + 1{,}56(a - 0{,}143)^2. \qquad (2)$$

Через відміну поля обтікання горизонтально-осьового і вертикально-осьового роторів, застосувати оригінальну формулу Глауерта в імпульсних моделях Н-ротора не можна. Аналіз робіт по дослідженню обтікання непроникного циліндра і Н-ротора показав якісну відповідність поля течії навколо цих двох тіл. Так, при математичному моделюванні циліндра визначено, що аналогічно Н-ротору зі збільшенням швидкості обертання осьовий тиск потоку на циліндр зменшується [1]. При експериментальних дослідженнях встановлено, що з зростанням швидкості обертання циліндра, його фактичний опір збільшується [2]. Ці результати дозволяють в якості аналога Н-ротора розглядати непроникливий циліндр.

Горизонтально-осьовий ротор розглядаємо як плоский диск з коефіцієнтом опору $C_{q\ пласт} \approx 1{,}0$, а вертикально-осьовий Н-ротор - як круговий циліндр з коефіцієнтом опору $C_{q\ цил} \approx 0{,}6$. Тому, при допущенні про відповідність між осьовими силами горизонтально-осьового ротора - $C_{q\ HAWT}$, і Н-ротора - $C_{q\ VAWT}$, можна записати рівняння $0{,}6\ C_{q\,HAWT} = C_{q\,VAWT}$. Підставляючи цей вираз в рівняння (3), отримуємо коефіцієнт $C_{q\ VAWT}$ для Н-ротора

$$C_{q\,VAWT} = 0{,}516 + 0.936(a - 0{,}143)^2. \qquad (3)$$

Відповідно до графіку на рис. 1 емпіричний коефіцієнт осьової сили $C_{q\ VAWT}$ при значеннях коефіцієнта індукції потоку $a > 0{,}4$ завжди перевищує цей параметр для значень $a < 0{,}4$. Виходячи з цього, критерієм застосування рівняння (4) приймається коефіцієнт корегування осьової сили K_q, який обчислюється як відношення коефіцієнта осьової сили $C_{q\ VAWT}$ з рівняння (3) до розрахункового коефіцієнта $C_{q\ сер}$

$$K_q = {C_{Q\,VAWT}}\Big/{C_{q\,сер}}, \qquad (4)$$

де коефіцієнт осьової сили Н-ротора $C_{q_{cep}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} C_q(\theta_i)$; $C_q(\theta_i)$ - миттєві значення коефіцієнта поздовжньої сили; m - кількість розрахункових точок одного оберту.

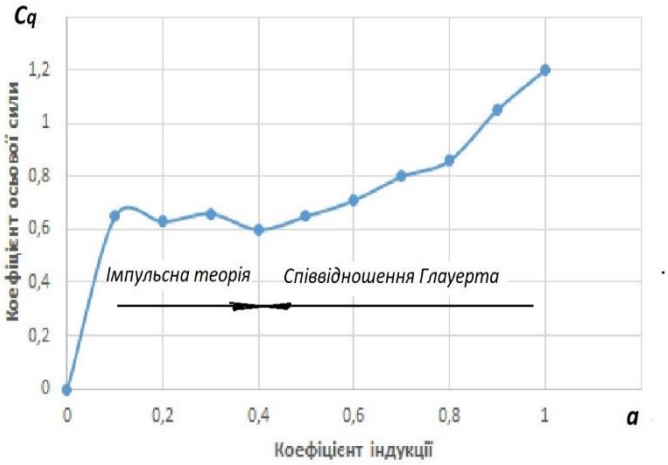


Рис. 1. Коефіцієнт осьової сили Н-ротора як функція коефіцієнта індукції потоку

Результати дослідження дозволяють підвищити точність імпульсних моделей при обчисленні характеристик Н-ротора.

1. Редчиц Д.А., Гуржий А.А. Численное моделирование эффекта Магнуса при обтекании кругового цилин-дра невозмущенным потоком вязкой жидкости / Прикладна гідромеханіка, Том 14, № 1. – 2012. – С. 63 – 71.
2. Бычков Н.М. Ветродвигатель с эффектом Магнуса. Характеристики вращающегося цилиндра / Теплофизика и аэромеханика, Том 12, № 1. – 2005. – С. 159 – 175.

Determining Flow Thrust in Momentum Models of the Darrieus H-Rotor

S. Tarasov[a1], I. Kostiukov[a], S. Moiseienko[a], V. Beitsun[a]

[a] Institute transport systems and technologies, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] tsv.transmag@gmail.com

This study examines the empirical Glauert relationship for the thrust coefficient of a horizontal-axis wind turbine within the range of flow induction factors from 0.5 to 1.0 and applies this relationship in momentum models of the vertical-axis Darrieus H-rotor. The similarity between the flow around a flat plate and a horizontal-axis rotor, as well as between an impermeable cylinder and an H-rotor, enables the use of drag coefficients of a plate and a cylinder to adapt the Glauert relationship to the aerodynamic properties of the Darrieus H-rotor. The paper proposes a method for correcting the thrust coefficient of the H-rotor in momentum model calculations. The results of the study improve the accuracy of momentum-model predictions of H-rotor performance characteristics.

Keywods: momentum model, vertical-axis Darrieus H-rotor, thrust force, flow induction factor, Glauert empirical relation.

Аналіз напружено-деформованого стану композитних акумуляторних пластин із внутрішньою мідною основою

О.В. Дорош[1], А.С. Тарасов, И.Б. Чашина, В.П. Гладенко

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Україна

[1] olchik.dorosh@gmail.com

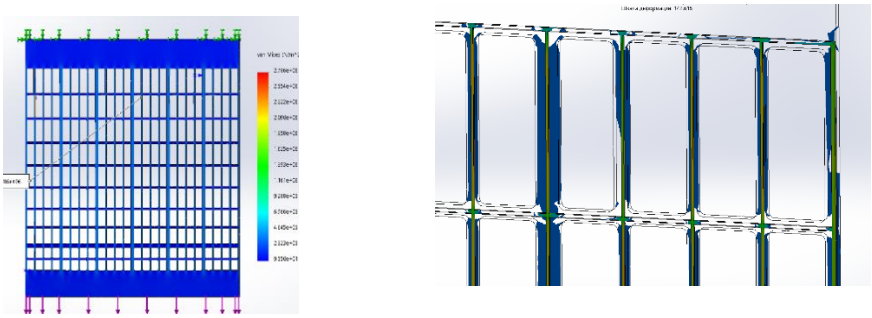
Ключові слова: композитні пластин, свинцево-кислотний акумулятор, напружено-деформований стан, мідна решітка, вібраційні навантаження.

Існує широкий спектр типів акумуляторних батарей, зокрема свинцево-кислотних, призначених для роботи в умовах підвищених механічних та вібраційних навантажень. До них відносяться тягові та стартерні акумулятори, що експлуатуються в техніці схильній до інтенсивних циклів швидкого розряду і частого заряду. Для таких акумуляторів особливо важливою є висока міцність і надійність конструкції решітки [1]. Класичні свинцеві грати мають обмежену механічну міцність і корозійну стійкість, що знижує довговічність батарей. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка композитних пластин, що поєднують переваги кількох матеріалів – високої електропровідності міді та корозійної стійкості свинцевих сплавів.

Дослідження кінетики корозійних процесів свинця та свинцевих сплавів у середовищі сірчаної кислоти засвідчили суттєвий вплив легувальних елементів на інтенсивність хімічної корозії. Встановлено, що додавання олова понад 0,3 мас.% сприяє зниженню швидкості корозії, тоді як присутність кальцію, навпаки, активує процеси окиснення. Мідь у концентраціях понад 0,01 мас.% істотно підвищує корозійну стійкість свинцю в киплячій H_2SO_4 за рахунок формування захисних плівок на поверхні та зменшення швидкості анодного розчинення. Завдяки високій електропровідності і здатності стабілізувати структуру при електрохімічному навантаженні, мідь ефективно виконує функцію внутрішньої основи композитних пластин. Її наявність забезпечує рівномірний розподіл струму, зменшення локальних термонапружень та підвищення довговічності конструкції в умовах циклічного навантаження.

В доповіді наведено результати чисельного дослідження напружено-деформованого стану композитних акумуляторних пластин, отриманих методом електроформування. Конструкція включає внутрішньою мідною решіткою, на яку електроосадженням нанесені шари свинцевого сплаву. Таке поєднання матеріалів забезпечує високу міцність при малій вазі та добру електропровідності, що робить композитні пластин перспективними для застосування в сучасних акумуляторних системах.

Як базова модель прийнята решітка типу D1 «+» з перпендикулярним розташуванням горизонтальних і вертикальних жилок. Товщина внутрішніх мідних решіток варіювалася. Граничні умови імітували реальні експлуатаційні навантаження: верхня грань була жорстко закріплена, а до нижньої прикладалося зусилля, що розтягує.



Напруги на внутрішній мідній решітці

Ррозроблено та змодельовані експериментальні моделі тривимірних композитних пластин з внутрішніми мідними решітками. Досліджено напружено-деформований стан композитних акумуляторних та визначено вплив товщини мідних решіток на її міцність. На основі аналізу отриманих результатів визначено небезпечні перерізи та зони руйнування струмовідводів різного конструктивного виконання.

1.Dzenzerskiy V., Tarasov S.V., Sukhova O.V., Ivanov V.A., Dorosh O. Optimization of grid configuration for lead-acid batteries by investigating grid deformation via numerical modeling // Romanian Journal of Physics. — 2025. — Vol. 70, No. 7–8. — Art. 911. — DOI: https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2025.70.911

Analysis of the stress-strain state of composite battery plates with an internal copper base

O. Dorosh[1], A. Tarasov, I. Chashina , V. Gladenko

Institute transport systems and technologies, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] olchik.dorosh@gmail.com

The results of a numerical study of the stress-strain state of composite battery plates obtained by the electroforming method are presented. Structurally, the grid consists of an internal copper grid, on which layers of lead alloys are deposited by the electroforming method. Based on finite element calculations, the influence of the thickness of the internal copper base on the characteristics of the composite plates is determined.

Keywords: composite plates; lead-acid battery; stress-strain state; copper grid; vibration loads.

Врахування характеристик горизонтальної траверси в імпульсних моделях Н-ротора Дар'є

І.Ю. Костюков, С.В. Мойсеєнко,А.С. Тарасов[1], І.Б. Чашина

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] tsv.transmag@gmail.com

Ключові слова: імпульсна модель, вертикально-осьовий Н-ротор Дар'є, горизонтальна траверса, скошене крило, кут скосу потоку, аеродинамічний опір траверси.

За даними Б. Кірке, на початку розвитку вітроустановок з Н-ротором, втрати потужності через аеродинамічний опір його траверс складали від 18 до 90% від загальних втрат. З цієї причини для підвищення ефективності Н-ротора пропонується методика, яка визначає і враховує вплив горизонтальних траверс на загальні характеристики ротора, що обчислюються імпульсними моделями.

Дослідження розглядає одинарну горизонтальну траверсу Н-ротора як авіаційне крило з нульовим кутом атаки. При цьому, обтікання горизонтальної траверси локальним відносним потоком має декілька принципових відмінностей від лопаті ротора:

- кут атаки траверси дорівнює нулю, тому на неї діє лише сила опору;
- розрахункові елементи траверси розташовані на різних відстанях від осі ротора, тому мають різні швидкості зустрічного потоку;
- вектор швидкості локального потоку на елементі траверси відхилений від перпендикуляра до його передньої кромки;
- елемент траверси, з точки зору аеродинаміки, є елементом скошеного крила;

Згідно з теорією скошеного крила за основу розрахункової схеми горизонтальної траверси приймають принцип еквівалентності скошеного крила і прямого крила, яке є перпендикулярним вектору швидкості локального відносного потоку. Для обчислення характеристик траверси потрібні швидкість локального потоку $W_{ел}$ і кут скосу локального потоку $\chi_{ел}$. Швидкість локального потоку елементу траверси $W_{ел}$ визначається як сума швидкості вітрового потоку V і швидкості зустрічного потоку $U_{ел}$. Кут скосу локального потоку $\chi_{ел}$ є кутом відхилення вектору $W_{ел}$ від перпендикуляру до передньої кромки елементу траверси. Параметри потоку елементів траверси $W_{ел}$ і $\chi_{ел}$ обчислюють аналогічно швидкості локального потоку W і кута атаки α лопаті, з врахуванням кривини зустрічного потоку по методиці Мандала-Бартона [1].

Аеродинамічна тангенціальна сила елементу траверси визначається згідно з теорією елементу лопаті через силу опору

$$C_T = -C_D \cos\chi_{0_{ел.}} \qquad (1)$$

Коефіцієнт потужності горизонтальної траверси Н-ротора є негативною величиною, яка показує втрати аеродинамічної потужності лопатей ротора, на подолання опору траверс. Якщо потужність опору траверс ротора визначити як $P_{тр} = M_{тр}\,\omega$, а потужність P_0 вільного вітру записати формулою $P_0\,V_0^3\,R\,H$, то коефіцієнт потужності горизонтальних траверс Н-ротора по рівнянню (2) має вигляд

$$C_{p_{тр}} = \frac{\sigma\,\lambda_{up}\,V_{up}}{2\pi\,V_0^3\,R\,H}\int_0^{2\pi}\int_{r_{min}}^{r_{max}} C_{T_{ел}}(r)\;W_{ел}^2(r)\,r\,dr\,d\theta, \qquad (2)$$

де σ - заповнення; λ_{up} - швидкісність навітряної лопаті; V_{up} - індукована швидкість вітру; $C_{Тел}(r)$ - коефіцієнт тангенціальної сили елементу траверси на радіусі r; $W_{ел}(r)$ - швидкість локального потоку на елементі траверси на радіусі r; r_{min} і r_{max} - мінімальний і максимальний радіус елементів траверси; dr - довжина елементів траверси; dθ - азимутальний крок розрахункових положень траверси.

В подвійному інтегралі рівняння (2), змінна $C_{Тел}(r)$ є табличною функцією, тому обчислення інтегралу виконують чисельним інтегруванням. Коефіцієнт $C_{Тел}(r)$ і коефіцієнт потужності траверс ротора є негативними. Результати дозволяють підвищити точність обчислення характеристик Н-ротора.

1. Mandal A. C., Barton J. D. The effects of dynamic stall and flow curvature on the dynamics of Darrieus turbines applying cascade model / Wind Engineering. Vol.18, No. 6. – 1994. – P. 267 – 282.

Characterization of the Horizontal Arm in Momentum Models of the Darrieus H-Rotor

I. Kostiukov[a], S. Moiseienko, A. Tarasov[a], I. Chashina[a]

[a] Institute transport systems and technologies, National Academy od Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] tsv.transmag@gmail.com

The paper presents a methodology for calculating the aerodynamic and energy characteristics of the horizontal arm of an H-rotor, as well as for accounting for these characteristics in the performance of the rotor as a whole. The study treats the horizontal arm as a swept wing rotating about a vertical axis. The analysis considers the main principles of the arm calculation methodology and highlights the differences between the flow around a horizontal arm and that around a vertical blade. The calculation scheme represents the arm as a swept wing and, in accordance with swept-wing theory in subsonic flow, applies the principle of equivalence between swept and unswept wings. The proposed methodology accounts for the influence of the horizontal arm on the efficiency of the H-rotor by calculating and summing the power coefficients of the blades and the arms.

Keywods: momentum model, vertical-axis Darrieus H-rotor, *horizontal arm, swept wing, flow skew angle, aerodynamic drag of the arm*.

Вплив тривалості старіння на міцнісні характеристики сплавів Pb-Ca-Sn для струмовідводів свинцево-кислотних акумуляторів

В.О. Дзензерський[a], О.В. Сухова[1], В.А. Іванов

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] sukhovaya@ukr.net

Ключові слова: свинцево-кислотні акумулятори, сплави свинець-олово-кальцій, природнє старіння, дисперсійне зміцнення, тимчасова міцність, відносне подовження

Натепер однією з вимог ринку свинцево-кислотних акумуляторів є зниження витрат споживачів на їх обслуговування, пов'язаних з необхідністю періодичного поповнення електроліту і додаткової зарядки. Цю проблему вирішують шляхом використання свинцево-кальцієвих сплавів для виготовлення струмовідводів [1]. Однак ці сплави схильні до міжкристалітної корозії, оскільки кальцій має подрібнюючий ефект, що призводить до збільшення швидкості корозії [2]. Негативну дію кальцію на корозійну стійкість можна знизити за рахунок легування сплавів Pb–Ca оловом. Крім того, у сплавів Pb–Sn–Ca є додатковий ресурс для поліпшення механічних властивостей завдяки природньому старінню [3,4]. Перспективними до використання є сплави Pb–Sn–Ca, що містять до 1,1 ваг.% Sn і до 0,1 ваг.% Ca (Pb – залишок) [1], однак вплив тривалості старіння на їх міцнісні характеристики досліджений недостатньо. Тому цю роботу присвячено вивченню цього питання.

Міцнісні характеристики на розтяг сплавів Pb–Sn–Ca вимірювали на випробувальній машині TIRAtest 2300 за температури 20±5°C. Досліджувані зразки виготовляли відповідно до вимог стандарту ДСТУ 11701-84. Середні значення тимчасової міцності на розрив та відносного подовження визначали за результатами випробувань 10 зразків. Похибка вимірювання не перевищувала 3–5%.

Залежно від співвідношення вмісту олова і кальцію (%Sn/%Ca) в досліджених сплавах Pb–Sn–Ca спостерігаються різні тенденції зміни їх міцнісних характеристик у ході природнього старіння під час зберігання на складі. Тимчасова міцність сплаву Pb–0,3%Sn–0,1%Ca (%Sn/%Ca=3) в ході старіння практично не змінюється, а подовження зменшується на 17,6%. Структура цього сплаву характеризується виділенням кристалів надлишкової фази Pb_3Ca з пересиченого кальцієм твердого розчину на основі α-Pb. Цей процес в основному завершується впродовж перших 1–3 діб.

Міцнісні характеристики сплаву Pb–0,7%Sn–0,08%Ca (%Sn/%Ca=8,75) більшою мірою змінюються впродовж перших 10–12 діб старіння, а потім темп зміни уповільнюється. Протягом першого періоду часу тимчасова міцність на розрив збільшується на 38,7%, а потім з продовженням старіння до 35 діб – лише на 11,6%. Відносне подовження впродовж 10–12 діб знижується на 30,8%, а під час старіння впродовж наступних 23 діб – на 27,8%. На властивості цього сплаву впливає виділення дисперсних надлишкових фаз з пересиченого оловом і кальцієм твердого розчину на основі свинцю. Причому впродовж перших 10–12 діб старіння виділяються зміцнювальні фази Pb_3Ca, $(Pb,Sn)_3Ca$ і Sn_3Ca, що обумовлює більший темп зміни

механічних характеристик. А потім темп уповільнюється через недостатню кількість олова для утворення зміцнювальної фази Sn_3Ca.

Для сплаву Pb–1,1% Sn–0,05% Ca (%Sn/%Ca=22) впродовж дослідженого періоду старіння спостерігається більш монотонна зміна механічних властивостей. Тимчасова міцність на розрив збільшується в 2,7 рази, а відносне подовження зменшується в 2,4 рази. Співвідношення вмісту олова і кальцію в цьому сплаві є достатнім для неперервного утворення зміцнювальних надлишкових фаз Pb_3Ca, $(Pb,Sn)_3Ca$ і Sn_3Ca з пересиченого оловом і кальцієм твердого розчину на основі α-свинцю.

Таким чином, зміни в структурі сплавів Pb–Sn–Ca, викликані проходженням процесів природнього старіння впродовж 35 діб, супроводжуються підвищенням міцності на розрив та зниженням відносного подовження. Залежність цих властивостей від тривалості старіння зростає зі збільшенням значення співвідношення вмісту олова та кальцію, досягаючи максимального ефекту для сплавів з %Sn/%Ca=22.

1. D. A. J. Rand, T. Moseley, J. Garche, and C. D. Parker, *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*, Elsevier, Amsterdam (2004).
2. O. V. Sukhova, V. A. Polonskyy, K. V. Ustinova, Corrosion-electrochemical properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe–(Si, B) and Al–Ni–Fe alloys in NaCl solution, *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, **124**(3), 46–52 (2019). https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-46-52
3. O. V. Sukhova, Solubility of Cu, Ni, Mn in boron-rich Fe–B–C alloys, *Physics and Chemistry of Solid State*, **22**(1), 110–116 (2021). https://doi.org/10.15330/pcss.22.1.110-116
4. C. Camurri, C. Carrasco, O. Prat, R. Mangalaraja, A. Pagliero, and R. Colàs, Study of precipitation hardening in lead calcium tin anodes for copper electrowinning, *Mater. Sci. Technol.*, **26**(2), 210–214 (2010). https://doi.org/10.1179/ 174328409x443245

Influence of ageing time on tensile properties of Pb-Ca-Sn grid alloys for lead-acid batteries

V. Dzenzerskiy[a], O. Sukhova[a1], V. Ivanov[a]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] sukhovaya@ukr.net

Tensile properties of Pb–Sn–Ca alloys (0,3–1,1 wt% Sn; 0,05–0,1 wt% Ca; Pb – balance) for grids of lead-acid batteries were investigated. Ultimate tensile strength and relative elongation were determined using TIRAtest 2300 universal testing machine at room temperature. After natural ageing for 35 days during storage at ambient temperature, ultimate tensile strength of the alloys increases but elongation decreases. Strengthening occurred rapidly primarily within first 3 days of ageing. Ageing processes have a greater effect on mechanical properties of precipitation-hardened Pb–Sn–Ca alloys when ratio of tin-to-calcium content increases up to 22.

Keywords: lead-acid batteries, lead-tin-calcium grid alloys, natural ageing, precipitation hardening, ultimate tensile strength, relative elongation.

Комплексна методологія визначення континуальних та локальних податливостей елементів багатоланкових механічних систем

В. С. Бейцун[1], С. В. Тарасов

[a] Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] beitsun98@gmail.com

Ключові слова: багатоланкова система, динаміка, податливість, шарнірний вузол, фланцеве з'єднання, математичне моделювання, фотограмметрія, експериментальне моделювання.

Сучасний розвиток робототехніки та аерокосмічної техніки зумовлює потребу у створенні складних багатоланкових просторових механізмів. Адекватне математичне моделювання їх просторової динаміки та точності позиціонування неможливе без детального врахування пружно-деформаційних властивостей елементів. Крім того, важливою метою такого моделювання є точне визначення просторових відхилень у кожному елементі конструкції для подальшого прецизійного налаштування алгоритмів системи керування рухом.

Загальна податливість багатоланкової системи формується за рахунок двох основних складових: континуальної (пружні деформації ланок) та локальної (деформації та конструктивні люфти з'єднувальних елементів, зокрема фланцевих з'єднань та шарнірних вузлів). Використання зведеної жорсткості для всієї конструкції призводить до суттєвих похибок. Тому актуальним завданням є розробка методології, яка б дозволяла роздільно ідентифікувати ці складові.

Запропоновано комплексну методологію, що базується на поєднанні числового математичного моделювання та натурних експериментів. Такий підхід дає змогу ефективно використовувати переваги обох методів для визначення матриць податливості. Згідно із запропонованою методологією, континуальна податливість ланок визначається розрахунковим шляхом. Оскільки ланки виготовляються з матеріалів із відомими фізико-механічними характеристиками, їх деформаційна поведінка з високою точністю описується аналітичними методами [1] опору матеріалів або за допомогою верифікованих просторових моделей на основі методу скінченних елементів.

Водночас локальна податливість з'єднань має складну нелінійну природу, тому визначається шляхом експериментального моделювання з урахуванням специфіки конкретного типу вузла. Зокрема, для дослідження податливості шарнірних вузлів ефективним є застосування високоточного безконтактного фотограмметричного методу [2], який дозволяє просторово фіксувати переміщення елементів і визначати параметри вибірки конструктивних люфтів без внесення додаткових мас у досліджувану систему. Разом з тим для ідентифікації податливості фланцевих з'єднань застосовуються експериментальні методи механіки деформівного твердого тіла [3]: натурні випробування на спеціалізованих стендах із використанням тензометрії та датчиків переміщень дають змогу оцінити контактні деформації з урахуванням зусиль попереднього натягу болтів та мікроковзання на стиках фланців.

Вектор загального просторового переміщення вільного кінця системи $\vec{U}$ подається у вигляді суперпозиції:

$$\vec{U} = \overrightarrow{U_c} + \overrightarrow{U_l}, \quad (1)$$

де $\overrightarrow{U_c}$– вектор континуальних переміщень ланок; $\overrightarrow{U_l}$– вектор локальних переміщень у з'єднаннях.

Шляхом віднімання попередньо розрахованої (МСЕ або аналітично) континуальної складової від загального експериментально виміряного вектора переміщень виділяється локальна податливість:

$$\overrightarrow{U_l} = \overrightarrow{U_c} - \vec{U}. \quad (2)$$

На основі серії просторових навантажень формується локальна матриця податливості вузла розмірності 6×6.

Отже, поєднання розрахункових та експериментальних методів дозволяє з високою точністю ідентифікувати реальні параметри жорсткості елементів. Отримані результати є надійною основою для побудови адекватних математичних моделей динаміки багатоланкових систем, розрахунку їх власних частот, а також розробки ефективних законів налаштування систем керування з урахуванням пружних відхилень конструкції.

1. А.И. Лурье, Аналитическая механика. М.: ГИФМЛ. 1961. 824 с.
2. Goda, G. L'Hostis, P. Guerlain, In-situ non-contact 3D optical deformation measurement of large capacity composite tank based on close-range photogrammetry, *Optics and Lasers in Engineering*, **119**, 37-55, (2019). https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.02.006
3. В. С. Бейцун, А. П. Дзюба, Експериментальне дослідження податливості фланцевих з'єднань у моделі маніпулятора космічного призначення, *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*, **1(38)**, 5-19, (2024). https://doi.org/10.15421/4224101

Complex methodology for determining continual and local compliances of multi-link mechanical system elements

V. Beitsun[a1], S. Tarasov[a]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] beitsun98@gmail.com

A comprehensive methodology for determining and separating the continual and local compliances of multi-link mechanical systems is proposed. The approach is based on a combination of numerical mathematical modeling and full-scale experiments. The continual compliance of the links is determined using analytical methods or the Finite Element Method (FEM). The local compliance of the joints is obtained experimentally: the photogrammetric method is used for hinge joints, while the methods of deformable solid mechanics are applied to study flange connections. Separating the overall structural compliance into components allows for obtaining accurate local compliance matrices. This provides reliable input data for mathematical models of spatial dynamics and enables precise tuning of control systems considering the elastic deviations of the structure elements.

Keywords: multi-link system, dynamics, compliance, hinge joint, flange connection, mathematical modeling, photogrammetry, experimental modeling.

Обчислення похилої траверси в імпульсних моделях Н-ротора Дар'є

І. Ю. Костюков, О. Л. Видута, М. В. Фесенко

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] lik_reklama@ukr.net

Ключові слова: імпульсна модель, вертикально-осьовий Н-ротор Дар'є, траверса з двома похилими гілками, підйомна сила і опір траверси, тангенціальна і нормальна сили траверси.

На відміну від горизонтальної траверси, на похилій траверсі виникає тангенціальна сила і обертаючий момент. У поданій роботі розглядають методику обчислення швидкості і кута атаки локального відносного потоку, а також сили, які виникають на траверсі з двома симетричними похилими гілками, котрі розглядають як лопать.

Похилі гілки траверси мають кут нахилу до горизонталі δ (рис. 1*а*). Поперечними перерізами гілки поділяють на окремі елементи. Кожен елемент похилої гілки обертається зі своєю кутовою швидкістю і характеризується своєю швидкісністю (відношення швидкості обертання елементу похилої гілки до швидкості вітрового потоку). Тонкий елемент профільованої похилої траверси фактично є її профільним перерізом, який лежить у похилій площині П. Похила площина П нахилена до горизонтальної площини Г під кутом 90^0 - δ (рис. 1*а*). Лінією перетину цих площин є лінія хорди профіля траверси. Тому хорда профіля, з одного боку, знаходиться в похилій площині П разом з профільним перерізом елемента траверси, а, з іншого боку - обертається відносно осі ротора разом з елементом траверси у горизонтальній площині Г.

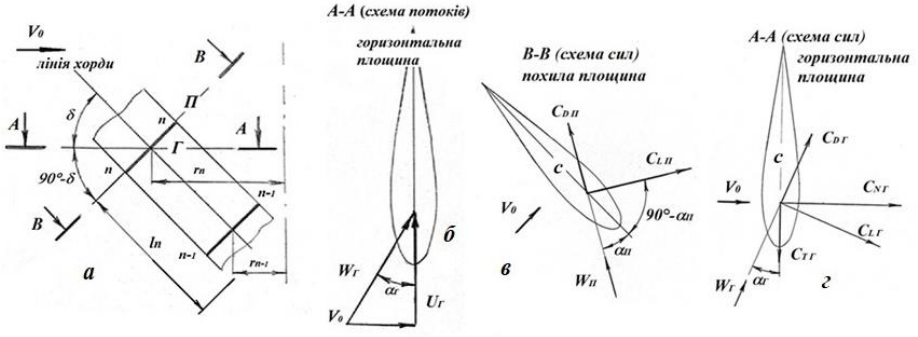


Рис. 1. Схема площин дії потоків і сил на елементі похилої траверси:
а - площини дії потоків і сил; *б* - потоки в горизонтальній площині Г; *в* - сили в похилій площині П; *г* - сили в площині Г; n, n-1 - елементи траверси; c - хорда траверси; r_n, r_{n-1} - радіуси обертання перерізів; δ - кут нахилу гілки траверси; l - відстань між перерізами траверси; $90^0 - \delta$ - кут між площинами Г і П; V_0 - швидкість вітру; $W_Г$ - швидкість локального потоку в площині Г; $W_П$ - проекція швидкості локального потоку в площині П; $U_Г$ - швидкість зустрічного потоку в площині Г; $\alpha_Г$ - кут атаки в площині Г; $\alpha_П$ - проекція кута атаки в площині П; $C_{L\,П}$ і $C_{D\,П}$ - коефіцієнти підйомної сили і опору в площині П; $C_{L\,Г}$ і $C_{D\,Г}$ - проекції коефіцієнтів підйомної сили і опору в площині Г; $C_{T\,Г}$ і $C_{N\,Г}$ - коефіцієнти тангенціальної і нормальної сили в площині Г

Характеристиками потоку для визначення сил траверси є швидкість $W_Г$ і кут атаки $\alpha_Г$ локального потоку на елементі траверси в площині Г (рис. 1*б*). При обертанні ротора на елемент похилої траверси в площині Г діють вітровий потік $V_Г$ і зустрічний потік траверси $U_Г$, які при підсумовуванні дають швидкість $W_Г$ локального потоку [1]

$$W_Г = V_a\sqrt{\sin\theta^2 + (\lambda_a + \cos\theta)^2}. \quad (1)$$

Кут атаки $\alpha_Г$ в імпульсній моделі [1] в горизонтальній площині Г обчислюють як

$$\alpha_Г = \tan^{-1}\frac{\sin\theta}{\lambda_a+\cos\theta}. \quad (2)$$

На елементі траверси площині П, коефіцієнти сил $C_{L\ П}$ і $C_{D\ П}$ визначають по швидкості $W_П$ і куту атаки $\alpha_П$, які є проекціями параметрів $W_Г$ і $\alpha_Г$ на площину П (рис.1*в*)

$$\alpha_П = \tan^{-1}\frac{\sin\theta\ \sin\delta}{\lambda_a+\cos\theta}. \quad (3)$$

$$W_П = V_a\ \frac{\sin\alpha_Г}{\cos\alpha_П}\sqrt{\sin\theta^2 + (\lambda_a + \cos\theta)^2}. \quad (4)$$

Тангенціальна і нормальна сили діють на елемент траверси у горизонтальній площині Г (рис. 1*г*), тому обчислюють проекції коефіцієнтів $C_{L\ П}$ і $C_{D\ П}$ на горизонтальну площину. Кут між горизонтальною і похилою площинами дорівнює 90^0 - δ, тому проекції коефіцієнтів підйомної сили $C_{L\ Г}$ і опору $C_{D\ Г}$ в горизонтальній площині рівні

$$C_{L_Г} = C_{L_П}\frac{\cos\alpha_П}{\cos\alpha_Г}, \quad (5)$$

$$C_{D_Г} = C_D\frac{\cos\alpha_П}{\cos\alpha_Г}. \quad (6)$$

Далі визначають коефіцієнти тангенціальної і нормальної сили, обертаючий момент, індуковану швидкість вітрового потоку, коефіцієнт потужності Н-ротора.

1. Beri H., Yao Y. Double Multiple Stream Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine / Energy and Power Engineering, N. 3, 2011. – P. 262 – 270.

Calculation of Flow Characteristics and Aerodynamic Forces of an Inclined Arm in Momentum Models of the Darrieus H-Rotor

I. Kostiukov[a1], O. Vyduta[a], M. Fesenko[a]

[a] Institute transport systems and technologies, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] lik_reklama@ukr.net

When designers choose the configuration and geometric parameters correctly, a positive tangential force and torque arise on the inclined arm. This torque provides additional output power for the Darrieus H-rotor. The study presents a method for calculating the velocity and angle of attack of the local relative flow, as well as the aerodynamic forces that act on a arm with two symmetrical inclined branches. The method treats the inclined arm as a blade. According to the method, the flow velocity and angle of attack on the arm branches act in the horizontal plane. Lift and drag on the arm branches arise in the inclined plane of the arm cross-section, while the tangential force and torque of the arm branches lie in the horizontal plane.

Keywords: momentum model, vertical-axis H-type Darrieus rotor, arm with two inclined branches, lift and drag of the arm, tangential and normal forces of the arm.

Моделювання розподілу міцності на розрив всередині анодів і катодів літій-іонних акумуляторів

В.О. Дзензерський[a], О.В. Сухова[1], В.А. Іванов, А.С. Тарасов

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] sukhovaya@ukr.net

Ключові слова: літій-іонні акумулятори, методи моделювання, метод скінченої деформації, активні графітові частинки, розподіл максимальної міцності на розрив, механічна деградація.

Моделі, які точно описують деформації і напруження в літій-іонних акумуляторах, потрібні для розробки нових конструкцій, що ефективно опираються руйнуванню. В роботі проаналізовані існуючі методи моделювання характеристик міцності на розрив графітових активних частинок анодів і катодів літій-іонних акумуляторів. Як перспективний метод обраний метод скінченої деформації, який враховує ефект розтріскування в механічному і хімічному внесках.

Застосований стохастичний підхід до розгляду разорієнтованої гетерогенної структури графіту. Це дозволяє отримати локальний розподіл максимальних значень міцності на розрив всередині активних графітових частинок з використанням функції розподілу Weibull. Однак застосування методу скінченої деформації для аналізу механічної деградації графітових анодів і катодів потребує детального аналізу для зменшення похибки. Це особливо важливо у випадку графітових катодів, які надають більше можливостей для інтеркаляції активних частинок.

Modelling tensile strength distribution within anodes and cathodes of lithium-ion batteries

V. Dzenzerskiy[a], O. Sukhova[a1], V. Ivanov[a], A. Tarasov[a]

[a] Institute of Transport Systems and Technologies, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] sukhovaya@ukr.net

In this study, a finite element framework has been chosen to analyze the distribution of maximum tensile strength in graphite active particles due to bulky anion intercalation in dual-graphite batteries. Finite strain formulation is considered to account for the large volume expansion that typically occurs in graphite cathodes. This model considers chemo-mechanical coupling, including the effect of the particle volume changes. To account for the stochastic nature of graphitic microstructures, the tensile properties are described by means of a Weibull distribution function.

Keywords: lithium-ion batteries, modelling methods, finite strain framework, graphite active particles, distribution of maximum tensile strength, mechanical degradation.

Методика чисельного моделювання просторових нестисливих потоків на основі рівнянь нав'є-стокса із застосуванням методу контрольних об'ємів

О.В. Акіменко[1], С. Ю. Пославський

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1]samsonova@ua.fm

Ключові слова: чисельні методи, вітроенергетична установка, метод контрольних об'ємів, рівняння Нав'є-Стокса.

Застосування горизонтально-осьових (ГО) вітроенергетичних установок (ВЕУ) у великій та малій енергетиці набуває все більшого значення у наших реаліях. Високі темпи зростання встановленої потужності вітроенергетичних систем у світі зумовлюють необхідність поглибленого дослідження їхніх аеродинамічних характеристик. Підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок значною мірою залежить від оптимізації конструкції ротора, що, у свою чергу, потребує застосування сучасних методів математичного та чисельного моделювання процесів обтікання лопатей повітряним потоком.

Чисельні методи дослідження аеродинаміки роторів ГО ВЕУ дозволяють отримувати детальну інформацію про структуру потоку, розподіл швидкостей, тиску та аеродинамічних сил на поверхні лопатей. Одним із найточніших підходів до моделювання аеродинамічних процесів є використання методів обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD), що базуються на чисельному розв'язанні рівнянь Нав'є–Стокса, це дозволяє врахувати тривимірні ефекти, що виникають при обтіканні ротора ГО ВЕУ.

Нестаціонарні процеси аеродинаміки ротора ГО ВЕУ описуються усередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса нестисливої рідини для фізичних змінних, записаних у довільних криволінійних координатах. Розроблено методику чисельного розрахунку із застосуванням методу контрольних об'ємів. До розв'язання системи рівнянь для нестисливих течій також був застосований підхід із введенням коефіцієнта штучної стисливості. Для обчислення конвективних різницевих потоків через грані контрольних об'ємів було застосовано апроксимацію Roe, для якої необхідні обчислення матриць Якобі. Для визначення в'язких різницевих потоків на гранях елементарних об'ємів було апроксимовано похідні декартових компонент вектора швидкості за криволінійними координатами (ξ, η, ζ).

Алгоритм розробленої чисельної методики був застосований до розв'язання задачі зовнішнього обтікання нерухомого кругового циліндра тривимірним потоком в'язкої нестисливої рідини. Для коректного визначення в'язких ефектів у фізичній області розрахунок проводився на нерівномірній сітці розміром 120x5x130 із згущенням по нормалі до поверхні циліндра, а також у його сліді. Для правильного відображення криволінійної фізичної області в розрахункову (математичну) були визначені об'єми і нормалі до граней елементарних комірок сітки, що покриває обчислювальну область, а також співвідношення для обчислення метричних коефіцієнтів. В якості початкових умов задавалися параметри незбуреного потоку у всій розрахунковій області. На поверхні циліндра задавалися граничні умови

прилипання, на вихідних границях – умови незбуреного потоку і характеристичні граничні умови (або м'які граничні умови).

Для визначення аеродинамічних характеристик ротора ГО ВЕУ розроблено чисельну методику моделювання просторових нестисливих течій на основі рівнянь Нав'є-Стокса із застосуванням методу контрольних об'ємів. Проведено тестування чисельного алгоритму на задачі просторового обтікання нерухомого циліндра. Отримано функції розподілу швидкостей, тиску в розрахунковій області для чисел Рейнольдса Re=200, Re=1000. Проведено порівняння результатів розрахунку з чисельними розрахунками інших авторів, відмічено хорошу узгодженість. Надалі планується застосувати дану методику безпосередньо до визначення аеродинамічних характеристик ГО ВЕУ.

1. J. C. Tannehill, D. A. Anderson, R. H. Pletcher, Computational fluid mechanics and heat transfer, 2nd ed, New York: *Taylor & Francis*, 785 p. (1986).
2. C. Prakash, S. Patankar, A Control Volume Based Finite-Element Method for Solving the Navier–Stokes Equations. Numerical Heat Transfer, (1985).
3. https://doi.org/10.1080/01495728508961854
4. О. А. Приходько, Д. О. Редчиць, Численное моделирование нестационарного течения в следе за цилиндром на основе уравнений Навье-Стокса, *Прикладная гидромеханика*. Т. 7. № 1. С. 56–71 (2005).
5. O. Prykhod'ko, D. Redchyts, Numerical modeling of a viscous incompressible unsteady separated flow past a rotating cylinder. *Fluid Dynamics*, Vol. 44, No. 6, P. 823–829 (2009).
6. https://doi.org/10.1134/S0015462809060040
7. С. В. Тарасов, Д. О. Редчиць, О. Б. Польовий, Обчислювальна гідродинаміка на службі вітроенергетики, *Світогляд.* № 6, 33–40 (2010).

A methodology for numerical modeling of three-dimensional incompressible flows based on the navier-stokes equations using the control volume method

O. Akimenko[a1], S. Poslavskij[a]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1]samsonova@ua.fm

The paper formulates a numerical methodology for modeling three-dimensional incompressible flows based on the Navier–Stokes equations using the finite volume method. The approach is developed within the framework of Reynolds-averaged equations in curvilinear coordinates with the application of an artificial compressibility technique. Convective fluxes are approximated using Roe's scheme with the evaluation of Jacobian matrices, while viscous fluxes are calculated through the approximation of velocity gradients in curvilinear coordinates. A computational algorithm implementing the proposed methodology is constructed. The method is applied to simulate external flow around a stationary circular cylinder in a viscous incompressible flow. Numerical simulations are performed on a non-uniform grid with refinement near the cylinder surface and in the wake region. Initial and boundary conditions, including no-slip and characteristic outlet conditions, are specified. Velocity and pressure distributions are obtained for Reynolds numbers Re = 200 and Re = 1000. The results are compared with available numerical data and show good agreement, confirming the validity of the developed approach.

Keywords: numerical methods, wind turbine, the control volume method, the Navier–Stokes equations.

Проєктування ефективних антенних решіток для технологічної системи позиціонування в режимі реального часу

С.В. Плаксін[a1], В.І. Магро[б]

[a]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

[1] svpdnepr@gmail.com

Розглядається застосування у закритих приміщеннях РРМ (рухомих роботизованих механізмів), що вимагає знання в режимі реального часу інформації про поточне місцезнаходження такого механізму. Використання відомих методів позиціонування, таких як GPS в закритому екранованому приміщенні є неможливим. Для відстеження РРМ використовується технологія RTLS (Real-Time Locating Systems). Дана технологія включає антени, які збирають інформацію з міток і передають її на сервер для обчислення координати міток. Робота присвячена математичному моделюванню удосконаленої конструкції антени у вигляді кінцевої лінійної антенної решітки. Покращені характеристики решітки антени досягаються за рахунок використання області зв'язку між випромінюючими елементами антенної решітки, що дозволяє значно поліпшити узгодження решітки з вільним простором для всіх кутів сканування.

Ключові слова: рухомий роботизований механізм, система позиціонування, режим реального часу, антенна решітка

Існують різні способи визначення місцезнаходження роботизованого мехнанізму. Наприклад, на відкритому просторі система GPS використовує GPS-приймач, який вловлює сигнали випромінювання, що надсилаються кількома супутниками, та процес трилатерації для визначення місцезнаходження. Однак одним із недоліків систем GPS є те, що вони не можуть забезпечити відстеження в приміщенні [1]. Аналогічно, мережі стільникового зв'язку можуть визначити приблизне місцезнаходження мобільного пристрою, визначаючи, яка комірка використовується пристроєм [2]. Точність цієї технології все ще недостатня (близько 200 метрів) і значною мірою залежить від розміру комірки.

Крім того, існує кілька технологій, які забезпечують відстеження в приміщенні, таких як технології, засновані на активній (RTLS) радіочастотній ідентифікації (RFID). RFID забезпечує передачу радіосигналу лише на короткі відстані до RFID-зчитувачів. Після вловлювання зчитувачем сигнали передаються на комп'ютер для обробки. RFID-мітки можуть бути активними або пасивними [3-4]. Активні мітки мають власне джерело енергії та надсилають свої ідентифікаційні дані та місцезнаходження, які є необхідними даними для забезпечення відстеження в режимі реального часу. Пасивні мітки не мають батареї та активуються за допомогою енергії, що генерується магнітним полем радіохвиль датчика зчитування. У якості такого датчика зчитування пропонується застосовувати скінчені антенні решітки поліпшеної конструкції. Таким чином, пасивна мітка на рухомому механізмі активується лише тоді, коли роботизований механізм знаходяться поблизу датчика зчитування, тобто антенної решітки.

Застосування технології RTLS у закритих металевих виробничих приміщеннях, де існує або високий рівень радіаційного випромінювання, або хімічне забруднення, це критична необхідність для безпеки та ефективності. При цьому необхідно забезпечувати відслідковувати переміщення рухомих роботизованих механізмів для уникнення зіткнень з перепонами та рухомих механізмів між собою. Технологія RTLS дозволяє створювати «динамічні зони безпеки».

Розглянемо можливі алгоритми позиціонування RTLS, що можуть бути застосовані в закритих металевих приміщеннях. Радіочастотні технології та протоколи дозволяють використовувати різні типи алгоритмів для обчислення положення тегів у сітці якорів (повний огляд можна знайти, наприклад, у [5]). Згадані алгоритми є найбільш використовуваними, деякі виробники також використовують їх комбінації.

Кут приходу (AoA): Обчислюються кути до передавачів або приймачів через спрямовано розміщені антенні решітки. Коли кут сигналу від сліпого вузла обчислюється до двох приймачів, можна визначити місцезнаходження. Для точного вимірювання кутів по всьому заводу потрібно багато приймачів. Збільшення точності також призводить до збільшення витрат [6], отримані вимірювання кутів чутливі до багатопроменевого поширення, що є поширеним явищем у будівлях.

Час прибуття (ToA): Системи ToA реєструють час відправлення сигналу та час його надходження до приймача. Час від відправлення до отримання, помножений на швидкість світла, дає відстань до вузла. Коли це виконується з трьох вузлів, визначається місцезнаходження [5] на основі часу, необхідного для отримання сигналу від мітки.

Різниця в часі прибуття (TDOA): ToF вимірює час, який сигнал проходить від мітки до приймача. Алгоритм TDOA використовує сигнал, який надсилається одночасно з кількох антен, вимірюється різниця в часі отримання цього сигналу.

Таким чином, поєднання запропонованої вдосконаленої антенної решітки з одним із розглянутих методів позиціонування RTLS дозволяє створити ефективну систему відслідковування переміщення рухомих роботизовних механізмів в закритому приміщенні.

1. Z. Xiang, S. Song, J. Chen et al., A wireless LAN-based indoor positioning technology, *IBM Journal of Research and Development*, **48**, 617–626 (2004). https://doi.org/10.1147/rd.485.0617

2. R. Clarke, Person location and person tracking. Technologies, risks and policy implications, *Information Technology & People*, **14**, 206-231 (2001). https://doi.org/10.1108/09593840110695767

3. Z. Asif, Integrating the supply chain with RFID: A technical and business analysis, *Communications of the Association for Information Systems*, **15**, 393–427, (2005). https://doi.org/10.17705/1CAIS.01524

4.S. Thiede, B. Sullivan, R. Damgrave et al., Real-time locating systems (RTLS) in future factories: technology review, morphology and application potentials, Procedia CIRP, **104**, 671-676 (2021). https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.113

5.F. Zafari, A. Gkelias, K. K. Leung, A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys*, **21**(3), 2568-2599 (2019). https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558

6.Insoft Whitepaper Industry, https://www.infsoft.com/

Dynamic Analysis of Offshore Pile Foundations for H-Darrieus Wind Turbines

S.Tarasov [a1], D.Dehtiarov [б2]

[a] Institute transport systems and technologies, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukrain
[б] Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

[1] tsv.transmag@gmail.com, [2] ddmlcfd@gmail.com

The dynamic behavior of offshore wind turbine foundations is a critical aspect of their design, particularly for vertical-axis H-Darrieus turbines. These structures are subjected to complex environmental and operational loads, including wind, waves, and rotor-induced forces, which can excite structural vibrations. Accurate prediction of natural frequencies and mode shapes is essential to avoid resonance and ensure long-term structural performance. A key challenge in this context is the realistic representation of pile–soil interaction. Soil behavior is inherently nonlinear and significantly influences the stiffness and damping of the foundation system. Efficient numerical methods are therefore required to capture these effects without excessive computational cost. The present framework builds upon a three-dimensional pile element approach and extends it toward dynamic analysis with damping, enabling the evaluation of the frequency spectrum of pile-supported offshore systems.

Key words: Pile foundation, offshore wind turbine, natural frequencies, soil-structure interaction, damping, FEM, 3D pile element model, eigenvalue analysis

Preface. This study provides a computational framework that can be extended for the dynamic analysis of pile foundations supporting offshore H-Darrieus wind turbines, with the main objective of determining natural frequencies and mode shapes while accounting for nonlinear pile–soil interaction and damping effects.

The foundation system is modeled using a three-dimensional pile element formulation in which the pile is represented as a beam-type finite element, and the surrounding soil is incorporated through distributed nonlinear springs embedded directly into the element. This approach avoids explicit three-dimensional meshing of the soil while still capturing essential soil–structure interaction effects, making it computationally efficient for large-scale offshore systems.

A key advantage of the formulation is its ability to represent fully three-dimensional behavior using line elements with rotational and translational degrees of freedom. Unlike conventional spring-based approaches, the soil response is not decomposed into fixed orthogonal directions. Instead, the soil resistance follows the actual deformation direction, which is critical when dealing with nonlinear behavior under combined loading and dynamic excitation[1].

For dynamic applications, the formulation can be extended by introducing mass and damping contributions to the system. The pile mass is represented along the beam element, while damping can be incorporated to reflect energy dissipation in both the structure and

surrounding soil. This enables the construction of a global dynamic system suitable for eigenvalue analysis.

Using this framework, the natural frequencies and mode shapes of the pile-soil system can be obtained by solving the corresponding dynamic equilibrium problem. The nonlinear stiffness arising from soil behavior influences the effective stiffness of the system, meaning that the vibration characteristics depend on loading level and soil conditions. This is particularly important for offshore wind turbine foundations[2], where cyclic and dynamic loads from wind, waves, and rotor operation interact with nonlinear soil resistance.

The method is especially suitable for offshore H-Darrieus wind turbines, where the foundation may experience multidirectional and time-varying loads. The ability to capture three-dimensional coupling effects and realistic soil behavior improves the reliability of predicted vibration characteristics, which are essential for avoiding resonance and ensuring structural integrity.

Compared with traditional modeling approaches, this method offers improved efficiency by reducing the number of elements required and eliminating explicit soil discretization, while also providing higher accuracy in nonlinear and multidirectional conditions. This makes it well-suited for parametric studies and design optimization focused on the frequency spectrum of pile-supported offshore structures.

Conclusion. The presented framework provides an efficient and physically consistent approach for analyzing the dynamic behavior of pile foundations in offshore wind turbine applications. By combining a beam-based finite element representation of the pile with embedded nonlinear soil springs, the method captures essential three-dimensional soil–structure interaction effects without the need for full soil discretization.

When extended to include mass and damping, the model enables the evaluation of natural frequencies and mode shapes, forming the basis for determining the vibration spectrum of the system. The consideration of nonlinear soil behavior ensures that stiffness and damping characteristics are realistically represented, which is crucial for accurate prediction of dynamic response.

This approach is particularly advantageous for offshore H-Darrieus wind turbines, where complex loading conditions and multidirectional responses must be considered. Overall, the method offers a balance between computational efficiency and modeling accuracy, making it suitable for both detailed analysis and practical engineering applications focused on avoiding resonance and optimizing structural performance.

1. Three-dimensional analysis of nonlinear pile–soil interaction responses using 3D pile element model, *Int J Geomech*, 21(8), 04021129 (2021). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002076

2. J.-H. Wan, R. Bai, X.-Y. Li, and S.-W. Liu, Natural frequency analysis of monopile supported offshore wind turbines using unified beam–column element model, *J Mar Sci Eng*, 11(3), 628 (2023). https://doi.org/10.3390/jmse11030628

Моделювання та калібрування кондуктометричних сенсорів у рідких середовищах

С. А. Кошель[1], М.Д. Кошель[2]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] ksa7@i.ua

[2] kkknd@ua.fm

Ключові слова: кондуктометричні сенсори, питома електропровідність, константа сенсора, концентрація, вимірювання опору.

Вступ

Кондуктометричні сенсори широко застосовуються для визначення концентрації речовин у рідких провідних середовищах і є важливим елементом систем автоматизованого управління в енергетиці, промисловості, транспорті та екологічному моніторингу, [1 – 4]. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення точності вимірювань у умовах невизначеності складу середовища та впливу зовнішніх факторів.

Методика та умови експерименту

Експериментальні дослідження проведено на водних розчинах гідроксиду натрію з використанням проточного сенсора типу КСН-25. Сенсор працює за двохелектродною схемою вимірювання, а для усунення поляризаційних ефектів використовується змінний струм із частотою 4 кГц.

Калібрування здійснювалося шляхом послідовного розведення еталонного розчину з відомою концентрацією та вимірюванням електричного опору. Отримані експериментальні дані оброблялися за допомогою комп’ютерних засобів із подальшим перетворенням у значення питомої електропровідності та концентрації.

У процесі дослідження встановлено, що залежність між сигналом сенсора та питомою електропровідністю має нелінійний характер. Виявлено, що константа сенсора залежить від електричного опору розчину і може бути описана поліномом другого ступеня.

Використання апроксимаційної залежності для визначення змінної константи сенсора дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань та забезпечити узгодження експериментальних результатів із довідковими даними.

Висновки

У роботі встановлено закономірності процесів, що відбуваються під час калібрування кондуктометричних сенсорів. Показано, що використання апроксимаційних залежностей для визначення змінної константи сенсора дозволяє підвищити точність вимірювань та забезпечити відповідність експериментальних даних теоретичним.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування розроблених сенсорів у системах автоматизованого управління для підвищення надійності та ефективності функціонування енергетичного обладнання.

1. Kirichek, R., Koucheryavy, A., Internet of Things Laboratory Test Bed, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016. p. 485
2. Zoski, Cynthia G., Handbook of Electrochemistry. Las Cruces, New Mexico, USA: Elsevier, 2007. 935 p.
3. Кошель М.Д., Кошель С.А. Визначення параметрів кондуктометричних сенсорів для автоматизо ваного управління енергетичним обладнанням. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2025. № 4. С. 10—16. https://doi. org/10.15407/dopovidi2025.04.010
4. ДСТУ 9020:2020 Метрологія. Кондуктометри і аналізатори рідин кондуктометричні. Методика повірки

Modeling and Calibration of Conductometric Sensors for Energy and Transport Systems

S. A. Koshel[1], M. D. Koshel[2]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] ksa7@i.ua

[2] kkknd@ua.fm

The paper examines the features of operation of conductometric sensors designed to measure specific electrical conductivity and determine the concentration of electrolytes in liquid media. The relevance of the study is обусловлена the widespread use of such sensors in automated industrial process control systems, power equipment, transport systems, environmental monitoring, and other fields where real-time monitoring of medium composition is required. The aim of the work is to establish the regularities of measurement processes of sensor characteristics, as well as to determine optimal conditions for their calibration and mathematical data processing to improve measurement accuracy. The study is based on the analysis of the relationship between the electrical resistance of a solution, its specific electrical conductivity, and electrolyte concentration.

***Keywords**: conductometric sensors, specific electrical conductivity, sensor constant, concentration, resistance measurement.*

Застосування кондуктометричних сенсорів в енергетичних і транспортних системах

С. А. Кошель[1], М.Д. Кошель[2]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] ksa7@i.ua

[2] kkknd@ua.fm

Ключові слова: кондуктометричні сенсори, електропровідність, енергетичні системи, транспортні системи, моніторинг.

Вступ

Сучасні енергетичні та транспортні системи потребують надійних методів контролю фізико-хімічних параметрів робочих середовищ. Одним із найбільш універсальних підходів є вимірювання електропровідності, що дозволяє оперативно оцінювати склад, ступінь забруднення та наявність домішок у рідинах і газах. Кондуктометричні сенсори завдяки простоті конструкції, високій чутливості та можливості безперервного контролю знаходять широке застосування в різних галузях техніки, [1-4].

Основні напрями застосування кондуктометричних сенсорів

В енергетиці кондуктометричні сенсори широко використовуються для контролю якості води в теплоенергетичних установках, зокрема у котлах, турбінах та системах охолодження. Вони дозволяють своєчасно виявляти зміни іонного складу, що впливають на корозійні процеси та утворення накипу. У ядерній енергетиці такі сенсори застосовуються для моніторингу чистоти теплоносія та виявлення витоків.

У системах відновлюваної енергетики, зокрема у паливних елементах і акумуляторних батареях, кондуктометричні методи використовуються для контролю стану електролітів, ступеня деградації та ефективності роботи. Це особливо актуально для літій-іонних та водневих енергетичних систем.

У транспортній галузі сенсори електропровідності застосовуються для контролю якості палива, мастильних матеріалів і охолоджуючих рідин. В електротранспорті вони забезпечують моніторинг стану акумуляторів і систем зберігання енергії. Також перспективним є їх використання в системах діагностики інфраструктури, наприклад для виявлення витоків технічних рідин або контролю стану дорожніх покриттів при обробці реагентами.

Перевагами кондуктометричних сенсорів є відносна простота, низька вартість, можливість мініатюризації та інтеграції в автоматизовані системи контролю. Водночас актуальними залишаються задачі підвищення селективності, стабільності та точності вимірювань у складних багатокомпонентних середовищах.

Висновки. Кондуктометричні сенсори є ефективним засобом контролю фізико-хімічних параметрів у енергетичних і транспортних системах. Вони забезпечують оперативний моніторинг якості робочих середовищ, сприяють підвищенню надійності

обладнання та безпеки експлуатації. Найбільш перспективними напрямами є їх застосування у системах відновлюваної енергетики, електротранспорті та інтелектуальних системах моніторингу. Подальший розвиток пов'язаний із удосконаленням матеріалів сенсорів, підвищенням точності вимірювань і інтеграцією в цифрові платформи керування.

1. Li, J., Zhao, H., Wang, Y., & Zhou, Y. (2024). Approaches for selectivity improvement of conductometric gas sensors: an overview. Sensors & Diagnostics, 3, 336–353. https://doi.org/10.1039/D3SD00226H
2. Korotcenkov, G. (2024). II–VI Semiconductor-Based Conductometric Gas Sensors: Is There a Future for These Sensors? Sensors, 24(12), 3861. https://doi.org/10.3390/s24123861
3. Hauser, P. C., & Kubáň, P. (2025). Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis—Developments from 2020 to 2024. Electrophoresis. https://doi.org/10.1002/elps.202400217
4. Thirstrup, C., & Deleebeeck, L. (2021). Review on electrolytic conductivity sensors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3083562

Modeling and Calibration of Conductometric Sensors for Energy and Transport Systems

S. A. Koshel[1], M. D. Koshel[2]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] ksa7@i.ua

[2] kkknd@ua.fm

The paper considers the main areas of application of conductometric sensors in modern energy and transport systems. It is shown that monitoring the electrical conductivity of media is an important tool for controlling the quality of working fluids, diagnosing the technical condition of equipment, and ensuring operational safety. The use of sensors in water chemistry regimes of power plants, cooling systems, fuel cells, batteries, and transport infrastructure is analyzed. Particular attention is paid to the detection of contamination, corrosion processes, and electrolyte leaks. The advantages of conductometric methods are identified, including high sensitivity, fast response, and the possibility of continuous monitoring. The перспективність integration of such sensors into automated monitoring and intelligent control systems is substantiated.

***Keywords**: Keywords: conductometric sensors, electrical conductivity, energy systems, transport systems, monitoring.*

Перспективи впровадження гнучких фотоелектричних перетворювачів третього покоління в енергосистеми транспортних засобів

С. В. Плаксін[a1], О. Б. Гниленко[б]

[a]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

[1]svp@westa-inter.com

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, тонкоплівковий сонячний елемент, енергозабезпечення транспортних засобів.

Сучасна стратегія розвитку глобального транспортного сектору базується на концепції сталого розвитку та декарбонізації, що зумовлює критичну необхідність в пошуку альтернативних джерел енергії для автономного живлення транспортних засобів. Інтеграція фотоелектричних модулів безпосередньо в кузовні елементи розглядається як один із найбільш перспективних шляхів підвищення енергоефективності електромобілів та гібридних систем. Потреба у використанні сонячної енергії в транспорті обумовлена необхідністю збільшення запасу ходу без збільшення маси акумуляторних батарей, що безпосередньо впливає на аеродинамічні та вагові характеристики транспортних засобів. Основними перевагами такого підходу є зниження навантаження на мережі загального користування та забезпечення часткової автономності бортових систем.

Необхідність переходу до сонячних елементів третього покоління при розв’язанні такої задачі зумовлена можливістю створення легких, гнучких та високоефективних структур на основі тонкоплівкових матеріалів. Окрім перовскітних сполук, особливу увагу привертають органічні сонячні елементи та фотоперетворювачі на основі квантових точок. Органічні матеріали дозволяють використовувати метод рулонного друку, що суттєво знижує енерговитрати при виробництві, а їхня спектральна чутливість може бути адаптована під конкретні умови експлуатації. Сонячні елементи на основі керамічних наноструктур та сенсибілізованих барвником осередків демонструють високу стабільність в умовах дифузного освітлення, яке є характерним для районів міської забудови. Перевагою є й те, що тонкоплівкові матеріали третього покоління здатні зберігати працездатність при значних кутах вигину поверхонь, що дозволяє інтегрувати їх у дахи, капоти та навіть засклені поверхні автомобілів без погіршення аеродинаміки [1].

Для підвищення ефективності фотоелектричного перетворення ключове значення має впровадження тандемних та каскадних структур. Поєднання матеріалів із різною шириною забороненої зони (наприклад, перовскіт/CIGS або перовскіт/органіка) дозволяє більш повно використовувати сонячний спектр. Тандемні структури здатні досягати ККД понад 30% у лабораторних умовах, що є критичним для обмеженої площі даху транспортного засобу. Сучасний стан досліджень у напрямку каскадних структур фокусується на оптимізації тунельних переходів та узгодженні струмів між шарами для забезпечення стабільної генерації при динамічній зміні інтенсивності освітлення [2].

Важливим напрямком підвищення продуктивності є використання нанотехнологій, зокрема впровадження металевих наночастинок (Ag, Au) для реалізації плазмонного ефекту. Плазмонний резонанс дозволяє суттєво посилити локальне електромагнітне поле, що збільшує поглинання світла в ультратонких активних шарах. Крім того, застосування діелектричних наночастинок (наприклад, SiO2 або TiO2) сприяє ефективному розсіюванню світла всередині структури, збільшуючи оптичний шлях фотона в напівпровіднику (технологія light trapping). Конструктивні рішення для light trapping включають також створення текстурованих поверхонь, використання дифракційних решіток та фотонних кристалів. Впровадження таких структур на тильній або фронтальній стороні сонячного елемента дозволяє багаторазово відбивати фотони, тим самим підвищуючи зовнішній квантовий вихід пристрою при збереженні мінімальної товщини поглинального шару напівпровідника[3].

Таким чином, інтеграція сонячних елементів третього покоління, підсилених впровадженням наноструктурних елементів та тандемною архітектурою, може бути вдалою стратегією для створення автономного електротранспорту наступного покоління.

1. Polman A., Knight M., Garnett E. C. et al. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges, *Science*, **352**, Issue 6283, (2016). https://doi.org/10.1126/science.aad4424.
2. Leijtens T., Bush K. A., Prasanna R., McGehee M. D. Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskites, *Nature Energy*, **3**, P. 828–838, (2018). https://doi.org/10.1038/s41560-018-0190-4.
3. Atwater H. A., Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices, *Nature Materials*, **9**, P. 205–213, (2010). https://doi.org/10.1038/nmat2629.

Prospects for the Implementation of Third-Generation Flexible Photovoltaic Converters in Vehicle Power Systems

S. Plaksin[a1], A. Gnilenko[b]

[a]Institute of Transport Systems and Technology, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b]Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

[1]svp@westa-inter.com

The integration of third-generation flexible solar cells into vehicle power systems is considered as a means of enhancing energy efficiency and autonomy. The study highlights the advantages of thin-film materials, such as perovskites and organic compounds, emphasizing their low weight, flexibility, and performance under diffuse lighting. Special attention is given to efficiency-enhancing strategies, including tandem and cascade architectures, plasmonic nanoparticles, and advanced light-trapping structures to ensure the commercial application of vehicle-integrated photovoltaics.

Keywords: photovoltaic converter, thin-film solar cell, vehicle power supply

Моніторинг динамічних параметрів магнітоплана на основі методу вимірювання сферичності фронту хвилі зондувального випромінювання

Ю.В. Шкіль

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

siv@westa-inter.com

Робота присвячена питанням побудови системи визначення просторового положення екіпажу маглева для моніторингу динамічних параметрів на основі методу визначення координат за сферичністю (кривизною) хвильового фронту зондувального радіовипромінювання.

Ключові слова: магнітоплан, сферичність хвильового фронту, фазова дальнометрія

Однією з важливих складових транспортної інфраструктури є високошвидкісні наземні транспортні коридори, для яких перспективним визнано магнітолевітаційний транспорт. Підвищенням ефективності такого виду транспорту є перехід до розподіленої енергетичної підсистеми маглева, що зумовлює застосування досконалої навігаційної системи з можливістю максимально точного визначення як місця розташування, так і динамічних характеристик магнітоплана на колійній.

Побудова адекватної системи можлива радіотехнічними засобами з використанням методу визначення координат за сферичністю хвильового фронту зондувального радіовипромінювання. Сферичність фронту електромагнітної хвилі характеризується значеннями параметра різниці різниць фаз, що дозволяє однозначно обчислювати відстань (дальність) і пеленг (напрямок) між джерелом радіовипромінювання та приймальними антенами [1].

Вимірювач подвійної різниці фаз складається з трьох антен і блоків обробки. Стосовно транспортної системи маглева антенами є коаксіальні щілинні лінії, укладені на полотні колійної структури. Проведене моделювання вимірювальної системи показало високу потенційну точність методу Кінетичні та динамічні параметри обчислюються за результатами вимірювання координат поступального та обертального руху екіпажу на основі методу фазової дальнометрії. Сферичність фронту вимірюється з використанням радіомаркерів, встановлених на платформі екіпажу.

Оцінки роздільної здатності вимірювання координат екіпажу щодо колійної структури дозволяють говорити про технічну реалізованість пропонованих рішень для забезпечення стійкості системи управління рухом під впливом дестабілізуючих факторів навколишнього середовища.

1. Якорнов Е.А. та ін. Теоретичний аналіз можливості застосування фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в стаціонарних системах радіозв'язку надвисокочастотного діапазону. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування, №48, 97 – 106 (2012).*

Залежність енергетичних характеристик лінійного синхронного двигуна магнітоплану від довжини фідерних ліній

Ю.В. Шкіль[1], С.В. Плаксін[1], І.В. Тимченко, Л.М. Погоріла

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] siv@westa-inter.com

Робота присвячена розрахункам основних характеристик лінійного синхронного тягового двигуна (ЛСТД) магнітолевітаційної транспортної системи для довжин секцій від 50 м до 12000 м.

Ключові слова: маглев-транспорт, лінійний синхроний тяговий двигун, , електродинамічний підвіс, тяговий модуль

Транспортні системи на магнітному підвісі як складова частина транспортної інфраструктури держави продовжують розширювати свою присутність у сфері пасажирських перевезень. Зважаючи на першочергову значимість високошвидкісних транспортних систем для людства, інтерес до магнітолевітаційного транспорту останніми роками стрімко зростає [1, 2].

Виникає потреба у вдосконаленні існуючої інфраструктури, як пасажирських, так і товарних перевезень. Досвід експлуатації цих систем висуває ряд вимог щодо покращення таких показників, як безпека, енергоефективність, комфортабельність.

Недоліком традиційного ЛСТД для магнітолевітаційного транспорту є те, що вся довга секція (так званий “long stator”) тягових котушок, вздовж якої рухається магнітоплан, знаходиться під напругою. Потужність інвертора, що подає живлення до секції, повинна відповідати потужності приводу, необхідного транспортному засобу. Інвертор для блоку повинен управляти рушійним струмом через напругу, створювану індуктивністю та опором всього блоку, на додаток до сумарної зворотної ЕРС (електрорушійної сили). Таким чином, інвертор повинен керувати великими ділянками котушок, які не використовуються і зумовлюють собою втрати енергії. Для зменшення втрат і врахування великої тривалості струму в блоці, котушки повинні мати досить великий поперечний переріз провідника, щоб зменшити нагрів. Подолати ці труднощі дозволяє концепція лінійного синхронного двигуна з локальною комутацією (LCLSM) шляхом застосування напівпровідникових технологій обробки електроенергії, які стали життєздатними протягом останніх кількох років. LCLSM живить мінімальну необхідну кількість котушок. Для приведення магнітоплану в рух живляться лише тягові модулі поблизу надпровідних котушок транспортного засобу. Кожен тяговий модуль (короткий, довжиною близько 2, 5 м) контролюється індивідуально. Зворотна ЕРС не додається, а потужність на локальний інвертор не збільшується зі зміною розміру та ваги поїзда.

Як показано в [3] при блоковій комутації секціями енергетична ефективність ЛСТД покращується в міру зменшення довжини фідерів живлення і наводяться дані для ліній 12000 м – 500 м. Інтерес представляє оцінка енергетичних втрат для довжин фідерів менше 500 м і до 50 м. Природно, що будувати ЛСТД з фідерами 50 м не доцільно, але зниження втрат обумовлено тим, що при розподілених системах

енергозабезпечення, зокрема, що використовують сонячну енергію, практично до нуля зводяться втрати на монтажних проводах між акумулятором-інвертором та колійною котушкою. Удосконалення двигуна в цьому напрямі стало можливим завдяки можливості підведення електроенергії до кожної колійної котушки від акумуляторів, що використовують енергію інсоляції.

В роботі розроблено алгоритм розрахунку енергетичних характеристик системи електропостачання, за допомогою якого отримані наступні результати (див. рис. 1, 2) для довжини ділянки секції, що живиться, від 50 м до 500 м.

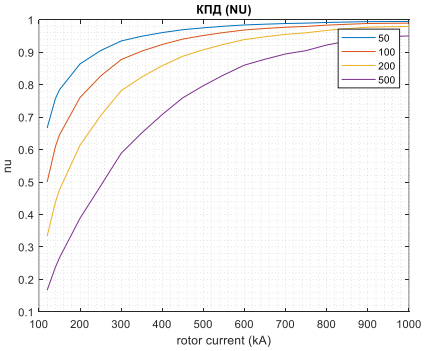


Рис 1. Залежність ККД лінійного двигуна від довжини фідерних секцій 50 – 500 м

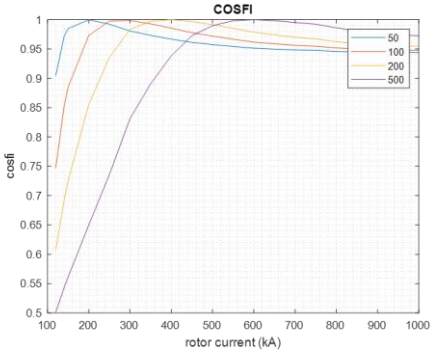


Рис. 2. Залежність коефіцієнта потужності лінійного двигуна від довжини фідерних секцій 50 – 500 м

Отже, якщо довжина секції співрозмірна з довжиною екіпажу, то тоді досягаються майже найкращі енергетичні характеристики двигуна. Подальше зменшення довжини секції не має сенсу, тому що екіпаж буде рухатись на суцільних стиках, що не сприяє поліпшенню характеристик..

1. Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. Transportation Systems and Technology [Електронний ресурс] / E. Fritz, J.Kluhspies, R. Kircher, M. Witt, & L. Blow, 2019. - 4(3). С. 134-155. Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134–155.
2. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. The International Maglev Board. Research Series 2. 1–19. Retrieved from [Електронний ресурс] / (2018). R. Kircher, R. Palka, E. Fritz, K. Eiler, M. Witt, L. E. Blow, J. Klühspies. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/327972538_Electromagnetic_Fields_of_High_Speed_Transportation_Systems_Maglev_Technologies_in_Comparison_with_Steel-Wheel-Rail
3. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией [Текст] / В.А. Дзензерский, В.И. Омельяненко, С.В. Васильев и др. Под общей редакцией В. А. Дзензерского, В. И. Омельяненко. – Киев.: Наукова думка, 2001.– 479 с.

Інноваційна технологія побудови магнітолевітаційної енергосистеми

Ю. М. Лаврич[1], Л. М. Погоріла[1]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1]lavrich@westa-inter.com

Використання традиційної технології та підходів проектування енергосистем не дозволяють створення надійної та безперебійної системи електрозабезпечення споживачів. Конструктивні особливості магнітолеветуючого транспорту впливають на ефективність бортової системи енергозабезпечення. Підвищення надійності системи можливе при застосуванні нових підходів розробки системи.

***Ключові слова**: пневмодвигун, стиснуте повітря, високошвидкісний наземний транспорт*

Вступ. Одною з можливих систем енергозабезпечення високошвидкісного наземного транспорту (ВШНТ) є системи з використанням стисненого повітря. Стиснене повітря завдяки пружності здатне виконувати роботу за рахунок накопиченої в ньому енергії. Накопичення енергії відбувається під час закачування повітря в балон під тиском, а виділення – при випуску повітря з балона. Накопичена стисненим повітрям енергія потім здійснює механічну роботу завдяки різниці тиску енергоносія (стисненого повітря) та атмосферного тиску.

Основна частина. Виконавчими механізмами у пневмосистемах є пневмодвигун. призначений для перетворення потенційної енергії стисненого повітря в механічну роботу та забезпечують необмежений обертальний рух вихідного валу. Пневмомотори мають ряд переваг - простота регулювання швидкості обертання і крутячого моменту, можливість повного гальмування під навантаженням. У турбінних пневмомоторах (ПМ) кінетична енергія потоку стисненого повітря перетворюється на механічну енергію обертання вихідного валу. Турбінні ПМ в порівнянні з двигунами об'ємного типу мають єдину рухливу частину - робоче колесо, що здійснює простий обертальний рух (у разі застосування передавального механізму обертальний рух здійснюють так довго, тому деталі визначаються надійністю та довговічністю лише підшипникових вузлів. Крім того, турбінні ПМ мають малі габарити і вагу (що є важливим показником для ВШНТ "суху" (безмасляну) робочу порожнину, вони прості та безпечні в обслуговуванні, здатні розвивати значні потужності.

На великих швидкостях руху ВШНТ збільшення тиску повітря перед його надходженням в камеру пневмодвигуна (ПД) здійснюється повітрозабірником (ПЗ), в результаті перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в потенційну енергію тиску, для регулювання пропускної спроможності якого необхідно застосування системи автоматичного регулювання. Для цього застосовані регульовані елементи конструкції, що забезпечують зменшення прохідного перерізу ПЗ, що зменшує надходження повітря в ПД, або відводять частину повітря від камери ПД, ще більш зменшуючи тиск у каналі ПЗ.

Робота системи здійснюється за програмою, що є залежністю координат, що визначають положення регулюючих органів, від параметрів, що характеризують потрібну витрату повітря. Потрібна витрата залежить від ступеня підвищення тиску в

ПД та наведеної частоти обертання, використовуючи сигнали від датчиків тиску до і після ПД значення швидкості обертання. У системі, що працює за наведеною частотою обертання, керуючий сигнал формується за частотою обертання ПД (датчик частоти обертання) і за щільністю потоку набігаючого повітря. Обертальний рух подається на лопатки ПД, швидкість обертання може змінюватися в діапазоні 100-25000об/хв залежно від тиску повітря на вході ПД. Запасена енергія стисненого повітря, надходячи у герметичну камеру ПД, чинить тиск на лопатки ротора і змушує його обертатися. Для вимірювання частоти обертання можливе використання будь-яких фізичних явищ, у яких частота обертання пов'язана певною залежністю з електричною величиною.

Управління швидкістю та крутним моментом ПД досягається шляхом регулювання подачі повітря, що можливо шляхом дроселювання або регулювання тиску. У першому випадку сила потоку повітря коригується шляхом розміщення клапанів у впускному або випускному отворі ПД. Дросельне регулювання знижує максимальну швидкість, але не впливає на стартову продуктивність. Швидкість і потужність може бути знижені шляхом застосування регулятора тиску на подачу стисненого повітря, який зменшує тиск повітря, що надходить на ПД і завжди встановлюється на вхідному отворі

Синхронізація валів ПД і генератора ВШНТ може здійснюватися датчиками та використанням зворотного зв'язку за швидкістю застосувавши частотні перетворювачі, найбільш ефективно ця проблема може бути вирішена з використанням високопродуктивних [1] програмно-логічних комплексів/

Висновки. Використання перетворювача енергії швидкісного напору дозволить підвищити ефективність енергосистеми транспорту.

1. Siemens Aktiengesellschaft. PM21. SIMOTION, SINAMICS S120 и двигатели производственных машин /Siemens AG. Berlin : Siemens AG, 2011. – 988 с.

Innovative technology for building a magneto-levitation power system

Y.N. Lavrych[1], L.M. Pogorelaya [1]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

[1]e-mail: lavrich@ westa-inter.com

The use of traditional technology and approaches to power system design does not allow the creation of a reliable and uninterrupted power supply system for consumers. The design features of magnetic levitation vehicles affect the efficiency of the on-board power supply system. Increasing the reliability of the system is possible when using new approaches to system development.

Імпульсний метод контролю стану працездатності накопичувача енергії в системі енергозабезпечення транспортних засобів

М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко[1], С. Я. Остаповська

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1]R.Y.Levchenko@nas.gov.ua

Ключові слова: накопичувач енергії, стан працездатності, імпульсний гальваностатичний метод, сигнал відгуку, коефіцієнт використання активних матеріалів, вейвлет Хаара.

Системи накопичення та зберігання енергії на основі електрохімічних джерел струму є новою та важливою технологією в транспортній галузі економіки. Метою роботи є підвищення ефективності використання накопичувачів енергії за рахунок розробки імпульсного гальваностатичного методу контролю стану працездатності в динамічних режимах роботи.

У загальному виді стан працездатності (State of Health – SOH) накопичувача енергії визначається у відсотках за виразом

$$SOH(\%) = C_ф / C_н \times 100\%, \qquad (1)$$

де $C_ф$ – фактична ємність накопичувача; $C_н$ – початкова ємність накопичувача у новому стані. Ємність накопичувача енергії пов'язана з поточним значенням кінетичних параметрів електрохімічного процесу, значення яких можна одержати із форми сигналу відгуку накопичувача на тестовий імпульс струму. Загальний вид форми сигналу відгуку наведено на рис. 1 [1].

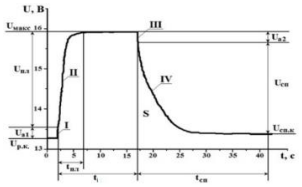


Рис. 1. Форма сигналу відгуку

Необхідні для визначення стану працездатності накопичувача енергії кінетичні параметри містить у собі стадія деполяризації тестового імпульсу. Процес деполяризації після зняття тестового імпульсу, який на сигналі відгуку відображено кривою деполяризації $U_{сп}$, в загальному виді описується рівнянням:

$$U_{сп}(t) = U_{сп}(t_0) - i_0 \cdot (t - t_0)/C_{д.с.}, \qquad (2)$$

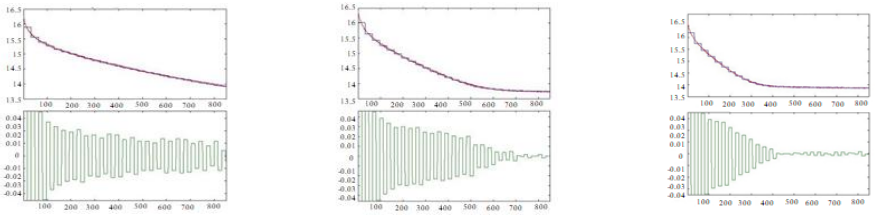
де $U_{сп}(t)$ – напруга спаду в момент часу t; $U_{сп}(t_0)$ – напруга спаду в момент вимкнення струму (t_0); i_0 – щільність струму обміну; $C_{д.с.}$ – ємність подвійного електричного шару.

Ємність подвійного шару прямо пропорційна величині його заряду та активній площі поверхні активної маси, тому тривалість стадії деполяризації пропорційна тривалості процесу розряджання подвійного шару та прямо пропорційна площі поверхні реагуючої частки активної маси, яка, у свою чергу, визначає стан працездатності. Авторами [1] обґрунтовано пропорційну залежність величини площі S фігури, що обмежена кривою напруги деполяризації $U_{сп}(t)$ на сигналі відгуку, від коефіцієнта використання активної маси. В якості математичного апарату для обробки

кривої напруги деполяризації $U_{сп}(t)$ обрано вейвлет-перетворення Хаара. Контроль стану працездатності накопичувача енергії здійснювали обчисленням кількості вейвлетів Хаара $N_п$ на кривій $U_{сп}(t)$ за відповідним алгоритмом та за еквівалентним виразу (1) рівнянням визначали поточний стан працездатності накопичувача енергії:

$$SOH(\%) = N_п/N_н \times 100\%, \quad (3)$$

де $N_п$ – кількість вейвлетів Хаара на кривій напруги деполяризації $U_{сп}(t)$ на сигналі відгуку в поточний момент часу, $N_н$ – кількість вейвлетів Хаара на кривій напруги деполяризації $U_{сп}(t)$ в сигналі відгуку накопичувача енергії на початку експлуатації. Для прикладу на рис. 2 наведено фрагменти визначення стану працездатності накопичувача енергії за роками.



а *б* *в*

Рис. 2. Фрагменти визначення стану працездатності накопичувача енергії*: а* – SOH=100% при повністю зарядженому накопичувачі в початковому стані; *б* –SOH≈82% в проміжному стані через 2 роки експлуатації; *в* – SOH≈68% через 4 роки в кінці терміну експлуатації**.**

1. С. В. Плаксін, М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповська, Імпульсний метод оперативного контролю та управління зарядним процесом накопичувача енергії, *Технологія та конструювання в електронній апаратурі,* **1–3**, 22–30 (2022). http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.22

Pulse method for monitoring state of health energy storage in the vehicle power supply system

M. Zhitnik[a], R. Levchenko[a1], S. Ostapovska[a]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] R.Y.Levchenko@nas.gov.ua

A pulse method has been developed that allows monitoring the current state of health the energy storage in dynamic operating modes. The method is based on the application of the Haar wavelet transform of the depolarization voltage curve on the response signal of the storage after removing the test pulse, which limits the area of the figure on the response signal, which is proportional to the utilization factor of active materials. Unlike known existing methods for determining the state of health the energy storage, the developed pulse galvanostatic method does not require disconnecting the consumer from the storage device and provides determination of the current state of the energy storage at any moment of its operation in real time and real application conditions.

Keywords: energy storage, state of health, pulse galvanostatic method, response signal, active materials utilization factor, Haar wavelet.

Розробка алгоритму визначення поточного стану працездатності електрохімічних накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення транспортних засобів

М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко[1], С. Я. Остаповська

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1]R.Y.Levchenko@nas.gov.ua

Ключові слова: електрохімічний накопичувач енергії, імпульсний гальваностатичний метод, поточний стан працездатності, сигнал відгуку, вейвлет Хаара.

Накопичувач енергії є невід'ємною та критично важливою складовою системи енергозабезпечення транспортних засобів. Тому точна оцінка стану працездатності накопичувача дуже важлива для ефективної та безпечної роботи системи енергозабезпечення в цілому.

Стан працездатності (SOH – State of Health) накопичувача у загальному виді визначають відношення поточної ємності до номінальної ємності за виразом:

$$SOH = C_n/C_н \times 100\%, \quad (1)$$

де $C_п$ – поточна ємність накопичувача; $C_н$ – номінальна ємність накопичувача на початку його експлуатації.

Традиційні методи визначення поточного стану працездатності електрохімічних накопичувачів енергії використовують складні моделі [1], у зв'язку з цим актуальною задачею залишається розробка нових методів визначення поточного стану працездатності та алгоритмів їх реалізацій.

Запропоновано алгоритм реалізації імпульсного методу визначення поточного стану працездатності електрохімічного накопичувача енергії в динамічних режимах без порушення штатного режиму роботи системи енергозабезпечення, блок-схема якого представлена на рис. 1.

Алгоритм передбачає послідовне виконання операцій з визначення основних параметрів накопичувача із сигналу відгуку, отриманого при подачі тестового імпульсу струму (див. блоки (1 – 16)) згідно з [2]. Під час заряджання на накопичувач періодично подаються тестові імпульси для порівняння поточних параметрів з попередніми значеннями. Процес триває до моменту, поки динамічні параметри не досягнуть постійних значень, після чого процес заряджання припиняється. (див. блоки (17 – 25)). Визначення поточного стану працездатності здійснюють за методикою [3] (див. блоки (28 – 33)), суть якої у спрощеному викладі полягає в обчисленні кількості вейвлетів Хаара на кривій деполяризації, виділеної із сигналу відгуку. Поточний стан працездатності накопичувача визначають за виразом (див. блок 34):

$$SOH = N_n/N_н \times 100\%, \quad (2)$$

де $N_п$ – кількість вейвлетів Хаара на кривій спаду напруги $U_{сп}$ в поточний момент часу, $N_н$ – кількість вейвлетів Хаара на кривій спаду напруги $U_{сп}$ на початку експлуатації при номінальній ємності накопичувача.

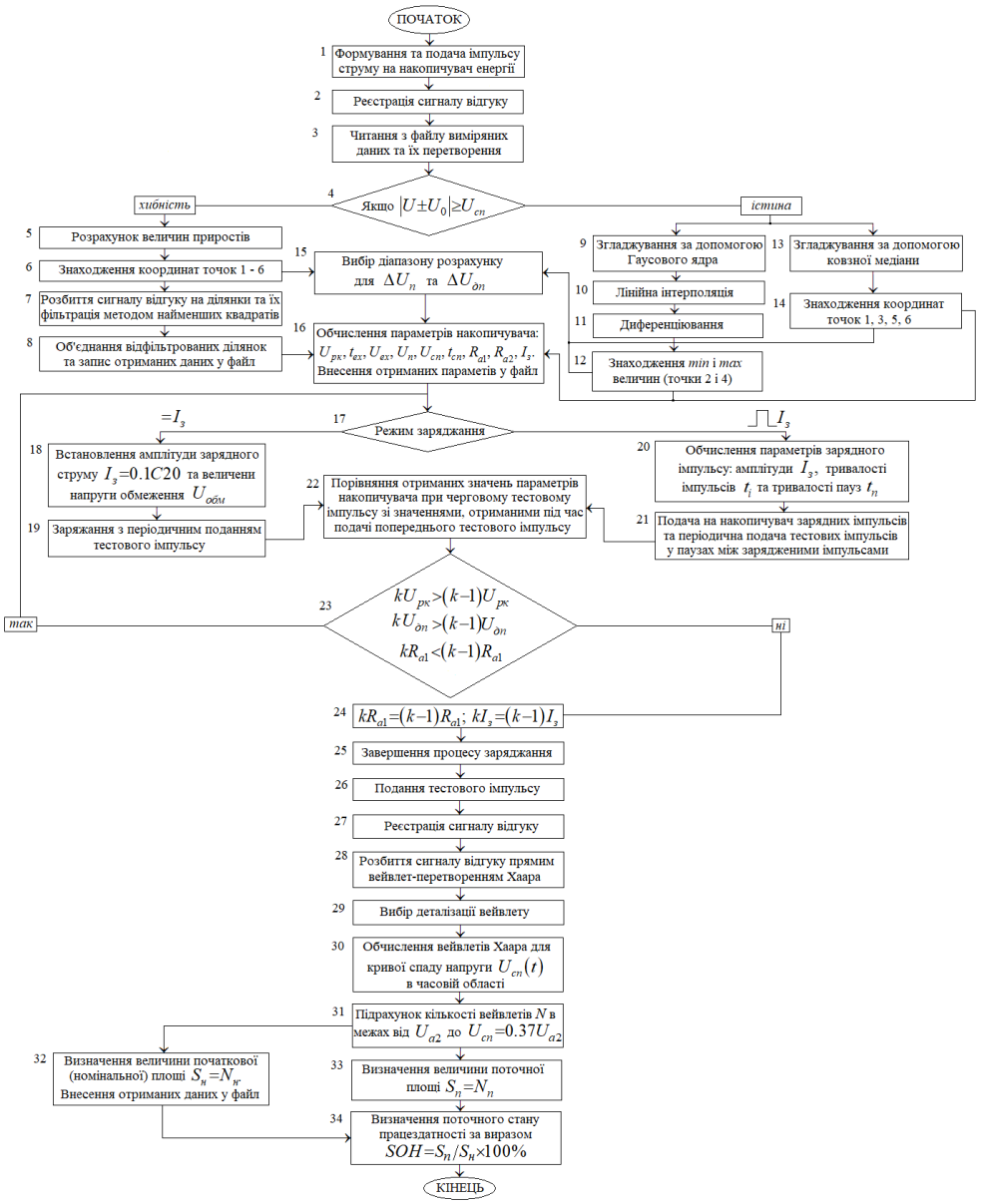
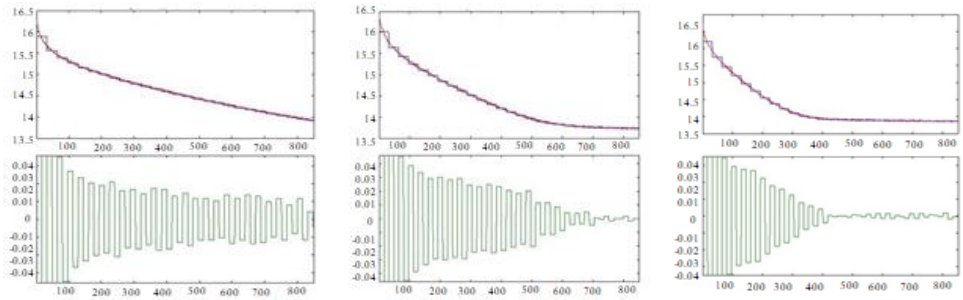


Рис. 1. Блок-схема алгоритму визначення поточного стану працездатності

Для прикладу на рис. 2 наведено експериментально одержані та оброблені з застосуванням вейвлет-аналізу сигнали відгуку для визначення поточного стану працездатності накопичувача енергії на основі свинцево-кислотної акумуляторної батареї 6СТ-60А3 у процесі його експлуатації впродовж 4 років.

Накопичувач енергії вважається працездатним, якщо значення SOH ≥ 60 %. Досягнення накопичувачем енергії значення стану працездатності 68% в наведеному прикладі означає, що він знаходиться на межі допустимої працездатності та потребує припинення експлуатації для запобігання порушення штатного режиму роботи системи енергозабезпечення транспортного засобу.



а *б* *в*

Рис. 2. Фрагменти обробки кривої деполяризації з застосуванням вейвлет-перетворень Хаара*: а* – $N_н$=25; SOH=100% при повністю зарядженому накопичувачі в початковому стані; *б* – $N_п$=20; SOH≈82% в проміжному стані через 2 роки експлуатації; *в* – $N_п$=17; SOH≈68% через 4 роки в кінці терміну експлуатації.

1. Z. Wang, X. Zhao, L. Fu et al, A review on rapid state of health estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **60**, 103457 (2023). https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103457
2. В. О. Дзензерський, С. В. Плаксін, М. Я. Житник, В. В. Лісунова, Управління процесом зарядки електрохімічного накопичувача енергії, *Електротехніка та електроенергетика*, **1**, 42–53 (2018). https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-5
3. С. В. Плаксін, М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповська, І. В. Тимченко, Методика обробки сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії для оперативного контролю його енергетичного стану, *Труди МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 41–42 (2023).

Development of an algorithm for determining the current state of health electrochemical energy storages in the vehicle power supply system

M. Zhitnik, R. Levchenko[1], S. Ostapovska

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1] R.Y.Levchenko@nas.gov.ua

Algorithm for determining the current state of health electrochemical energy storages based on the use of a single-pulse galvanostatic method is proposed. Mathematical processing of the response signal is based on the application of wavelet transforms of the depolarization voltage decay function in the time-frequency domain to obtain the necessary information in real time, using Haar wavelets as an informative parameter for determining the current state of health.

Keywords: electrochemical energy storage, pulse galvanostatic method, current state of health, response signal, Haar wavelet.

Чисельне моделювання структури течії навколо безпілотного апарату типу «літаюче крило»

М. С. Арсенюк[1]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1] ars_mix@ukr.net

Ключові слова: аеродинаміка транспортних засобів, числове моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, URANS, модель турбулентності, БПЛА, літаюче крило.

Невідкладні потреби України у використанні безпілотних апаратів (БПЛА) призвели до появи різноманітних конструкцій цих літальних засобів. Однією з основних ідей компонування «літаюче крило» є можливість створення підйомної сили всією поверхнею БПЛА, а також мінімізація лобового опору. Одним із найзручніших і найперспективніших інструментів дослідження аеродинаміки є чисельне моделювання, яке дозволяє в малі терміни детально вивчити аеродинаміку тіл, що обтікаються [1].

У доповіді розглядається аеродинаміка БПЛА типу «літаюче крило» на моделі з профілем крила Clark YH 12% з кутом установки 2° за наявністю плавно піднятих вінглето-подібних закінцівок крила (рис.1). Довжина корпусу в центральній частині становила 23,17 см, а розмах крил – 60 см. При швидкості 40 м/с (144 км/год) відповідне число Рейнольдса дорівнювало $6{,}3 \cdot 10^5$.

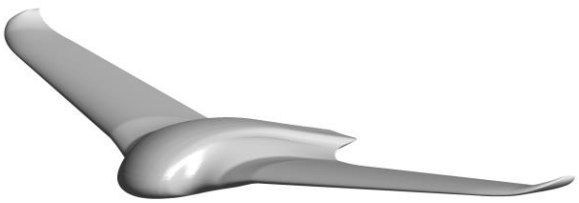
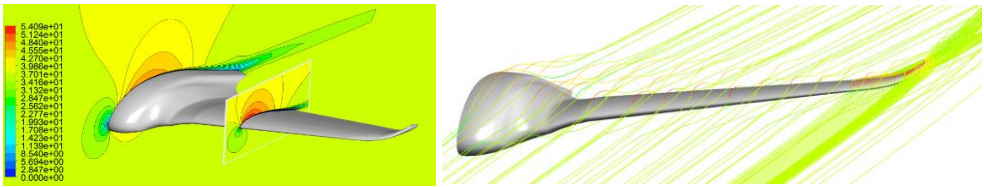


Рис. 1. Загальний вигляд БПЛА «літаюче крило»

В якості математичної моделі для розрахунку обтікання моделі БПЛА було застосовано тривимірні нестаціонарні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (URANS), які записані у довільної криволінійної системи координат [1]. При замиканні системи рівнянь використовувалася модель турбулентності SST Ментера [2-3].

Для чисельного розв’язання рівнянь Нав'є-Стокса використовується контрольно-об'ємний метод, який включає в себе дискретизацію розрахункової області на контрольні об'єми; інтегрування рівнянь на окремих контрольних об'ємах; формування системи алгебраїчних рівнянь; розв’язання лінійної системи алгебраїчних рівнянь [1]. Чисельна методика реалізована в рамках спеціалізованого пакету обчислювальної аеродинаміки, який багато років розробляється в Інституті транспортних систем і технологій НАН України.

В результаті комп’ютерних експериментів отримано дані щодо структури течії повітря навколо корпусу БПЛА (рис. 2), а так само вплив, який чиниться потоком, який набігає, на поверхню корпусу.



а *б*

Рис. 2. Результати моделювання :а- розподіл модуля швидкості в поздовжніх перетинах БПЛА; б - Лінії течії навколо БПЛА при куті установки 2°

При нульових кутах атаки та ковзання (крейсерський режим польоту) реалізується переважно безвідривне обтікання. Невелика зона відриву потоку спостерігається на задній навітряній частині переходу з крила до центрального тіла.

Розрахункові інтегральні аеродинамічні характеристики показують, що досліджувана конфігурація має досить значну підйомну силу та невеликий лобовий опор. Значення коефіцієнту підйомної сили склало $C_y = 0.598$ при коефіцієнті лобового опору $C_x = 0.0365$.

В цілому, результати комп'ютерного моделювання підтверджують, що компонування «літаюче крило» придатне для створення легких БПЛА з можливістю великого часу перебування у польоті.

1. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэрогидромеханике и тепломасообмене. – Киев: Наукова думка, 2003.-380 с.
2. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA-Journal., 32(8), 1994. - P. 1598 – 1605.
3. Grotjans, H. and Menter, F.R. Wall functions for general application CFD codes" // In K.D.Papailiou et al., editor, ECCOMAS 98 Proceedings of the Fourth European Computational Fluid Dynamics Conference, John Wiley & Sons, 1998. - P. 1112-1117.

Numerical modeling of the flow structure around a flying wing unmanned aerial vehicle

M. Arseniuk[1]

Institute of Transport Systems and Technologies, the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

[1] ars_mix@ukr.net

We consider numerical simulation of the flow around an unmanned aerial vehicle of the "flying wing" type. The simulation was based on the numerical solution of the Navier-Stokes equation system, which was supplemented by the equations of the two-parameter turbulence model k-ω SST. The solution was performed by a numerical algorithm based on the control volume method. As a result of the simulation, the distribution of velocities and pressures around the aircraft was obtained. The resulting spatial flow and aerodynamic characteristics of the UAV are analyzed.

Keywords: aerodynamics of transport vehicles, numerical modeling, Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes equations, URANS, turbulence models, UAV, flying wing.

Енергетичні технології побудови гібридних накопичувачів електричної енергії

Ю.М.Лаврич[1], Л. М. Погоріла

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

[1]lavrich@westa-inter.com

Застосування у автономних системах джерела живлення одного типу виявилось ненадійним та нераціональним. У процесі подальшої еволюції автономних систем з'явилися потреба гібридної системи генерації (ГСГ), яка інтегрує декілька джерел живлення з різними принципами генерації електроенергії.

Ключові слова: *магнітолевітаційний транспорт,джерела живлення,накопичувачі, алгоритм*.

Вступ. Стосовно магнітолевітаційного(Маглев) транспорту у якості моноджерела живлення (ДЖ) використано індукційний лінійний генератор (ІЛГ), ефективність якого цілком залежить від швидкості руху транспортного засобу. Складовими гібридного накопичувача електричної енергії (ГНЕЕ) можуть бути електротехнічний накопичувач енергії (ЕНЕ) і електрохімічний накопичувач енергії (ХНЕ), які можуть бути доповнені механічним накопичувачем енергії (GAES), який використовують енергетику швидкісного тиску повітря під час руху транспортного засобу.

1. Основна частина.

Обґрунтування оптимального складу гібридної автономної системи генерації, а саме оптимального складу джерел та накопичувачів електроенергії, тісно пов'язано з визначенням та оптимізацією її режимів роботи. Необхідний комплексний підхід до оптимізації складу та режимів роботи автономної системи генерації та споживачів електроенергії. Алгоритм комплексного обґрунтування складу та режимів роботи ГСГ наведено на рис. 1.

Використання ІЛГ в якості основного моноджерела живлення Маглев транспорту разом з накопичувачами електричної енергії, дозволяє отримати нові, відсутні сьогодні, функціональні можливості забезпечення переходу від моно- до багатофункціональної бортової гібридної енергосистеми. Бортова гібридна енергосистема складається з основного джерела живлення, а саме ІЛГ, а також з гібридного накопичувача електричної енергії, з використанням модульного принципу побудови накопичувачів різного принципу роботи. Кожен з можливих варіантів побудови гібридної бортової системи генерації має свої недоліки та переваги, але у сукупності сінергетичний ефект робить гібридну систему енергозабезпечення стійкою, енергоефективною, надійною та екологічною.

В якості накопичувачів енергії в енергосистемах найбільш широко використовуються акумуляторні батареї (АКБ) з різними типами електролітів, на основі яких формуються потужні системи накопичення – акумуляторні батареї великої потужності, час відгуку батареї становить 40-60 мс. Конденсаторні батареї (СК), що застосовуються в ГНЕЕ, виконані на базі осередків з подвійним електричним шаром, час відгуку СК, на відміну від АКБ, значно менше і становить близько 1 мкс.

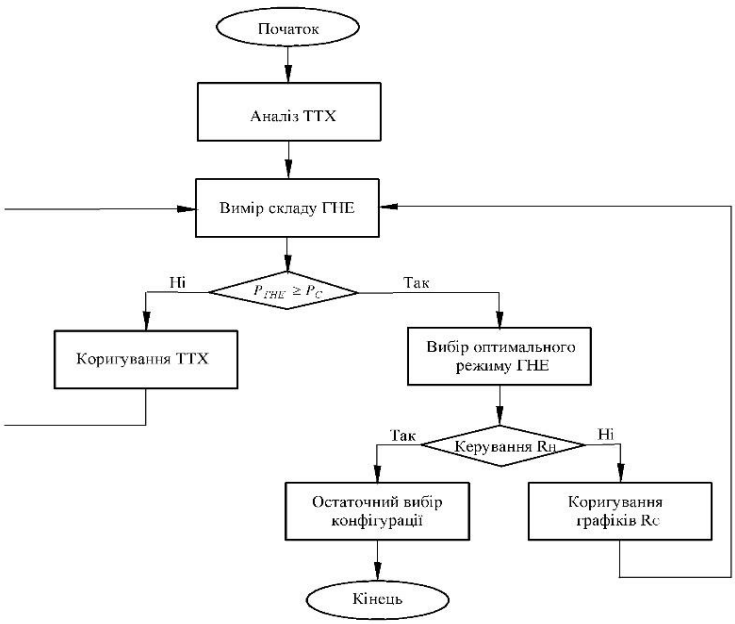


Рис. 1. Алгоритм обґрунтування складу та режимів роботи ГСГ

Наявність енергоємних накопичувачів в якості проміжних пристроїв між джерелами генерації енергії та споживачем дозволяє звільнитися від жорсткої вимоги щогодинної відповідності генерації енергії її споживанню

Обґрунтування оптимального складу джерел та накопичувачів у автономний системі мікрогенерації передбачає обов'язковий вибір алгоритмів керування. Для практичної реалізації алгоритму керування необхідний постійний контроль за запасом енергії у накопичувачах ГНЕЕ та поточними значеннями генерованої, споживаної та акумульованої потужностями.

Висновки. Розроблений алгоритм комплексного обґрунтування складу та режимів роботи гібридної автономної системи генерації заснований на розрахунку та порівняльному аналізі енергетичних характеристик гібридних складових автономної системи з урахуванням потреб електропостачання конкретного споживача.

Energy technologies for building hybrid electric energy storage systems

Yu. Lavrich, L.Pogorila

The use of a single type of power source in autonomous systems turned out to be unreliable and irrational. In the process of further evolution of autonomous systems, the need for a hybrid generation system (HGS) appeared, which integrates several power sources with different principles of electricity generation.

Keywords*: magnetic levitation transport, power sources, storage devices, algorithm.*

Режими роботи 2-х режимного тягово-левітаційного модуля

С. В. Плаксін[а], О. О. Голота[б1]

[а]Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1]sashagolota3012@gmail.com

Ключові слова: магнітна левітація, тяговий модуль, лінійний двигун, режими роботи, електромагнітна система.

Базовий 2-режимний тягово-левітаційний модуль перспективної магнітолевітаційної транспортної системи повинен виконувати наступні функції [1]:

- створювати тягове зусилля;
- забезпечувати левітацію у всьому діапазоні швидкостей магнітоплану;
- стабілізувати транспортний засіб відносно напрямної траси.

Для реалізації вищевказаних функцій можливо застосувати пару шляхових подвійних котушок NF-типу, які встановлюються навпроти в бічних стінках шляхопроводу з модифікацією їх конструкції наступним чином:

- вертикально розміщені котушки кожної сторони модуля вмикаються між собою через власний швидкодіючий напівпровідниковий комутаційний вузол, який забезпечує дві електричні схеми їх з'єднання. Конфігурації «0» відповідає тяговий режим, а конфігурації «8» – режим левітації [1].
- вертикальні пари котушок, що розміщенні на протилежних стінках шляхопроводу з'єднуються через напівпровідниковий комутаційний вузол утворюючи нуль-потоковий контур для компенсації бокового зміщення магнітоплану.
- котушки модуля в залежності від режиму роботи можуть бути активними, тобто отримувати живлення, або пасивними з замиканням на себе.

Режим левітації, коли котушки модуля мають конфігурацію «8», має дві фази [1]:

- перша – коли швидкості магнітоплану не достатньо аби наведені струми створили достатню для польоту силу левітації. В цьому випадку на котушки модулів, в межах довжини магнітоплану, подається від зовнішнього джерела постійний струм аби підняти транспортний засіб на висоту 5…10 мм над напрямною шляху. По мірі розгону частина модулів переходить у тяговий режим, бо зростає складова сили левітації від наведеного струму.
- друга, при досягнені певної швидкості у тих модулях які відповідають за створення левітації котушки замикаються на себе і їх живлення припиняється, тобто стають пасивними, а струм утворюється лише індукцією, коли транспортний засіб проїжджає повз.

Таким чином, маємо гібридний режим роботи підвіски – в діапазоні низьких швидкостей модуль реалізує електростатичний спосіб левітації, а при переході в область високих швидкостей – електродинамічний спосіб підвішування магнітоплану.

Режим тяги – котушки модуля мають конфігурацію «0» і на них подається зміна трифазна напруга регульована по амплітуді та частоті. Ця напруга формується методом широтно-імпульсної модуляції напівпровідниковим перетворювачем у складі модуля.

Суттєвою відмінністю пропонованого 2-режимного тягово-левітаційного модуля від існуючих концепцій є те, що в активному стані знаходяться тільки ті тягові модулі, в зоні дії яких знаходиться магнітоплан. Така пляма активності довжиною трохи більше рухомого складу рухається відносно шляхової структури із швидкістю екіпажу.

1.Аналіз передумов до створення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля другого покоління / А. М. Муха та ін. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2(110). С. 65–75. https://doi.org/10.15802/stp2025/332149.

Operating modes of the 2-mode traction-levitation module

S. Plaksin[a], O. Holota[b1]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]sashagolota3012@gmail.com

The paper provides detailed aspects of the operating modes of a combined dual-mode traction-levitation module that combines the functions of generating traction and magnetic suspension of the crew. A significant difference of such a module from existing concepts is that only those traction modules are in the active state, in the area of which the magnetoplane is located. Such a spot of activity, slightly longer than the rolling stock, moves relative to the track structure at the speed of the crew.

Keywords: magnetic levitation, traction module, linear motor, operating modes, electromagnetic system.

Просторова стабілізація екіпажу високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи

Ю. В. Шкіль[а], О. О. Голота[б1]

[а]Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1]sashagolota3012@gmail.com

Ключові слова: просторова стабілізація, котушка, нульовий потік, бортовий магніт.

Екіпаж високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи фактично летить над напрямною шляхопроводу, звісно така система потребує певного зусилля, в поперечному напрямку відносно напрямку руху, для запобігання його бічного зсуву. Як і випадку з підвіскою, стабілізація потяга може здійснюватися електромагнітним шляхом силами магнітного відштовхування або притягання [1].

Застосування магнітної сили відштовхування для поперечної стабілізації магнітоплану запропоновано Паулеом і Денбі і влаштоване наступним чином – дві котушки лінійного тягового двигуна встановлені з лівого і правого боків напрямної та з'єднані між собою електрично. Бортовий магніт рухаючись повз ці котушки наводить в кожній з них електрорушійну силу. Якщо екіпаж знаходиться по центру траси повітряні зазори між ним і боковими стінками однакові, а значить електрорушійні сили лівої і правої котушки однакові і компенсують одна одну. У випадку, коли екіпаж зміщається вліво чи право відносно центру траси електрорушійні сили перестають бути рівними і під дією їх різниці виникає струм, який у котушці до якої потяг став ближче створює додаткову магніторушійну силу, під дією якої потяг повертається до центрального положення.

Подальшим розвитком ідеї шляхових котушок з нульовим потоком є з'єднання левітаційних котушок, що вмонтовані в протилежні бокові стінки напрямної маглев-траси, як показано на рис. 1 [2].

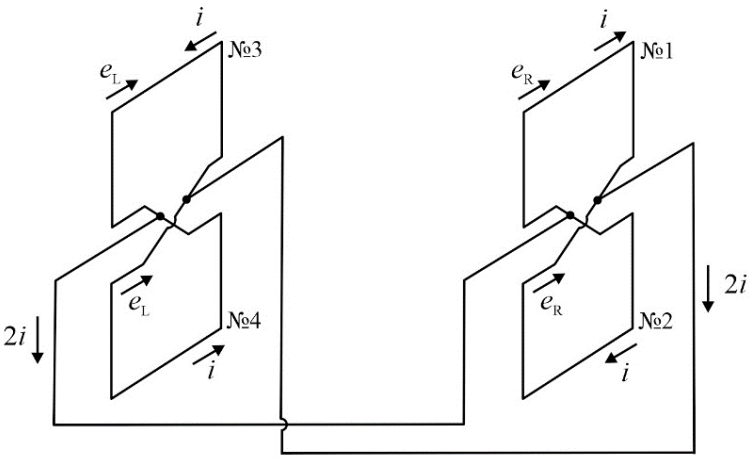


Рис. 1. Котушки левітації в японському JR-maglev типу MLX

В кожній з бічних стінок розміщується по дві котушки, на лівій стінці вертикально розміщено котушки 3 і 4, коли магнітна ось бортового магніту знаходить строго між цими котушками (по вертикалі) їх електрорушійні сили однакові. Якщо є зміна вертикального положення екіпажу рівність електрорушійних сил між котушками 3 і 4 порушується, різницею цих електрорушійних сил створюються циркулюючі струми, що і створюють додаткову магніторушійну силу.

Така схема увімкнення магнітолевітаційних котушок (рис. 1) забезпечує стабілізацію магнітолевітаційного транспортного засобу, як в поперечному напрямку, так і по висоті, тобто фактично діє як повноцінна направляюча система.

Використання сил магнітного притягання для стабілізації транспортного засобу суттєво ускладнене на високих швидкостях, оскільки процеси управління положенням магнітоплану в поперечному напрямку відносно напрямку руху і левітацією є взаємопов'язаними [2]. Прикладом застосування такого підходу є транспортні системи HSST та UTM, які працюють на низьких та середніх швидкостях.

1. Wang, S., Li, H., Wang, L., Huang, H., Deng, Z., & Zhang, W. *Suspension parameters optimization of HTS maglev under random vibration*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021. 31(8), P. 1–4. https://doi.org/10.1109/tasc.2021.3094427
2. Аналіз передумов до створення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля другого покоління / А. М. Муха та ін. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2(110). С. 65–75. https://doi.org/10.15802/stp2025/332149.

Spatial stabilization of the crew of a high-speed magnetic levitation transport system

Yu. Shkil [a], O. Holota[b1]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]sashagolota3012@gmail.com

The paper analyzes methods of spatial stabilization of the crew of high-speed magnetic levitation transport systems (maglev) to minimize dynamic oscillations caused by external disturbances. The main attention is paid to the use of null-flux electromagnetic systems, which provide high energy efficiency and self-regulating levitation stability.

Keywords: spatial stabilization, coil, zero flux, onboard magnet.

Екологічно раціональна енергосистема, як основа перспективного високошвидкісного наземного транспорту

Ю. В. Шкіль[а], О. О. Голота[б1]

[а]Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1]sashagolota3012@gmail.com

Ключові слова: фотоперетворювач, розподілена енергосистема, магнітоплан, енергоефективність.

Сучасними трендами в розвитку транспорту є підвищення його енергоефективності з одночасним зменшенням негативного впливу на екосистеми територій. Одним з шляхів руху в цій парадигмі є об'єднання в єдиній системі технологій відновлюваних джерел енергії та магнітолевітаційного транспорту.

Пропонується використати розподілену систему фотоелектричних перетворювачів, що розміщується уздовж маглев-траси, для живлення його основних підсистем (бортових споживачів, підсистеми управління рухом, тягового приводу та магнітної підвіски). В основі обґрунтування можливості живлення системи високошвидкісного наземного транспорту на магнітній левітації від мережі розподілених фотоелектричних перетворювачів є оцінка енергозатрат транспорту та енергетичного потенціалу енергосистеми.

Встановлено, що для магнітоплану з електродинамічним підвісом загальною масою 400 кг питомі витрати енергії на рух не перевищують 123 Вт·год/т·км на перегоні довжиною 100 км. Потужність, що розвивається тяговим приводом, за умови руху з постійною швидкістю 500 км/год, складає 14,66 МВт, при цьому потужність, що споживається з мережі сягає 18,9 МВт [1].

Аналіз статистичних даних надходження сонячної енергії в Україні показав, що середньорічна кількість сумарної сонячної радіації на квадратний метр площі поверхні коливається від 1070 кВт·год/м^2 на півночі країни до 1400 кВт·год/м^2 на її півдні [1]. Для практичних розрахунків з урахуванням орієнтації і ККД сонячних фотоелектричних панелей можна користуватись цифрою 50 кВт·год/м^2 на рік [2]. Тоді 1 м^2 фотоелектричної панелі на протязі календарного року може забезпечити енергію необхідну для переміщення вантажу в 1 тону на відстань, що дорівнює довжині однієї шляхової котушки 2τ/3 м, 625000·1/τ раз. Якщо величину τ прийняти в діапазоні від 1,5 до 2,6 м, то число переміщень складе відповідно 417000 та 240000 раз, що для вантажу 1 т відповідає пропускній здатності шляху 1,5…2,6 хв. Така «коротка» котушка потребує іншої архітектури усієї маглев-траси, але перехід на базовий модуль з живленням від автономного джерела, що находиться поруч і є запорукою високої енергоефективності системи в цілому.

Баланс енергетичних потреб магнітолевітаційного поїзда і можливостей фотоелектричної системи енергозабезпечення ілюструє, що цілком можливо використовувати розподілену фотоелектричну систему в якості системи енергопостачання високошвидкісного наземного транспорту.

1. Обґрунтування застосування розподіленої мережі фотоелектричних перетворювачів для живлення лінійного двигуна магнітолевітаційного транспорту / Плаксін С. В. та ін. *Системні технології*. 2025. Т. 6, № 155. С. 10–19. https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-155-2024-02
2. Мхітарян Н.М. Геліоенергетика. Системи, технології, використання. Київ: Наукова думка, 2002. 320 с.

An environmentally sound energy system as the basis for promising high-speed land transport

Yu. Shkil [a], O. Holota[b1]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]sashagolota3012@gmail.com

Analysis of the balance of energy needs of a maglev train and the capabilities of a photovoltaic power supply system shows that it is quite possible to use a distributed photovoltaic system as a power supply system for high-speed ground transport. Thus, in conditions of real solar energy availability in Ukraine, the electrical energy generated by 1 m^2 of photovoltaic panels is enough to transport a maglev train weighing 400 tons for a distance of 1 m approximately 1 thousand times.

Keywords photoconverter, distributed energy system, magnetoplane, energy efficiency.

Порівняльний аналіз систем підвішування екіпажу в магнітолевітаційних транспортних системах

С. В. Плаксін[а], Д. В. Устименко[б1]

[а]Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1]ustimenko.1979@gmail.com

Ключові слова: магнітоплан, левітація, підвіска, магніт, маглев-траса.

В магнітолевітаційних транспортних системах виділяють чотири основні підсистеми [1]:

- лінійний двигун, який забезпечує переміщення магнітоплану уздовж траси;
- підвіску, яка забезпечує магнітну левітацію екіпажу над трасою;
- підсистему управління рухом транспортного засобу;
- підсистему живлення шляхової інфраструктури та магнітоплану.

Магнітну підвіску, з точки зору технічної реалізації, класифікують на електромагнітну (EMS) [2] і електродинамічну (EDS) [3].

Левітація в системах з електромагнітною підвіскою реалізується на основі сил магнітного притягання між напрямною, яка розміщується вздовж траси, та бортовими електромагнітами. Така підвіска за своєю суттю є нестабільною і потребує високоточного регулювання величини повітряного зазору в процесі руху транспортного засобу. Зазвичай величина повітряного зазору коливається близько 10 мм, тому на високих швидкостях руху таке регулювання стає досить складною задачею, вирішення якої суттєво ускладнює конструкцію підвіски і підсистеми управління. З тієї ж причини, транспортні системи з EMS досить вимогливі до якості і точності побудови траси. EMS забезпечує достатню підйомну силу у всьому діапазоні швидкостей магнітоплану, що беззаперечно є достоїнством такого підвішування, на відміну від EDS, які мають швидкісні обмеження.

Електромагнітні підвіски можна поділити на два типи за реалізацією технології левітації:

- підвіски з інтегрованими левітацією і управлінням. Реалізована на японській HSST транспортній системі;
- підвіски з розділеною левітацією та управлінням. Такий тип підвіски застосовується на німецькому Transrapid.

EMS з інтегрованими левітацією і управлінням найпростіші та найдешевші в реалізації але не можуть застосовуватись на високих швидкостях, бо з ростом швидкості руху взаємний вплив підсистем левітації та управління зростає і система перестає справлятись із своїми задачами. EMS де функції створення левітації та управління положенням екіпажу відносно траси розділені, добре працює на високих швидкостях але потребує складної системи управління з високоточною системою датчиків.

В електродинамічних підвісках, на відміну від електромагнітних, працює сила відштовхування (сила Ленца). В EDS відбувається взаємодія бортового магніту з пасивною наземною частиною для утворення підйомної сили, магнітоплан не

підніметься над трасою доки не досягне певної швидкості (не менше 100…150 км/год), нижче якої він опиратиметься на напрямну шляху звичайними колесами. Бортові магніти рухаючись відносно траси уздовж якої розміщено безліч індукційних котушок наводять в останніх магнітне поле. Сила відштовхування є результатом взаємодії цих полів (бортового і траси) і саме вона піднімає екіпаж та забезпечує стійку левітацію. Системи EDS характеризуються високою магнітною стабільністю і не потребують контролю за повітряним зазором, величина якого коливається біля 100 мм. Значна величина повітряного зазору і низька чутливість до коливань навантаження робить такий тип підвіски гарним вибором для високошвидкісних транспортних систем.

Найбільш перспективною вважається електродинамічна підвіска (EDS) з надпровідниковими бортовими електромагнітами (SC), саме з таким типом підвіски японський маглев встановив, і досі тримає, світовий рекорд зі швидкості [1].

На думку авторів перспективний наземний транспорт на магнітній левітації повинен мати таку підвіску в якій поєднуються сильні сторони обох типів підвісок. На етапі розгону підвіска повинна працювати як електромагнітна, а з виходом на швидкості вище 150 км/год переходити на електродинамічну. Отримати таке гібридне рішення можливо лише за умови принципово іншої архітектури Maglev-траси.

1. Аналіз передумов до створення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля другого покоління / А. М. Муха та ін. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2(110). С. 65–75. https://doi.org/10.15802/stp2025/332149.
2. Sinha P. *Design of a magnetically levitated vehicle*. IEEE Trans. Magn. 1984. Vol. 20(5), P. 1672–1674. http://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063552
3. Powell J. R., Danby G. T. *Maglev vehicles-raising transportation advances of the ground*. IEEE Potentials. 1996. Vol. 15, no. 4, P. 7-12. http://doi.org/10.1109/45.539957

Comparative analysis of crew suspension systems in magnetic levitation transport systems

S. Plaksin[a], D. Ustymenko[b1]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]ustimenko.1979@gmail.com

The paper presents a comparative analysis of electromagnetic (EMS) and electrodynamic (EDS) suspension systems for maglev transport in terms of stability of movement, efficiency and cost of implementation. Based on the consideration of technical features, rational areas of application of each technology for promising high-speed ground transport built on the basis of magnetolevitation technology are determined.

Keywords: magnetoplane, levitation, suspension, magnet, maglev track.

Лінійні електродвигуни в магнітолевітаційних транспортних системах

С. В. Плаксін[а], Д. В. Устименко[б1]

[а]Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1]ustimenko.1979@gmail.com

Ключові слова: лінійний асинхронний двигун, лінійний синхронний двигун, електрорушійна сила, магнітний потік.

Сьогодні у світі є низка експериментальних установок та масштабних магнітолевітаційних транспортних систем, наприклад: експериментальний полігон JR-Maglev у префектурі Яманаші (Японія), дослідницька лінія Transrapid (Німеччина), корейський UTM, японський HSST, проект надшвидкісної пасажирської лінії «Hyperloop» в США [1]. В усіх вищеназваних транспортних системах з магнітолевітаційним підвішуванням підсистема, що створює підйомну силу, відокремлена від підсистеми, що забезпечує лінійний рух транспортного засобу.

Основою підсистеми, що забезпечує лінійний рух магнітоплану уздовж траси, є лінійний тяговий електродвигун. Лінійні тягові електродвигуни для задач магнітолевітаційного транспорту можуть бути двох типів: лінійний асинхронний двигун (LIM) та лінійний синхронний двигун (LSM).

LIM за принципом дії аналогічний до класичного асинхронного електродвигуна з обертовим ротором – магнітне поле первинної частини, що змінюється в часі і просторі через повітряний зазор індукує електрорушійну силу у вторинній частині. Під дією якої у вторинній частині протікає струм, який взаємодіє з магнітним потоком у повітряному зазорі і створює силу (сила Лоренца), що рухає транспортний засіб. Є два типи лінійних асинхронних тягових двигунів:

- SP у якого коротка первинна частина розміщена на борту магнітоплану, а вторинна частина знаходиться на напрямній траси;
- LP у якого довга первинна частина розміщена на напрямній маглев-траси, а вторинна частина знаходиться в нижній частині магнітоплану.

Перший тип асинхронного лінійного електродвигуна LIM SP потребує ковзного контакту для передачі енергії на борт, та характеризується низькою енергетичною ефективністю через кінцевий ефект. Сильною стороною такої конструкції є простота та дешевизна вторинної частини.

Другий тип асинхронного лінійного електродвигуна LIM LP має значно більшу вартість, так як уздовж траси укладаються котушки довгої первинної частини з відповідною організацією живлення. Оскільки така конструкція не потребує ковзного контакту для передачі електричної енергії на борт транспортного засобу, то може застосовуватись у високошвидкісних транспортних системах.

Лінійні синхронні електродвигуни мають активний індуктор конструкція якого визначає тип LSM, можуть використовуватись електромагніти з залізними сердечниками або надпровідні магніти. Взаємодія між магнітним полем індуктора і струмами якоря створює рушійну силу. Лінійні синхронні електродвигуни також

розрізняють в залежності від розміщення індуктора на борту екіпажу чи на напрямній траси.

Лінійні тягові асинхронні та синхронні електродвигуни не потребують спеціальних датчиків для їх роботи. В існуючих транспортних системах поширення набули синхронні електродвигуни з розміщенням індуктора на борту магнітоплану, що пояснюється їх вищою енергетичною ефективністю в порівнянні з асинхронними. Такі синхронні двигуни мають «довгий» статор, коли їх якірна трифазна обмотка (котушки секцій) має значну протяжність та отримує живлення від системи трифазних фідерів з такою або більшою довжиною зони. Довгі лінії є причиною значних втрат. Зменшення довжини секції обмотки якоря дозволило б підвищити енергетичні показники лінійного двигуна але не було реалізовано в поточних системах, оскільки тільки віднедавна знайшла вирішення проблема надійності та швидкодії комутаційної апаратури енергетичної підсистеми.

Враховуючи розвиток в електроніці з'явилась можливість будувати маглев-траси не з «довгих» секцій з трифазними силовими обмотками, а з дискретних базових модулів, що мають чотири «короткі» котушки з електронним реконфігуруванням їх режиму роботи [2].

1. Аналіз передумов до створення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля другого покоління / А. М. Муха та ін. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2(110). С. 65–75. https://doi.org/10.15802/stp2025/332149.
2. 2-mode traction-levitation module of a promising magnetic-levitation transport system / S. Plaksin et al. *Electromechanical and energy saving systems*. 2022. Vol. 58, no. 2. P. 56–65. https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53.

Linear electric motors in magnetic levitation transport systems

S. Plaksin[a], D. Ustymenko[b1]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]ustimenko.1979@gmail.com

The work contains a comparative analysis of traction linear synchronous, asynchronous electric motors used in transport systems based on magnetic levitation (Maglev). Their main technical and energy characteristics and features of the power subsystem arrangement are analyzed. A direction for increasing the efficiency of the linear traction drive of magnetolevitation transport is determined, which consists in replacing the "long" stator windings with "short" discrete modules.

Keywords: linear asynchronous motor, linear synchronous motor, electromotive force, magnetic flux.

Вплив довжини фідерної лінії на енергетичні показники лінійного тягового електродвигуна магнітолевітаційного транспорту

Ю. В. Шкіль[а], Є. М. Чуприна[б1]

[а]Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна
[б]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

[1]nesty.lords@gmail.com

Ключові слова: фідер, лінійний електродвигун, ККД, живлення.

В діючих системах маглев-транспорту постачання електроенергії здійснюється від високовольтної мережі кабелем на шляхове полотно. Залежно від інтервалу проходження поїздів можуть бути обрані різні відстані між розташованими вздовж траси тяговими підстанціями, але не більше, ніж 50 км. Для економії енергії статор лінійного тягового електродвигуна (ЛТЕД) розділений на ділянки, постачання струмом яких здійснюється в міру входження в них екіпажу (як правило, кабельна проводка розділена на ділянки 0,5…3 км). Електроенергія подається тільки на ті секції ЛТЕД, які в існуючий момент мають відношення до транспортного засобу. Довгі кабелі крім омічного опору мають значну реактивну складову, яка забирає на себе відчутну частку енергії підстанції. Зменшивши довжину фідерних секцій варто очікувати покращення енергетичних показників. Удосконалення ЛТЕД в цьому напрямі стало можливим завдяки появі технічної можливості підведення електроенергії до кожної котушки, наприклад від розподіленої мережі фотоелектричних перетворювачів. Такий підхід до параметрів ЛТЕД і побудови його системи живлення дозволяє реалізувати локальне управління котушками та дає змогу змінювати робочі режими шляхових котушок у довільному порядку та за необхідним алгоритмом. Це дає змогу подавати енергію тільки в котушки, які покриває проекція екіпажу на шляхову структуру, та задавати режими роботи котушок тільки на довжині екіпажу за рахунок електронного реконфігурування цих котушок.

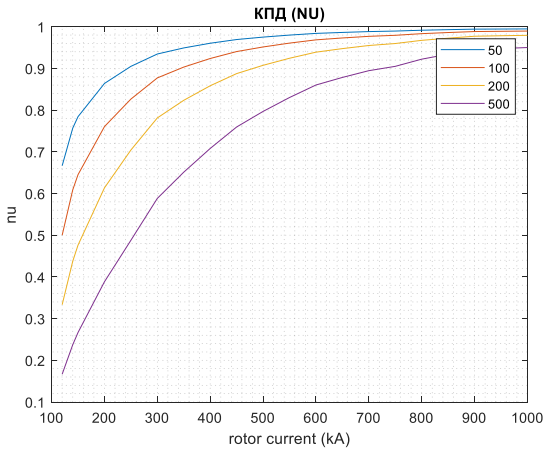


Рис. 1. Залежність ККД ЛТЕД від довжини фідерних секцій 50…500 м

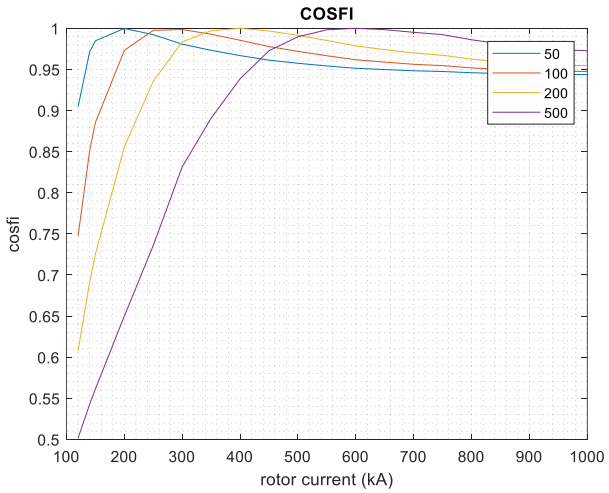


Рис. 2. Залежність коефіцієнта потужності від довжини фідерних секцій 50…500 м

Результати розрахунків енергетичних показників (ККД і коефіцієнта потужності) для ЛТЕД за різної довжини фідерних секцій (50…500 м) наведені на рис. 1 та 2

В результаті проведених розрахунків встановлено, що якщо довжини секцій співрозмірні з довжиною екіпажу, то досягаються майже найкращі енергетичні характеристики ЛТЕД. Подальше зменшення довжини секції немає сенсу, тому що екіпаж буде рухатись на суцільних стиках, що не сприяє поліпшенню характеристик.

The influence of the length of the feeder line on the energy performance of the linear traction electric motor of magnetic levitation transport

Yu. Shkil [a], Y. Chupryna[b1]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[b1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]nesty.lords@gmail.com

The paper analyzes the influence of the feeder line length on the electromagnetic losses and energy performance (efficiency and power factor) of a traction linear synchronous electric motor of a magneto-levitation vehicle. Graphs of the dependence of the efficiency and power factor of the electric motor on the length of the feeder line are presented. It is established that the best energy characteristics of the LTDE are achieved under the condition that the length of the feeder line is approximately equal to the length of the crew.

Keywords: feeder, linear electric motor, efficiency, power supply.

Використання мікропроцесорної платформи Arduino Mega для керування натурними моделями високошвидкісних магнітолевітаційних поїздів

А.М. Муха[а], Ю.В. Шкіль[б], Є.М. Чуприна[в1]

[б]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна
[а,в]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

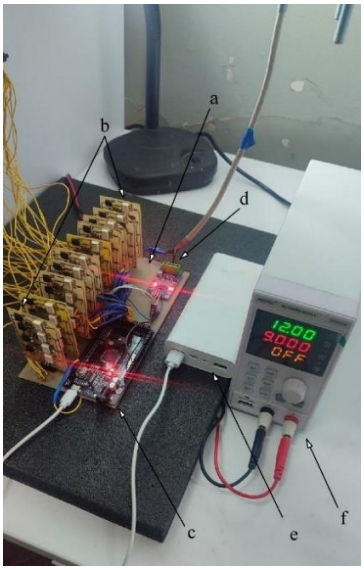
[1] nesty.lords@gmail.com

Ключові слова: натурна модель, лабораторний стенд, мікропроцесорна система

На сучасному етапі розвитку техніки мікропроцесорні системи керування є найбільш розповсюдженим засобом автоматизації, завдяки відносно низькій вартості та високому універсальності мікропроцесорних комплектів.

Однією з мікропроцесорних платформ, які знайшли широке застосування, система Arduino. Лінійка пристроїв дуже широка від мінімального Nano до потужного Mega 2560.

Розроблений лабораторний стенд дозволяє дослідити основні режими натурної моделі високошвидкісної магнітолевітуючої транспортної одиниці (екіпажу) (рис.1). Стенд складається з тягових модулів, в кожному з них по п’ять тягових секцій. Кожна секція побудована на двох керованих Н-мостах, де в якості напівпровідникових ключів використовуються IGBT транзистори.



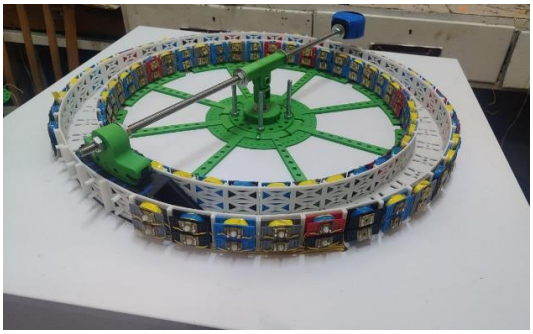


Рис. 1. Вигляд натурної моделі високошвидкісного транспорту

Рис. 2. Комутуючий блок у вигляді модульної системи: a – материнська плата, b – плати керування, c – Arduino MEGA, d – модуль RS422/TTL, e – джерело живлення Arduino, f – джерело живлення системи материнської плати.

Для керування тяговим модулем розроблена комутаційний блок (рис.2), з мікропроцесорною системою керування на базі Arduino MEGA. Цей однопалатний комп’ютер має достатню кількість портів вводу-виводу, та потужне обчислювальне ядро. Розроблено програмне забезпечення дозволило на підставі сигналу з енкодеру кутових положень комутувати потрібну тягову секцію, з можливістю зміни напрямку магнітного поля, при зміні напрямку струм у тяговій котушці модуля (рис.3).

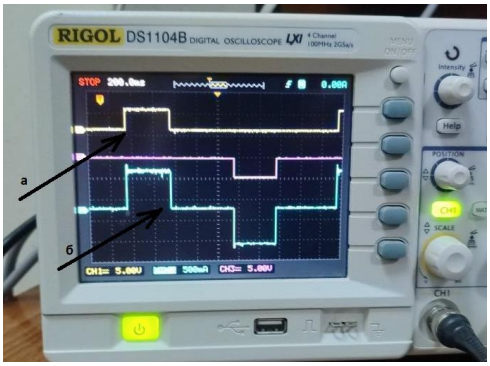


Рис. 3. Отримані осцилограми струму у тяговій котушці тягової секції стенду: а – команди керування від Arduino MEGA; б – струм тягової котушки.

Кожна з секції займає у просторі 45 градусів, а отже на кожен модуль припадає по 9 градусів у просторі натурної моделі, фактичний час подачі струму у секцію, ще менший, що пов'язано з необхідністю створення максимального тягового зусилля.

В цілому гнучкість та швидкість при створенні програмного коду в оболонці Arduino IDE дозволяє проводити багатоваріантні зміни кутів випередження комутації тягових котушок. Більш детально в роботі [1] представлена розробка системи позиціонування натурного стенду та дослідження шляхового модуля в режимі неробочого ходу.

1.Голота О. О. Дослідження режимів керування шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, *Транспортні системи та технології перевезень*. — 2025. — № 30. — С. 29–36. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2025/340121

Using the Arduino Mega microprocessor platform to control full-scale models of high-speed maglev trains

A. Mukha[a], Yu. Shkil[b], Y. Chupryna[c]

[b]Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[a,c1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

[1]nesty.lords@gmail.com

A brief description of the use of the Arduino Mega microprocessor platform for controlling full-scale models of high-speed maglev trains is presented. Using the angular values obtained from the encoder during the movement of the crew, it is possible to create an algorithm for controlling the traction module by transmitting signals through the module for data exchange of RS422/TTL protocols to Arduino. The effectiveness of the developed hardware and software of the switching unit is experimentally proven.

Keywords: full-scale model, laboratory stand, microprocessor system.

Фактори електрохімічної стійкості залізних електродів лужного акумулятора в транспортних та енергетичних системах

М.В. Костиря[a1], М.Д. Кошель[a], С.В. Корпач[a]

[a]Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна
[1] kostyrya_59@i.ua

Ключові слова: залізо-оксидний електрод, вольтамперограма, поляризаційні характеристики, лужний акумулятор,транспортні та енергетичні системи

Ефективність енергетичних систем залежить від стабільності їхніх компонентів. під час багаторазових циклів заряду/розряду електроди зазнають комплексних електрохімічних, структурних і механічних змін. Фазові перетворення, об'ємні зміни активної маси та корозія приводять до деградації електродів, що знижує працездатність усієї системи.

Особливої актуальності набуває дослідження електродних матеріалів для лужних акумуляторів, які широко застосовуються в автономних та транспортних установках. Їхня довговічність визначається перебігом окисно-відновних процесів на електродах у циклічному режимі. Тому аналіз впливу фазового складу та структури на їхній робочий стан є важливим завданням.

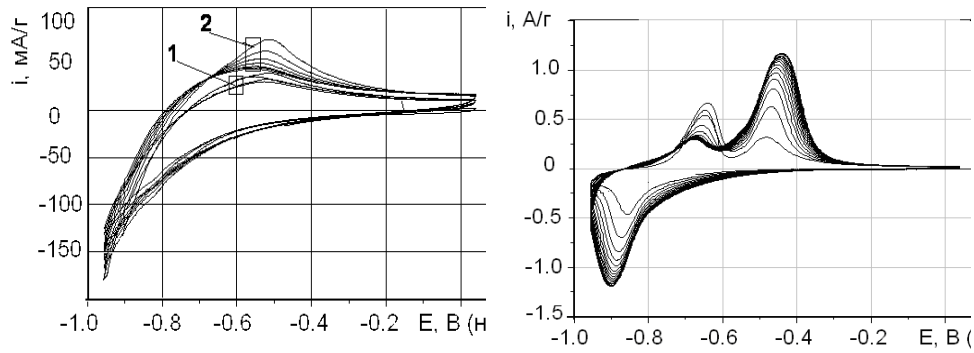
Робота є продовженням досліджень із розроблення методів одержання комплексних залізних електродів [1]. Основну увагу приділено оцінці впливу фазового складу та структури на електрохімічну стійкість у циклічних режимах. Електрод розглядається не лише як електрохімічний об'єкт, а як функціональний елемент енергетичної системи.

Для досягнення мети проведено експериментальні дослідження залізних електродів методом циклічної вольтамперометрії. Використано пресовані матеріали на основі оксидних форм заліза (Fe_3O_4 та Fe_2O_3), а також композитний електрод із додаванням вуглецевих нанотрубок (ВНТ). Такий підхід дозволяє оцінити вплив структурних модифікацій на поведінку електродів за багаторазового навантаження.

Результати досліджень оксидних форм заліза наведено на рисунку (а). Отримані вольтамперограми відображають особливості електрохімічних процесів залежно від фазового складу. Також оцінено вплив ВНТ на поведінку композитного матеріалу в циклічному режимі (рисунок, б).

Піки мають відносно пологий та розмитий характер, що вказує на підвищену поляризацію та обмежену кінетику електродного процесу. При цьому для електрода на основі Fe_2O_3 фіксуються вищі струмові значення піків порівняно з Fe_3O_4, що свідчить про його більш електрохімічну активність за однакових умов дослідження. Отримані дані вказують на поступову зміну кінетичних характеристик електродного процесу під дією циклічного навантаження.

Для композитного електрода (рисунок, б) спостерігається підвищення струмових характеристик та стабілізація положення піків у процесі циклювання. Це може бути пов'язано з покращенням електропровідності та більш рівномірним розподілом струму в об'ємі електрода. Додавання ВНТ сприяє зменшенню дефекційних проявів та підвищенню циклічної стійкості системи.



а *б*

Рис. Вольтамперограми пресованих залізних електродів: *а* – електроди на основі оксидних форм: Fe_3O_4 (крива1), Fe_2O_3 (крива 2); *б* – композитний залізний електрод з ВНТ.

Таким чином, отримані результати підтверджують визначальний вплив фазового складу та структурної модифікації на електрохімічні характеристики залізних електродів у циклічному режимі. Показано перспективність модифікації оксидних матеріалів для підвищення їх циклічної стійкості.

Factors of Electrochemical Stability of Iron Electrodes of Alkaline Batteries in Transportation and Energy Systems

M. Kostyrya[a1], M. Koshel[a], S. Korpach[a]

[a]Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

[1]e-mail: kostyrya_59@i.ua

The work has carried out a comparative study of the electrochemical behavior of pressed electrodes for an alkaline battery based on oxide forms of iron and a composite material modified with carbon nanotubes under cyclic loading conditions. The study was carried out by the method of cyclic voltammetry. Differences in the shape and intensity of current packs were established, which reflect the peculiarities of the course of redox processes. It is shown that the material based on Fe_2O_3 is characterized by higher current indicators compared to Fe_3O_4. The addition of carbon nanotubes contributes to the formation of clearer peak current characteristics and an increase in the cyclic stability of the iron electrode.

Keywords: iron oxide electrode, voltammogram, polarization characteristics, alkaline battery, transportation and energy systems

1. М.В. Костиря, М.Д. Кошель, С.В. Корпач, *Дослідження і моделювання динаміки заряд/розрядних процесів Fe/Fe(OH)$_2$ електродів лужних акумуляторів транспортних засобів*, Збірник матеріалів 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2024)», Херсон, 133-136 (2024).

Аналітичний розв'язок термопружної задачі для функціонально градієнтних пологих оболонок та плит за наявності внутрішнього джерела енергії.

О. В. Марчук

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ksmntu386@gmail.com

Ключові слова: точний тривимірний аналітичний розв'язок, функціонально градієнтні пологі оболонки та плити, внутрішнє джерело енергії

У цій публікації розвивається метод, розроблений автором, який він раніше застосував при розв'язанні задач термонапруженого стану функціонально градієнтних шаруватих пологих оболонок та плит без внутрішнього джерела тепла [1]. Деформації шарів оболонки функціонально градієнтного матеріалу визначаються за допомогою таких рівнянь:

$$e_{ii}^{(k)} = \frac{1}{E^{(k)}(z)}\left(\sigma_{ii}^{(k)} + \nu^{(k)}(\sigma_{jj}^{(k)} + \sigma_{33}^{(k)})\right), \quad e_{33}^{(k)} = \frac{1}{E^{(k)}(z)}\left(\sigma_{33}^{(k)} + \nu^{(k)}\sigma_{ii}^{(k)}\right),$$
$$2e_{i3}^{(k)} = \frac{\sigma_{i3}^{(k)}}{G^{(k)}(z)}, \quad 2e_{12}^{(k)} = \frac{\sigma_{12}^{(k)}}{G^{(k)}(z)} \quad (i \neq j = 1,2). \tag{1}$$

Переміщення, напруження та температуру знаходимо, використовуючи наступні співвідношення:

$$U_i^{(k)}(x,y,z) = V_i^{(k)}(x,y)\, f_i^{(k)}(z),$$
$$\sigma_{i3}^{(k)}(x,y,z) = \tau_{i3}^{(k)}(x,y)\, f_{i+3}^{(k)}(z), \tag{2}$$
$$T^{(k)}(x,y,z) = t^{(k)}(x,y)\, f_7^{(k)}(z)\ (i = 1,2,3).$$

Деформації знаходимо з відповідних рівнянь для пологих оболонок. Планарні напруження визначаємо з використанням закону Гука. Розв'язувальну систему неоднорідних диференціальних отримуємо варіаційним шляхом. Розглядається розподіл шуканих функцій за експоненціальним законом. Розв'язуємо її аналітично. Остаточно шукані функції складаються з розв'язку однорідної системи рівнянь та окремого розв'язку неоднорідної системи рівнянь

Паралельно розвивається прикладний підхід до розв'язання задачі про термонапружений стан пологих оболонок та плит за наявності внутрішнього джерела енергії. Для цього варіанту розрахунку приймається така апроксимація шуканих функцій за товщиною конструкції

$$U_i^{(k)}(x,y,z) = U_{il}^{(k)}(x,y)\, f_{il}^{(k)}(z),$$
$$U_3^{(k)}(x,y,z) = W_p^{(k)}(x,y)\,\beta_p^{(k)}(z)\ \ (i = 1,2; l = 1,2,3; p = 1,2,3) \tag{3}$$

Тут, $U_{i1}^{(k)}(x,y)$ и $U_{i2}^{(k)}(x,y)$ - тангенціальні складові вектора переміщень к-того шару оболонки; $U_{i3}^{(k)}(x,y)$ - функції зсуву по осі *x* та *y*; $W_1^{(k)}(x,y)$, $W_2^{(k)}(x,y)$ - нормальні переміщення к-того шару оболонки; $W_3^{(k)}(x,y)$ - функція обтиснення; $f_{i1}^{(k)}(z)$, $f_{i2}^{(k)}(z)$, $\beta_1^{(k)}(z)$, та $\beta_2^{(k)}(z)$ - поліноми першої степені; $\beta_3^{(k)}(z)$ - поліном другої степені; $f_{i3}^{(k)}(z)$ - поліноми третьої степені.

Деформації знаходять з відповідних співвідношень для пологих оболонок. Напруження отримуємо з застосуванням закону Гука. Розрахункові диференціальні рівняння отримано варіаційним шляхом. Розподіл температури за товщиною конструкції знаходимо шляхом розв'язання наступного рівняння теплопровідності.

$$-\lambda_1^{(k)}\left(\frac{\pi n x}{a}\right)^2 - \lambda_2^{(k)}\left(\frac{\pi n y}{b}\right)^2 + \lambda_{3,3}^{(k)} f_{7,3}^{(k)} + \lambda_3^{(k)} f_{7,33}^{(k)} + q_t^{(k)} = 0 \qquad (4)$$

Розв'язують його методом скінченних різниць. Тут розподіл величин термонапруженого стану по товщині шару може бути довільним.

Особливістю другого підходу є призначення функцій зовнішнім поверхням шарів, що дозволяє розділити шари на підшари з відповідним підвищенням точності результатів розрахунку. Збіжність результатів розрахунків, отриманих за двома запропонованими підходами, може підтвердити їхню надійність.

1. A.V. Marchuk, Modeling of the Thermally Stressed State of Functionally Graded Shallow Shells in a Three-Dimensional Formulation. Advanced Structured Materials. Springer **204**, 413–424 (2024).

Analytical solution of the thermoelastic problem for functionally gradient shallow shells and plates in the presence of an internal energy source.

A. Marchuk

National transport university, Kyiv, Ukraine.

ksmntu386@gmail.com

This publication develops the method developed by the author, which he previously applied when solving problems of the thermally stressed state of functionally gradient layered shallow shells and plates without an internal heat source. For a special case of hingedly supported plates and shallow shells with a thermal load from an internal heat source distributed according to a trigonometric law, a system of inhomogeneous differential equations is obtained by variational means. It is solved analytically without introducing an approximation of the sought functions by the thickness of the structure. The second approach uses a polynomial approximation of the functions sought by the thickness of the structure. The convergence of the calculation results obtained by the two proposed approaches can confirm their reliability

Keywords: exact three-dimensional analytical solution, functionally graded shallow shells and plates, internal energy source

Задача термопружності для міжфазної тріщини з ділянками контакту за умов неідеального теплообміну

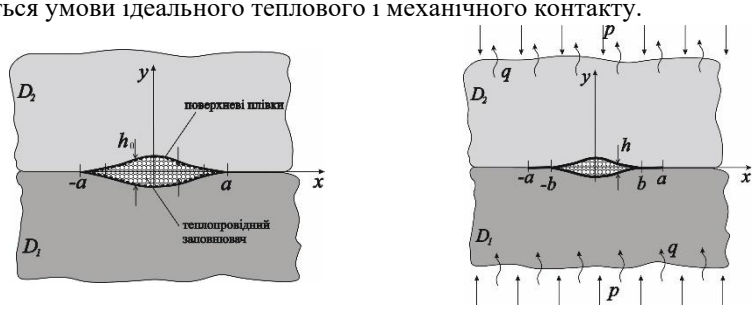
Х.І. Середницька

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

ser.kristina@gmail.com

Ключові слова: термопружність, біматеріал, міжфазна тріщина, ділянки контакту, неідеальний тепловий контакт

Розглянемо біматеріальну площину, компоненти якої характеризуються різними термомеханічними властивостями. На межі з'єднання півплощин розташована міжфазна розкрита тріщина довжиною *2a* і висотою $\mathrm{h}_0(x)$ (рис. 1 а). Порожнина тріщини заповнена теплопровідною речовиною з коефіцієнтом теплопровідності λ_m, а береги тріщини покриті тонкими плівками з термоопором $r_0(x)$. Береги тріщини контактують по краях на ділянках (*-a;-b*) і (*b;a*) під дією стискальних зусиль p та стаціонарного однорідного теплового потоку q, заданих на безмежності в перпендикулярному до тріщини напрямі (рис. 1 б). Параметр b, що характеризує півдовжину розкритої частини тріщини наперед невідомий. Між берегами тріщини відбувається передача тепла за умови неідеального теплового контакту з термоопором. На розкритій частині тріщини передачу тепла моделюємо термоопором, який дорівнює сумі термоопорів заповнювача тріщини і поверхневих плівок. На ділянках контакту термоопір визначається термоопором плівок. Термоопір заповнювача пропорційний розкриттю тріщини, яке змінюється під дією навантаження. Термоопір поверхневих плівок є сталим відносно навантаження. Вважаємо, що заповнювач тріщини не чинить опору деформуванню тіла, а береги тріщини контактують без тертя. Поза тріщиною відбуваються умови ідеального теплового і механічного контакту.



а *б*

Рис. 1. Схема біматеріалу з міжфазною тріщиною з зонами контакту за наявності заповнювача та поверхневих плівок до навантаження (а) і після навантаження (б).

За допомогою методу сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь [1] задачу термопружності для такого біматеріалу зведено до нелінійної системи сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь відносно функцій стрибка температури $\gamma(x)$ та розкриття тріщини $\mathrm{h}(x)$ на міжфазній лінії.

Нелінійність системи пов'язана з тим, що в обидва рівняння входять невідомі функції і невідомий параметр b. Систему розв'язано за допомогою аналітично-

числової процедури, побудованої на основі методів послідовних наближень і колокацій [1]. Оскільки параметр b в систему входить нелінійно, то задається діапазон зміни цього параметра $(0 < b < 1)$, а натомість невідомими вважаються зусилля p і потік q, за яких реалізуються ділянки контакту берегів тріщини заданої довжини a-b. З умови плавного змикання берегів тріщини визначено співвідношення між зусиллями p і потоком q, яке враховано у поданнях функцій стрибка температури та розкриття тріщини.

На основі розробленого числового апарату проаналізовано висоту тріщини, зміну довжини ділянок контакту та розподіл контактних напружень в залежності від параметрів теплопровідності заповнювача, термоопору плівок та прикладеного термомеханічного навантаження. Довжина ділянки контакту залежить від впливу поверхневого термоопору та коефіцієнта теплопровідності заповнювача тріщини. Врахування термоопору поверхневих плівок на ділянках контакту берегів тріщини зумовлює додатковий вплив термічних деформацій на контактний тиск берегів тріщини. Визначено коефіцієнти інтенсивності міжфазних напружень для різних значень теплопровідності заповнювача тріщини, термоопору поверхневих плівок і довжини ділянки контакту.

1. Мартиняк Р.М., Середницька Х.І. Контактні задачі термопружності для міжфазних тріщин в біматеріальних тілах. Львів: Растр-7, 2017. 168 с.

Thermo-elasticity problem for an interfacial crack with contact zones under conditions of non-ideal heat transfer

Kh. Serednytska

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

ser.kristina@gmail.com

The thermos-elastic behaviour of a bi-material with an interfacial crack was investigated, taking into account the near-tip contact zones, the thermal conductivity of the filler and the surface films of the crack. The problem is reduced to a nonlinear system of singular integro-differential equations with respect to the temperature jump and the crack opening. A numerical-analytical procedure for solving the obtained system was constructed using the method of successive approximations. The lengths of the contact zones are determined from the condition of smooth closure of the crack faces. The dependences of the crack height and the length of the contact zones on the thermal conductivity of the filler and the thermal resistance of the films are analysed. The coefficients of intensity of interfacial stresses are determined.

Keywords: thermos-elasticity, bi-material, interfacial crack, contact zones, non-ideal thermal contact

Визначення концентрації та потоку речовини у водних розчинах пористих середовищ з використанням похідних дробового порядку

Я.Д.П'янило[1], Г.Т.Лянце[2], Г.М.П'янило[1]

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1]danylo794@gmail.com, [2]anna.lyantse@gmail.com

Ключові слова: концентрація та потік речовини, математична модель, похідні дробового порядку, асимптотичні методи, крайова задача

Зберігання газу відбувається в пластах складних пористих середовищ, які знаходяться на різній глибині, під значними тисками і високими температурами. Практично у всіх підземних сховищах наявна вода – за контурна або підошовна. Очевидно, що за наявних умов частина газу дифундує у воду при закачування газу та виділяється з води при відбиранні газу. Ця проблема досліджувалася в роботах на основі диференціальних рівнянь в частинних похідних. Оскільки в процесі зберігання газі змінюється як тиск, так і температура, історія процесу має значний вплив на дифузію газу. Відомо, що процеси такого типу добре описуються похідними дробового порядку. Метою роботи є дослідження застосування похідних дробового порядку до вивчення процесу дифузії газу у водних розчинах.

Отримані результати. Будемо розглядати шар, товщиною l, на нижній межі якого є нульова концентрація, на верхній змінюється за законом $c(l,t) = d + c_{0l}\left(1 - e^{-\zeta t}\right)$, а початковий тиск $\mathrm{c}(x,0) = \frac{dx}{l}$. Тут d, c_{0l}, ζ - деякі сталі, які визначаються експериментально. Задача зводиться до розв'язування рівняння дифузії з конвективною складовою

$$\frac{c\partial^{\alpha} c}{\partial \tau^{\alpha}} + \upsilon \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

за відповідних крайових умов з використання похідної дробового порядку Капутто

$${}^{c} D_{\tau}^{\alpha} = \frac{c\partial^{\alpha}}{\partial \tau^{\alpha}} f(\tau) := \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^{\tau} \frac{f'(\xi)}{(\tau-\xi)^{\alpha}} d\xi.$$

Оскільки вода в пластах підземних сховищ є нерухомою, то конвективною складовою можна знехтувати. Потік речовини визначається за формулою $J_x\left(x,t\right) = -D\,\partial c/\partial x\big|_{x=x_0}$. Розв'язок задачі в зображеннях Лапласа-Карсона має вигляд

$$\bar{c}_z = c_{0l}\left(1 - \frac{p}{p+\zeta}\right)\frac{sh(\theta x)}{sh(\theta l)} + \frac{d}{l}x, \theta = \frac{p^{2-\alpha}}{D}.$$

Потік речовини в зображеннях Лапласа-Карсона має вид

$$\bar{J}_x = -D\left[c_{0l}\left(1 - \frac{p}{p+\zeta}\right)\frac{\theta ch(\theta x)}{sh(\theta l)} + \frac{d}{l}\right].$$

Отримати оригінал в загальному випадку в параметричній формі достатньо важко. Зауважимо, що одним із шляхів є розклад зображення на прості дроби з подальшим обернення кожного з доданків. Однак при цьому використовуються функції Мітаг-Лефлера. На практиці їх застосування пов'язане з певними труднощами, оскільки отримується розклад в ряд типу Тейлора. Іншим шляхом є розклад відношення гіперболічних функцій в ряди Діріхле

$$\left(e^{-z(l-x)} - e^{-z(l+x)}\right) \times \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \, e^{-2jzl}, z = \sqrt{\frac{p^\alpha}{D}}.$$

Для їх обернення знайдено обернення зображення виду

$$g(w,t) = -\frac{1}{2\pi i}\int_\gamma e^{pt} e^{-wp^{\frac{\alpha}{2}}} dp$$

для довільних значень параметру α. При цьому повинні виконуватись умови існування оригіналу.

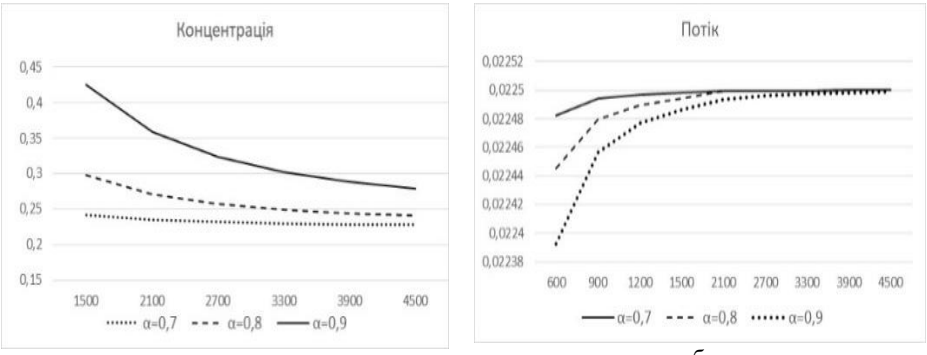
При розв'язуванні багатьох прикладних задач достатньо знати поведінку розв'язку для великих або малих часів. В розглядуваному випадку концентрація та потік речовини для великих часів обчислюються за формулами

$$c_z(x,t) = c_{0l}\frac{x}{l}\left[1 - \frac{l^2-x^2}{6D^2}\frac{t^{2\alpha-3}}{\Gamma(2\alpha-2)} + \frac{l^2-x^2}{6\zeta D^2}\frac{t^{2\alpha-4}}{\Gamma(2\alpha-3)}\right] + \frac{d}{l}x,$$

$$J_x(x,t) = -D\left[\frac{c_{0l}}{l}\left(1 + \frac{x^2-\frac{l^2}{3}}{2D^2}\frac{t^{2\alpha-4}}{\Gamma(2\alpha-3)} - \frac{x^2-\frac{l^2}{3}}{2\zeta D^2}\frac{t^{2\alpha-5}}{\Gamma(2\alpha-4)}\right) + \frac{d}{l}\right]$$

відповідно.

Результати проведеного числового експерименту для $l=40$ м; $D=0{,}05$ м/с^2; d=0,6 моль/м^3; c_{0l}=0,3 моль/м^3; ζ =0,1 та різних значень порядку дробової похідної подано на рис. 1.



а б

Рис.1.Залежність концентрації (а)та потоку (б) від часу для $x=10$ і різних значень порядку дробової похідної.

Висновки та обговорення результатів. Результати моделювання всередині області визначення суттєво залежать від значень порядку дробової похідної. Оскільки граничні значення задовольняють умови сформульованої задачі і від порядку дробової похідної не залежать, то при умові адекватного вибору цього порядку отримується розв'язок, який враховує історію процесу, який вивчається. Зауважимо, що основними проблемами, які виникають при використанні дробового числення є наступні. Оскільки побудована значна кількість похідних дробового порядку, то вибір вигляду похідної займає чи не основну проблему при моделюванні певного фізичного процесу. Далі, як випливає з отриманих результатів суттєву проблему становить вибір порядку дробової похідної. Слід також зауважити, що залежність ефективності та складності обчислень дробового числення суттєво залежить від точності вхідної інформації та від технологічних обмежень, які накладаються на математичні модель процесу. Аналіз літератури показує, що при моделювання деяких процесів застосування дробового числення не приводить до підвищення адекватності в той час як значно зростають обчислювальні труднощі.

Контакт зі зчепленням і проковзуванням берегів міжфазної тріщини за складного навантаження

В. І. Острик

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

v.i.ostryk@gmail.com

Ключові слова: контакт зі зчепленням і проковзуванням, міжфазна тріщина, модель Комніноу, метод Вінера – Гопфа, контактні напруження, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Розв'язки задач про рівновагу пружних тіл із тріщинами, які містяться на межі поділу середовищ із різних матеріалів, характеризуються осциляцією напружень і переміщень в околах вершин тріщини [1], що вказує на взаємне проникнення середовищ поблизу вершин тріщини. М. Комніноу [2] для знаходження коректних розв'язків запропоновано вводити області контакту берегів тріщини поблизу її вершин. Якщо контакт берегів тріщини відбувається також і всередині тріщини, то за наявності тертя відповідна область контакту поділяється на зони зчеплення і проковзування. Схему контакту зі зчепленням і проковзуванням у випадку взаємодії штампа з пружною півплощиною вперше запропоновано Л. А. Галіним [3] та розповсюджено на задачі про взаємодію берегів тріщин у пружній площині у роботах [4, 5]. Нижче розглянуто задачу про міжфазну тріщину з контактом її берегів як біля вершин тріщини (за моделлю Комніноу), так і в її середині із поділом області контакту всередині тріщини на зони зчеплення і проковзування.

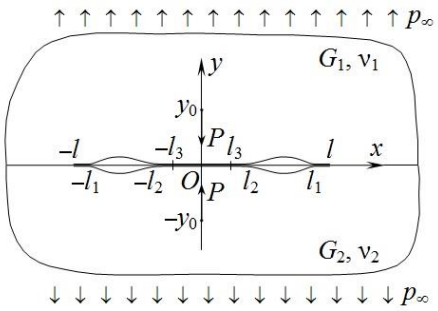


Рис. 1. Міжфазна тріщина з контактуючими берегами.

Кусково-однорідна площина складена із двох різнорідних півплощин $y \geq 0$, $y \leq 0$ ($-\infty < x < \infty$), модулі зсуву яких G_1, G_2, а коефіцієнти Пуассона ν_1, ν_2 відповідно (рис. 1). Півплощини на частинах $l \leq x < \infty$, $-\infty < x \leq -l$ своєї спільної межі $y = 0$ ідеально з'єднані, а на іншій її частині $-l < x < l$ кусково-однорідна площина має тріщину. На нескінченності прикладені розтягувальні напруження p_∞, а у точках $x = 0$, $y = \pm y_0$ – дві зосереджені сили P, направлені назустріч одна одній.

Вважаємо, що тріщина частково розкрита на інтервалах $l_2 < x < l_1$, $-l_1 < x < -l_2$, а на проміжках $-l_2 \leq x \leq l_2$, $l_1 \leq x < l$, $-l < x \leq -l_1$ її береги контактують. Область контакту $-l_2 \leq x \leq l_2$ всередині тріщини виникає завдяки дії зосереджених сил, а дві інші області контакту $l_1 \leq x < l$ і $-l < x \leq -l_1$ біля вершин тріщини вводимо згідно з моделлю Комніноу [2]. Вважаємо також, що нижня півплощина є більш жорсткою, ніж верхня, тобто $G_2(1 - 2\nu_1) > G_1(1 - 2\nu_2)$. Тому, враховуючи сили тертя за законом Амонтона в областях контакту, прилеглих до вершин тріщини, маємо проковзування верхнього берега тріщини відносно нижнього у напрямку до її середини. Область контакту $-l_2 \leq x \leq l_2$ всередині тріщини під впливом тертя поділяється на зону зчеплення $-l_3 \leq x \leq l_3$ у

своїй середині та дві зони проковзування $l_3 < x \le l_2$, $-l_2 \le x < -l_3$ на краях. Припускаємо, що у зонах $l_3 < x \le l_2$ і $-l_2 \le x < -l_3$ проковзування верхнього берега тріщини відносно нижнього відбувається у напрямку до вершин тріщини. Довжини $2l_2$, $l - l_1$, $2l_3$ областей контакту та зони зчеплення заздалегідь невідомі та підлягають визначенню.

Із застосуванням методу Вінера – Гопфа знайдено аналітичний розв'язок задачі. Визначено розміри областей контакту та зони зчеплення. Отримано розподіли контактних напружень і коефіцієнт інтенсивності зсувних напружень. На відміну від задачі Галіна про контакт зі зчепленням і проковзуванням штампа та пружної півплощини [3], у розглянутій задачі відносний розмір зони зчеплення l_3/l_2 виявився значно меншим. Так, для коефіцієнта тертя 0,5 у випадку $\nu_1 = 0{,}25$; $\nu_2 = 0{,}3$; $G_2/G_1 = 6$, $2y_0 = 1$ він дорівнює 0,49 замість 0,94 у задачі Галіна для півплощини з коефіцієнтом Пуассона 0,3.

1. 1.M. L. Williams, The stresses around a fault or crack in dissimilar media, *Bull Seismological Soc Am*, **49**, 199–204 (1959).
2. 2.M. Comninou, The interface crack, *Trans ASME. J Appl Mech*, **44**, 631–636 (1977).
3. Л. А. Галин, Вдавливание штампа при наличии трения и сцепления, *Прикл математика и механика*, **9**(5), 413–424 (1945).
4. 4.Р. В. Гольдштейн и Ю. В. Житников, *Равновесие трещин при сложном нагружении с учетом областей контакта и свободной поверхности, скольжения и сцепления*, Институт проблем механики АН СССР, Москва, Препр. № 276 (1986).
5. 5.А. В. Андреев, Р. В. Гольдштейн и Ю. В. Житников, Эволюция равновесного состояния гладких криволинейных трещин со взаимодействующими с трением поверхностями в процессе нагружения, *Изв РАН. Механика твердого тела*, 1, 135–149 (2003).

Contact with adhesion and sliding of interface crack faces under complex loading

V. I. Ostryk

Institute of Applied Physics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine.

v.i.ostryk@gmail.com

The problem of the contact of the faces of an interface crack in a piecewise homogeneous elastic plane under the action of tensile stresses set at infinity and two concentrated compressive forces applied near the crack is considered. Frictional sliding of its faces occurs in two contact domains near the tips of the crack, and the third contact domain inside the crack is divided into zones of adhesion and slip. An analytical solution to the problem was found using the Wiener—Hopf method. The dimensions of the contact domains and the adhesion zone are determined. The contact stress distributions and shear stress intensity factor were obtained.

Keywords: contact with adhesion and sliding, interface crack, Comninou model, Wiener–Hopf method, contact stress, stress intensity factor.

Розсіювання енергії у фрикційному демпфері з розімкнутою рівноміцною оболонкою

А. Величкович[а1], І. Шацький[б], В. Шопа[б]

[а]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна
[б]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[1] a_velychkovych@ukr.net

Ключові слова: рівноміцна розрізана оболонка, заповнювач, сухе тертя, конструкційний гістерезис, одновимірна модель.

Для більшості інженерних об’єктів ефективний віброзахист є важливою умовою надійної, довготривалої та безпечної експлуатації. У таких системах демпфувальні пристрої повинні мати достатню утримувальну здатність і податливість за помірної матеріаломісткості та водночас забезпечувати інтенсивне розсіювання енергії динамічних впливів.

Об’єктом дослідження є фрикційний демпфер (рис. 1), базовим елементом якого є розімкнута циліндрична оболонка зі змінною за азимутом товщиною стінки, оптимізованою за критерієм рівноміцності [1]. Усередині оболонки розміщено слабостисливий заповнювач, що утворює з нею активну контактну пару. Мета статті – аналітичне дослідження впливу раціонального розподілу матеріалу в оболонці на розсіювання енергії у фрикційному демпфері за немонотонного навантаження. Основою дослідження є одновимірна модель [2, 3], у якій квазістатичну взаємодію розімкнутої оболонки із заповнювачем описано законом сухого тертя на усіх етапах циклічного навантаження.

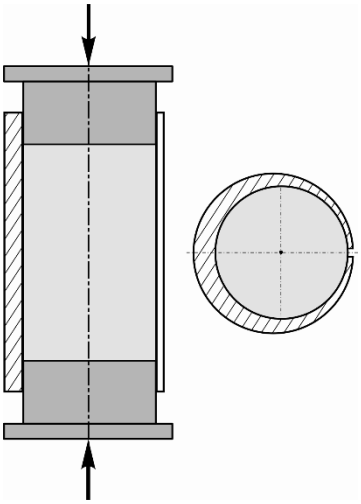


Рис. 1. Фрикційний демпфер з рівноміцною оболонкою

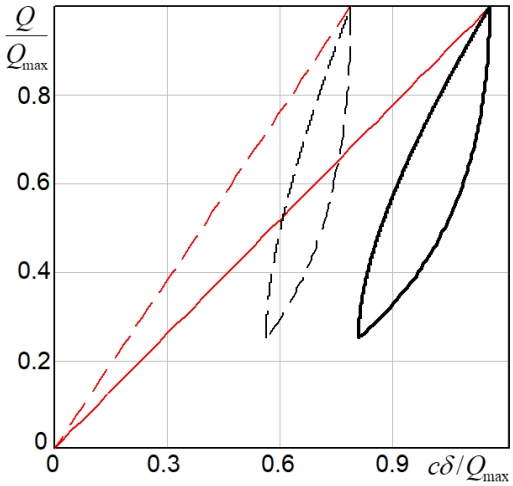


Рис. 2. Діаграма циклічного деформування: штрихові лінії – оболонка сталої товщини, суцільні – рівноміцна оболонка

У аналітичному вигляді отримано співвідношення для побудови діаграми немонотонного деформування, а також формули для визначення розсіяної за цикл енергії. Проведено порівняння поведінки двох конструктивних варіантів демпфера: з розімкнутою оболонкою сталої товщини та з розімкнутою рівноміцною оболонкою (рис. 2). Показано, що перехід до рівноміцної оболонки істотно підвищує податливість системи і водночас впливає на форму та площу петлі гістерезису. Отримані результати формують аналітичну основу для проєктування фрикційних демпферів, у яких вимоги до міцності, маси, жорсткості та демпфування повинні виконуватися узгоджено. Встановлені закономірності демонструють, що оптимізація профілю оболонки є дієвим конструктивним інструментом регулювання дисипативних характеристик фрикційних систем за одночасного зменшення маси. Загалом проведене дослідження розвиває клас оболонкових демпферів для віброзахисту технічних систем і конструкцій у гірництві, нафтогазовій галузі та будівництві.

1. I.P. Shats'kyi, V.M. Shopa, and A.S. Velychkovych, Development of Full-Strength Elastic Element Section with Open Shell, *Strength Mater*, 53, 277–282 (2021). https://doi.org/10.1007/s11223-021-00286-y
2. В.М. Шопа, І.П. Шацький, О.О. Бедзір, і А.С. Величкович, *Контактна взаємодія прорізаних оболонок з деформівними тілами*, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ (2015).
3. I. Shatskyi, A. Velychkovych, Analytical Model of Structural Damping in Friction Module of Shell Shock Absorber Connected to Spring, *Shock and Vibration*, 2023, 4140583 (2023). https://doi.org/10.1155/2023/4140583

Energy Dissipation in a Friction Damper with an Open Equal-Strength Shell

A. Velychkovych[a1], I. Shatskyi[b], V. Shopa[b]

[a]Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
[b]Pidstryhach-Institute for Applied Problems in Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

[1] a_velychkovych@ukr.net

The object of the study is a friction damper whose principal element is an open cylindrical shell with an azimuthally varying wall thickness optimized according to the equal-strength criterion. The slightly compressible shell filler forms an active contact pair with the shell. The aim of the paper is to investigate analytically the influence of a rational material distribution in the shell on energy dissipation in the damper under non-monotonic loading. Based on a one-dimensional model, analytical relationships were obtained for constructing the cyclic deformation diagrams, as well as formulas for determining the energy dissipated per cycle. A comparison was carried out between the behaviors of two variants of the damper: one with an open shell of constant thickness and the other with an open equal-strength shell. The transition to an equal-strength shell significantly increases the compliance of the system and simultaneously affects the shape and area of the hysteresis loop.

Keywords: equal-strength slotted shell, filler, dry friction, structural hysteresis, one-dimensional model.

Аналітично-числовий підхід до розв'язування задач термопружності для термочутливих кусково-однорідних тіл

О. Вовк[1], Р. Кушнір

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] vovk0108@gmail.com

Ключові слова: нелінійні задачі теплопровідності, термочутливі тіла, термопружний стан, метод лінеаризувальних параметрів, адаптована формула Пруднікова

Визначення термопружного стану термочутливих (із залежними від температури характеристиками матеріалів) елементів конструкцій, які перебувають в умовах складного теплообміну, є актуальними та затребуваними в багатьох галузях промисловості та техніки, оскільки на його основі здійснюється оцінка міцності та надійності. Для адекватного опису термомеханічних процесів в таких структурах використовують нелінійні математичні моделі. Однією з найпоширеніших є модель на основі квазістатичної задачі термопружності для термочутливих тіл. Як відомо, в цьому випадку задача складається з двох етапів: визначення температурного розподілу і викликаного ним термопружного стану. І дуже часто саме проблема розв'язування нестаціонарних задач теплопровідності викликає труднощі. В таких задачах нелінійними є рівняння, а у випадку врахування складного теплообміну з довкіллям нелінійними є також крайові умови. Складність таких задач зумовили широке застосування числових або аналітично-числових підходів. Тут запропоновано один з таких підлодів. Він полягає у частковій лінеаризації вихідної задачі через введення змінної Кірхгофа та подальшій її лінеаризації за допомогою методів послідовних наближень і лінеаризувальних параметрів. Таким чином, розв'язування нелінійної задачі теплопровідності зведено до ітераційного процесу, коли на кожному кроці розв'язується лінійна крайова задача з уточненими на попередньому кроці величинами. Далі до отриманої лінійної задачі застосовано інтегральне перетворення Лапласа. Підхід був апробований на низці задач теплопровідності для термочутливих тіл за складного тепло обміну [1]. Достовірність отриманих результатів перевірено шляхом порівняння з аналітичними розв'язками для часткових випадків та розв'язками, отриманими суто числовими методами. Далі підхід був доповнений застосуванням адаптованої формули Пруднікова, що ґрунтується на використанні рядів Фур'є [2], для знаходження оригіналів перетворення Лапласа, оскільки аналітичне їх визначення для складніших задач теплопровідності викликало труднощі. Таким чином доповнений підхід був успішно поширений на задачі для ідеально контактуючих [3, 4] та за неідеального контакту через фрикційний нагрів плоско паралельних термочутливих тіл [5]. Зауважимо, що підхід стосується саме нелінійної задачі теплопровідності, оскільки визначення термопружного стану у випадку, якщо температура кусково-однорідної термочутливої структури змінюється лише за однією координатою визначається за відомими в літературі співвідношеннями [1].

У дослідженні вищезгаданий підхід продемонстровано на прикладі нестаціонарної задачі теплопровідності для двох контактуючих термочутливих тіл за конвективно-променевого теплообміну з довкіллям та тепловиділень на межі дотику. Наве-

дено розподіли температури та викликаних нею напружень, отримані на основі розв'язків низки задач термопружності для кусково-однорідних тіл за різних теплових впливів. Достовірність отриманих результатів перевірено в часткових випадках. Для розглянутих задач швидкість збіжності ітераційних процесів не перевищувала 45 ітерацій, що підтвердило ефективність застосування запропонованого підходу до розв'язування нелінійних задач теплопровідності такого типу.

1. Р.М. Кушнір, В.С. Попович, Термопружність термочутливих тіл, Сполом, Львів (2009).
2. R.M. Kushnir, T.Ya. Solyar, A Numerical-Analytical Approach to the Analysis of Non
3. -Stationary Temperature Fields in Multiply-Connected Solids, Mechanics, Materials Science & Engineering, 3, 90-106, (2016). https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1167.0165
4. R. Kushnir, O. Vovk, T. Solyar, Thermoelastic state of a thermosensitive piecewise-homogeneous half-space, 12th International Congress on Thermal Stresses (Hangzhou, China, 1-5 June 2019), Part II, Paper, Zhejiang University, 265-268 (2019).
5. O.M. Vovk, Thermal State of Two Contacting Thermosensitive Layers Under Complex Heat Exchange, Mathematical Sciences, 287(2), 334–345, (2025). https://doi.org/10.1007/s10958-025-07594-7
6. O.M. Vovk, Thermal state of a thermosensitive tribosystem under complex heat exchange, Mathematical Sciences, 278(5), (2024). https://doi.org/10.1007/s10958-024-06962-z

Analytical-numerical approach to solving thermoelasticity problems for heat-sensitive piecewise homogeneous bodies

O. Vovk[1], R. Kushnir

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

[1] vovk0108@gmail.com

An analytical-numerical approach to solving nonlinear problems of quasi-static thermoelasticity for thermosensitive piecewise homogeneous bodies is proposed. The approach concerns the solution of the nonlinear problem of thermal conductivity. Its essence lies in the linearization of the initial problem of thermal conductivity using the Kirchhoff variable, and then applying the methods of linearizing parameters and successive approximations to the resulting problem. The solution of the linear problem of thermal conductivity is carried out using the Laplace transform with its inverse according to the adapted Prudnikov formula. Numerical studies have been carried out on examples of thermoelasticity problems for thermosensitive bodies under different thermal heating, solved using the approach.

Keywords: nonlinear heat conduction problems, thermosensitive bodies, thermoelastic state, linearizing parameter method, adapted Prudnikov formula.

Побудова розв'язків тривимірних задач теорії пружності для неоднорідного трансверсально ізотропного шару

Ю. В. Токовий[1], Д. І. Бойко

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] tokovyy@gmail.com

Ключові слова: неоднорідний матеріал, метод безпосереднього інтегрування, трансверсально ізотропний шар, тривимірна задача теорії пружності, інтегральні рівняння.

У доповіді запропоновано підхід до розв'язування тривимірних задач теорії пружності для трансверсально ізотропного шару, пружні модулі якого неперервно змінюються за товщиною. Площина ізотропії матеріалу шару є паралельною до плоских обмежувальних поверхонь шарів, до яких прикладено довільним чином розподілені нормальні та зсувні навантаження.

Для побудови розв'язку задачі застосовано загальну стратегію методу безпосереднього інтегрування рівнянь рівноваги [1, 2], у результаті чого встановлено вирази компонент тензора напружень через визначальні функції, за які вибрано сумарні напруження $\sigma = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$ та поперечні напруження σ_{zz}. Тут σ_{xx} та σ_{yy} – планарні (у площині ізотропії) нормальні напруження. З використанням цих співвідношень систему рівнянь суцільності в напруженнях зведено до ключових рівнянь для визначальних функцій. У просторі зображення подвійного інтегрального перетворення Фур'є, ключові рівняння зведено до інтегральних рівнянь Вольтерри другого роду для окремих визначальних функцій з відповідними умовами на межі. У такий спосіб сформульовано допоміжні крайові задачі для інтегральних рівнянь для визначальних функцій. Отримані допоміжні задачі розв'язно за допомогою «швидкого» числового методу квадратур.

Запропонований підхід дає змогу аналізувати напружений стан трансверсально ізотропних тіл із плоскопаралельними поверхнями у загальній тривимірній постановці за довільних профілів залежності властивостей матеріалу від поперечної координати та співвідношень між модулями анізотропії. Використання підходу дає можливість адекватно прогнозувати механічну поведінку тіл, виготовлених із функціонально градієнтних матеріалів, та визначати на макрорівні профілі залежностей анізотропних модулів від поперечної координати для забезпечення бажаних полів напружень. Ефективність підходу продемонстровано для типових трансверсально ізотропних композитів з урахуванням впливу неоднорідності матеріалу на розподіл поперечних напружень.

На рис. 1 наведено розподіл за товщинною координатою z безрозмірних поперечних напружень σ_{zz}/p, які виникають у перерізі $x = y = 0$ трансверсально ізотропного шару $(x, y, z) \in \mathbb{R}^2 \times [-1,1]$ внаслідок навантаження на плоских поверхнях $\sigma_{zz}(x, y, \pm 1) = p\, exp(-3x^2 - 5y^2)$, $\sigma_{xz}(x, y, \pm 1) = \sigma_{yz}(x, y, \pm 1) = 0$. Профілі заленості пружних модулів від поперечної координати вибрано у вигляді

$$E'(z) = E_0'(1 + \tau_E \exp(t_E z)), \quad G'(z) = G_0'(1 + \tau_G \exp(t_G x_3)),$$
$$E(z) = E_0, \quad G(z) = G_0, \quad \nu'(z) = \nu_0', \quad \nu(z) = \nu_0, \qquad (1)$$

а модулі із нижнім індексом «0» відповідають PZT-4 кераміці ($E_0 = 81.28$МПа, $E_0' = 64.53$МПа, $G_0 = 30.56$МПа, $G_0' = 25.6$МПа, $\nu_0 = 0.33$, $\nu_0' = 0.34$). Тут τ_E , τ_G – безрозмірні числові параметри, які дають змогу варіювати профілі неоднорідності властивостей матеріалу (1). Криві на рисунку відповідають випадкам $\langle \tau_E, \tau_G \rangle = \langle i, j \rangle$, де $i, j = 0,1$. Очевидно, що випадок $\langle 0,0 \rangle$ відповідає однорічному трансверсально ізотропному матеріалу. З рисунка видно суттєвий вплив неоднорідності на розподіл поперечних напружень.

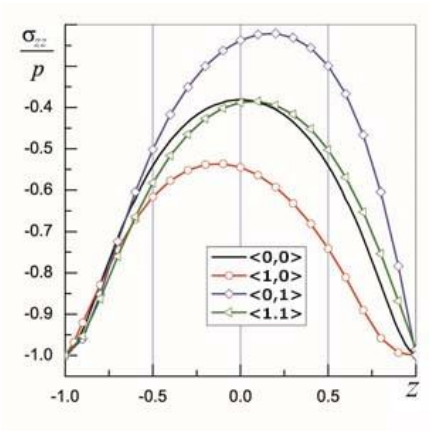


Рис. 1. Вплив неоднорідності матеріалу на розподіл поперечних напружень.

1. 1.Y. Tokovyy, C.-C. Ma, *The Direct Integration Method for Elastic Analysis of Nonhomogeneous Solids*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle (2021).
2. Y. Tokovyy, C.-C. Ma, An analytical solution to the three-dimensional problem on elastic equilibrium of an exponentially-inhomogeneous layer, *Journal of Mechanics*, **31**(5), 545 – 555 (2015).

Construction of solutions to the three-dimensional elasticity problems for an inhomogeneous transversely isotropic layer

Yu. Tokovyy[1], D. I. Boiko

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] tokovyy@gmail.com

A methodology is proposed for solving three-dimensional elasticity problems in transversely isotropic layers with thickness-dependent elastic moduli. The plane of isotropy is assumed parallel to the layer boundaries, which are subjected to arbitrary normal and shear loads. By applying the method of direct integration, the problem is reduced to governing equations for key determinant functions, selected as transverse and total stresses. The proposed methodology enables the analysis of the stress state of transversely isotropic bodies with plane-parallel boundaries within a general three-dimensional framework, allowing for arbitrary profiles of the variation of the anisotropic moduli with respect to the transverse coordinate, as well as arbitrary surface loading.

Keywords: inhomogeneous material, direct integration method, transversely isotropic layer, three-dimensional problem of elasticity theory, integral equations.

Дослідження напружень у плоскодеформованому планарно-неоднорідному прямокутному брусі

Ю. В. Токовий[1], М. Й. Юзв'як

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] tokovyy@gmail.com

Ключові слова: додаткові деформації, кутові точки, пружний прямокутник, аналітичні розв'язки, метод прямого інтегрування, функція Вігака.

Запропоновано алгоритм розв'язання плоскої задачі теорії пружності для прямокутної області, виготовленої з матеріалу, властивості якого є довільними функціями обох планарних координат. Розглянута задача належить до царини складних та актуальних задач механіки деформівного твердого тіла як з точки зору розвитку фундаментального методологічного інструментарію, так і прикладного використання в інженерній практиці. Складність для побудови аналітичних розв'язків задач для областей з кутовими точками обумовлена наявністю поверхневих концентраторів напружень. Ці характерні точки зазвичай розділяють різні грані конструктивного елемента. У рамках математичної моделі вони є точками перетину різнорідних координатних осей [1]. Палітра розподілу напружень поблизу таких точок відрізняється від решти тіла, і математична оцінка її є досить складною через складність граничних умов, які зазвичай змінюються в цих точках, та негладкості поверхні [2]. Крім того побудова аналітичних розв'язків задачі ускладнена неоднорідністю матеріалу. Причина цього полягає в тому, що ключові рівняння відповідних крайових задач містять коефіцієнти, що залежать від координати місця точки і є комбінаціями профілів модулів матеріалу або коефіцієнтів жорсткості [3]. Це означає, що такі коефіцієнти не комутують з диференціальними операторами, і тому класичні методи розв'язання є здебільшого незастосовними [4]. Точні розв'язки існують лише для дуже специфічних градієнтів та геометрій матеріалів [3]. Були також численні спроби розробити деякі специфічні методи для довільних профілів неоднорідності, коли модулі матеріалу демонструють зміну в одному просторовому напрямку, який зазвичай трансферсальний до поверхні. Це є типовим для функціонально градієнтних матеріалів або багатошарових конструкцій. У цьому випадку можна виконати відокремлення змінних, і побудова розв'язків є не такою складною, як у випадку довільно напрямленої неоднорідності, коли властивості матеріалу змінюються з двома координатами.

Для розв'язання сформульованої задачі використано підхід, заснований на використанні методу прямого інтегрування [3] та методу додаткових деформацій [5]. Такий підхід передбачає, що члени зі змінними коефіцієнтами у фізичних співвідношеннях слід розглядати як невідомі додаткові деформації, тоді як основні пружні деформації містять постійні властивості матеріалу. Потім будується аналітичний розв'язок для однорідної області, що розглядається з додатковими деформаціями. Для виконання цього завдання ми використовуємо метод прямого інтегрування [3], який довів свою ефективність при розв'язанні задач для областей з

кутовими точками. Після отримання явного аналітичного розв’язку для допоміжної задачі, невідомі додаткові деформації визначаємо за допомогою методу послідовних наближень. Варто зауважити, що задача, яку потрібно розв'язати для кожного кроку апроксимації, формулюється для визначального рівняння зі сталими коефіцієнтами.

1. В.Т. Гринченко, *Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров*, Наукова думка, Киев (1978).
2. V.V. Meleshko, Yu.V.Tokovyy, J.R. Barber, Axially symmetric temperature stresses in an elastic isotropic cylinder of finite length, *J. Math. Sci*., **176**(5), 646–669 (2011).
3. Y. Tokovyy, C.-C. Ma, *The Direct Integration Method for Elastic Analysis of Nonhomogeneous Solids*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle (2021).
4. Y. Tanigawa, Some basic thermoelastic problems for nonhomogeneous structural materials, *Appl. Mech. Rev.*, **48**(6), 287–300 (1995).
5. И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич, *Расчет на прочность деталей машин*, Машиностроение, Москва (1993)

Analysis of stresses in a plane-deformed planar-inhomogeneous rectangular bar

Yu. Tokovyy[1], M. Yuzvyak

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

[1] tokovyy@gmail.com

A generalization of the direct integration method is suggested for the plane problems of elasticity and thermoelasticity theories in a rectangular domain under the assumption that the material properties are arbitrary functions of both planar coordinates. This generalization implies the introduction of one key function for expressing all the stress-tensor components and the use of the method of additional strains to handle the material inhomogeneity. As a result, the problem is reduced to a sequence of boundary value problems for the key function, which is to be determined from a second-order integro-differential equation with constant coefficients, accompanied by the integral conditions derived based on the original ones for the stress-tensor components.

Keywords: additional strains, irregular points, elastic rectangle, analytical solutions, direct integration method, Vihak function.

Математичне моделювання в задачах з урахуванням електропружних та п'єзомагнітних властивостей матеріалів

О.Д. Онопрієнко[a1], В.Б. Говоруха[a], Т.С. Кагадій[б], А.Г. Шпорта[б]

[a]Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна
[б]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
[1]e-mail: onopriienko.o.d@dsau.dp.ua

Ключові слова: електропружність, напружено-деформований стан, асимптотичний аналіз, п'єзомагнітні наноматеріали, розрахункові моделі, коефіцієнти інтенсивності напружень, розвиток тріщини

Сучасні матеріали, зокрема магнітоп'єзоелектричні композити, стали ключовими для нових поколінь пристроїв, де вони виконують функції сенсорів, актуаторів, перетворювачів енергії та елементів систем керування. Такі матеріали активно застосовуються в авіаційній техніці, машинобудуванні, приладобудуванні, мікроелектроніці та інших галузях високотехнологічного виробництва. Актуальність проблеми підсилюється необхідністю врахування анізотропії та нелінійної поведінки сучасних композиційних матеріалів, що широко застосовуються в інженерній практиці. У цьому контексті аналітичні та чисельно-аналітичні підходи відіграють ключову роль, оскільки дозволяють отримувати обґрунтовані наближені розв’язки та здійснювати верифікацію результатів чисельного моделювання. Проведення комплексного аналізу механізмів руйнування п'єзоелектричних та п'єзомагнітних матеріалів є критично важливим для розуміння і прогнозування міцності та надійності структурних компонентів.

Одним з напрямів представленої роботи є узагальнення розвинутого авторами методу збурень на випадок електропружних та електромагнітопружних матеріалів. Такий підхід дозволяє формулювати відповідні крайові задачі для основних рівнянь та представляти початкову задачу електропружності (електромагнітопружності) як суперпозицію крайових задач теорії потенціалу. При цьому механічні та електричні складові можуть бути відокремлені, зберігаючи взаємодію через крайові умови.

Окрема увага в даній роботі приділяється дослідженню п’єзомагнітних та магнітоелектричних наноматеріалів, що зумовлено їх здатністю до ефективного перетворення механічної та магнітної енергії на рівні наномасштабу. Такі матеріали є перспективними для застосування у високочутливих сенсорних системах, наноактуаторах і пристроях збору енергії. Водночас зменшення розмірів до наномасштабу супроводжується ускладненням механізмів руйнування, зокрема ініціації та розвитку тріщин, що істотно впливає на довговічність і надійність матеріалів.

Методологічною основою дослідження є поєднання молекулярної динаміки, квантовомеханічного моделювання та аналітичних методів. Перші два методи забезпечують розуміння механізмів утворення і розвитку тріщин на атомарному рівні. Вони дозволяють враховувати міжатомні взаємодії та квантові ефекти, що є важливим при аналізі наноматеріалів. Такі квантові ефекти можуть значно впливати на поведінку тріщин, наприклад, шляхом зміни енергетичних бар'єрів для розповсюдження тріщин або виникнення нових дефектів. Створення більш точних математичних моделей, що передбачають поведінку матеріалу, є однією із задач дослідження. Аналітичні методи застосовуються для розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень та динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах тріщин. Такі коефіцієнти характеризують концентрацію напружень у місцях дефектів та тріщин та дозволяють кількісно оцінити, наскільки напруження навколо тріщини може призвести до її розповсюдження. Поєднання вказаних підходів забезпечило комплексне розуміння механізмів руйнування в п'єзомагнітних наноматеріалах.

Отримані результати свідчать, що на наномасштабі відбувається істотна трансформація полів напружень, а квантові ефекти можуть змінювати енергетичні бар'єри поширення тріщин. Встановлено значний вплив наноструктурних дефектів як центрів зародження тріщин, а також здатність магнітоелектричних доменів змінювати траєкторію їх росту. Це відкриває перспективи керування процесами руйнування за допомогою зовнішніх полів.

Mathematical modeling of problems with consideration of electroelastic and piezomagnetic material properties

O. Onopriienko[a1], V. Govorukha[a] , T. Kagadiy[b], A. Shporta[b]

[a]Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine
[b]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

[1]e-mail: onopriienko.o.d@dsau.dp.ua

This study develops a mathematical framework for modeling electromechanical and piezomagnetic materials with strong field coupling. The perturbation method is extended to magnetoelectroelastic media, enabling the reduction of governing equations to boundary value problems of potential theory. Particular attention is given to nanoscale effects in piezomagnetic materials, where crack initiation and propagation are governed by coupled mechanical and electromagnetic interactions. A multi-scale approach combining molecular dynamics, quantum mechanical modeling, and asymptotic analysis is employed. Stress intensity factors are derived to quantify near-tip field singularities. The results reveal the dominant role of nanoscale defects and magnetoelectric interactions in fracture evolution, providing a basis for controlled crack propagation via external fields.

Keywords: electroelasticity, stress-strain state, asymptotic analysis, piezomagnetic nanomaterials, computational models, stress intensity factors, crack propagation

Моделювання умов взаємодії пружних суцільних середовищ із тонкими включеннями у системах кристал – квазікристал

В. В. Пастернак[a1], Г. Т. Сулим[б у]

[a]Волинський національний університет ім. Лесі Українки, Луцьк, Україна
[б]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] pasternak.viktoriia@vnu.edu.ua

Ключові слова: квазікристали, фазонне поле, фононне поле, тонке включення, умови взаємодії, коефіцієнти інтенсивності теплових напружень

Дослідження механічної поведінки квазікристалів привертає значну увагу через їхні високою мірою специфічні фізико-механічні властивості. Завдяки ним ці матеріали демонструють високу твердість, зносостійкість та низький коефіцієнт тертя. У зв'язку з цим вони розглядаються як перспективні для використання в інженерних конструкціях та функціональних матеріалах. Квазікристали характеризуються складною внутрішньою структурою та наявністю додаткових ступенів вільності, пов'язаних із так званим фазонним полем. Фононне поле пов'язане зі звичайними пружними деформаціями, тоді як фазонне відображає внутрішні перегрупування атомної будови, що є характерною особливістю квазіперіодичної структури матеріалу.

При застосуванні концепції суцільного середовища до фізичних систем типу кристал – квазікристал виникає специфічна проблема формулювання умов взаємодії на межі контакту матеріалів. Спричинене це передусім тим, що у звичайних кристалічних, полікристалічних чи аморфних матеріалах фазонне поле відсутнє. Тому умови контакту традиційних матеріалів не враховують фазонних переміщень і фазонних напружень. Це ускладнює формулювання коректних крайових умов на межі кристал – квазікристал. У науковій літературі це питання мало досліджене. Більшість робіт зосереджена на задачах для однорідних квазікристалічних середовищ або вивчення контакту між двома квазікристалічними. Випадків вивчення контакту квазікристалів зі звичайними кристалічними або аморфними матеріалами віднайти не вдалося. У зв'язку з цим та відсутністю однозначних експериментальних результатів виникає потреба у побудові різних моделей контактної взаємодії. Останні дають можливість дослідити можливі граничні випадки поведінки системи, а також оцінити вплив фазонного поля на напружено-деформований стан кусково-однорідного тіла.

Для вирішення сформульованої задачі у цій роботі запропоновано три моделі умов взаємодії між кристалічним середовищем та квазікристалом. Перша модель передбачає, що фазонні переміщення на межі контакту дорівнюють нулю. Така умова відповідає ситуації, коли контакт із кристалічним матеріалом обмежує можливість внутрішніх перебудов у квазікристалі на межі контакту. У цьому випадку тут атомна структура квазікристалу фактично фіксується.

Друга модель передбачає, що фазонне поле формально існує і в кристалічному середовищі. При цьому фазонні переміщення на межі контакту вважаються сталими. Такі сталі значення не створюють фазонних деформацій у кристалічному матеріалі. Водночас вони надають квазікристалічному середовищу певну свободу фазонних

перебудов. Фізично це можна трактувати як можливість обмеженої адаптації структури квазікристалу до контакту з іншим матеріалом.

Третя модель передбачає відсутність фазонних напружень на межі контакту. У цьому випадку фазонні переміщення можуть змінюватися довільно. Така умова може відповідати контакту квазікристалу з аморфними або полікристалічними матеріалами. У цих матеріалах відсутня чітко впорядкована структура, яка могла б обмежувати фазонні перебудови на межі контакту. Тому атомна структура квазікристалу може вільніше адаптуватися до такого контакту.

Поряд із цим розглянуто просторові задачі термопружності квазікристалічного середовища із тонкими оболонковими включеннями. Для їхнього розв'язування розроблено числовий підхід на основі модифікованого методу граничних елементів, особливостями якого є використання спеціальних функцій форми для врахування особливостей полів фононних і фазонних напружень, а також спеціальних квадратурних формул для числового обчислення сингулярних та гіперсингулярних інтегралів.

Досліджено коефіцієнти інтенсивності теплових напружень на фронтальних лініях тонкостінних включень. Аналіз проведено для різних варіантів умов взаємодії на поверхнях контакту. Отримані результати дали можливість оцінити вплив фазонних крайових умов на напружений стан системи. З'ясовано, що вибір моделі взаємодії істотно впливає на величину коефіцієнтів інтенсивності напружень.

Modeling of interaction conditions between elastic media and thin inclusions in crystal – quasicrystal systems

V. Pasternak[a1], H. Sulym[b]

[a]Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine
[b]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

[1] pasternak.viktoriia@vnu.edu.ua

This study addresses the problem of modeling interaction conditions in systems composed of crystalline and quasicrystalline elastic media containing thin inclusions. In quasicrystals, the mechanical behavior is described by both phonon and phason fields, whereas conventional crystals do not possess a phason degree of freedom. This difference complicates the formulation of appropriate interface conditions for the phason field at the crystal–quasicrystal boundary. To investigate possible limiting cases, three models of interaction conditions at the interface are proposed. The first model assumes that phason displacements vanish at the contact surface, while the second model assumes constant phason displacements at the interface. The third model prescribes the absence of phason stresses on the contact boundary. Numerical results are obtained for the thermal stress intensity factors along the fronts of thin inclusions and the influence of the adopted interaction models is analyzed.

Keywords: quasicrystals, phason field, thin inclusions, interaction conditions, thermal stress intensity factors

Реакція пружної матриці з двоперіодичними жорсткими дисковими включеннями на хвильове навантаження

В. В. Михаськів[а], І. Я. Жбадинський[аб1]

[а]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[б]Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

[1]zhbadynskyi.igor@gmail.com

Ключові слова: пружна матриця, періодичні жорсткі включення, хвильове навантаження, коефіцієнти інтенсивності динамічних напружень.

Періодично структуровані пружні композити та метаматеріали вирізняються спеціальними хвильовими ефектами, зумовленими множинним розсіюванням та динамічною взаємодією наповнювачів [1]. Окремий інтерес становлять метаматеріали, створені введенням у пружну матрицю ґраткових систем жорстких дискових включень. За гармонічного хвильового навантаження таких структур слід враховувати фактор частотної залежності динамічних напружень в околі включень, що важливо з точки зору оцінки динамічної міцності (дотепер відповідний аналіз стосувався одноперіодичних ланцюжків з жорстких дискових включень [2,3]).

Тут розглянуто задачу нормального падіння пружної гармонічної поздовжньої хвилі переміщень з амплітудою u_0 на двоперіодичний масив абсолютно жорстких дискових включень у пружній матриці (μ, ν, ρ – її модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона та густина). Неоднорідності мають однакову масу M, радіус a, їх центри розташовані періодично у двох напрямках на відстані d (рис. 1). З урахуванням умов періодичності і поступальності руху включень отримано граничне інтегральне рівняння (ГІР) відносно стрибка нормальних напружень $\Delta\sigma$ на поверхнях відлікового включення S у формі

$$\iint_S \Delta\sigma(\boldsymbol{y}) \left\{ \frac{\rho}{M} - \sum_{j=1}^{2} \boldsymbol{D}_j^{\boldsymbol{x}} \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{exp[ik_j r_{nm}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})]}{r_{nm}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})} \right] \right\} dS_{\boldsymbol{y}} = \mu k_2^2 u_0, \boldsymbol{x} \in S. \quad (1)$$

Тут $r_{nm}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \sqrt{(x_1 - y_1 - nd)^2 + (x_2 - y_2 - md)^2}$, $k_j (j = 1,2)$ – хвильові числа поздовжньої та поперечної хвиль, $\boldsymbol{D}_j^{\boldsymbol{x}}$ – відомі диференціальні оператори [2].

За числовим розв'язком ГІР [2] амплітуда відносного коефіцієнта інтенсивності динамічних напружень (КІДН) поздовжнього зсуву $\overline{K}_{I_I}$ в околі відлікового включення як функція кутової координати φ точки його фронту визначається за формулою (B– нормувальна стала):

$$\overline{K}_{II}(\varphi) = B(a^2 - x_1^2 - x_2^2)^{\frac{1}{2}} |\Delta\sigma(x)| \Big|_{\substack{x_1 = a\cos\varphi \\ x_2 = a\sin\varphi}}. \quad (2)$$

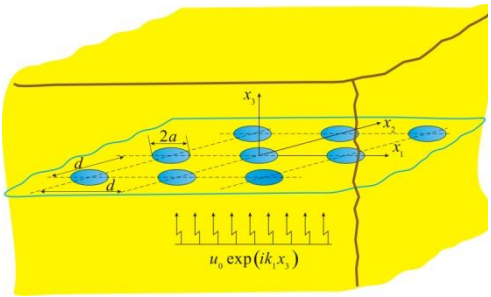


Рис. 1. Геометрія задачі.

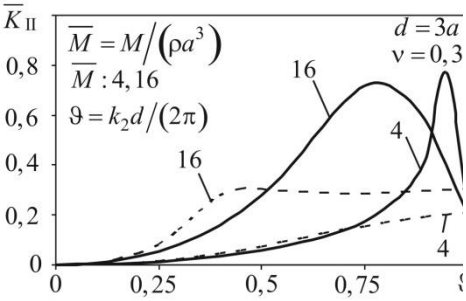


Рис. 2. Частотні залежності КІДН.

Рис. 2 стосується розрахунків КІДН в найближчій до сусідніх включень точці фронту відлікового включення, штрихові криві відповідають випадку поодинокого включення. На частотному спектрі виявлено присутність пікових значень КІДН, які за збільшення маси розсіювачів зміщуються в область нижчих частот.

1. X. Pu, A. Marzani, A. Palermo, A multiple scattering formulation for elastic wave propagation in space–time modulated metamaterials, *J Sound Vib*, **573**, 118199 (2024). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118199
2. V. Mykhas'kiv, I. Zhbadynskyi, *Boundary Integral Equation Method for 3D Elastodynamic Problems with Chain-Arranged Rigid Disk-Shaped Inclusions, Chapter 22: Advances in Mechanics, Advanced Structured Materials 191 (edited by A.N. Guz et al.). – Cham (Switzerland): Springer Nature,*391–406 (2023). DOI: 10.1007/978-3-031-37313-8_22
3. I. Zhbadynskyi, V. Stankevych, I. Butrak, Dynamic Stresses in 3D Elastic Solids with Pairwise Disk-Shaped Gaps within One-Periodic Lattice, *In: Proceedings of the XXX International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED),* September 8-10, Tbilisi, 319–322 (2025). DOI: 10.1109/DIPED66951.2025.11194683

Response of elastic matrix with double-periodic rigid disk-shaped inclusions to wave loading

V. Mykhas'kiv[a], I. Zhbadynskyi[ab1]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
[b]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

[1]zhbadynskyi.igor@gmail.com

Numerical solution of 3D problem with the incidence of normal time-harmonic longitudinal wave on a double-periodic array of coplanar rigid disc-shaped inclusions by using the boundary integral equation method is proposed. The mode-II dynamic stress intensity factor in the inclusion vicinities is computed and analyzed based on variations in the wave number, periodic distance, and mass of the constituent inclusions.
Keywords: elastic matrix, periodic rigid inclusions, wave loading, dynamic stress intensity factors.

Термонапружений стан термочутливого порожнистого циліндра з ФГМ покриттям за конвективно-променевого теплообміну

Г. Ю. Гарматій[1], Б. М. Калиняк[2]

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] galynaharmatiy@gmail.com

[2] b-kalynyak@litech.net

Ключові слова: термонапруження, циліндр, термочутливість, функційно-градуйований матеріал (ФГМ), покриття.

Функційно-градуйовані матеріали (ФГМ) [3] завдяки неоднорідності своїх характеристик надають нові можливості керування тепловими потоками, що забезпечує ефективний контроль теплових навантажень в елементах конструкцій. Врахування температурної залежності і неоднорідності термомеханічних характеристик матеріалів робить можливим точніше прогнозувати термонавантаження та оптимізувати конструкції для забезпечення надійності, довговічності та стабільної роботи за екстремальних температур.

Розглянуто вплив термочутливості термомеханічних характеристик вибраних матеріалів довгого порожнистого циліндра з тонким ФГМ покриттям на розподіл в ньому температури та напружень за конвективно-променевого теплообміну. На межі циліндра та покриття виконуються умови ідеального термомеханічного контакту. Нелінійну нестаціонарну крайову задачу теплопровідності з розривними коефіцієнтами розв'язано чисельно методом прямих. Процес розв'язування складається з двох частин: просторової дискретизації та чисельного інтегрування за часом. Для просторової дискретизації використано інтегро-інтерполяційний метод [1], який приводить до різницевих схем, що збігаються у класі розривних коефіцієнтів. Отримана задача Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь розв'язана за допомогою формул диференціювання назад [2].

Напружений стан визначено з відповідної квазістатичної незв'язаної задачі термопружності у напруженнях, яку зведено методом безпосереднього інтегрування [4] до розв'язування інтегрального рівняння Фредгольма другого роду відносно радіальних напружень.

Чисельні дослідження проведено у діапазоні температур від 300 К до 1600 К з залежним від часу зростом температури середовища на поверхнях циліндра, який виготовлений з алюмінію із нікосиловим покриттям. Характеристики двокомпонентного матеріалу $P(r,t)$ покриття (SiC, Ni) описано моделлю простої суміші [3] $P(r,t) = P_1(t)S_1(r) + P_2(t)S_2(r)$,де $S_1(r)$ та $S_2(r)$ – об'ємні частки складових $(S_1(r) + S_2(r) = 1)$. Індекс "1" відповідає нікелю, а "2" – карбіду кремнію. Вважаємо, що $S_1(r) = \left(\frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right)^n$. (r – радіальна координата, r_0 – внутрішній радіус циліндра, r_2 – зовнішній, а r_1 – радіальна координата покриття,). Температурні залежності термомеханічних характеристик j -ї $(j = 1,2)$ складової покриття та алюмінію $(j = 3)$ взято у вигляді [3] $P_j(t) = P_{j,0}\left(\frac{P_{j,-1}}{t} + 1 + P_{j,1}t + P_{j,2}t^2 + P_{j,3}t^3\right)$, де

$P_{j,-1}$, $P_{j,0}, P_{j,1}, P_{j,2}, P_{j,3}$ – коефіцієнти температурної залежності фізико-механічних характеристик матеріалів.

Для дослідження впливу термочутливості вибраного матеріалу на термонапружений стан циліндра з ФГМ покриттям розв'язано відповідну квазістатичну задачу термопружності за сталих термомеханічних характеристик.

1. Alexander A. Samarskii, *The Theory of Difference Schemes*, Imprint CRC Press (2001). https://doi.org/10.1201/9780203908518
2. E. Hairer & G. Wanner, *Solving ordinary differential equations II. Stiff and differential-algebraic problems*. Springer-Verlag (1996).
3. J. N. Reddy, Thermomechanical Behavior of Functionally Graded Materials. *Final Report for AFOSR Grant F49620-95-1-0342.* CML Report 98-01 (1998).
4. Tokovyy Yu, Ma Chien-Ching. *The Direct Integration Method for Elastic Analysis of Nonhomogeneous Solids*, Cambridge Scholars Publishing (2021).

Thermally Stressed State of a Thermosensitive Hollow Cylinder with an FGM Coating under Convective–Radiative Heat Transfer

H. Harmatii[1], B. Kalynyak[2]

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

[1] galynaharmatiy@gmail.com,

[2] b-kalynyak@litech.net

The uncoupled quasi-static problem of thermoelasticity for a hollow cylinder with FGM coating is solved, taking into account the temperature dependence of the thermomechanical characteristics of the material during convective-radiative heat exchange with media with a time-varying temperature. The non-linear non-stationary boundary value problem of thermal conductivity was solved by the numerical method of straight lines. The thermally stressed state of the cylinder is determined from Fredholm integral equations of the second kind, obtained by direct integration of the problem of thermal elasticity in stresses. The effect of temperature dependence of thermophysical and mechanical characteristics of materials on the thermostressed state of a hollow cylinder was studied.

Keywords: thermal stresses, cylinder, thermosensitivity, functionally graded material (FGM), coating.

Періодична система близько розміщених анізотропних включень різної гладкої форми у анізотропній матриці за антиплоскої деформації

О. І. Кваснюк

Фізико- механічний інститут ім. Г. В. Карпенко НАН України, Львів, Україна

aleksey.kvasniyk@gmail.com

Ключові слова: антиплоска деформація, анізотропія, періодична система включень, концентрація напружень, метод сингулярних інтегральних рівнянь.

Розглянемо пружне анізотропне тіло (матрицю) з періодичним рядом однакових криволінійних анізотропних гладких включень, рівномірно розміщених вздовж осі *Ox* з періодом d. Межовий контур включення в основній смузі періодів позначимо через *L*. (Рис. 1.)

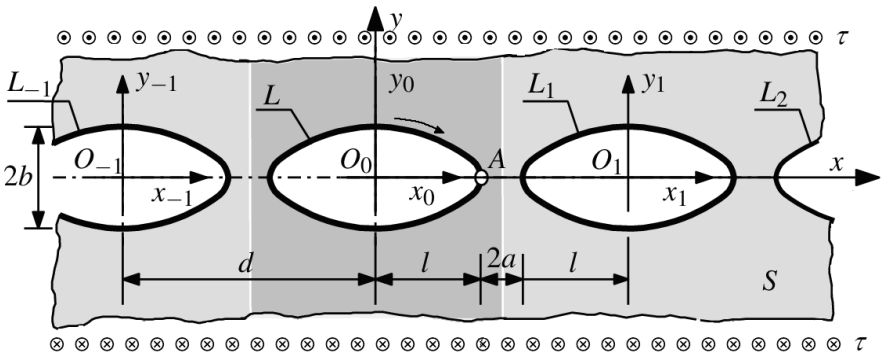


Рис. 1. Анізотропне тіло з анізотропними включеннями за антиплоскої деформації.

Уважатимемо, що механічний контакт між матрицею та включенням на його гладкому замкненому контурі L є ідеальним, тобто виконуються крайові умови для нормальних компонент зсувного напруження τ_{nz} та переміщення *w*:

$$w^+(t) = w^-(t),\ \tau_{nz}^+(t) = \tau_{nz}^-(t),\ t \in L. \qquad (1)$$

Тут верхні індекси вказують на граничні значення відповідних величин за підходу до контуру *L* зліва (+) або справа (-) за його обходу проти годинникової стрілки. Матриця *S* на нескінченності знаходиться під дією поздовжнього зсуву напруженнями $\tau_{yz}^{\infty}(x,y) = \tau, \tau_{xz}^{\infty}(x,y) = 0$. Задачу з крайовими умовами (1) розв'язано методом СІР [2]. Напруження та переміщення у кусково-однорідному анізотропному тілі $S = S_0 \cup S_j$ описують комплексні потенціали (КП) $\Phi_3^j(z_3^j) = d\varphi_3^j(z_3^j)/dz_3^j$, записані у математичних площинах $z_3^j = x + \mu_3^j y$ для областей матриці (*j*=0) та включень (*j*=1) [1]. Систему СІР розв'язано числовим методом квадратур [2,3] та проведено розрахунки відносних контактних τ_{nz}/τ (рис. 2 *a*) та контурних напружень з боку матриці τ_{sz}^-/τ (рис 2 *b*) та включення (рис. 2 *c*) для періодичної системи еліптичних включень (*b*/*l*=0,84) для пружних параметрів задачі $a_{01} = \sqrt{G_{13}^0 G_{23}^0}/\sqrt{G_{13}^1 G_{23}^1} = 4$ (G_{12}^j, G_{23}^j - модулі зсуву матриці та включення)

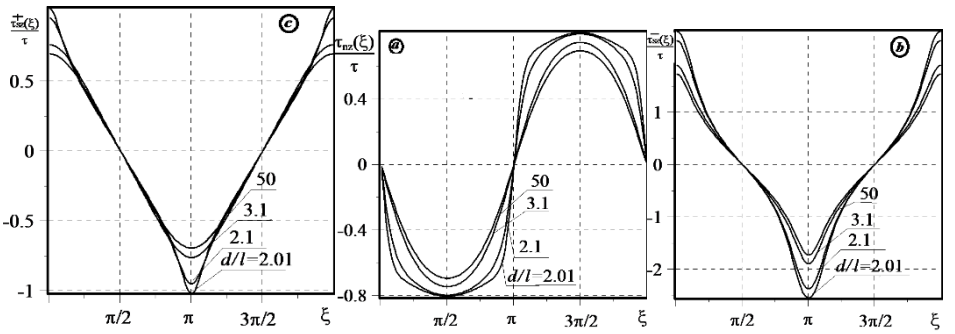


Рис. 2. Розподіл відносних напружень на одному з включень у періодичної системі включень еліптичної форми для різного відносного періоду *d/l* за параметрів ортотропії включення $\sqrt{G_{13}^1/G_{23}^1} = 5$ та матриці $\sqrt{G_{13}^0/G_{23}^0} = 1/2$.

1. С. С. Лехницкий. Теория упругости анизотропного тела, -М.: Наука, – 416 с, (1977).
2. В. Н. Долгих, Л. А. Фильштинский. Теория линейно – армированного композиционного материала с анизотропными компонентами структуры. Механика твердого тела № 6, 53-63 (1978).
3. M. P. Savruk, V. S. Kravets, L. Yo. Onyshko, O. I. Kvasniuk. Determination of an anisotropic body with smooth curvilinear inclusions under longitudinal shear. PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS. VOLUME 59, № 5, P. 74 (2023).

A periodic system of closely spaced anisotropic inclusions of various smooth shapes in an anisotropic matrix under longitudinal shear

O. Kvasniuk

KARPENKO PHYSICO – MECHANICAL INSTITUTE OF THE NAS OF UKRAINE.

aleksey.kvasniuk@gmail.com

We consider the antiplane problem of the theory of elasticity for an elastic piecewise homogeneous anisotropic body was solved using the method of singular integral equations. For periodic system of anisotropic inclusions in the orthotropic plane, the constructed system of integral equations is solved numerically by the quadrature method. The programming language is c++.. The influence of the elastic constants of anisotropic materials of the plane and the inclusions,as well as the shape of the curvilinear inclusions on the shear stress distributions at the interface of the materials was studied.

Keywords: antiplane deformation, anisotropy, periodic system of inclusions, stress concentration, singular integral equation method.

Математична модель визначення температури поверхні під шаром ізоляції за даними інтенсивності вихідного випромінювання

Ю. В. Бойчук

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

yuronchuk@gmail.com

Ключові слова: обернена задача, теплопровідність, теплоізоляція, інтенсивність випромінювання, дистанційна термометрія.

Вступ. У багатьох галузях промисловості, зокрема в енергетиці та авіакосмічній галузі, виникає необхідність контролю температури конструкційних елементів, що знаходяться під шаром теплоізоляції [1]. Оскільки прямий контактний метод вимірювання температури під покриттям часто є неможливим, актуальним є розвиток методів дистанційної термометрії, заснованих на розв'язанні обернених задач теплообміну. У попередніх роботах авторів розглядалася модель відновлення температури об'єкта за даними вимірювання температури вільної поверхні покриття. Проте точність таких моделей суттєво залежить від похибки контактного вимірювання. У даній роботі пропонується розширення математичної моделі шляхом використання додаткових даних про інтенсивність ІЧ-випромінювання, що виходить із шару ізоляції.

Математична модель. Розглядається плоский теплоізоляційний шар товщиною $2b$, що перебуває в ідеальному термічному контакті з об'єктом при $y=-b$ та обмінюється теплом із зовнішнім середовищем при $y=b$ (рис. 1).

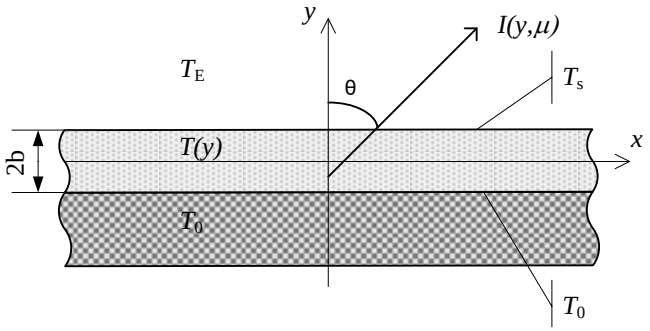


Рис. 1. Теплоізоляційний покрив, встановлений на поверхні тіла високої теплопровідності.

Тепловий стан системи описується системою взаємозв'язаних рівнянь теплопровідності та перенесення випромінювання:

$$\lambda \frac{d^2T(y)}{dy^2} - \frac{dq_r}{dy} = 0, y \in (-b, b) \quad (1)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності, dq_r — радіаційний потік енергії, що визначається через інтегральну інтенсивність випромінювання $I(y,\mu)$. Обернена задача полягає у визначенні температури $T_0 = T(0)$ за умови, що відомі температура зовнішнього

середовища T_E та експериментально виміряна інтенсивність випромінювання I_{exp}, що виходить із поверхні $y=b$ у напрямку датчика.

Метод розв'язання. Запропоновано підхід, що базується на мінімізації цільового функціонала невязки між розрахованою інтенсивністю $I_{calc}(T_0)$ та експериментально отриманими даними I_{exp}:

$$J(T_0) = \left\| I_{calc}(T_0) - I_{exp}{}^2 \min \right\|. \quad (2)$$

Розрахунок теоретичної інтенсивності $I_{calc}(T_0)$ проводиться на основі розв'язку прямої задачі кондуктивно-променевого теплообміну з використанням наближення "сірого тіла" та врахуванням процесів поглинання і розсіювання в об'ємі шару. На відміну від класичних постановок [2], де використовується лише температура поверхні T_S, такий підхід дозволяє отримати надлишкову інформацію про температурний градієнт всередині шару, що потенційно підвищує стійкість розв'язку оберненої задачі.

Висновки. Сформульовано математичну модель оберненої задачі термометрії, яка враховує спектральні характеристики вихідного випромінювання. Очікується, що залучення радіометричних даних дозволить зменшити вплив невизначеності умов конвективного теплообміну на точність відновлення температури під ізоляцією. Подальші дослідження будуть спрямовані на аналіз збіжності ітераційного алгоритму та оцінку впливу оптичних параметрів матеріалу на похибку методу.

1. *K. Daryabeigi* Combined Heat Transfer in High-Porosity High Temperature Fibrous Insulations: Theory and Experimental Validation // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. – 2011. Vol. 2, № 4. – P. 536–546.
2. В.Ф. Чекурін, Ю.В. Бойчук, Математична модель для визначення температури поверхні, покритої теплоізоляційним шаром. *Математичні методи та фізико-механічні поля*. – 2021. Т. 63. No 1. С. 161–172

Mathematical model for determining the surface temperature under an insulation layer based on output radiation intensity data

Y. Boichuk

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

yuronchuk@gmail.com

A mathematical model for determining surface temperature under insulation based on remote radiometry is presented. The inverse heat transfer problem is solved by reconstructing boundary conditions from measured infrared intensity. The model utilizes coupled heat conduction and radiation transfer equations, accounting for the optical properties of the material. A solution method based on discrepancy functional minimization is proposed. This approach improves temperature reconstruction stability and reduces the impact of uncertain convective heat exchange conditions.

Keywords: inverse problem, heat conduction, thermal insulation, radiation intensity.

Математичне і комп'ютерне моделювання процесів деформування складних конструкцій за руйнівних навантажень

Б.Д. Дробенко[а1], М.В. Марчук[а], М.М. Хом'як[а], Д.В. Клименко[б], В.М. Сіренко[б] В.М. Харченко[б]

[а]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[б]Державне підприємство «Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля», Дніпро, Україна

[1]drobenko@ukr.net

Ключові слова: математичне моделювання, комп'ютерне моделювання, міцність, руйнівне навантаження, складні конструкції, нелінійне деформування, метод скінченних елементів

У рамках тривимірної моделі пружно-пластичного тіла розроблено методологію дослідження міцності складних конструкцій з урахуванням їхньої реальної геометричної форми та нелінійного характеру деформування. На цій основі створено відповідне програмне забезпечення, яке надає можливості у стислі терміни проводити обчислювальні експерименти і шляхом комп'ютерного моделювання досліджувати міцність конструкцій та істотно точніше (у порівнянні з відомими підходами на основі моделей стрижнів, балок, пластин і оболонок) визначати для них руйнівні навантаження і зони, з яких починається їхнє можливе руйнування.

Розроблена методологія і відповідне програмне забезпечення пройшли апробацію в ДП "КБ "Південне" ім. М.К. Янгеля". З їхнім використанням досліджено міцність низки різних баків паливних відсіків ракетоносіїв. Порівняльний аналіз результатів моделювання і натурних руйнівних експериментів показав добре узгодження місця і характеру руйнування та значення руйнівних навантажень.

У процесі комп'ютерного моделювання процесів деформування розглянутих конструкцій у межах геометрично й фізично нелінійних математичних моделей виявлено нові механічні ефекти, які неможливо отримати за припущення пружного деформування. Зокрема зі збільшенням навантаження і переходом в пластичну зону деформування, розглядувані конструкції наче "намагаються вціліти" і реагують на небезпеку остаточного руйнування перерозподілом напружень (щоб максимально використати експлуатаційний ресурс): максимальні напруження з наближенням до руйнування зміщуються в інші місця конструкцій; різниця між напруженнями на зовнішній і внутрішній поверхнях конструкцій у місці максимальних напружень зменшується до мінімуму, що також є непрямим свідченням наближення руйнування у цій зоні. У межах традиційно використовуваних лінійних моделей без врахування ефектів пружнопластичного деформування і наявності великих деформацій та переміщень неможливо визначити руйнівне навантаження і місце руйнування.

Виконані дослідження дають можливість оптимізувати обсяги експериментального відпрацювання, зберегти матеріальну частину і замінити руйнівні випробування розрахунково-експериментальними роботами. Із збільшенням випадків збігу результатів комп'ютерного моделювання і натурних експериментів, зростанням довіри до результатів комп'ютерного моделювання взагалі може відпасти необхідність у руйнівних натурних експериментах. Після обчислювальних експериментів і визначення

найнапруженіших місць складної конструкції шляхом комп'ютерного моделювання можна виконати неруйнівний натурний експеримент на реальному фізичному прототипі. При виконанні такого експерименту давачі рекомендовано ставити в найнапруженіших місцях конструкції, визначених засобами комп'ютерного моделювання, після чого порівняти експериментальні значення деформацій в цих місцях з аналогічними значеннями, отриманими з обчислювального експерименту. У разі збігу результатів обчислювального й натурного експериментів для навантажень, менших за руйнівні, можна різко зменшити кількість натурних експериментів, в яких навантаження доводять до руйнівного.

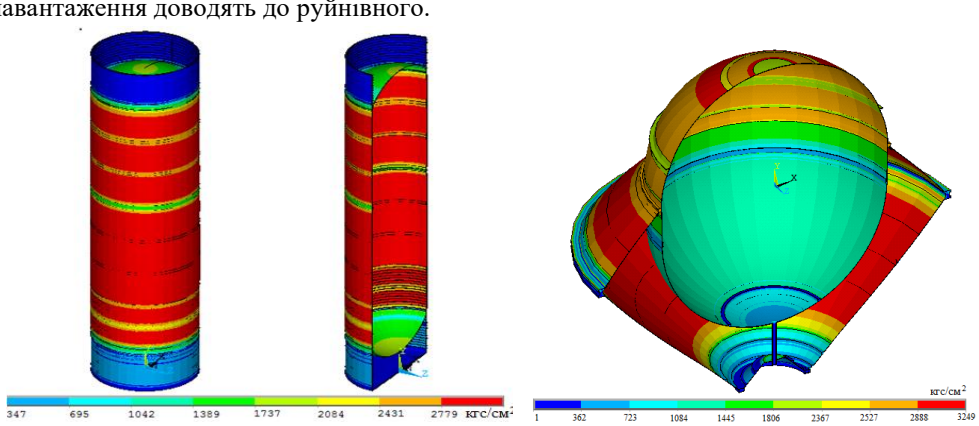


Рис. 1. Розподіл еквівалентних напружень в паливних баках за руйнівних навантажень.

Mathematical and computer simulation of the processes of deformation of complex structures under destructive loads

B. Drobenko[a1], M. Marchuk[a], M. Khomyak[a], D. Klymenko[b], V. Sirenko[b], V. Kharchenko[b]

[a]Ya.S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.
[b]State Enterprise «M.K. Yangel Design Bureau "Pivdenne"», Dnipro, Ukraine.

[1]drobenko@ukr.net

Within the framework of the general model of an elastic-plastic body using the finite element method, a methodology for studying the strength of complex structures has been developed, taking into account their real geometric shape and the nonlinear nature of deformation.. The strength of a number of fuel compartment tanks of various types of rocket launch vehicles has been studied. A comparative analysis of the results of computer modeling and the corresponding full-scale destructive experiments showed good agreement between the calculated values of destructive loads, locations and nature of tank destruction with those obtained experimentally.

Keywords: mathematical modeling, computer modeling, strength, destructive load, complex structures, nonlinear deformation, finite element method

Взаємодія тонких оболонкових включень у пружному середовищі за гармонічних коливань

Р. М. Кушнір[а], Я. М. Пастернак[б1], Г. Т. Сулим[а]

[а]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[б]Волинський національний університет ім. Лесі Українки, Луцьк, Україна

[1] iaroslav.pasternak@vnu.edu.ua

Ключові слова: гармонічні коливання, метод граничних елементів, тонкі оболонкові включення, взаємодія включень, коефіцієнти інтенсивності напружень

У роботі розглянуто задачі взаємодії тонких оболонкових включень у пружному середовищі за його гармонічних коливань. Необхідність дослідження такого типу задач постійно виникає в інженерній практиці. Зокрема, у сучасних конструкціях часто присутні тонкі елементи, що геометрично мають вигляд оболонок. До них належать армування, тонкі пластини, оболонки, а також різноманітні технологічні вставки у матеріалах конструкційних елементів. Також до них можна віднести й дефекти структури матеріалу, наприклад оксидні чи сульфідні прошарки в конструкційних сталях тощо. Наявність таких включень істотно впливає на розповсюдження пружних хвиль у середовищі. Відтак дослідження хвильових процесів у середовищах із тонкими включеннями має важливе значення не лише для академічної науки, але й для аналізу міцності та надійності конкретних конструкцій. Воно також є надзвичайно актуальним для задач неруйнівного контролю та діагностики матеріалів. Окрім того, подібні задачі виникають у геофізиці, матеріалознавстві та акустиці.

У роботі на основі принципу поєднання континуумів різної розмірності побудовано аналітико-числовий підхід до розв’язування просторових задач про гармонічні коливання ізотропного пружного середовища з тонкими оболонковими жорсткими включеннями. Для розв’язування цієї проблеми побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь та використано модифікований метод граничних елементів, що є ефективним для дослідження задач у необмежених або великих областях. Його використання також дає можливість зменшити розмірність задачі, оскільки обчислювальна схема вимагає дискретизації лише на серединних поверхнях включень та на межі тіла. Завдяки цьому істотно зменшуються вимоги до обчислювальних ресурсів. У розробленому підході враховано специфічні особливості задачі, пов’язані з існуванням тонких неоднорідностей. Для коректного опису особливостей полів напружень на їхній фронтальній лінії застосовано спеціальні функції форми. Це забезпечило високу точність числового розв’язку. Також у методі використано спеціальні квадратурні формули для обчислення особливих інтегралів.

У роботі запропоновано високоточні процедури обчислення узагальнених коефіцієнтів інтенсивності напружень. Оскільки ці коефіцієнти характеризують поведінку напруженого стану поблизу фронтальної лінії включення, то їхнє визначення є важливим для аналізу локальної концентрації напружень та оцінювання конструкційної міцності. У математичній моделі включень враховано можливість їхнього руху як жорсткого цілого. Крім того, враховано можливість появи крутних

коливань включень. Такий підхід дає змогу більш адекватно описувати реальну поведінку тонких елементів у пружному середовищі.

У роботі здійснено числовий аналіз задач для систем із декількох оболонкових включень різної геометричної форми. Проаналізовано їхню взаємодію під дією гармонічного збурення. Досліджено вплив взаємного розташування включень та їхніх мас на напружено-деформований стан середовища. Особливу увагу приділено розподілу коефіцієнтів інтенсивності напружень на фронтальних лініях включень. З'ясовано, що взаємодія включень може істотно змінювати цей розподіл.

Також досліджено вплив взаємодії включень на їхні коливання. Виявлено, що взаємодія включень може змінювати амплітуди та характер руху кожного з них. Окрему увагу приділено аналізу резонансних явищ. З'ясовано, що взаємодія включень може зумовлювати зміщення резонансних частот системи.

Врахування таких ефектів має важливе значення для аналізу динамічної поведінки конструкцій в цілому. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування матеріалів із заданими динамічними властивостями. Вони також можуть застосовуватися при аналізі вібраційної стійкості конструкцій та ін.

Interaction of thin shell inclusions in an elastic medium under time-harmonic vibrations

R. Kushnir[a], Ia. Pasternak[b1] , H. Sulym[a]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
[b]Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine

[1] iaroslav.pasternak@vnu.edu.ua

This study addresses the interaction of thin shell inclusions embedded in an elastic medium under time-harmonic vibrations. Such problems are important for understanding wave propagation and dynamic stress concentration in heterogeneous materials and engineering structures. A boundary element method is developed for solving three-dimensional time-harmonic problems for isotropic elastic media containing thin rigid shell inclusions. The proposed approach employs special shape functions that account for the square-root singularity near the inclusion front line. High-accuracy procedures are implemented for computing generalized stress intensity factors along the front line of the inclusions. The model also allows for rigid-body motion and torsional vibrations of the inclusions. Numerical studies are carried out to investigate the interaction of several inclusions of different shapes and to analyze their influence on the stress intensity factors and resonance behavior of the system.

Keywords: time-harmonic vibrations, boundary element method, thin shell inclusions, interaction of inclusions, stress intensity factors

Визначення напружено-деформованого стану циліндра під дією власної ваги з використанням варіаційного підходу

Л. І. Постолакі

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

lesya.postolaki@gmail.com

Ключові слова: пружний циліндр, осесиметрична задача, варіаційний метод однорідних розв'язків.

Розглядається осесиметрична задача теорії пружності для скінченного суцільного циліндра, який перебуває під дією власної ваги. Бічна поверхня циліндра вважається жорстко закріпленою, а торцеві поверхні є вільними від зовнішніх навантажень. Для побудови аналітичного розв'язку використовується принцип суперпозиції, що дозволяє представити шуканий напружено-деформований стан у вигляді суми двох частин. Перша частина відповідає так званому основному стану і описує розв'язок задачі теорії пружності для неоднорідної системи рівнянь рівноваги, обумовленої наявністю об'ємних сил, при цьому на торцевих поверхнях задаються однорідні граничні умови. Друга частина — збурений стан — визначається як розв'язок однорідної системи рівнянь (без об'ємних сил), але з неоднорідними граничними умовами на торцях циліндра, які компенсують невиконання початкових умов в основному стані. Цей підхід дозволяє звести складну крайову задачу до двох простіших. Розв'язки обох підзадач разом забезпечують виконання рівнянь рівноваги та всіх граничних умов. Отриманий у такий спосіб розв'язок дозволяє детально дослідити розподіл напружень і переміщень у циліндрі, а також оцінити вплив геометричних параметрів і фізико-механічних характеристик матеріалу на його напружено-деформований стан.

Задача визначення збуреного стану полягає у знаходженні розв'язку однорідного бігармонічного рівняння [1]:

$$\nabla^2\nabla^2\tilde{\chi} = 0$$

за крайових умов на бічній поверхні циліндра $r = 1$:

$$\tilde{u}_r|_{r=1} = -u_r^0(z),\ \ \tilde{u}_z|_{r=1} = -u_z^0(z)$$

і неоднорідних умов на торцевих поверхнях циліндра $z = \pm b$:

$$\tilde{\sigma}_{zz}|_{z=-b} = -\sigma_{zz}^0,\ \ \tilde{\sigma}_{rz}|_{z=-b} = 0,\ \ \tilde{\sigma}_{zz}|_{z=b} = 0,\ \ \tilde{\sigma}_{rz}|_{z=b} = 0.$$

Задачу визначення збуреного стану додатково декомпозовано на дві підзадачі, кожна з яких відповідає певному типу граничних умов на торцевих поверхнях. Для підвищення ефективності аналізу в межах кожної з цих задач окремо розглянуто симетричну та антисиметричну складові відносно серединної площини циліндра. Такий підхід дозволяє врахувати характер просторового розподілу шуканих величин і спростити процедуру побудови розв'язку за рахунок використання властивостей симетрії. Розв'язок кожної з отриманих чотирьох задач представлено у вигляді розвинення за повними системами комплексних осесиметричних однорідних

розв'язків рівнянь Ляме. Коефіцієнти розвинення виступають як невідомі параметри, що підлягають визначенню з умов задачі.

Для знаходження цих коефіцієнтів введено квадратичні функціонали, побудовані окремо для кожної із збурених задач. Зазначені функціонали визначають у квадратичній нормі міру відхилення наближеного розв'язку від заданих неоднорідних граничних умов на торцевих поверхнях. Мінімізація функціоналів приводить до необхідних умов оптимальності, які, у свою чергу, зводяться до безмежних систем лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів розвинення. Отримані системи рівнянь розв'язуються методом редукції [2], що дозволяє звести їх до скінченних систем із заданою точністю. Проведено числове дослідження розподілу компонент напружень уздовж осі циліндра для різних його довжин, що дає змогу оцінити вплив геометричних параметрів на напружено-деформований стан, зокрема зміни напружень у приповерхневих та центральних зонах.

1. С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
2. V. F. Chekurin, L. I. Postolaki A variational method of homogeneous solutions for axisymmetric elasticity problems for cylinder // Mathematical Modeling and Computing. – 2015. – 2, No. 2. – P. 128–139. https://doi.org/10.23939/mmc2015.02.128.

Determination of the Stress–Strain State of a Cylinder under Self-Weight Using a Variational Approach

L. Postolaki

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine

lesya.postolaki@gmail.com

Using the variational method of homogeneous solutions, the problem of determining the stress–strain state of a solid finite cylinder under the action of its own weight has been solved. The lateral surface of the cylinder is assumed to be fixed, while the end faces are free from external loads. The implementation of the method reduces the problem of determining the perturbed state to the solution of infinite systems of linear algebraic equations, which are solved by the reduction method. A numerical analysis of the stress components along the axial coordinate has been carried out for cylinders of various lengths, allowing for the assessment of the influence of geometric parameters on the stress distribution.

Keywords: elastic cylinder, axisymmetric problem, variational method of homogeneous solutions.

Методика оптимізації режимів термообробки елементів конструкцій із функціонально-градієнтних матеріалів

Є.М. Ірза

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

evgen_irza@ukr.net

Ключові слова: напружено-деформований стан, функціонально-градієнтний матеріал, метод скінченних елементів, параметрична оптимізація.

У роботі запропонована методика оптимізації режимів термообробки елементів конструкцій із функціонально-градієнтних матеріалів.

Температурне поле й напружено-деформований стан тіла у процесі термообробки визначають параметри: $t(\vec{r},\ \tau)$ – температура; $\hat{\sigma}(\vec{r},\ \tau)$ – тензор напружень; $\hat{\varepsilon}(\vec{r},\ \tau)$ – тензор деформацій; $\vec{u}(\vec{r},\ \tau)$ – вектор переміщень, де $\vec{r}$ – радіус-вектор точки тіла; τ – час. Фізико-механічні характеристики тіла залежать від просторової координати і температури. Параметри стану пов'язані між собою, з фізичними і геометричними параметрами тіла та зовнішніми діями, заданими вектором силового навантаження $\vec{p}$ та функцією теплового навантаження $h(\tau)$ (функція керування), системою рівнянь

$$L_i(\vec{r},\ \tau, \rightleftarrows\ t,\ \hat{\sigma},\ \hat{\varepsilon},\ \vec{p},\ \vec{u},\ h) = 0, \quad i = \overline{1, n_0}, \tag{1}$$

де через L_i позначено нелінійні інтегро-диференціальні оператори.

Зазначимо, що загалом в цю систему рівнянь входять рівняння руху, геометричні співвідношення між деформаціями і переміщеннями, феноменологічні співвідношення, які пов'язують компоненти тензорів напружень і деформацій, початкові та крайові умови.

Вимоги до якості виробів і параметрів технологічних процесів термообробки призводять до певних додаткових обмежень, які накладаються на змінні стану і технологічні умови процесу термообробки. Ці обмеження складаються з нерівностей

$$\phi_j(\vec{r}, \tau, t, \hat{\sigma}, \hat{\varepsilon}, \vec{p}, \vec{u}, h) \le 0,\ j = \overline{1, m} \tag{2}$$

(ϕ_j – задані функції). Вибір обмежень на параметри стану і технологічні умови здійснюється з урахуванням цілей термообробки.

У розглядуваному формулюванні задача оптимізації теплових режимів у процесах термообробки полягає у знаходженні функції керування $h(\tau)$, яка забезпечує мінімальну тривалість процесу нагрівання-охолодження при в’язях (1) і обмеженнях (2).

Розв’язок сформульованої екстремальної задачі будується на основі принципу поетапної параметричної оптимізації, відповідно до якого термомеханічні процеси в тілі, що піддається термообробці, як в системі з розподіленими параметрами, спочатку описують дискретною моделлю, після чого розв'язують оптимізаційну задачу як задачу нелінійного математичного програмування.

Внаслідок виконання стандартної скінченно-елементної дискретизації вихідна система рівнянь (1) зводиться до системи

$$\sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega^{(e)}} \bar{L}_j(\tau,\ \{\boldsymbol{T}^{(e)}\},\ \{\boldsymbol{U}^{(e)}\},\ h(\tau))d\Omega = 0, j = \overline{1,n}. \qquad (3)$$

відносно невідомих значень температури $\{\boldsymbol{T}^{(e)}\}$ і переміщень $\{\boldsymbol{U}^{(e)}\}$ у вузлах скінченно-елементного поділу тіла.

Для відшукання розв'язку системи рівнянь (3) використовується сімейство одно-крокових різницевих алгоритмів, відповідно з яким весь часовий інтервал процесу термообробки послідовно проходять з кроком $\Delta\tau$ (шукані значення параметрів стану в кінці кожного часового проміжку$[\tau_i,\ \ \tau_{i+1}]$, $i = 0,1,\ldots$ визначають з використанням їхніх значень на початку проміжку). У межах запропонованого підходу функція керування на часовому проміжку $[\tau_i,\ \ \tau_{i+1}]$ апроксимується лінійною функцією. Значення функції керування у момент часу τ_{i+1} задається співвідношенням

$$h_{i+1} = h_i + a_i\Delta\tau, \qquad (4)$$

де a_i – максимально можлива швидкість зростання (спадання) функції керування при нагріванні (охолодженні) за врахування обмежень (2), (3).

Таким чином, відповідно до запропонованого підходу оптимізаційна задача на проміжку часу $[\tau_i,\ \ \tau_{i+1}]$ зводиться до задачі пошуку максимуму швидкості зміни функції керування, а практично – одного параметра a_i, значення якого визначається шляхом прямого пошуку з множини допустимих значень його зміни на основі інформації про напруження, деформації й переміщення в тілі, а також задані обмеження на розглядуваному кроці.

Отримано розв’язки важливих класів задач оптимального за швидкодією керування тепловими режимами у виробничих процесах нагрівання-охолодження термочутливих тіл із пружних та в'язкопружних функціонально-градієнтних матеріалів.

Methodology for heat treatment modes optimizing of structural elements made of functionally gradient materials

E. Irza

Ya.S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

evgen_irza@ukr.net

The paper proposes methods for heat treatment modes optimizing of structures made of functionally gradient materials.

Keywords: stress-strain state, functional-gradient material, finite element method, parametric optimization

Проблеми визначення фазового складу та залишкових напружень у сталевих тілах за нагріву

О. Р. Гачкевич[а], Т.В. Козакевич[а1], Т.Волчаньскі[б]

[а]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна
[б]Політехніка Опольська, Ополе, Польща

[1] tv.kozakevych@gmail.com

Ключові слова: низьколеговані маловуглицеві сталеві пластини, термічна обробка, фазовий склад, залишковий напружений стан.

Було проаналізовано експериментальні теоретико-експериментальні та числові підходи до проблем визначення та кількісного опису залишкового напруженого стану, який зумовлений фазовими змінами, що відбуваються в сталевих низьколегованих маловуглецевих пластинах за різного виду технологічного нагріву рухомими розподіленими джерелами тепла. Розглянуто окремі з наявних моделей опису розпаду аустеніту в сталевому тілі, які враховують фізичні процеси, що відбуваються при фазових змінах.

Задачі математичної фізики, що описують фазові зміни та відповідні їм залишкові напруження є суттєво нелінійними, загальні методи розв’язання яких не розроблені [1]. Тому актуальним при розв’язанні цієї проблеми є використання експериментального чи теоретично встановлених особливостей протікання наявних процесів і явищ та застосування числових і числово-аналітичних методів розв’язування сформульованих при цьому задач математичної фізики.

Побудовано, оснований на методі зважених залишків у поєднанні з методом скінчених елементів, варіант методики числового розв’язування сформульованих складових задач наявних етапів запропонованої розрахункової схеми поставленої вихідної комплексної задачі механіки за врахуванням фазових перетворень для розглядуваної пластини (визначення температурного поля і відповідного приведеного часу перебування точок пластини в інтервалі температур поліморфних перетворень за монотонного охолодження; знаходження відсоткового вмісту залишкових фазових складових на основі відомих аналітичних залежностей (отриманих з використанням методу математичної статистики експериментальних термокінетичних діаграм фазових змін у маловуглецених низьколегованих сталях за монотонного охолодження, де встановлені інтервал поліморфних перетворень $850^0C \div 500^0C$); визначення залишкових напружень на основі задачі, сформульованої в переміщеннях за підходу методу умовних деформацій при знайденій деформації, викликаній різним відсотковим вмістом наявних при перетвореннях фазових складових за відмінності у їх питомих об’ємах).

На основі моделей, що ґрунтуються на статистичному підході до опису розпаду аустеніту розроблено методику параметричної оптимізації параметрів рухомих розподілених джерел тепла відносно відсоткового вмісту мартенситу при зменшенні рівня залишкових напружень.

Зазначено проблеми визначення і дослідження залишкового напруженого стану за локального нагріву промисловими рухомими джерелами тепла. У більшості підходів до опису залишкового напруженого стану сталевих тіл, вихідним є визначення відсоткового вмісту фазових складових при розпаді аустеніту за охолодження при змінах температури в інтервалі температур поліморфних перетворень. Було проаналізовано наявні моделі опису розпаду аустеніту в сталевому тілі, які в тій чи іншій мірі враховують фізичні процеси, що відбуваються при фазових змінах. Окреслено проблеми визначення і дослідження напруженого стану тіл за локального нагріву реальними рухомими джерелами тепла, зокрема, за їх різного моделювання, а також оптимізації такого напруженого стану за цільовими критеріями.

Основою вибраної моделі є інтерполяційні статистичні аналітичні співвідношення, що описують відсотковий вміст фазових компонент і відповідні їх механічні властивості, залежно від хімічного складу сталі та часу перебування в проміжку температур евтектоїдних перетворень за монотонного охолодження. Дана модель за відносно повного опису процесів і її ступеня математичної складності дає можливість сформулювати ефективну методику дослідження та оптимізації залишкових фазового та напруженого станів, що ґрунтується на числових методах розв'язання відповідних задач математичної фізики і підходах комп'ютерної симуляції. Ці опрацювання дають можливість розв'язати ряд проблем, пов'язаних з необхідністю врахування залишкових фазового і напруженого станів.

1. T. Wołczański, T.Kozakevych, O.Hachkevych, Structural and residual stress state of steel plates subjected to the heating of moving heat sources (ISSN 1429-6063, ISBN 978-83-66033-63-4), Oficyna Wydawnicza politechniki Opolskiej, Opole, 2020. – 290 c.

Problems of determining the phase composition and residual stresses in steel bodies during heating

O. Hachkevych[a], T. Kozakevych[a1], T. Wolczanski[b]

[a]Ya.S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.
[b]Opole University of Technology, Opole, Poland

[1] tv.kozakevych@gmail.com

The experimental, theoretical-experimental and numerical approaches to the problems of modeling, optimization, and quantitative description of the residual stress state are analyzed, which is caused by phase and structural changes occurring in low-alloyed low-carbon steel plates with different types of technological heating by mobile distributed heat sources. Some of the existing models describing the decay of austenite in the steel body are described, which take into account the physical processes that occur during phase and structural changes. The indicated problems of determining and investigating the residual stress state of local heating by industrial mobile heat sources.
Keywords: low-alloy low-carbon steel plates, heat treatment, phase composition, residual stress state.

Воднево-індуковане руйнування металів: декогезійно-дифузійна модель

Б. І. Гайвась[а], А. Дмитрук[б1]

[а]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[б] Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

[1] dmytruk15@gmail.com

Ключові слова: воднево-індуковане руйнування металів; моделювання; декогезія; дифузія, зумовлена напруженнями; воднева крихкість; метод скінченних елементів; ріст тріщини

Воднево-спричинена деградація металевих матеріалів зумовлена взаємодією механічних полів, процесів перенесення водню та мікромеханізмів руйнування [1]. У зонах концентрації напружень відбувається накопичення водню, спричинене градієнтами концентрації та напружено-індукованою дифузією, що призводить до зниження міжатомних сил зчеплення і ініціює ріст тріщин [2].

Метою роботи є побудова моделі, яка поєднує перенесення водню з критеріями руйнування на основі декогезійного механізму та забезпечує зв’язок між мікро- і макрорівнями процесу.

Розглядається металеве тіло з тріщиною, на яке діє зовнішнє навантаження. Водень надходить через поверхню та дифундує в об’ємі матеріалу, формуючи поле концентрації. Перенесення водню відбувається під впливом як концентраційних градієнтів, так і напруженого стану, зокрема гідростатичних напружень, що сприяють його локалізації поблизу вершини тріщини.

Механічний стан тіла визначається умовами рівноваги, а дифузія водню законом збереження маси з урахуванням впливу напружень. У зоні вершини тріщини виникає підвищений рівень напружень, що зумовлює інтенсивне накопичення водню.

Ключовим елементом моделі є критерій руйнування, який враховує спільний вплив концентрації водню та напружено-деформованого стану. На мікрорівні дія водню проявляється у зменшенні сил зчеплення між атомними площинами, що відповідає декогезійному механізму. Цей ефект передається на макрорівень через залежність умов руйнування від концентрації водню.

Таким чином, задача зводиться до розв’язання зв’язаної задачі механіки та дифузії водню з урахуванням воднево-залежного критерію руйнування в області поблизу тріщини.

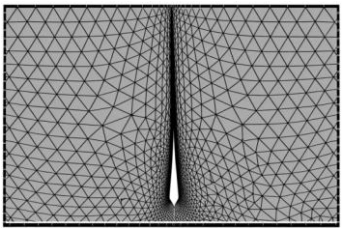


Рис. 1. Фрагмент скінченно-елементної сітки поблизу вершини тріщини

Для чисельного дослідження сформульованої задачі використано метод скінченних елементів. Область дискретизується на скінченні елементи з урахуванням геометрії тріщини. Для адекватного відтворення сингулярної поведінки напружень поблизу вершини тріщини використовується згущення сітки та спеціальні елементи [4].

Механічна задача формулюється у варіаційній формі та розв'язується відносно поля переміщень.

Задача перенесення водню також розв'язується методом скінченних елементів шляхом апроксимації поля концентрації у вузлах сітки. Рівняння дифузії інтегрується в часі із застосуванням неявної або квазі-неявної схеми, що забезпечує стійкість розрахунків. Зв'язок між механічною та дифузійною задачами реалізується ітераційно: на кожному кроці часу спочатку визначається напружений стан, після чого оновлюється поле концентрації водню з урахуванням градієнтів гідростатичних напружень. Запропонований підхід дозволяє узгоджено враховувати вплив водню на процеси накопичення пошкоджень і розвиток тріщин у металевих матеріалах.

1. B. Gayvas, V. Dmytruk, Influence of hydrogen on the strength of metals, Mathematical Problems of Mechanics of Nonhomogeneous Structures: Proc. 11th Int. Conf. (Lviv, Sept. 24–26, 2024), 195–196 (2024).
2. J. Shang, W. Chen, J. Zheng, Z. Hua, L. Zhang, C. Zhou, C. Gu, Enhanced hydrogen embrittlement of low-carbon steel to natural gas/hydrogen mixtures, *Scripta Mater*, **189**, 67–71 (2020). https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.08.011
3. M. Dadfarnia, P. Novak, D.C. Ahn, J.B. Liu, P. Sofronis, D.D. Johnson, I.M. Robertson, Recent advances in modeling hydrogen embrittlement, *Adv Mater*, **22(10**), 1128–1135 (2010).
4. M. A. Memon, D. L. C. Ching, I. Khan, Z. B. May, та M. A. Memon, A comparative finite element study of stress-assisted and non-stress-assisted hydrogen diffusion at a triangular notch in API 5L X52 steel, *Results in Engineering*, **29**, 109039 (2026). https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109039

Hydrogen-Induced Fracture of Metals: A Decohesion–Diffusion Model

B. Gayvas [a], A. Dmytruk[b1]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine.
[b]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

[1] dmytruk15@gmail.com

This study presents a model of hydrogen-induced fracture in metallic materials, combining decohesion mechanisms with stress-driven hydrogen diffusion. The formulation incorporates the influence of hydrogen concentration on the reduction of material strength and crack resistance. A coupled problem of mechanical deformation and hydrogen transport is considered within a continuum framework. The model accounts for the interaction between stress fields and diffusion processes, particularly in the vicinity of crack tips. A finite element approach is employed for numerical implementation, allowing the analysis of crack initiation and propagation under hydrogen effects. The proposed framework extends existing models by integrating micro- and macro-scale mechanisms into a unified description.

Keywords: hydrogen-induced fracture of metals; modeling; decohesion; stress-driven diffusion; hydrogen embrittlement; finite element method; crack propagation

Непрямий метод граничних елементів у задачах поздовжнього зсуву анізотропних тіл з тріщинами

К. В. Васільєв[1], Г. Т.Сулим

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1]kirill.all@gmail.com

Ключові слова: непрямий метод граничних елементів, тріщина, КІН, ортотропний матеріал, крайові умови першого роду, поздовжній зсув

Розглянуто задачу визначення напружено-деформованого стану анізотропного циліндричного тіла з паралельною до осі z твірною і напрямною L' з внутрішніми плоскими стрічковими тріщинами L_j за заданих зовнішніх силових і дислокаційних навантажень в умовах поздовжнього зсуву. У цьому разі достатньо вивчати напружено-деформований стан довільного перпендикулярного до осі z перерізу S тіла площиною xOy (рис. 1).

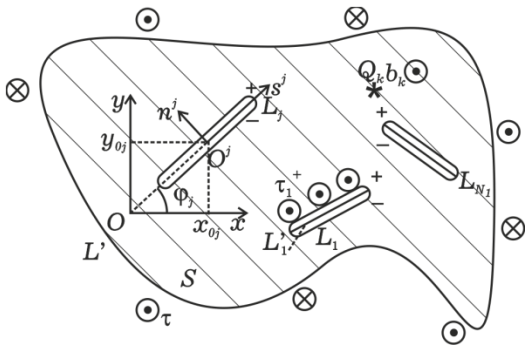


Рис. 1. Схема задачі

Для розв'язання задачі запропоновано модифікацію непрямого методу граничних елементів [2] на основі застосування методу функцій стрибків [1]. Із застосуванням останнього задача для тіла з тріщинами спочатку зводиться до задачі для суцільного тіла із додатково заданими невідомими функціями стрибків (розривів) похідних від переміщень уздовж осьових ліній L'_j (перерізів тріщин площиною xOy). У свою чергу застосування непрямого методу граничних елементів полягає у моделюванні досліджуваної області за допомогою необмеженої площини із заданими на L' фундаментальними розв'язками для анізотропного середовища у такий спосіб, щоб задовольнити крайові умови на L', визначити невідомі функції стрибків на L'_j та врахувати вплив внутрішніх навантажень. Оскільки досліджується задача для тіла із заданим зовнішнім навантаженням, то за фундаментальні розв'язки на L' обрано зосереджені сили.

Побудовано загальну систему результуючих граничних інтегральних рівнянь задачі та запропоновано числову схему їхнього розв'язування.

Апробацію та верифікацію запропонованого підходу здійснено на прикладах дослідження поздовжнього зсуву квадратного бруса з тріщиною за дії однорідного навантаження, а також зосереджених сил. Обчислено значення коефіцієнтів інтенсивності напружень для різних лінійних розмірів тіла, точок прикладання силових чинників та сталих модулів пружності матеріалу.

Порівняння отриманих результатів із відомими розв'язками, поданими у працях [3, 4], показало їхню докладну узгодженість, що підтверджує достовірність і ефективність запропонованої модифікації непрямого методу граничних елементів та перспективи її розвитку і розширення сфери застосування.

1. Г. Т. Сулим, Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями, *Досл.-вид. центрНТШ, Львів,*716 (2007).
2. P. K. Banerjee, R. Butterfield, Boundary element methods in engineering science, *McGraw-Hill, London,* 452 (1981).
3. N. Liu, N.J. Altiero, An integral equation method applied to mode III crack problems, *Engineering Fracture Mechanics,* **41(**4), 587-596 (1992). https://doi.org/10.1016/0013-7944(92)90303-V
4. Ia. M. Pasternak, K. V. Vasil'ev, H. T. Sulym, Antiplane deformation by concentrated factors of bounded bodies with cracks and rigid inclusions, *J. Math. Sci.,* **190(**5), 710–724 (2013).

Indirect boundary element method in problems of longitudinal shear of anisotropic solids with cracks

K. Vasil'ev[1], H. Sulym

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

[1]kirill.all@gmail.com

The problem of determining the stress–strain state of anisotropic bounded body with cracks under prescribed external loads in conditions of longitudinal shear is considered. To solve the problem, a modification of the indirect boundary element method based on the application of the discontinuity (jump) function method is proposed. A general system of resulting boundary integral equations for the problem is constructed, and a numerical scheme for their solution is proposed. The validation and verification of the proposed approach are carried out using examples of longitudinal shear of a square bar with a crack under uniform loading as well as under concentrated forces. The values of stress intensity factors (SIFs) are computed for different linear dimensions of the body, locations of applied forces, and elastic constants of the material. Some of the obtained SIF results are in agreement with those derived by other approaches.

Keywords: indirect boundary element method, crack, SIF, orthotropic material, boundary conditions of the first kind, longitudinal shear

Визначення ефективних в'язкопружних характеристик при поздовжньому розтягу двофазового композиту

А. В. Столярова[1], С. М. Гребенюк

Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

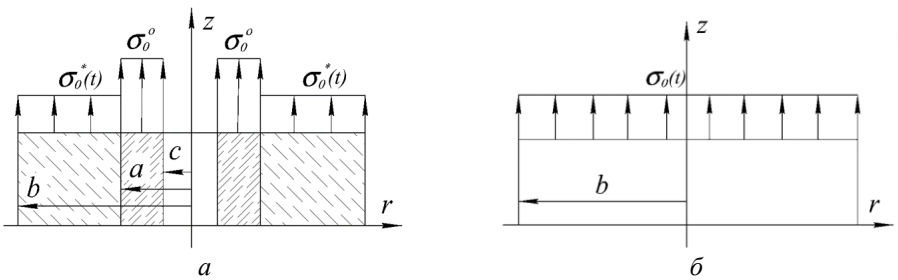
[1] st_av991@ukr.net

Ключові слова: композиційний матеріал, напружено-деформований стан, в'язкопружна ізотропна матриця, порожнисте транстропне волокно.

Сучасна мікромеханіка композитів переходить від спрощених пружних моделей до комплексного врахування реології фаз та складної геометрії армування [1]. Попри розвиток моделей лінійної в'язкопружності [2] та дослідження переваг порожнистого армування [3], існуючі підходи часто обмежені припущеннями про ізотропність армуючих включень. Дослідження в'язкопружної поведінки волокнистих композитів наведено у роботах [4, 5]. Це зумовлює актуальність розробки аналітичних моделей на основі інтегральних операторів, що забезпечують високу точність прогнозування напружено-деформованого стану за мінімальних обчислювальних витрат.

Розглянемо односпрямований композит з гексагональною схемою армування з в'язкопружними матрицею та транстропними порожнистими волокнами. В'язкопружні властивості як матриці, так і гомогенізованого матеріалу будемо описувати інтегральними операторами спадкової теорії Больцмана-Вольтера. Представимо неоднорідний матеріал однорідним за допомогою методу представницького об'ємного елементу, при цьому гомогенізований матеріал будемо вважати транстропним. Для опису в'язкопружних властивостей транстропного матеріалу необхідно отримати значення п'яти незалежних величин: інтегральні оператори $\tilde{E}_1$ та $\tilde{E}_2$, що моделюють лінійні деформації в'язкопружного композиту, інтегральні оператори $\tilde{G}_{12}$ та $\tilde{G}_{23}$, що моделюють зсувні деформації, а також коефіцієнт Пуассона ν_{12}, яку будемо вважати сталою у часі величиною.

Для отримання $\tilde{E}_1$ для представницького об'ємного елементу розв'яжемо дві вісесиметричні крайові задачі: про сумісне деформування складеного циліндру (матриця, порожнисте волокно) та однорідного суцільного циліндру, що моделює композит, при поздовжньому розтягуванні (див. рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Поздовжній розтяг: *а* – сумісне деформування матриці $(a \le r \le b)$ та порожнистого волокна $(c \le r \le a)$; *б* – деформування композита.

Вважається, що на міжфазних поверхнях виконуються умови ідеального з'єднання. На волокно у напрямку осі діє стале навантаження σ_0°, відповідно осьове напруження для волокна також є сталою величиною. А осьове напруження матриці визначається як $\sigma_z^* = \sigma_0^*(t)$.

Напружено-деформований стан в'язкопружної ізотропної матриці при поздовжньому розтягуванні описується співвідношеннями (1)-(4) [6], а в'язкопружного трансверсально-ізотропного порожнистого волокна – співвідношеннями (5)-(8) [7].

$$u_r^*(r,t) = A(t)\cdot r + \frac{B(t)}{r}, \tag{1}$$

$$u_z^*(z,t) = \left(\frac{(1-\nu^*-2(\nu^*)^2)}{1-\nu^*}\left(\tilde{E}^*\right)^{-1}[\sigma_0^*(t)] - \frac{2\nu^*}{1-\nu^*}A(t)\right)z, \tag{2}$$

$$\sigma_{rr}^*(r,t) = \frac{\nu^*}{1-\nu^*}\sigma_0^*(t) + \frac{\tilde{E}^*[A(t)]}{1-\nu^*} - \frac{\tilde{E}^*[B(t)]}{r^2(1+\nu^*)}, \tag{3}$$

$$\sigma_{\theta\theta}^*(r,t) = \frac{\nu^*}{1-\nu^*}\sigma_0^*(t) + \frac{\tilde{E}^*[A(t)]}{1-\nu^*} + \frac{\tilde{E}^*[B(t)]}{r^2(1+\nu^*)}, \tag{4}$$

$$u_r^\circ(r,t) = C(t)\cdot r + \frac{D(t)}{r}, \tag{5}$$

$$u_z^\circ(z,t) = \frac{1}{1-\nu_{23}^\circ}\left(\frac{\sigma_0^\circ(1-\nu_{23}^\circ-2\nu_{21}^\circ\nu_{12}^\circ)}{E_1^\circ} - 2C(t)\nu_{21}^\circ\right)z, \tag{6}$$

$$\sigma_{rr}^\circ(r,t) = E_2^\circ\left(\frac{\sigma_0^\circ\nu_{12}^\circ}{E_1^\circ(1-\nu_{23}^\circ)} + \frac{C(t)}{1-\nu_{23}^\circ} - \frac{D(t)}{r^2(1+\nu_{23}^\circ)}\right), \tag{7}$$

$$\sigma_{\theta\theta}^\circ(r,t) = E_2^\circ\left(\frac{\sigma_0^\circ\nu_{12}^\circ}{E_1^\circ(1-\nu_{23}^\circ)} + \frac{C(t)}{1-\nu_{23}^\circ} + \frac{D(t)}{r^2(1+\nu_{23}^\circ)}\right), \tag{8}$$

де символ $^\circ$ позначає величини, що відносяться до волокна, а символ $*$ – величини, що відносяться до матриці; $\tilde{E}^*$ – лінійний інтегральний оператор, а $\left(\tilde{E}^*\right)^{-1}$ – оператор, обернений до нього, які визначаються співвідношеннями (9) та (10) відповідно.

$$\tilde{E}^*[y(t)] = E^*\left(y(t) - \int_0^t R(t-\tau)\,y(\tau)d\tau\right), \tag{9}$$

$$\left(\tilde{E}^*\right)^{-1}[y(t)] = \frac{1}{E^*}\left(y(t) - \int_0^t Q(t-\tau)\,y(\tau)d\tau\right), \tag{10}$$

де $E^* = const$ – миттєвий поздовжній модуль пружності, $R(t)$ – ядро релаксації матеріалу матриці, $Q(t)$ – ядро повзучості матриці.

Невідомі функції $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ та $D(t)$, а також співвідношення між σ_0° та $\sigma_0^*(t)$ знаходяться з умов неперервності радіальних напружень, а також радіальних та осьових переміщень на межі «матриця-волокно», а також міркування, що зовнішня поверхня матриці та внутрішня поверхня порожнистого волокна вільні від напружень.

Використання умов узгодження переміщень та напружень, отриманих у результаті розв'язання цих задач, дозволяє отримати інтегральний оператор $\tilde{E}_1$ у вигляді функції механічних характеристик матеріалу та функцій часу.

1. S.I. Kundalwal, Review on micromechanics of nano- and micro-fiber reinforced composites, *Polymer Composites*, **39**(12), 4243–4274 (2018). https://doi.org/10.1002/pc.24569
2. Y. Chen, Z. Zhao, D. Li et. al., Constitutive modeling for linear viscoelastic fiber-reinforced composites, *Composite Structures*, **263**, 113679 (2021). https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113679
3. G. Wang, W. Tu, M.-J. Pindera, Tailoring the moduli of composites using hollow reinforcement, *Composite Structures*, **160**, 838–853 (2017). https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.060
4. E.J. Barbero, R. Luciano, Micromechanical formulas for the relaxation tensor of linear viscoelastic composites with transversely isotropic fibers, *International Journal of Solids and Structures*, **32**(13), 1859–1872 (1995). https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00233-M
5. R. Rodríguez-Ramos, J.A. Otero, O.L. Cruz-González et. al., Computation of the relaxation effective moduli for fibrous viscoelastic composites using the asymptotic homogenization method, *International Journal of Solids and Structures*, **190**, 281–290 (2019). https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.11.014
6. М.І. Клименко, С.М. Гребенюк, С.І. Гоменюк, *Ефективні механічні характеристики в'язкопружних композитів*, Видавничий дім «Гельветика», Херсон (2019).
7. А.В. Столярова, *Ефективні механічні характеристики композиційних матеріалів із трансторопними порожнистими волокнами*, Видавничий дім «Гельветика», Херсон (2021).

Determination of Effective Viscoelastic Characteristics during Longitudinal Tension of a Two-phase Composite

A. Stoliarova[1], S. Grebenyuk

Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

[1] st_av991@ukr.net

We consider a unidirectional composite with a hexagonal reinforcement pattern consisting of a viscoelastic isotropic matrix and hollow transversely isotropic fibers. Two axisymmetric boundary value problems are solved: the joint deformation of a composite cylinder (consisting of the matrix and a hollow fiber) and a homogeneous solid cylinder under longitudinal tension, assuming perfect interfacial contact. The viscoelastic properties of both the matrix and the homogenized material are described using the constitutive relations of the Boltzmann-Volterra hereditary theory. By applying the displacement consistency conditions derived from these solutions, the instantaneous effective longitudinal elastic modulus and the effective relaxation kernel of the homogenized material are obtained as functions of the constituents' mechanical properties. The proposed approach expands the predictive capabilities for the behavior of modern structural materials.

Keywords: composite material, stress-strain state, viscoelastic isotropic matrix, hollow transversely isotropic fiber.

Моделювання динамічної взаємодії тонкостінного п’єзоелектричного включення із п’єзоелектричною матрицею

Р. Рабош[1], Р. Андрійчук, В. Міщенко

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] romanrabosh@gmail.com

Ключові слова: асимптотична модель, тонкостінне включення, п’єзоелектричний матеріал.

У роботі розглянуто антиплоску задачу динамічної взаємодії п’єзоелектричного середовища кристалографічного класу 6mm із тонкостінним криволінійним п’єзоелектричним включенням. Складові електропружної системи ідеально контактують між собою, а зовнішнє збурення гармонічно змінюється з часом Із застосуванням теорії сингулярних збурень побудовано математичну модель розглядуваної задачі, в якій реальні умови контакту на поверхні неоднорідності заміняються так званими ефективними умовами контакту – умовами розривності визначальних компонент п’єзоелектричного зовнішнього середовища на серединній лінії включення. В залежності від типу отриманих ефективних умов розроблено методи розв’язання відповідних задач розсіяння зсувних хвиль горизонтальної поляризації.

Запропонований підхід є ефективним інструментом для аналізу хвильових процесів у композитах із тонкостінними включеннями та надає можливості застосування в задачах неруйнівного контролю, математичного моделювання поверхневих акустичних хвиль та проектування п’єзоелектричних структур із наперед заданими динамічними властивостями.

Modeling the dynamic interaction of a thin-walled piezoelectric inclusion with a piezoelectric matrix

R. Rabosh[a1], R. Andriychuk[a], V. Mischenko[a]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] romanrabosh@gmail.com

We consider a dynamic problem for a piezoelectric medium with a thin-walled curvilinear piezoelectric inclusion under the transient antiplane loading. Materials of the composite belong to crystallographic class 6mm. The conditions of ideal mechanical contact are prescribed at the boundary of the inclusion. Given the small thickness of inhomogeneity, we model it by jumps of displacements, electric potential, and their normal derivatives on the centerline of the defect. The method of matched asymptotic expansions is used to obtain the dynamic interaction model.

Keywords: asymptotic model, thin-walled inclusion, piezoelectric material, SH-waves.

Двобічні оцінки граничних навантажень за згину циліндричної оболонки з поздовжніми колінеарними тріщинами

М. В. Маковійчук[1], Т. М. Даляк

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, лабораторія моделювання демпфуючих систем, Івано-Франківськ, Україна

[1] makoviy@ua.fm

Ключові слова: циліндрична оболонка, колінеарні тріщини, закриття тріщин, згин, граничне навантаження, критерії руйнування

Досліджується напружений стан та гранична рівновага ізотропної циліндричної оболонки, радіуса R і завтовшки $2h$ з двома наскрізними колінеарними розрізами завдовжки $2l$, які розташовані вздовж твірної циліндра на відстані $2d$ між їхніми центрами. До країв тріщин прикладено самозрівноважене рівномірно розподілене згинне навантаження $m = \text{const}$; решта поверхонь оболонки вільні від напружень. Закриття дефектів унаслідок деформації згину враховуємо на основі моделі контакту країв тріщини вздовж лінії в одній з поверхонь оболонки [1]. З урахуванням симетрії об'єкта та навантаження відносно лінії тріщин такий підхід призводить до крайової задачі для рівнянь теорії пологих оболонок із взаємозв'язаними умовами розтягу-згину на контурах дефектів [2]:

$$\Delta\Delta\,\varphi - \frac{B}{R}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \qquad \Delta\Delta\, w - \frac{1}{DR}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0, \qquad (x,y)\in \boldsymbol{R}^2/L;$$

$$\left[u_y\right] = h\left|\left[\theta_y\right]\right| \geq 0, \qquad M_y = -m + hN_y \operatorname{sgn}\left[\theta_y\right], \qquad N_y \leq 0, \qquad x\in L; \tag{1}$$

$$N_x = N_{xy} = N_y = 0, \quad M_x = M_{xy} = M_y = 0, \quad Q_x^* = Q_y^* = 0, \qquad (x,y) \to \infty.$$

Тут φ – функція напружень, w – прогин оболонки; $B = 2Eh$, $D = 2Eh^3/(3(1-\nu^2))$, E і ν – модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона її матеріалу; $\left[u_y\right]$ – розкриття тріщин, $\left[\theta_y\right]$ – розрив кута повороту нормалі на берегах розрізів; N_x, N_{xy}, N_y – зусилля, M_x, M_{xy}, M_y – моменти, Q_x^*, Q_y^* – узагальнені поперечні сили; L – сукупність розрізів.

Числовий розв'язок задачі (1) побудовано методом сингулярних інтегральних рівнянь. За знайденими функціями стрибків переміщень та кутів повороту нормалі обчислювали коефіцієнти інтенсивності зусиль та моментів у внутрішніх та зовнішніх вершинах тріщин

$$K_N^{\pm} = \mp\frac{B}{4\sqrt{\pi l}} \lim_{x\to\pm l} \sqrt{l^2 - x^2}\left[u_y\right]'(x)\,,$$
$$K_M^{\pm} = \pm(3 - 2\nu - \nu^2)\frac{D}{4\sqrt{\pi l}} \lim_{x\to\pm l} \sqrt{l^2 - x^2}\,[\theta_y]'(x).$$

Для аналізу граничного стану оболонки використано локальний та інтегральний енергетичні критерії лінійної механіки руйнування [3–5].

$$\max_z G(z) = 2\gamma_*, \;\Rightarrow\; \frac{1}{4h^2E}\left(K_N^2 + (3+\kappa)K_N\frac{|K_M|}{h} + 3\kappa\left(\frac{K_M}{h}\right)^2\right) = 2\gamma_*.$$

$$\frac{1}{2h}\int_{-h}^{h} G(z)dz = 2\gamma_*, \;\Rightarrow\; \frac{1}{4h^2E}\left[K_N^2 + \kappa\left(\frac{K_M}{h}\right)^2\right] = 2\gamma_*.\; \kappa = \frac{3(1+\nu)}{3+\nu}.$$

Тут $G(z)$ – потік енергії у вершину тріщини, γ_* – питома поверхнева енергія. Ці критерії визначають відповідно нижню та верхню оцінки граничних навантажень, при яких починається стабільне підростання тріщин у найбільш напружених ділянках, а при подальшому довантаженні відбувається лавиноподібне руйнування оболонки. Побудовано залежності отриманих граничних навантажень від безрозмірних параметрів відстані між дефектами та кривизни оболонки.

1. І. П. Шацький, Інтегральні рівняння задачі згину пологої оболонки, ослабленої розрізом з контактуючими кромками, *Доп. АН УРСР. Сер. А*, № 2, 26–29 (1991).
2. І. Шацький, М. Маковійчук, Закриття колінеарних тріщин при згині пологих циліндричних оболонок, *Машинознавство*, № 11–12, 27–30 (2011).
3. В. А. Осадчук, *Напряженно-деформированное состояние и предельное равновесие оболочек с разрезами*, Наукова думка, Киев (1985).
4. M. V. Makoviichuk, I. P. Shatskyi, Analysis of the limit equilibrium of a bent spherical shell with collinear cracks according to local and integral failure criteria, *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physics and Mathematics*, **2**, 132–135 (2023). https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.21
5. I. Shatskyi, T. Dalyak, M, Makoviichuk, and V. Perepichka, A tactic of two-side estimates of limiting bending loads for plates with contact cracks, *Procedia Structural Integrity*, **59**, 246–252 (2024). https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.035

Two-sided estimates of ultimate bending loads of a cylindrical shell with longitudinal collinear cracks

M. Makoviichuk[1], T. Dalyak

Pidstryhach-Institute for Applied Problems in Mechanics and Mathematics, NAS of Ukraine, Laboratory of modelling of damping systems, Ivano-Frankivsk, Ukraine

[1] makoviy@ua.fm

We consider the stress state and limit equilibrium of an isotropic shallow cylindrical shell, weakened by two longitudinal collinear through crack capable of closing under bending loading. Crack closure was taken into account based on the model of contact of crack edges along a line in one of the shell faces. A boundary value problem for the equations of the theory of shallow shells with interconnected boundary conditions on the contours of defects was formulated. The numerical solution of the problem was constructed by the method of singular integral equations. To evaluate the limit state of the shell, local and integral energy criteria of linear fracture mechanics were used. These criteria establish the lower and upper bounds of the critical load, corresponding to the onset of stable crack growth and the subsequent catastrophic structural failure of the shell. Dependences of limit loads on the dimensionless parameters of the distance between defects and shell curvature were constructed.

Keywords: cylindrical shell, collinear cracks, cracks closure, bending, limit load, failure criteria

Напружено-деформований стан пружно-пластичної однорідної пластини з двома тріщинами

Л. Р. Куротчин[a1]

[a]Інститут Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] kurotchyn.lesya@gmail.com

Ключові слова: пружно-пластична модель, крайова задача, тріщина, двовісний-розтяг, однорідна пластина, умова пластичності Мізеса, пластична зона.

Розглядаємо однорідну ізотропну пластину завтовшки $2h$, яка знаходиться під дією однорідного поля зусиль на нескінченності q, P з двома рівними тріщинами довжини $2l$ уздовж прямої на відстані s одна від іншої. Вважаємо рівень навантаження, розміри тріщин, товщину пластини та властивості матеріалу такими, що на продовженні тріщин вузькою смугою розвиваються пластичні зони по всій товщині пластини, а у всіх інших точках матеріал залишається пружним. Згідно з аналогом δ_c-моделі, зони пластичної деформації замінимо поверхнями розриву пружних переміщень (фіктивними тріщинами), а реакцію пластичної зони на пружній об'єм – невідомими зусиллями та моментами, які задовольняють певну умову пластичності біля вершин яких утворюються зони пластичності [1].

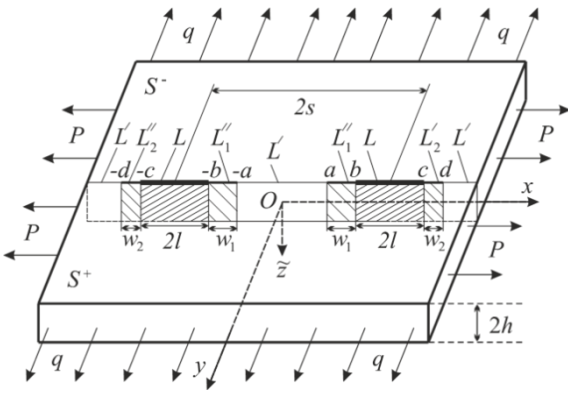


Рис. 1. Зображення пластини з тріщинами в декартовій системі координат.

Крайові умови задачі:

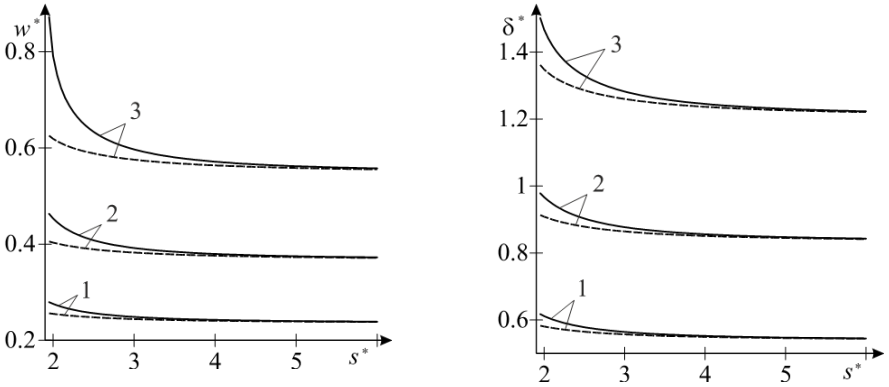
$$\sigma_{\overline{y}y}^{\pm} = 0, \sigma_{\overline{x}y}^{\pm} = 0, x \in L;$$

$$\sigma_{\overline{y}y}^{\pm} = \sigma_{01}, \sigma_{\overline{x}y}^{\pm} = 0, x \in L_1 = L_1' \cup L_1''; \quad (1)$$

$$\sigma_{\overline{y}y}^{\pm} = \sigma_{02}, \sigma_{\overline{x}y}^{\pm} = 0, x \in L_2 = L_2' \cup L_2''.$$

Дана задача розвязана методом комплексних потенціалів Колосова-Мусхелішвілі. Отримано компоненти тензора напружень на дійсній осі. Розв'язок задачі зведено до числового розв'язування системи двох нелінійних алгебраїчних рівнянь, одне з яких отримане з умови пластичності Мізеса, а інше – з умови однозначності переміщень при обході контуру тріщин [2, 3]. Отримано рівняння для визначення довжини зон пластичності та розкриттів тріщини з умови пластичності Мізеса. Окремі результати досліджень показано на рис. 2, який побудований при $\frac{P}{\sigma_y} = 0.4$, та різних значеннях навантаження q/σ_y, криві 1 – при $\frac{q}{\sigma_y} = 0.4$, криві 2 – при $\frac{q}{\sigma_y} = 0.5$, криві 3 – при $\frac{q}{\sigma_y} =$

0.6, де суцільні (штрихові) лінії побудовані для внутрішньої w_1/l (зовнішньої w_2/l) зони пластичності на $[a, b]$ ($[c, d]$) та розкриття у вершині b (c).



а *б*

Рис. 2. *а* – графічна залежність довжини пластичної зони від s^*; *б* – графічна залежність величини розкриття у вершині тріщини від $s^* = s/l$.

1. О.С. Богданова, *О предельном состоянии ортотропной пластины с периодической системой коллинеарных трещин при двухосном нагружении*, Мат. методи та фіз.-мех. поля, **49**(3), 131–140 (2006).
2. Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков *Численные методы.* – Москва: БИНОМ, (2003).
3. М.П. Саврук, П.Н. Осив, И.В. Прокопчук *Численний аналіз в плоских задачах теории трещин.* - Киев: Наук. Думка, (1989).

Stress-strain state of an elastic-plastic homogeneous plate with two cracks

L. Kurotchyn[a1]

[a]Y.S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] kurotchyn.lesya@gmail.com

We consider a homogeneous isotropic plate with two equal cracks located on one straight line under biaxial tension on infinity. It is assumed that the plastic zones are appeared near the tips of the cracks. According to the Kolosov-Muskhelishvili complex-potential method the problem is solved. Additionally, the equations of plasticity of Mizesa are used to determine the plastic zones.

Keywords: elastic-plastic model, boundary value problem, cracks, biaxial tension, homogeneous plate, condition plasticity of Mises, plastic zones

Вищі резонанси коливань рідини в тороїдальних контейнерах

О. В. Солодун[1]

Інститут математики НАН України, Київ, Україна

[1] solodun@imath.kiev.ua

Ключові слова: резонансні коливання рідини, нелінійні модальні методи, внутрішні резонанси, крайова задача, тороїдальний резервуар.

Коливання рідини в обмежених об’ємах є класичною задачею гідродинаміки, однак для складних геометрій і режимів руху її адекватний опис потребує нелінійної постановки. Особливого значення це набуває для просторових рухів рідини, близьких до резонансних і перехідних процесів, де можливе виникнення внутрішніх (вторинних) резонансів та суттєво зростає роль вищих гармонік. У таких умовах лінійні моделі втрачають адекватність через інтенсивний енергообмін між модами. Для отримання нелінійних математичних моделей резонансних коливань для баків із некласичними конфігураціями широкого розповсюдження отримали нелінійні модальні методи [1-3] в яких природньо застосовується асимптотика третього порядку Наріманова–Моісеєва. В загальному використання такої асимптотики призводить до нелінійних модальних систем із нескінченною кількістю узагальнених координат другого та третього порядку малості. Внаслідок цього у системі виникають умови для появи внутрішніх резонансів, коли проявляються супергармоніки, які наближаються до однієї із власних частот σ_{mn}. У роботі [4] спектр власних коливань рідини в тороїдальних порожнинах досліджено із застосуванням варіаційної методики розв’язання основної крайової задачі гідродинаміки [1]

$$\Delta\psi=0,\ \ r\in Q_0,\ \ \frac{\partial\psi}{\partial n}=0,\ r\in S_0,\ \ \frac{\partial\psi}{\partial n}=\kappa\phi,\ r\in\Sigma_0. \tag{1}$$

Це дало змогу отримати власні значення κ_{mn} та власні форми коливань для такої геометрії області

$$\psi_{mn}(r,z,\theta)=\varphi_{mn}(r,z)\begin{matrix}\sin(m\,\theta)\\ \cos(m\,\theta)\end{matrix}. \tag{2}$$

Враховуючи умови виникнення внутрішніх резонансів у системі, а вони виникають при кратному співпадінні власної частоти системи σ_{mn} із зовнішньою збурюючою частотою ω ($\sigma_{mn}=k\,\omega, n\geq 1$) [5], дослідження кількох перших вказаних співвідношень дозволяють визначити критичні глибини заповнення тороїдальних баків, за яких виникають внутрішні резонанси вищих порядків ($k>2$), а також встановити мінімально необхідний набір мод для побудови адекватних скінчених нелінійних модальних моделей.

1. И.А. Луковский, *Введение в нелинейную динамику тел с полостями, частично заполненными жидкостью*, Киев Наук. Думка, 296 (2010).

2. А.В. Солодун, Общая нелинейная математическая модальная модель третьего порядка малости колебаний жидкости в соосных конических резервуарах, *Зб. праць Ін-ту математики НАН України*, 14, № 2, 133–149 (2017).
3. A.V. Solodun, A.N. Timokha, The Narimanov-Moiseev multimodal analysis of nonlinear sloshing in circular conical tanks, *Studies in Systems, Decision and Control*, **177**, 267–309 (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99918-0_9
4. А.В. Солодун, Собственные колебания жидкости в тороидальных баках, *Зб. праць Ін-ту математики НАН України*, 16, № 2, 140–155 (2019).
5. А.В. Солодун, О внутренних резонансах колебания жидкости в подвижных соосных резервуарах конической формы, *Зб. праць Ін-ту математики НАН України*, 13, № 3, 218–229 (2016).

Higher resonances of liquid sloshing in toroidal containers

O. Solodun[1]

Institute of Mathematics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] solodun@imath.kiev.ua

Considering the resonant steady-state liquid sloshing at a frequency close to the first natural sloshing eigenfrequency, a set of geometric parameters of a toroidal tank was determined based on the analysis of the condition for the occurrence of internal resonances, for which the mechanism of secondary resonances can cause disturbances of higher sloshing modes. Ways for the further development of nonlinear modal methods for tanks of toroidal configurations were outlined.

Keywords: resonant liquid sloshing, nonlinear modal methods, internal resonances, boundary value problem, toroidal tank.

Вплив зміни напрямку ортотропії на динамічну поведінку пластини з включеннями за дії розподіленого навантаження

О. І. Тужеляк[1]

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] oliatuzheliak@gmail.com

Ключові слова: коливання, ортотропна пластина, включення, напрямок ортотропії, розподілене навантаження, непрямий метод граничних елементів.

Розглянуто задачу про усталені поперечні коливання ортотропної пластини, яка містить множину масивних наскрізних абсолютно жорстких включень довільної конфігурації та розташування. Включення можуть мати різні типи з'єднань з пластиною, зокрема жорстке закріплення, шарнірне опирання або пружне з'єднання. Вважається, що включення здійснюють переважно поступальний рух у напрямку нормалі до серединної поверхні пластини. На зовнішній межі пластини, яка має довільну форму, задаються мішані гармонічні в часі крайові умови. На поверхні пластини діє довільне гармонічне в часі розподілене навантаження.

Математична модель задачі формулюється в межах уточненої теорії пластин, яка враховує поперечні зсуви та всі інерційні компоненти [1]. На відміну від задачі про коливання пластини з отворами, у даному випадку амплітуди переміщень включень є невідомими і визначаються в процесі розв'язання, що приводить до необхідності розв'язання зв'язаної системи рівнянь, яка включає рівняння коливань пластини та рівняння руху включень [2, 3].

Розв'язок задачі будується на основі непрямого методу граничних елементів із використанням послідовнісного представлення функцій Гріна [2, 3]. Шукані функції подаються у вигляді потенціалів простого шару та розв'язків відповідної неоднорідної задачі з однорідними крайовими умовами в прямокутній області. Систему інтегральних рівнянь відносно невідомих густин потенціалів та амплітуд переміщень включень розв'язують методом колокацій.

На відміну від робіт, де досліджено динамічну поведінку пластин з включеннями за фіксованого напрямку ортотропії, у даній роботі розглядається вплив зміни орієнтації ортотропних властивостей матеріалу пластини на її коливальні характеристики. Зміна напрямку ортотропії реалізується шляхом варіювання орієнтації головних осей пружності матеріалу, що призводить до зміни ефективних жорсткісних характеристик конструкції.

Запропонований підхід дозволяє дослідити чутливість динамічної поведінки пластини з включеннями до зміни напрямку ортотропії, а також встановити особливості взаємодії між геометрією включень, параметрами навантаження та орієнтацією матеріалу. Очікується, що зміна напрямку ортотропії може суттєво впливати на розподіл амплітуди прогину пластини, зокрема в областях взаємодії з включеннями та в зоні дії розподіленого навантаження.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого чисельного аналізу та оптимізації параметрів композитних конструкцій з включеннями з урахуванням умов динамічного навантаження.

1. Я. Й. Бурак, Ю. К. Рудавський, М. А. Сухорольський, *Аналітична механіка локально навантажених оболонок,* Інтелект-Захід, Львів (2007).
2. T. V. Shopa, Transverse vibration of an orthotropic plate with a collection of inclusions of any configuration with different types of connections with matrix, *Materials Science*, **55**(1), 94–104 (2019).
3. Т. В. Шопа, О. І. Тужеляк, Поперечні коливання ортотропної пластини з абсолютно жорсткими включеннями за врахування розподіленого навантаження на її поверхні, *Фіз.-хім. механіка матеріалів,* 58 , № 3, 105–111 (2022).

Effect of Orthotropy Direction Change on the Dynamic Behavior of a Plate with Inclusions under Distributed Load

O. Tuzheliak[a1]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] oliatuzheliak@gmail.com

In the framework of a refined theory, which takes into account transverse shear deformation, the solution of the problem on the steady-state transverse vibration of an orthotropic plate with an arbitrary number of massive absolutely rigid inclusions is constructed. It is assumed that inclusions perform predominantly translational motion along the normal direction to the middle surface of the plate. An arbitrary time-harmonic distributed external load is applied to the surface of the plate. The solution is built on the basis of the indirect boundary element method. Numerical examples for particular cases of the problem are provided to illustrate how variations in the orthotropy direction affect the dynamic response of the plate with inclusions.

Keywords: vibrations, orthotropic plate, inclusions, orthotropy direction, distributed load, indirect boundary element method.

Розсіяння SH-хвиль періодичним міжфазним масивом пластинчастих п’єзоелектричних включень

Р. Андрійчук[a1], Ю. Максимів[a], В. Матус[a], В. Пороховський[a]

[a]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

[1] andriychukroman@gmail.com

Ключові слова: асимптотична модель, тонкостінне включення, п’єзоелектричний матеріал, масив періодично розташованих включень, SH-хвилі.

У даній роботі запропоновано методику розв’язання задач хвильового навантаження біматеріального пружного тіла із плоскою міжфазною поверхнею за присутності у ньому періодичної системи приповерхневих або міжфазних пластинчастих п’єзоелектричних включень. Розглянуто випадок антиплоскої деформації такого композиту та неконтрастних за пружними параметрами включень. Взаємодію включень із зовнішнім середовищем описують стрибки переміщень та напружень на серединній лінії включень. Ці стрибки пропорційні товщині включень, виражаються через набігаючу хвилю і мають такий же вигляд, як і у випадку одинокого включення, тобто взаємодією розсіювачів у отриманій моделі нехтується. Розв’язок задачі розсіяння SH-хвиль періодичною множиною міжфазних п’єзоелектричних включень змінної товщини за заданих стрибків переміщень і напружень на лінії включень визначено методом перетворення Фур’є за просторовою координатою. В результаті розсіяне поле переміщень отримано у вигляді відбитих та заломлених хвиль, які є суперпозицію плоских хвиль, що поширюються від лінії включень в напрямку на безмежність.

Scattering of SH waves by a periodic interphase array of plane piezoelectric inclusions

Andriychuk[a1], V. Matus[a], Yu. Maksymiv[a], R. V. Porochovs’kyj [a]

[a]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

[1] andriychukroman @gmail.com

Using the singular perturbation method, a model of the interaction of an elastic matrix with a system of collinear periodically located piezoelectric thin non-contrast inclusions of constant thickness was obtained. The study was carried out under conditions of anti-plane wave loading. A method for solving the problems of SH-wave scattering by a bimaterial elastic body with a flat interface surface in the presence of a periodic system of near-surface or interphase plate piezoelectric inclusions is proposed.

Keywords: asymptotic model, thin-walled inclusion, piezoelectric material, periodic array of inclusions, SH-wave.

Визначення контактного тиску між нескінченним в'язкопружним двопараметричним шаром та жорсткою основою

І. С. Скородинський

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

ihorskorodynskyi@gmail.com

Ключові слова: нескінченний в'язкопружний шар, узагальнена двопараметрична модель, плоска деформація, вертикальне переміщення, контактний тиск.

В об'єктах сучасної інфраструктури механічна взаємодія між твердими тілами часто відбувається через проміжкові шари та покриття різної товщини та з різними фізико-механічними властивостями. Тому важливо вміти адекватно визначати напружено-деформований стан таких об'єктів, зокрема реактивні контактні тиски між масивними тілами та відносно тонкими прошарками та покриттями. Дана доповідь присвячена визначенню контактних тисків між нескінченним в'язкопружним шаром та жорсткою основою за дії зосередженого та рівномірно розподіленого навантажень.

Розглянемо нескінченний в'язкопружний шар товщини $2h$, зчеплений з жорсткою основою, до верхньої границі якого прикладене довільне нормальне навантаження $p(x,t)$, розподілене на ділянці $x \in [a,b]$. Матеріал шару описує модель Кельвіна – Фойгта. Задача розглядається в межах узагальненої двопараметричної моделі та плоскої деформації [1]. Нехай вісь Ox співпадає з серединною лінією перерізу шару. Тоді єдине відмінне від нуля переміщення в шарі при лінійному розподілі за товщиною матиме вигляд

$$v(x,y,t) = \frac{V(x,t)}{2}\left(1+\frac{y}{h}\right), \tag{1}$$

де $V(x,t)$ – вертикальне переміщення навантаженої поверхні $y=h$. Підставляючи вираз (1) у фізичне співвідношення моделі Кельвіна – Фойгта [2] для напруження σ_y і враховуючи, що останнє є сталим при $|y|<h$ [3], для контактного тиску між шаром та жорсткою основою при $y=-h$ у межах плоскої деформації отримаємо

$$q(x,t) = -\sigma_y(x,t) = -\frac{G}{h}\left(\frac{V(x,t)}{1-\mu_0}+\frac{2}{3}\tau_K\dot{V}(x,t)\right). \tag{2}$$

У формулі (2) G – рівноважний модуль зсуву, τ_K – час запізнення, а $\mu_0 = \mu/(1-\mu)$, де μ – рівноважний коефіцієнт Пуассона. Визначений таким чином контактний тиск не залежить явно від заданого навантаження $p(x,t)$, і його гладкість визначається тільки гладкістю функцій $V(x,t)$, $\dot{V}(x,t)$.

Досліджено два випадки навантаження верхньої границі шару: зосереджена сила P_0, прикладена в точці з координатами $(0,h)$ та рівномірно розподілене на ділянці $x \in [-a,a]$ навантаження p_0. Для обох випадків отримано явні вирази для контактного тиску. При цьому використано відповідні представлення для вертикального переміщення $V(x,t)$ [1, 4]. В обох випадках при $t \to \infty$ отримується пружний розв'язок, пропорційний вертикальному переміщенню навантаженої поверхні.

Побудовано графіки контактного тиску між шаром та жорсткою основою для трьох матеріалів шару в обох випадках навантаження. У випадку рівномірно розподіленого навантаження розглянуто ще три значення приведеної товщини шару $\delta = h/a$. Характерною для обох випадків навантаження є слабка залежність контактного тиску від часу. Для рівномірно розподіленого навантаження спостерігається дуже добре узгодження з точним розв'язком для нескінченної пружної смуги [5]. Для зосередженої сили це узгодження є гіршим через різну поведінку відповідних функцій в околі точки її прикладання.

Отримані результати можуть бути корисними для оцінки реактивних контактних тисків між в'язкопружними шарами та жорсткими основами в реальних об'єктах.

1. І. С. Скородинський, О. В. Максимук, Узагальнена модель в'язкопружного проміжного шару або покриття, що враховує деформацію поперечного зсуву, Мат. методи та фіз.-мех. поля, 56, № 1, 62–70 (2013).
2. А. Фрейденталь, Х. Гейрингер, Математические теории неупругой сплошной среды, Физматгиз, Москва (1962).
3. В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев, Балки, плиты и оболочки на упругом основании, Физматгиз, Москва (1960).
4. І. С. Скородинський, О. В. Максимук, Механічна поведінка в'язкопружного шару на жорсткій основі під дією нормального розподіленого навантаження, Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 20, 197–206 (2014).
5. Я. С. Уфлянд, Интегральные преобразования в задачах теории упругости, Наука, Ленинград (1967).

Determination of the contact pressure between an infinite viscoelastic two-parameter layer and the rigid foundation

I. Skorodyns'kyi

Pidstryhach Institute for Applied Problems in Mechanics and Mathematics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

ihorskorodynskyi@gmail.com

The normal stress and the contact pressure between an infinite viscoelastic layer and the rigid foundation are determined using the corresponding constitutive relation for the Kelvin – Voigt material within the framework of generalized two-parameter model and the plane strain. The graphs of the contact pressure are plotted for the cases of the normal concentrated force and the normal uniformly distributed load applied at the top boundary of the layer. A good agreement with exact solution for an infinite elastic strip in the case of uniformly distributed load is established.

Keywords: infinite viscoelastic layer, generalized two-parameter model, plane strain, vertical displacement, contact pressure.

Метод розв’язання зв'язаної задачі теорії термопружності за дії об'ємних сил

В.П. Ревенко

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, Львів, Україна

victor.rev.12@gmail.com

Ключові слова: тривимірне тіло, термонапружений стан, температурне поле, об'ємна сила, напруження, переміщення, часткові розв’язки.

Побудова розв’язків задач теорії термопружності за дії об'ємних сил є складною математичною і фізичною проблемою. Розглянуто систему рівнянь Нав’є, яка враховує температурне поле за дії об'ємних сил, що описуються потенціалом F. В роботі [1], коли потенціал об'ємної сили $F = 0$, враховано фізичні особливості розподілу деформацій і знайдено для стаціонарної температури T такий частковий розв’язок, який не містить пружних переміщень (однорідних розв'язків):

$$u_j^\tau = \frac{\partial \vartheta}{\partial x_j} + \beta_1 \Omega_j,\ j = \overline{1,3},\ e^\tau = 3\alpha T,\ \Theta^\tau = \sigma_1^\tau + \sigma_2^\tau + \sigma_3^\tau = 0, \tag{1}$$

де T, $\Omega_j = \int T\, dx_j$, $j = \overline{1,3}$ – тривимірні гармонічні функції, $\vartheta = \beta(x\Omega_1 + y\Omega_2 + z\Omega_3)$, $\nabla^2\psi = -\alpha T,\ \beta = -\frac{1}{6}\alpha,\ \beta_1 = \frac{4}{3}\alpha$. Доведено, що переміщення і напруження (1) не містять пружних складових.

Розглянемо пружне тіло, яке вільно деформується під дією об'ємних сил з потенціалом $F \neq 0,\ T = 0$. Вперше знайдено частковий розв’язок системи рівнянь Нав’є

$$u_j^f = \frac{\partial \vartheta_f}{\partial x_j} + \chi_1 \Omega_j,\ j = \overline{1,3},\ e^f = -\frac{(1-2\nu)}{E}F,\ \Theta^f = \sigma_1^f + \sigma_2^f + \sigma_3^f = -F, \tag{2}$$

де $\Omega_{jf} = \int F\, dx_j,\ j = \overline{1,3},\ F$ – тривимірні гармонічні функції, $\vartheta_f = \chi(x\Omega_{1f} + y\Omega_{2f} + z\Omega_{3f}),\ \chi = -\frac{(1+2\nu)}{6E}, \chi_1 = \frac{4\nu}{3E}$.

Використано подання переміщень (1), (2) та знайдено температурні і об'ємні напруження, сума яких є загальним частковим розв'язком системи рівнянь Нав’є

$$\begin{aligned} &\sigma_j^{\tau+f} = 2G\{\frac{\partial^2(\vartheta+\vartheta_f)}{\partial x_j^2} + \frac{1}{3}\alpha T - \frac{\nu}{3E}F\},\ j = \overline{1,3},\ \Theta^{\tau+f} = F, \\ &\tau_{jm}^{\tau+f} = G\{2\frac{\partial}{\partial x_j}\frac{\partial(\vartheta+\vartheta_f)}{\partial x_m} + \beta_1[\frac{\partial \Omega_j}{\partial x_m} + \frac{\partial \Omega_m}{\partial x_j}] + \chi_1[\frac{\partial \Omega_{jf}}{\partial x_m} + \frac{\partial \Omega_{mf}}{\partial x_j}]\},\ m \neq j \end{aligned} \tag{3}$$

До напружень (3) добавлено відомі пружні напруження [2] і одержано загальне подання напружень у тривимірному тілі. Розглянуто термопружний стан прямої призми прямокутного перерізу за дії симетричного за змінними x, y температурного поля. Розроблена методика врахування впливу температурних напружень у крайових

умовах на плоских поверхнях призми, які не зустрічають зовнішнього опору. Після задоволення крайових умов знайдено температурний стан призми з вільними від навантажень поверхнями.

1. V. Revenko Construction of static solutions of the equations of elasticity and thermoelasticity theory, *Scientific Journal of TNTU*, **108**(4), 64–73 (2022). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.04.064
2. V.P. Revenko Solving the three-dimensional equations of the linear theory of elasticity *Int. Appl. Mech*., **45**(7), P. 730–741 (2009). https://doi.org/10.1007/s10778-009-0225-4

Method for solving a coupled problem of the theory of thermoelasticity under the action of volumetric forces

V. Revenko

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, the *National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine,*

victor.rev.12@gmail.com

A three-dimensional boundary value problem of the theory of thermoelasticity is solved taking into account the action of volume forces. The general solution of the system of Navier differential equations, which describes the thermoelastic stress state of an isotropic body, is given as the sum of the homogeneous elastic and partial solutions that take into account the influence of temperature or volume forces. New physically justified partial solutions of the thermoelasticity equations are constructed when the temperature field or volume force potential are given by three-dimensional harmonic functions. Simple formulas for expressing normal temperature stresses are obtained and it is shown that their sum is zero, and the volume expansion is equal to $e^{\tau} = 3\alpha T$*; when* $T = 0$*, then* $\Theta^{f} = -F$*,* $e^{f} = -(1-2\nu)F/E$*. A method for taking into account the influence of temperature stresses in boundary conditions on flat surfaces of a prism is developed.*

Keywords: three-dimensional body, thermally stressed state, temperature field, bulk force, stress, displacement, partial solutions.

On the Biofiltration of Water Contaminated with Organic Pollutants

Poliakov V. L.

[a]Institute of Hydromechanics of NAS, Kyiv, Ukraine
[6]Institute of water problems and land reclamation of NAAS, Kyiv, Ukraine

[1] vpoliakov.ihm@gmail.com

Key words: biofiltration, organic pollution, modeling, trickling biofilter, nonlinear filtration, pressure differential.

In practice, biofiltration has gained considerable widespread adoption. Its high efficacy is attributed to microbial colonies which, together with their metabolic by-products, form stable microstructures. The stability of the existence and functioning of such artificial microbial formations (biofilms) is ensured by an assemblage of solid structural elements — particles of varying morphology and fibrous materials — to which the biofilms firmly adhere. Through the establishment and maintenance of favorable environmental conditions surrounding the biofilm, combined with the implementation of rational process technology, prolonged and productive operation of the corresponding treatment units can be achieved. Ensuring maximum performance from biofilters — despite the considerable accumulated operational experience — is realistically attainable only through the application of mathematical modeling methods.

The conceptual model of biofiltration is founded upon two principal components — a structural compartment and an operational compartment — which formally describe the behavior of the substrate, the oxidizing agent (oxygen), and the microbial biomass at two distinct levels. At the micro-level, consideration is given to such essential physical and biochemical processes as diffusion, interphase mass transfer, bio-oxidation, decomposition, biosynthesis, and inhibition. At the scale of the working layer, the dominant roles are played by convective mass transport, substrate utilization, endogenous respiration, biodeformations (biofilm detachment), and predation.

The stability and productivity of biofilter operation are ensured by the continuous supply of strictly controlled quantities of water, substrate, and oxidizing agent (in aerobic biofiltration). It is precisely the hydro-gas-dynamic compartment that reflects the characteristics of the movement and distribution of moisture — and, in the case of trickling biofiltration, gas — within the filter bed. The mobility of the aqueous and gaseous phases is sustained by the processes of filtration, moisture transfer, and infiltration, all of which occur within the porous (granular) layer.

In accordance with practical requirements, the nature of the organic contamination, and the design of the biofilter, various types of biofiltration are employed — including submerged and trickling, as well as aerobic and anaerobic variants.

As a result of the transformation of the organic substrate, products are generated that serve, firstly, as the basis for biosynthesis and, secondly, release energy for the maintenance of the vital functions of the microorganisms. In practice, the technological process of biological water treatment is governed by the concentrations of substrate and oxidizing agent. It is precisely the deficiency of the latter that frequently constitutes the primary cause of the

low productivity of biofiltration installations. Increasing the initial concentration of the oxidizing agent is practiced, by means of two approaches. The dissolved oxygen content is elevated through either forced aeration or natural aeration. In recent years, another variant of biofiltration — namely trickling filtration — has come into widespread use. It becomes possible to appreciably enhance the interphase gas exchange throughout the entire working layer. Achieving this objective in practice necessitates recourse to mechanical ventilation.

In the theoretical investigation of the hydraulic aspects of trickling biofiltration, two principal challenges have emerged: firstly, the assessment of the hydraulic and physical state of a partially moisture-saturated porous (granular) layer at a specified flow rate of contaminated water; and secondly, the analysis of non-linear gas filtration through such a layer under the corresponding degrees of moisture saturation of the working medium and applied pressure differential.

Two characteristic scenarios have been examined in detail. In the first case, the pressure above the filter bed was varied over a wide range — from vacuum to tens of thousands of Pa. In the second scenario, the pressure below the filter bed was varied in an analogous manner. A methodology is proposed for accounting separately for the influence of capillary forces, gravitational forces, and the aforementioned pressure differential on the transit gas flow. The primary calculations focused on the characteristic values of the reduced pressures at the inlet and outlet surfaces of the filter bed, as well as the rate of moisture transfer caused by the aforementioned forces.

As an illustrative example, selected results of an analytical investigation of the concurrent movement of water and gas through the filter bed under mechanical ventilation were obtained. The pore space is only partially saturated with moisture, the filtration processes under consideration, in the broad sense of the term, are of an essentially non-linear character, The moisture content, pressure, water film thickness were determined in stages.

In the first stage, the characteristic constants were established — namely, the suction pressures at the upper and lower boundaries of the filter bed, as well as the moisture flux component, attributable to the combined action of two forces: capillary forces and gravity. In the second stage, the distribution functions of pressure, moisture content, and water film thickness along the height of the filter bed are determined sequentially. In the third stage, the relationship between the gas flow rate and the external pressure was obtained by solving the gas filtration equation

A thorough quantitative analysis of the principal hydraulic characteristics of trickling biofiltration has been carried out. The subject of the calculations encompassed pressure and moisture content profiles, as well as the relationship between the controlling pressure differential and the gas flow rate. The exact formula for calculating the gas flow rates in high rate biofilters, taking into account the non-linear effects arising from inertial forces and flow turbulence, and the water-physical state of the bed, was derived. It has been established that non-linear effects become significant only at comparatively low water flow rates. The use of average water film is justified in the determination of biochemical characteristics, however, it may introduce appreciable errors in the gas rate calculation.

Biofiltration is an effective and promising method for the biological treatment of water contaminated with organic pollutants. To fully realize its significant potential, it is necessary to make a rational choice of process and design parameters using mathematical modeling methods. In the practice of trickle biofiltration with mechanical aeration of the filter bed, it is crucial to determine the flow rates of the contaminated water and the gas containing the

oxidizing agent, as well as the pressure differential that is created at the boundaries of the bed and controls gas dynamics and biological oxidation.

Наведено короткий огляд біофільтрації як ефективного методу біологічного очищення стічних вод різного походження. Описано структуру концептуальної моделі біофільтрації стічних вод, що містять органічні забруднювачі, та визначено ключові фізичні й біохімічні процеси, які в сукупності забезпечують їх видалення. Детально проаналізовано гідравлічні аспекти краплинної біофільтрації з механічною аерацією завантаження. Методологію розрахунку гідродинамічного стану активного шару та газодинаміки для високонавантажених біофільтрів проілюстровано на прикладі розрахунків низки задач із використанням типових вихідних даних.

Ключові слова: біофільтрування, органічне забруднення, моделювання, крапельний біофільтр, нелінійна фільтрація, перепад тиску.

The VERLIFE Guidelines – 2024 Version and On-going Revision

Oliver Martin

European Commission - Joint Research Centre, Petten, The Netherlands

E-mail address: oliver.martin@ec.europa.eu

The VERLIFE Guidelines are validated procedures for the calculation of the residual lifetime and integrity of components and piping of WWER–type reactors. They cover procedures for the calculation of the resistance against fast fracture, fatigue damage, corrosion-mechanical damage and acceptability of flaws found during in-service inspection. They also contain procedures for integrity evaluation of piping, in-service inspection qualifications, risk-informed in-service inspection as well as integrity and lifetime of reactor vessel internals and components support structures. Numerous appendices on related specific topics like e.g. degradation assessment of material properties by radiation damage and thermal ageing, thermal hydraulic regimes for pressurized thermal shock evaluations, etc. are part of the guidelines.

Drafting of the VERLIFE Guidelines started in 2002 as a dedicated project within the 5th Euratom Framework Programme involving 12 institutions from the Czech Republic, Slovakia, Hungary, Finland and Bulgaria and a first official version of the guidelines was published in 2003.

In 2008 a revised version of the VERLIFE Guidelines were published as part of the Euratom project COVERS running from 2006-8 within the 6th Euratom framework programme. The structure and most of the content remained from the 2003 version, but some new content was added and contributors now expanded to institutions from the Ukraine, Germany and Spain.

From 2009-11 the VERLIFE Guidelines were revised again, this time within an IAEA project. Six new appendices were added (App. A-F) and the completed revised version was submitted to the IAEA editorial board in 2013. Unfortunately the IAEA could not publish the new version of the VERLIFE Guidelines because of editorial reasons. The Joint Research Centre of the European Commission (EC-JRC) took over from IAEA and finally published the new version of the VERLIFE Guidelines in 2024.

Given that the content of the 2024 version is pretty much unchanged since 2013 the content of a number of sections and appendices are outdated. Thus EC-JRC organised a workshop in December 2025 with 22 experts from the Czech Republic, Slovakia, Hungary, Finland, the Netherlands and the Ukraine to review the guidelines and agree on a way forward to revise them. The workshop participants agreed to establish 9 working groups to revise the various sections and appendices of the guidelines. The plan is to have completed revised guidelines by late 2027.

In the presentation the content of the VERLIFE Guidelines will be briefly described and the status of the ongoing revision exercise of the guidelines will be presented, including already agreed changes, where available.

Keywords: VERLIFE, WWER reactor, integrity & lifetime assessment, reactor components & piping, support structures, ageing assessment, degradation mechanisms.

Аналізи старіння, що визначають строк служби, та практика їх застосування при обґрунтуванні довгострокової експлуатації елементів і конструкцій АЕС

О. П. Шугайло

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ, Україна

ap_shugaylo@sstc.ua

Ключові слова: довгострокова експлуатація, аналіз старіння, ефекти старіння, механізми деградації.

Згідно з визначенням НП 306.2.210-2017 [1] аналіз старіння, що визначає строк служби це аналіз безпеки, який враховує старіння у часі елементів і конструкцій і обґрунтовує їх безпеку у період проєктної та довгострокової експлуатації (ДСЕ) на певний проміжок часу. У світовій практиці такий аналіз має назву TLAA (Time Limited Ageing Analysis), зустрічаються також назви – Time Limited Assumptions (TLA) або Residual Life Assumptions (RLA). TLAA, TLA або RLA – це різні назви однієї і тієї ж діяльності.

Відповідно до СОУ НАЕК 080:2023 [2] одним із вагомих кроків під час обґрунтування ДСЕ є виконання оцінки технічного стану та проведення розрахунків на міцність. Тобто на цьому етапі може виникнути питання: а в чому різниця між розрахунками міцності для обладнання і трубопроводів та аналізом TLAA? Номенклатура обґрунтувань міцності, наприклад, для обладнання та трубопроводів чітко вказана в ПНАЭ Г-7-002-86 [3]. У разі зіставлення переліку TLAA із переліком розрахунків на міцність стає очевидним, що міцнісний розрахунок є однією із складових усього переліку TLAA. Водночас не всі розрахунки міцності можуть розглядатись як аналіз TLAA.

Основними рисами TLAA є:

часова обмеженість аналізу - аналіз базується на припущенні щодо визначеного періоду експлуатації (наприклад, 30–40 років) і містить параметри, що змінюються в часі/залежать від часу (зміна накопиченої втомної пошкоджуваності під впливом перехідних процесів і втоми металу, деградація властивостей металу внаслідок опромінення тощо);

врахування ефектів старіння – аналіз враховує механізм деградації (наприклад для втоми це циклічні навантаження) та ефекти старіння (тріщиноутворення);

врахування умов експлуатації;

детерміністичний розрахунковий аналіз для визначення запасів міцності.

Поняття TLAA введено в регуляторну і експлуатаційну практику документами НП 306.2.210-2017 [1] і СОУ НАЕК 080:2023 [2] на основі документів МАГАТЕ SSG-48 [4] та SRS-82 [5]. Вимоги до TLAA представлені в цих документах в достатньо загальному вигляді і не дають відповіді на низку таких питань як, який TLAA є вихідним, ідентифікація TLAA для їх застосування при обґрунтуванні переходу до ДСЕ/на етапі ДСЕ, критерії для виконання переоцінки/ревалідації TLAA, склад та зміст щодо оформлення результатів TLAA. Це доклад присвячено пошуку відповідей

на зазначені питання та формуванню пропозицій щодо покращення практики застосування і поширення TLAA на АЕС України.

1. Загальні вимоги до управління старінням елементів і конструкцій та довгострокової експлуатації енергоблоків атомних станцій (НП 306.2.210-2017)
2. Довгострокова експлуатація діючих енергоблоків атомної електростанції. Загальні положення (СОУ НАЕК 080:2023).
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989
4. SSG-48 Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA. Vienna. 2018.
5. SRS-82 (Rev. 1) Ageing management for nuclear power plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). Safety Reports Series. IAEA. Vienna. 2024

Time Limited Ageing Analysis and practice of their implementation for long term operation justification of elements and structures on Ukrainian NPP

O. Shugailo[1]

State Enterprise “State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, Kyiv, Ukraine.

ap_shugaylo@sstc.ua

According to SOU NAEK 080:2023, one of the important step within Long Term Operation justification is performing of technical condition assessment and structural integrity/strength calculations. The question may arise at this stage what is the difference between strength calculations for equipment and pipelines and TLAA analysis? The nomenclature of strength justifications, for example, for equipment and pipelines, is clearly indicated in PNAE G-7-002-86. When comparing the list of TLAA with the list of strength calculations, it becomes obvious that the strength calculation is one of the components of the entire list of TLAA. At the same time, not all strength calculations can be considered as TLAA analysis.

Keywords: Long Term Operation, ageing effects, TLAA, degradation mechanisms

Assessment of thermal-hydraulic uncertainties within APAL project

V. Pištora[1], M. Pošta, K. Šišková

[a]ÚJV Řež, a.s., Czech Republic.

[1] vladislav.pistora@ujv.cz

Keywords: pressurized thermal shock, thermal-hydraulic, uncertainties

One of the most limiting safety assessments for the long-term operation (LTO) of nuclear power plants (NPPs) is the reactor pressure vessel (RPV) integrity assessment for pressurized thermal shock (PTS). PTS is characterized by rapid cooling of both the reactor downcomer and internal RPV surface, which leads to high thermal stresses in RPV wall, in most cases accompanied by high pressure in the RPV. If a flaw existed in an embrittled RPV and PTS occurred, the flaw could initiate fast fracture, which challenges the integrity of the RPV. Thus, PTS evaluation is important to support the LTO.

APAL (Advanced PTS Analysis for LTO) was a project funded by the EU within HORIZON 2020 program. The APAL project involved 16 partners from 13 countries. The project duration was 2020 - 2024.

PTS assessment is a multidisciplinary task, starting with selection of transients, continuing by thermal-hydraulic (TH) analyses (both system TH analyses of the whole NPP and detailed mixing analyses of the cold legs with safety injection of cold water and of the reactor downcomer), structural analyses (STA), and ending with fracture-mechanics analyses (FMA). PTS analyses are based either on deterministic assessments with conservative boundary conditions (both TH and STA+FMA) or on probabilistic assessments (treating some input parameters as statistical distributions). Challenge of the APAL project is to apply probabilistic approach on both sides (TH and STA/FMA) of PTS analyses and to analyze the propagation of uncertainties in the whole chain of PTS calculations.

APAL project consisted of the following work packages (WP):

WP1 - LTO improvements relevant for PTS analysis,

WP2 - Improved TH analysis,

WP3 - Deterministic margin assessment,

WP4 - Probabilistic margin assessment,

WP5 - Definition of best practices for advanced PTS analysis,

WP6 - Training and dissemination,

WP7 - Scientific coordination and project management.

Brief overview of the whole APAL project and its WPs will be presented in the paper.

One of the most interesting results was the analysis of propagation of thermal-hydraulic uncertainties through the whole PTS assessment. About 30 input parameters for TH calculations (both “plant parameters” and “model parameters”) were treated as statistical distributions. As the full Monte Carlo simulations can hardly be performed due to enormous computational time needed for at least thousands of system TH simulations, Wilks’ method was used to obtain 95%/95% lower (tolerance) limit of maximum allowable reference

temperature. In this case, typically 59 TH simulations are needed. Both deterministic and probabilistic fracture-mechanics analyses were performed. In the paper only the results of deterministic FMA will be presented. Together with the full Wilks' set of results (with underlined 95%/95% lower tolerance limit), also the "base case" and "conservative case" results will be shown. Finally, correlations between the maximum allowable reference temperature and selected (most influential) input TH parameters will be presented based on Spearman and Pearson correlation coefficients.

Fatigue assessment of welds with incomplete penetration and in structurally complex areas

P. Gal[1], J. Cerny, V. Pistora

UJV Rez, a. s, Husinec, Czech Republic.

[1] petr.gal@ujv.cz

Keywords: welds with incomplete penetration, welds, Fatigue, normal stress, critical distance, notch tip, singularity, austenitic stainless steel.

The determination of the fatigue life of components with fabrication defects mostly focuses on the crack propagation stage, skipping the fatigue initiation stage. But in reality, the number of cycles are required to fatigue crack initiation. On NPP´s are lots of welds and certain amounts with incomplete penetration. These types of welds are also located on parts of the reactor lid and also on the reactor internals. This means they are difficult to inspect using NDT methods, for example thermal sleeve and, in some cases, the components are non-replaceable (like internals). Most of these components for VVER reactors (and also for PWR) are made of stainless steel.

Welds with incomplete penetration are areas where the weld root does not have the precise geometry defined in the drawings. This leads to simplification during modeling, and the result is singular point on computational model, see Fig. 1b. Representative welded structure is listed on Fig. 1a.

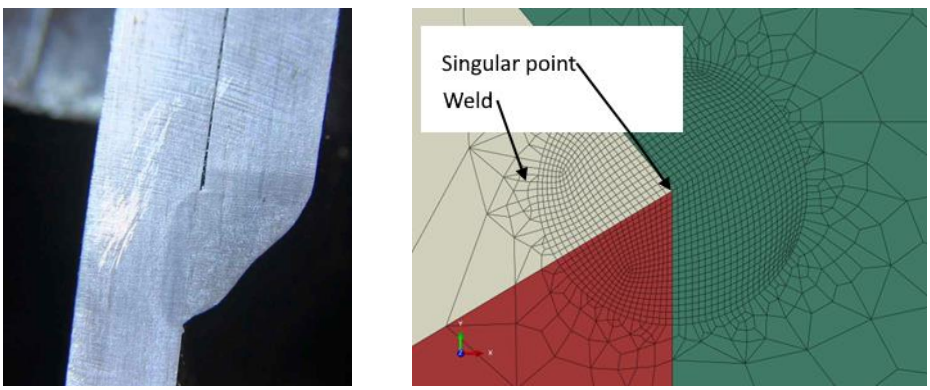


Fig. 1. Representative welded structure *a*, simplification on FE mesh *b*.

Simplifying the model leads to singularities, and assessing fatigue on these points is irrelevant. Theoretically, the stresses are infinite and mesh dependent and the stress is characterized by formulae (1), which is valid for linear elastic analyses. In the case of an elasto-plastic analysis, the singular point still remains, and the stress is characterized by formulae (2). In simplicity, smaller elements around singular point leads to higher stress on singular point.

$$\sigma_{(r)} = r^{-1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_{(r)p} = r^{-1/(n+1)} \quad (2)$$

There are a number of approaches suitable for assessing welds, e. g. Nominal stress method using Ke approach (like ASME [1]), Hot spot / structural stress method Effective notch stress method. However, most of these methods are not applicable to fatigue weld root assessments because they are not recommended for weld roots. Approaches like effective notch stress is recommended for weld roots. However, this method is linked to the FAD curves, it is not applicable to nuclear industry, which is based on different material life curves.

On RCC-M [2], there is a codified approach for fatigue assessment on singular points. This procedure is based on an experimental program that focuses on the fatigue of industrial manufacturing defect and basic information is provided in [3]. This procedure is based on calculating the maximum normal stress range at the characteristic distance *d* from the crack tip or from singular point. The contribution will cover the procedure of fatigue assessment on singular points and its implementation in the standard procedure for VVER and PWR reactors.

1. ASME. ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section III – Rules for Construction of Nuclear Facility Components. *New York: American Society of Mechanical Engineers* (2024).
2. AFCEN, RCC-M: Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, 2022 ed. Paris, France: AFCEN (2022).
3. J. A. Le Duff and C. Amalzallag, “Fatigue crack initiation from singular geometries or fabrication defects,” in *European Conference on Life Assessment of Industrial Components and Structures*, Cambridge, UK, Sept. 30–Oct. 1 (1993).

Методологічні підходи до оцінки міцності крихкого руйнування корпусу та внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000

М.В. Баняс[1], А.О. Касяненко, М.С. Зарицький, С.А. Радченко

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна.

[1]m.banyas@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: крихке руйнування, корпус реактора, внутрішньокорпусні пристрої

Створення національної методичної бази з обґрунтування цілісності та безпечної експлуатації реакторів ВВЕР є пріоритетним завданням науково-технічної підтримки довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС.

Для оцінки крихкої міцності корпусів реакторів (КР) ВВЕР використовується стандарт [1]. Згідно з цим стандартом розрахунки на опір крихкому руйнуванню (ОКР) КР повинні виконуватись з постульованими тріщинами та виявленими несуцільностями за результатами неруйнівного контролю.

Для оцінки крихкої міцності КР у якості параметрів механіки руйнування використовуються коефіцієнт інтенсивності напружень та значення J-інтегралу, водночас розрахунки рекомендується виконувати в рамках нелінійної механіки руйнування. Підходи лінійної механіки руйнування застосовуються у випадку попереднього вибору небезпечних сценаріїв або за умови достатніх обґрунтувань.

Строк експлуатації КР визначається за досягненням критичною температурою крихкості матеріалу T_k значення максимально допустимої критичної температури крихкості T_{ka}, яке визначається розрахунковим чином.

Зокрема в рамках розроблення та вдосконалення документу [1] було:

- змінено підхід до визначення геометричних розмірів постульованих тріщин;
- уточнено вимоги до теплогідравлічних розрахунків;
- встановлено вимоги до розрахунку на опір крихкому руйнуванню з використанням методу скінченних елементів;
- визначено критерії до оцінки цілісності наплавлення КР;
- встановлено вимоги до застосування підходу теплового опресування.

Базуючись на підходах [1], також розроблено нормативні документи з оцінки ймовірності крихкого руйнування корпусу реактора та побудови граничних p-T кривих.

Оцінка крихкої міцності внутрішньокорпусних пристроїв реактора (ВКП) має свої особливості, пов’язані з інтенсивним радіаційним навантаженням. Під час розрахунку напружено-деформованого стану та параметрів механіки руйнування необхідно враховувати такі ефекти як розпухання, радіаційна повзучість та радіаційне зміцнення матеріалу, водночас розподіл температури в матеріалі ВКП визначається з урахуванням енерговиділень під дією повного спектру нейтронного та гамма-опромінення.

Постулювання тріщин в елементах ВКП визначається на основі аналізу НДС, результатів неруйнівного контролю металу та таких механізмів деградації як розпухання, втомне пошкодження та корозійне розтріскування під напруженням.

Зазначені особливості розрахунків на опір крихкому руйнуванню знайшли своє відображення в документі [2].

Розроблення та вдосконалення документів [1] та [2] виконувалось з урахуванням досвіду розрахунку на ОКР елементів реакторів енергоблоків АЕС України та використанні сучасних науково-технічних знань механіки руйнування, програмних продуктів та розрахункових методик. Документи [1] та [2] пройшли державну експертизу ЯРБ та погоджені Держатомрегулювання до використання.

Для оцінки крихкого руйнування елементів реактора та виконання розрахунків в рамках лінійної механіки руйнування розроблено програмний засіб, що дозволяє виконувати відбір найбільш небезпечних сценаріїв для уточнених розрахунків. За допомогою розробленого програмного засобу також виконується опрацювання та узагальнення результатів розрахунків на ОКР.

1. СОУ НАЕК 177:2023 Інженерна, наукова і технічна підтримка. Методика оцінки крихкої міцності корпусів реакторів ВВЕР.
2. ПМ-Т.0.03.333-23 Типова програма оцінки технічного стану та продовження строку експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000.

Methodological approaches to assessment of brittle fracture strength of WWER-1000 reactor vessel and internals

M. Banias[1]

Affiliate “SS STS” JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine.

[1]m.banyas@direkcy.atom.gov.ua

The report is dedicated to the review of approaches to assessing the brittle fracture strength of WWER reactor pressure vessels and internals. The description of the standard for reactor pressure vessel fracture assessment is given. The crucial improvements during document development are considered. Based on this standard, a method was developed to assess the probability of brittle fracture and to determine p-T curves. The main fracture assessment features for the reactor vessel are presented. To select dangerous scenarios and process calculation results, the software was developed.

Keywords: brittle fracture, reactor vessel, reactor vessel internals

Аналіз імовірності крихкого руйнування як інструмент кількісної оцінки безпеки корпусів реакторів ВВЕР-1000

А.О. Касяненко[1], М.В. Баняс, М.С. Зарицький, Є.Л. Данильчук, С.А. Радченко

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна.

[1]a.kasianenko@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: аналіз імовірності, крихке руйнування, метод Монте-Карло.

Розроблення методики оцінки ймовірності крихкого руйнування корпусу реактора (далі – КР) зумовлене необхідністю впровадження ймовірнісного критерію оцінки безпеки, який закріплений у новій редакції НП 306.2.245-2024 [1], та виконання вимог СОУ НАЕК 080:2023 [2] в частині аналізу безпеки, який враховує старіння КР у часі і обґрунтовує його безпеку у період призначеного та перепризначеного строку служби (TLAA). Реалізація даного критерію забезпечує гармонізацію національної нормативної бази із сучасними міжнародними стандартами МАГАТЕ.

В інженерній практиці детерміністичний підхід оцінки крихкого руйнування КР є основою для обґрунтування безпечної експлуатації КР, що базується на окремих консервативних значеннях температури крихкості T_k та параметрів постульованої тріщини. Паралельно з цим, аналіз імовірності крихкого руйнування КР дозволяє врахувати статистичну варіативність характеристик металу, геометричних параметрів тріщин тощо. Такий підхід забезпечує перехід від фіксованих температурних запасів міцності КР до обчислення частоти ініціації миттєвого руйнування КР як інтегрального кількісного показника безпеки КР. Таким чином, ці підходи не виключають один одного, а доповнюють. Детерміністичні розрахунки є базисом – нижньою межею безпеки, тоді як імовірнісні розрахунки є доповненням для глибшого аналізу чутливості системи до варіативності вхідних даних.

Для практичної реалізації вищезазначених підходів розроблено методику оцінки ймовірності крихкого руйнування КР [3]. Дана методика пройшла апробацію під час виконання розрахункових обґрунтувань безпечної експлуатації КР та погоджена Держатомрегулювання до використання.

Для виконання розрахунків за цією методикою розроблено програмний модуль на основі методу Монте-Карло. Даний метод дозволяє моделювати множину станів системи (множину «корпусів реакторів»), які враховують різні сценарії експлуатаційних навантажень та різні набори випадкових значень параметрів для розрахунку на опір крихкому руйнуванню КР.

Використання розробленого інструментарію дозволяє обґрунтувати дотримання цільового критерію ймовірності крихкого руйнування корпусу реактору на рівні 10^{-7} на реактор за рік. Це є необхідною умовою для обґрунтування безпеки експлуатації корпусу реактора та прийняття рішення щодо продовження строку експлуатації КР у період довгострокової експлуатації енергоблока.

1. НП 306.2.245-2024 «Загальні положення безпеки атомних станцій».
2. СОУ НАЕК 080:2023 «Довгострокова експлуатація діючих енергоблоків атомної електростанції. Загальні положення».

3. СОУ НАЕК 267:2025 «Методика оцінки ймовірності крихкого руйнування корпусу реактора ВВЕР-1000».

Probability analysis of brittle fracture as a tool for quantitative assessment of WWER-1000 reactor vessels

A. Kasianenko[1], M. Banias, **M. Zaritsky**, **E. Danylchuk, S. Radchenko**

Affiliate “SS STS” JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine.

[1]a.kasianenko@direkcy.atom.gov.ua

The report substantiates the relevance of developing a methodology for assessing the probability of brittle fracture of a reactor pressure vessel in the context of implementing new requirements of the national document NP 306.2.245-2024. The transition from a traditional deterministic approach to a probabilistic safety analysis is considered, allowing for the inclusion of statistical variability in material properties and geometric defect parameters. The application of the Monte Carlo method to model system states and to calculate the frequency of fracture initiation as an integral safety indicator is described. The proposed approach harmonizes national regulations with IAEA standards and serves as a tool for re-evaluating time-limited aging analyses (TLAA) to justify the life extension of nuclear power units.

Keywords: probabilistic analysis, brittle fracture, Monte Carlo method.

Оцінка розпухання вигородки корпусу реактору ВВЕР-1000 в межах реалізації проєкту DELISA-LTO (EURATOM)

В. М. Дємєнков[1], О. П. Шугайло, Д. С. Брік, Б. О. Чумель

Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, Київ, Україна

[1]vm_demenkov@sstc.ua

Ключові слова: вигородка, розпухання, довгострокова експлуатація, флюєнс.

Вигородка реактора ВВЕР-1000 є одним з елементів який суттєво впливає на період довгострокової експлуатації реактора та енергоблока АЕС в цілому. Основною особливістю експлуатації вигородки є її робота в умовах значного нейтронного опромінення, яке обумовлює радіаційну повзучість та розпухання матеріалу вигородки, внаслідок чого змінюються проєктні значення зазорів між вигородкою і шахтою внутрішньокорпусною, між вигородкою та ТВЗ та умови їх охолодження.

Питання оцінки розпухання вигородки детально розглядались в межах міжнародного проєкту «Опис продовженого строку експлуатації та його впливу на безпечну експлуатацію і надійність конструкційних матеріалів – довгострокова експлуатація без компромісів для безпеки» (так званий - DELISA-LTO) [1]. Для кращого розуміння впливу розпухання на вигородку у межах проекту DELISA-LTO здійснені такі кроки:

– визначення та порівняння нормативних вимог, сучасної практики, підходів до розрахунку/аналізу розпухання та специфічних аспектів аналізу розпухання [1], [3];

– розробка та тестування моделей внутрішньокорпусних пристроїв реактора для оцінки розпухання за спрощеним підходом у двовимірній постановці (Рис. 1), [4];

– виконання бенчмарків для оцінки розпухання (3D-модель та складний підхід) (Рис. 2), [5].

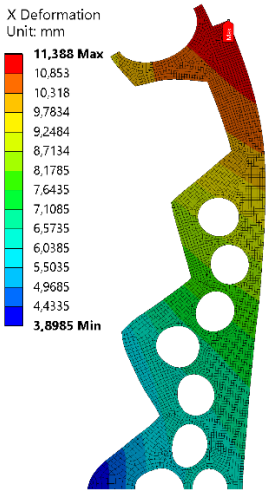


Рис. 1. Радіальні переміщення вигородки у перерізі з максимальним флюєнсом нейтронів (двовимірна постановка)

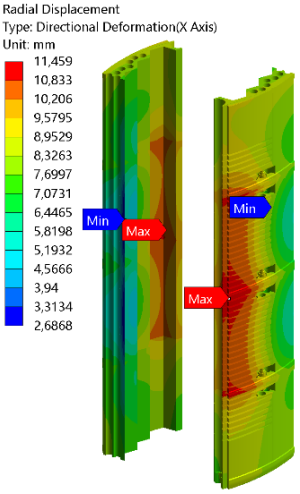


Рис. 2. Радіальні переміщення вигородки (тривимірна постановка)

Також в межах робочого пакету були виконані аналізи чутливості та проаналізовано вплив на формозміну вигородки таких факторів, як параметр радіаційного розпухання C_D, флюєнс нейтронів та внутрішні енерговиділення, конструкційні особливості (кількість кілець вигородки), врахування флюєнсу нейтронів та енерговиділень у шахті внутрішньокорпусній.

За результатами проведених досліджень виявлені аспекти в підходах до розрахункової оцінки розпухання вигородки, які потребують подальшого уточнення, і з огляду на які сформовані відповідні рекомендації. Однією із ключових є рекомендація щодо отримання експериментальних даних для опроміненої сталі 08Х18Н10Т. Наявність таких результатів дозволить виконати більш точну верифікацію та валідацію результатів лцінки ступеню розпухання.

1. https://delisa-lto.eu
2. О. Шугайло, В. Піштора, Ш. Шавай, та ін., Розрахункова оцінка розпухання вигородки реакторів типу ВВЕР: сучасний досвід та порівняльний аналіз. *Проблеми міцності*, №4, 20–36 (2024).
3. O. Shugailo, V. Pistora, Ya. Dubyk, et al., Normative approaches, current practice and experience of RPV internals calculations (swelling evaluation) for LTO justification, D3.1., DELISA-LTO project (2023).
4. Ya. Dubyk, O. Shugailo, V. Diemienkov, et al., Developing and Testing Models of RPV Internals for Swelling Evaluation, D3.2., DELISA-LTO project (2023).
5. Ya. Dubyk, O. Shugailo, V. Diemienkov, et al., Benchmark of swelling evaluation, D3.3., DELISA-LTO project (2024)

Assessment of the swelling of the VVER-1000 reactor pressure vessel baffle within the framework of the DELISA-LTO (EURATOM) project

V. Diemienkov[1], O. Shugailo, D. Brik, B. Chumel

State Enterprise “State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, Kyiv, Ukraine.

[1] vm_demenkov@sstc.ua

The VVER-1000 core baffle significantly affects long-term operation due to intense neutron irradiation, which causes radiation creep and swelling, altering design clearances and cooling conditions of reactor internals.
In 2022, the Euratom DELISA-LTO project was launched to assess the impact of extended operation on safety and structural materials. A dedicated work package focused on swelling analysis, including regulatory review, numerical modeling (2D/3D), benchmarking, and sensitivity studies of key parameters such as neutron fluence, parameter of irradiation swelling, design features.
This research discovered the weak points, and highlighted the need for additional experimental data on irradiated steel and harmonization of national VVER regulations. The project supports safer long-term operation through improved prediction of material degradation.

Keywords: baffle, swelling, long-term operation, fluence.

Комплексний підхід до оцінки безпечної експлуатації вигородки реактора ВВЕР-1000: від вимірювань формозміни до прогнозних розрахунків

Є.Л. Данильчук[1], М.В. Баняс, С.А. Радченко

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна.

[1]e.danylchuk@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: внутрішньокорпусні пристрої, вигородка реактора, радіаційне розпухання

Вигородка реактора ВВЕР-1000 піддається впливу високих доз радіаційного опромінення, що викликає зміну фізико-механічних властивостей металу і призводить до її прогресуючої формозміни внаслідок радіаційного розпухання.

Радіаційне розпухання вигородки реактора є одним з основних факторів, який визначає строк експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000. Формозміна вигородки може призводити до наступних наслідків:

- вичерпання зазорів «тепловиділяюча збірка (ТВЗ) – вигородка» та «шахта внутрішньокорпусна (ШВК) – вигородка»;
- розкриття між суміжними кільцями вигородки.

Повне зменшення зазору «ТВЗ – вигородка» може призвести до порушення руху теплоносія та теплового балансу, ускладнити перевантаження ТВЗ, заклинювання та блокування органів регулювання. Вичерпання зазору "ШВК – вигородка" може змінити напружено-деформований стан ШВК та порушити тепловий баланс. Розкриття між кільцями вигородки внаслідок її формозміни призводить до перетоків теплоносія та збільшення напружень у різьбових з'єднаннях.

З метою оцінки технічного стану та обґрунтування безпечної експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв реактора в період довгострокової експлуатації енергоблоків виконується комплекс робіт, що включає як виконання чисельного моделювання процесів формозміни, так і вимірювання фактичної геометрії конструкції безпосередньо в реакторі.

Виконання розрахункових оцінок радіаційного розпухання регламентовано документом [1]. Процедура розрахунку передбачає нейтронно-фізичні розрахунки (енерговиділень та радіаційного навантаження), оцінку полів температури, розрахунок безпосередньо формозміни і напружено-деформованого стану (НДС), оцінку крихкої міцності та циклічної міцності.

Флюенс нейтронів, радіаційні пошкодження, та енерговиділення оцінюються за допомогою комп'ютерних кодів ANC-H, Scale та MCNPX. Розрахунок температурних полів, чисельне моделювання процесів формозміни та наступна оцінка НДС виконується за допомогою розрахункового коду ANSYS. Розрахунки розпухання проводять у пружно-в’язкопластичній постановці з урахуванням геометричної нелінійності.

З метою оцінки фактичного стану вигородки реактора ВВЕР-1000 розроблено сучасний вимірювальний комплекс. Цей комплекс призначений для вимірювання відстаней між протилежними гранями внутрішньої поверхні вигородки у проєкції на горизонтальну площину на заданих висотних відмітках. Наразі, за допомогою

комплексу вже виконано аналіз геометричних параметрів внутрішньої поверхні вигородки реактора на ряді енергоблоків АЕС України.

Отримані результати фактичних вимірювань використовуються для перевірки результатів чисельного моделювання розпухання та оцінки зміни форми вигородки, а також зняття надлишкового консерватизму. Обробка результатів вимірювання геометричних розмірів внутрішньої поверхні вигородки реактора ВВЕР-1000 виконується згідно розробленої методики [2] з метою коригування моделі радіаційного розпухання, зокрема параметру радіаційного розпухання.

Виконані розрахункові оцінки, а також результати фактичних вимірювань свідчать про дотримання умов міцності та обґрунтування безпечної експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв реактора в період довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС.

1. ПМ-Т.0.03.333-23 Типова програма оцінки технічного стану та продовження строку експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000.
2. СОУ НАЕК 262:2022 «Інженерна, наукова і технічна підтримка. Методика обробки вимірів геометричних розмірів вигородки реакторів ВВЕР-1000».

A comprehensive approach to the safe operation assessment of the VVER-1000 core baffle: from measurements of change of form to predictive calculations

E. Danylchuk[a1], M. Banias[a], S. Radchenko[a]

[a]Affiliated “SS STC” JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine.

[1]e.danylchuk@direkcy.atom.gov.ua

The report is dedicated to the review of approaches to the safe operation assessment of the VVER-1000 core baffle. It is noted that radiation void swelling of the core baffle is one of the main factors determining the service life of the RPV internals. To assess the change of form of the core baffle, a complex of works is performed, which includes both numerical modeling of the deformation processes and measurement of the actual geometry of the structure. The calculated estimates, as well as the results of actual measurements, indicate compliance with the strength conditions and justification of the safe operation of the RPV internals during the long-term operation of the NPP power units.

Keywords: RPV internals, core baffle, radiation void swelling

CFD аналіз для цілей обґрунтування міцності елементів ВБ реактора ВВЕР-1000

Д. В. Рубан[1], Р. О. Ліщук[a], Г. Ю. Євлахович

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] d.ruban@direkcy.atom.gov.ua

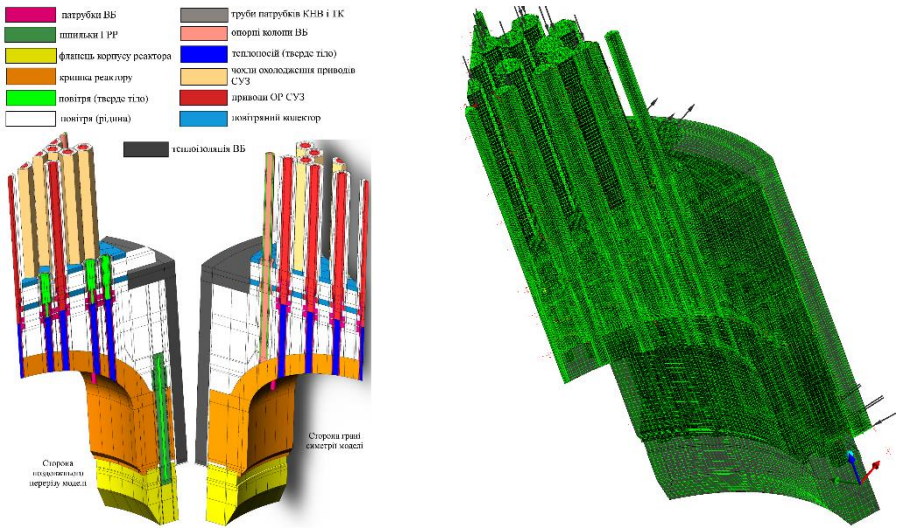
Ключові слова: ANSYS CFX, CFD, FEM, верхній блок, патрубки ВБ, деталі головного ущільнення, кришка реактора, міцність елементів ВБ, валідація CFD моделі, розрахункова сітка

Конструкційні елементи верхнього блоку (ВБ) реактора ВВЕР-1000 знаходяться в умовах нерівномірного охолодження. Нерівномірність виникає внаслідок різного напрямку повітряних потоків, зміни витрати повітря та теплового поля зі сторони об'єму під кришкою реактора протягом перехідних процесів, різних режимів тепловіддачі (примусова, змішана і природня конвекція), складності просторової конфігурації ВБ. Для оцінки поля температури на поверхнях патрубків ВБ, кришки реактора і деталей головного ущільнення (ДГУ), які обдуваються повітрям, раніше використовувався суттєво спрощений підхід на базі FEM (finite elements method) [1] моделі одиничних елементів конструкції ВБ без урахування чисельного моделювання обдування конструкцій повітряним потоком. Такий підхід оцінював надлишково консервативні або некоректні параметри теплового поля елементів ВБ.

Тому було виконано розробку підходу і CFD (computational fluid dynamic) моделі [2], які мають можливість чисельного моделювання потоків повітряного обдування ВБ і представляють збірку елементів конструкції ВБ. Профіль температури за результатами розрахунків з використанням CFD моделі в подальшому слугує граничною умовою для FEM моделі ВБ для цілей обґрунтування міцності елементів конструкції ВБ реактора ВВЕР-1000 [3]. Ключовими елементами розрахункового дослідження являються патрубки ВБ (ОР СУЗ, ТК, КНВ, повітряник реактора), кришка реактора та ДГУ.

CFD модель ВБ для коду ANSYS CFX просторово розглядає 60°-й сектор симетрії конструкції ВБ в межах від внутрішньої поверхні кришки і фланця корпусу реактора до відмітки верхнього торця шестигранних чохлів охолодження приводів ОР СУЗ. Таких просторових меж моделі достатньо для представлення основних повітряних потоків, які обдувають досліджувані елементи конструкції ВБ: потік вентиляційної системи ВБ через шестигранні чохли охолодження приводів ОР СУЗ; потік за рахунок підсмоктування повітря через нещільність теплоізоляції ВБ; потоки перемішуються в повітряному колекторі вентсистеми ВБ.

При розробці CFD моделі для її валідації і налаштування розглянуто дані випробування ВБ реактора ВВЕР-1000, а також дані експериментальних і розрахункових досліджень теплових процесів у ВБ. Стосовно витрати і температури повітря, моделювання повітряника реактора в межах 60°-го сектору симетрії та умов відведення тепла від зовнішніх поверхонь моделі прийнято консервативні підходи в рамках розрахунків для цілей аналізу циклічної міцності елементів ВБ.



а *б*

Рис. 1. CFD модель ВБ: *а* – геометрична модель (30°); *б* – модель розрахункової сітки (60°).

1. M. Svrcek. *Assessment of flanges and nozzles of VVER reactor types*. Conference “Material Issues in Design, Manufacturing and Operation of NPPs Equipment”. UJV Rez (2014).
2. Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications – revision. NEA, Committee on the Safety of Nuclear Installations. (2015).
3. M. Brumovsky. Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation (VERLIFE). *Procedia Engineering*, **86**, 308-314 (2014).

CFD analysis for the purpose of substantiating the strength of the elements of the upper block of the WWER-1000 reactor

D. Ruban[a1], R. Lishchuk[a], G. Yevlakhovych[a]

[a]Affiliate “SS “Scientific and Technical Centre” of JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine.

[1] d.ruban@direkcy.atom.gov.ua

This paper considers the approach and development of the CFD model of the upper block of the VVER-1000 reactor for numerical estimation of the thermal regime of the upper block structures. The CFD analysis approach was developed to replace simplified method that provide overly conservative and unphysical results. The developed approach includes modelling of flow regimes and heat transfer of air flowing around the upper block structural elements, and also includes sufficient detail of the upper block elements for correct modelling of transient regimes associated with changes in the thermal load on the upper block elements. The methodology for all stages of developing the upper block is presented, starting from the geometric and mesh model, and ending with validation, adjusting, verification of the model and selection of boundary conditions for analyzing transient processes.

Keywords: ANSYS CFX, CFD, FEM, upper block, UB nozzles, main seal parts, reactor cover, strength of the UB elements, validation of the CFD model, calculated mesh

Збереження кваліфікації діючого обладнання як один із основних критеріїв безпечної довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС

В. О. Посох[1], А. А. Келін[2]

Філія «ВП «Науково-технічний центр», АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] v.posokh@direkcy.atom.gov.ua , [2] a.kelin@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: кваліфікація обладнання, «жорсткі» умови навколишнього середовища, кваліфікаційний термін.

Кваліфікація обладнання (КО) - підтвердження того, що обладнання у межах строку експлуатації буде виконувати покладені функції з урахуванням характеристик середовища, в яких воно функціонує (включно з розширеними проєктними умовами) [1]. Іншими словами КО – це підтвердження можливості обладнання виконувати свої функції (функції безпеки) під час виникнення аварії («жорстких» умов навколишнього середовища включно з розширеними проєктними умовами) або під дією сейсмічних впливів.

За результатами виконання КО – все обладнання енергоблоків АЕС України, яке підлягає кваліфікації на «жорсткі» умови навколишнього середовища (ЖУ) та сейсмічні впливи (СВ) кваліфіковано.

З моменту встановлення КО на ЖУ та СВ фахівцями АТ «НАЕК «Енергоатом» ведуться роботи зі збереження встановленої КО

Заходи зі збереження встановленої кваліфікації обладнання (КО) виконуються з метою компенсації або зменшення впливу чинників, що можуть нести негативний вплив на стан кваліфікованого обладнання, а також для виявлення та пом’якшення дії цих чинників.

На даний час у галузі активно ведеться робота по удосконаленню нормативно-методичного забезпечення процесу збереження КО. Також успішно впроваджено заходи які вимагаються [3] в рамках збереження КО:

- моніторинг умов експлуатації параметрів навколишнього середовища в приміщення в яких експлуатується обладнання яке підлягає кваліфікації на ЖУ, що дозволяє ефективніше прогнозувати кваліфікаційні терміни;

- перепризначеня кваліфікаційних термінів обладнання з використанням закону Арреніуса (1);

$$R = Ce^{\frac{-\varphi}{kT}} \qquad \frac{t_S}{t_a} = e^{\left(\frac{\varphi}{k}\right)\left(\frac{1}{T_S}-\frac{1}{T_a}\right)} \tag{1}$$

- дослідницькі роботи з науково-технічної підтримки, що дозволяє ефективніше впроваджувати заходи направлені на підвищення безпеки енергоблоків під час винекнення ЖУ та СВ;

- інші заходи (спеціальне маркування обладнання яке підлягає кваліфікації на ЖУ та СВ, навчання персоналу, який задіяно в роботах на обладнання яке підлягає кваліфікації на ЖУ та СВ тощо).

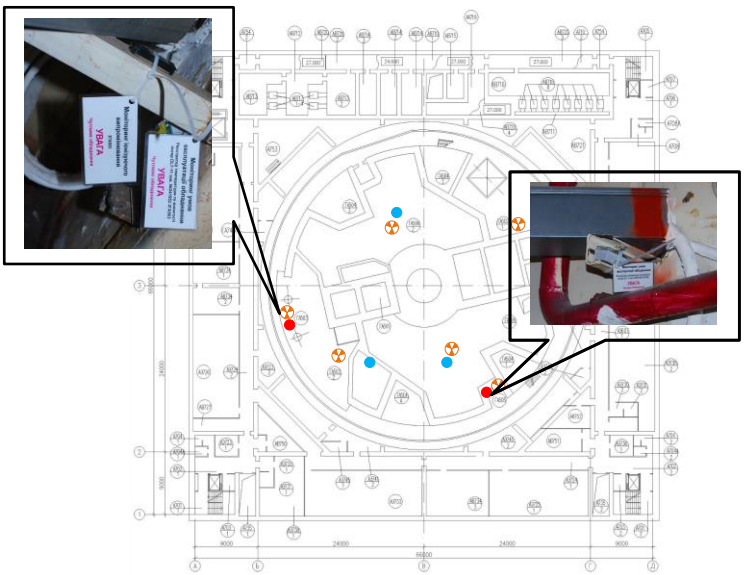


Рис. 1. Розміщення засобів моніторингу на енергоблоці

Водночас процес збереження КО потребує удосконалення деяких заходів, які в подальшому дозволять більш ефективно впливати на стан кваліфікації обладнання в період довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС.

1. НП 306.2.245-2024 «Загальні положення безпеки атомних станцій»
2. SSG-69 «Equipment Qualification for Nuclear Installations. Specific Safety Guide. IAEA, Vienna, 2021»
3. ПМ-Д.0.03.476-23 «Програми робіт з кваліфікації обладнання енергоблоків атомних електричних станцій»

Preservation of equipment qualification as a key criterion for the safe long-term operation of nuclear power plant units

V. Posokh[1], A. Kelin[2]

Affiliate «Separate Subdivision «Scientific and Technical Centre» of the Joint Stock Company «National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom»

[1] v.posokh@direkcy.atom.gov.ua , [2] a.kelin@direkcy.atom.gov.ua

Equipment Qualification (EQ) ensures that systems and components can perform their safety functions under harsh environmental and seismic conditions, including beyond-design-basis scenarios. All relevant equipment at Ukrainian NPP units has been qualified, with measures in place to preserve EQ, such as environmental monitoring and qualified life reassessment using the Arrhenius model. Additional activities include technical support studies, equipment labeling, and personnel training. Further improvements are needed to enhance EQ preservation during long-term operation.

Keywords: Equipment Qualification (EQ), Harsh Environmental Conditions (HEC), Qualified Life.

Методологічні підходи щодо переоцінки сейсмостійкості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС

І. О. Трусов[1], В. О. Посох[2]

Філія «ВП «Науково-технічний центр», АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] i.trusov@direkcy.atom.gov.ua; [2] v.posokh@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: детерміністичний аналіз сейсмічної небезпеки, сейсмостійкість, сейсмологічний моніторинг.

29.11.2016 набрав чинності нормативно-правовий акт НП 306.2.208-2016 «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій» [1]. НП 306.2.208-2016 [1] по відношенню до ПНАЭ Г-5-006-87 [2] встановлюють додаткові вимоги, наприклад, до визначення сейсмічних характеристик майданчика АЕС, категоризації елементів та конструкцій, врахування сполучень технологічних умов експлуатації виробів АЕС і сейсмічних впливів для обґрунтування сейсмостійкості тощо.

З метою приведення діючих енергоблоків АЕС України у відповідність до вимог НП 306.2.208-2016, АТ «НАЕК «Енергоатом» розроблені заходи з впровадження НП 306.2.208-2016 [3]. Заходами [3], зокрема, передбачено виконання робіт з переоцінки сейсмостійкості обладнання, трубопроводів, будов та споруд I та II категорії сейсмостійкості відповідно до вимог НП 306.2.208-2016 [1]. З метою встановлення методологічних основ для організації діяльності з оцінки сейсмостійкості відповідно до вимог НП 306.2.208-2016 [1] філією «ВП НТЦ» розроблено Програму переоцінки сейсмостійкості обладнання, трубопроводів, будівель та споруд I та II категорії сейсмостійкості згідно з вимогами НП 306.2.208-2016 «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій» ПМ-Т.0.03.482-23 [4].

У доповіді представлено:

- стан реалізації Заходів [3] в частині підтвердження сейсмостійкості елементів і конструкцій I та II категорії сейсмостійкості за результатами детерміністичного аналізу сейсмічної небезпеки з урахуванням результатів сейсмологічного моніторингу;
- визначені Програмою [4] методологічні підходи щодо аналізу необхідності переоцінки сейсмостійкості за уточненими параметрами вимог із сейсмостійкості за результатами сейсмологічного моніторингу;
- визначені Програмою [4] методологічні підходи щодо аналізу необхідності врахування додаткових сполучень навантажень відповідно до вимог НП 306.2.208-2016.

Приведений аналіз застосування вище зазначених методологічних підходів з точки зору оптимізації та уніфікації переоцінки сейсмостійкості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС.,

1. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій.
2. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва : Энергоатомиздат, 1989, 29 с.
3. Заходи № 33/06 щодо впровадження нормативно-правового акту Держатомрегулювання «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій» НП 306.2.208-2016 (в новій редакції)».
4. ПМ-Т.0.03.482-23. Програма переоцінки сейсмостійкості обладнання, трубопроводів, будівель та споруд I та II категорії сейсмостійкості згідно з вимогами НП 306.2.208-2016 «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій.

Methodological approaches to the reassessment of the seismic resistance of elements and structures of nuclear power plants

I. Trusov[1], V. Posokh[2]

Affiliate «Separate Subdivision «Scientific and Technical Centre» of the Joint Stock Company «National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom»

[1] i.trusov@direkcy.atom.gov.ua; [2] v.posokh@direkcy.atom.gov.ua

The report presents the status of implementation of the measures for the application of NP 306.2.208-2016 with regard to the confirmation of the seismic resistance of elements and structures of seismic categories I and II based on the results of deterministic seismic hazard analysis, taking into account the results of seismological monitoring, as well as methodological approaches to analyzing the need for reassessment of seismic resistance according to reassessed seismic resistance requirement parameters derived from seismological monitoring results, and methodological approaches to analyzing the need to consider additional load combinations in accordance with the requirements of NP 306.2.208-2016.

Keywords: deterministic seismic hazard analysis, seismic resistance, seismological monitoring.

Аналіз підходів до оцінки міцності захисної оболонки ВВЕР-1000 при екстремальних динамічних впливах з використанням ПК ЛІРА-САПР

О. В. Халченков[1], О. П. Шугайло, А. В. Панченко, М. А. Комар

Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, Київ, Україна

[1] ov_khalchenkov@sstc.ua

Ключові слова: МСЕ, ЛІРА-САПР, захисна оболонка, динамічні впливи, напруження, деформації, СПЗО

Захисна оболонка (ЗО) реакторів типу ВВЕР-1000 є критично важливим бар'єром безпеки, що запобігає виходу радіоактивних речовин у навколишнє середовище та належить до І категорії відповідальності з ядерної та радіаційної безпеки згідно з класифікацією ПиН АЭ-5.6 [1]. При аналізі її стійкості до екстремальних динамічних впливів (таких як падіння літака, ударна хвиля від вибуху або інтенсивні сейсмічні навантаження) ключовим питанням стає адекватне математичне моделювання сумісної роботи залізобетону, герметизуючого сталевого облицювання (ГСО) та системи попереднього напруження захисної оболонки (СПЗО).

Існує ряд підходів до оцінки динамічних впливів з використанням ПК «ЛІРА-САПР», зокрема квазістатичний підхід, спектральний аналіз, пряме інтегрування рівнянь руху у часі тощо. Кожен з цих підходів має свої переваги та обмеження. Спектральний метод є загальноприйнятим стандартом для розрахунку споруд на динамічні впливи, але він базується на принципі суперпозиції, що виключає можливість врахування фізичної нелінійності, обов’язковість якої встановлена п. 2.1.3.8 ДБН В.2.6-98:2009 [2] та п. 1.20.1 ПиН АЭ-5.6 [1].

Для об'єктивної оцінки міцності доцільно використовувати ланцюжок розрахунків, детально описаний в [3], де ключовим етапом є пряме інтегрування рівнянь руху у нелінійній постановці. Вплив СПЗО моделюється шляхом прикладання температурного навантаження до стрижневих елементів. В попередніх роботах, зокрема в [3], враховано вплив ГСО шляхом задання додаткової арматури листового типу товщиною 8 мм із внутрішньої сторони конструкції. Це дозволило описати роботу конструкції, водночас такий підхід не дозволив визначити зусилля безпосередньо в ГСО, що є критично важливим для визначення моменту втрати герметичності. В оновленій скінченно-елементній (СЕ) моделі ГСО задано за допомогою нелінійних елементів оболонкового типу, що з’єднані з оболонковими елементами залізобетону за допомогою абсолютно жорстких тіл (АЖТ). Такий підхід дозволив точніше описати нелінійну роботу залізобетону, а також зафіксувати пікові зусилля безпосередньо в ГСО.

На рис. 1 наведено приклад результатів розрахунку еквівалентних напружень у ГСО сферичного куполу ЗО при імпульсній взаємодії $2 \cdot 10^6$ кг·м/с протягом 0,2 с. Отримані напруження перебувають у допустимих межах. На підставі розрахунків з високою імовірністю можна припустити, що розглянуте динамічне навантаження не призводить до порушення герметичності ГСО ЗО.

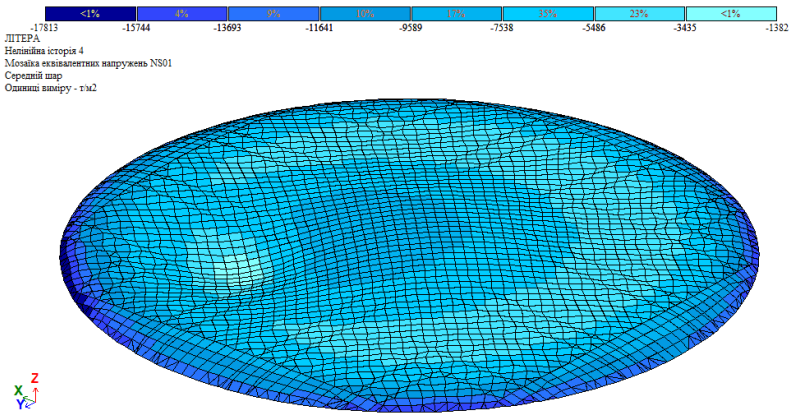


Рис. 1. Пікові еквівалентні напруження у ГСО сферичного куполу ЗО при імпульсному впливі $2 \cdot 10^6$ кг·м/с протягом 0,2 с.

Використання описаного в [3] ланцюжка розрахунків у поєднанні з явним моделюванням ГСО за допомогою плоских СЕ та АЖТ дозволяє отримати найбільш достовірну картину розподілу напружень, включаючи напруження у ГСО, що є критично важливим для визначення моменту втрати герметичності у випадку аварії.

1. ПиН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Минатомэнерго СССР (1986)
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зміна №1. Міністерство розвитку громад та територій України, Київ (2020).
3. O. Shugailo, O. Khalchenkov, General assessment of the NPP containment strength hit by air weapons, Strength Mater, 56, No. 5, 983–998 (2024). https://doi.org/10.1007/s11223-024-00709-6

Analysis of approaches to assessing the VVER-1000 containment strength under extreme dynamic impacts using LIRA-SAPR

O. Khalchenkov[a1], O. Shugailo[a], A. Panchenko[a], M. Komar[a]

[a]State Enterprise “State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, Kyiv, Ukraine.

[1] ov_khalchenkov@sstc.ua

This paper presents an enhanced methodology for assessing the structural integrity of VVER-1000 reactor containment systems under extreme dynamic loads (e.g., impact, explosion). We employ direct integration of motion equations in a non-linear formulation to satisfy regulatory requirements. A key advancement in our updated finite element model is the explicit representation of the 8 mm steel liner using shell elements coupled to the reinforced concrete via rigid body elements. This approach enables precise determination of stress distribution within steel containment liner under accidental conditions.

Keywords: FEM, LIRA-SAPR, containment, dynamic loads, stresses, strains.

Впровадження у національну практику сучасних міжнародних підходів до оцінки безпеки елементів АЕС за техногенних впливів

О-р П. Шугайло[1], Д.І. Рижов[a]

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ, Україна

[1] op_shugaylo@sstc.ua

Ключові слова: міцність, динамічні навантаження, повітряна ударна хвиля, падіння літака, розширені проєктні умови, ядерна та радіаційна безпека.

Забезпечення безпеки атомних електричних станцій (АЕС) потребує врахування широкого спектру зовнішніх небезпек як природного, так і техногенного характеру. При тому, стосовно вимог до аналізу зовнішніх небезпек природнього характеру в Україні вже діє нормативно-правовий акт [1], який враховує сучасні міжнародні підходи [2]. Водночас чинні в Україні вимоги до оцінки безпеки АЕС стосовно небезпек техногенного характеру обмежуються окремими положеннями, які здебільшого вказують на необхідність їх врахування, а регулюючі вимоги до сучасних процедур такого врахування (наприклад, відбір техногенних небезпек, методології врахування техногенних небезпек тощо) загалом відсутні [3].

Специфікою окремих небезпек техногенного характеру (наприклад, повітряна ударна хвиля, падіння літака тощо) є те, що навантаження від них передаються як на будівельні конструкції, так і на обладнання, трубопроводи (а також їх опорні конструкції) енергоблока АЕС. В цих умовах, навіть у випадку збереження глобальної цілісності будівельної конструкції, додаткові високочастотні навантаження можуть призвести до порушення працездатності обладнання, трубопроводів (а також їх опорних конструкцій) енергоблока АЕС [4-6]. Проте, цей вид високочастотних навантажень не врахований в проєктах обладнання та трубопроводів діючих енергоблоків АЕС України, оскільки його врахування не вимагається чинними нормами розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС [7].

У той же час в міжнародній практиці (зокрема, в рекомендаціях Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [4-6]) вказаний вид високочастотних навантажень на обладнання та трубопроводи прийнято розглядати під час оцінки безпеки енергоблоків АЕС. До того ж, згідно рекомендацій МАГАТЕ [4-6], а також підходів Західноєвропейської асоціації ядерних регуляторів (WENRA) [8-10] прийнято розглядати проєктні техногенні впливи та техногенні впливи розширених проєктних умов. Останні також не враховані в проєктах діючих енергоблоків АЕС України.

З урахуванням викладеного, наразі вкрай актуальним постало завдання з розробки регулюючого та методичного забезпечення впровадження у національну практику сучасних міжнародних підходів до оцінки безпеки елементів енергоблоків АЕС за техногенних впливів. У контексті виконання зазначеного завдання авторами сформульовані узагальнені пропозиції щодо вдосконалення національних підходів до оцінки безпеки елементів енергоблоків АЕС залежно від ступеня їх відповідальності за забезпечення ядерної та радіаційної безпеки під час і після техногенних впливів, а також окреслені перспективні напрями подальших наукових досліджень у сфері

розробки сучасних методик оцінки безпеки елементів енергоблоків АЕС за техногенних впливів.

1. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій щодо зовнішніх впливів природного характеру (НП 306.2.232-2021), затверджені наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 30.04.2021 № 263, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 20.05.2021 за № 670/36292.
2. Д.І. Рижов, С.М. Єган, О-р П. Шугайло. Про сучасні вимоги до оцінки безпеки атомних станцій щодо зовнішніх впливів природного характеру. *Ядерна та радіаційна безпека*. № 2(98). 2023. С. 4–15. URL: https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).01.
3. О-р П. Шугайло, Д.І. Рижов, С.М. Єган, О.В. Сахно Розвиток методів оцінки безпеки енергоблоків атомних станцій за техногенних впливів. *Ядерна та радіаційна безпека.* № 4(108). 2025. С. 69-79. https://doi.org/10.32918/nrs.2025.4(108).07.
4. Safety Aspects of NPPs in Human-Induced External Events: General Considerations, IAEA Safety Report Series No. 86, IAEA, Vienna, 2017.
5. Safety Aspects of NPPs in Human-Induced External Events: Assessment of Structures, IAEA Safety Report Series No. 87, IAEA, Vienna, 2018.
6. Safety Aspects of NPPs in Human-Induced External Events: Margin Assessment, IAEA Safety Report Series No. 88, IAEA, Vienna, 2017.
7. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 454 с.
8. WENRA. Safety Reference Levels for Existing Reactors 2020. WENRA, 2021.
9. WENRA. Guidance Document. Issue F: Design Extension of Existing Reactors. 2014.
10. WENRA. Guidance Document. Issue TU: External Hazards. Head Document. 2020.

Implementation of modern international approaches to the safety assessment of NPP components under human-induced hazards into national practice

O-r Shugaylo[a1], D. Ryzhov

[a]State Enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety", Kyiv, Ukraine

[1] op_shugaylo@sstc.ua

The necessity of improving existing NPP safety assessment methods regarding human-induced hazards, such as aircraft impact and air blast waves, has been substantiated. Special attention is paid to the problem of high-frequency loads on the equipment and piping of NPP power units during human-induced hazards. To address this issue, approaches for implementing international experience into national practice have been proposed.

Keywords: strength, dynamic loads, air blast wave, aircraft impact, design extension conditions, nuclear and radiation safety.

Методологічні підходи до оцінки сейсмостійкості будівельних конструкцій та споруд атомних електростанцій

І.О. Трусов[1]

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] i.trusov@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: гранична сейсмостійкість, коефіцієнту непружного поглинання енергії, лінійно-спектральний метод, HCLPF.

Відповідно до вимог СОУ НАЕК 182 [1] сейсмічна оцінка елементів АЕС виконується на основі вимог вітчизняних нормативних документів, з урахуванням сучасних міжнародних підходів, а також рекомендацій документів МАГАТЕ. Одним із таких підходів є метод граничної сейсмостійкості [2], [3], що використовується у світовій практиці для сейсмічної переоцінки блоків АЕС, у тому числі з реакторами ВВЕР.

Розглядаються особливості визначення значення граничної сейсмостійкості HCLPF (High Confidence Low Probability of Failure - висока забезпеченість низької ймовірності відмови) сталевих каркасних будівель критичної інфраструктури лінійно спектральним методом. Розрахунковий аналіз сейсмостійкості елементів діючих АЕС в рамках методу граничної сейсмостійкості проводиться з метою визначення інтегрального параметра HCLPF, що характеризує рівень сейсмічної стійкості цього елемента.

Параметр HCLPF, виражений в одиницях прискорення вільного падіння g, порівнюється з величиною максимального прискорення на ґрунті PGA (Peak Ground Acceleration – пікове прискорення акселерограми), визначеного для майданчика АЕС і характеризує інтенсивність землетрусу, прийнятого в якості сейсмічних кваліфікаційних вимог.

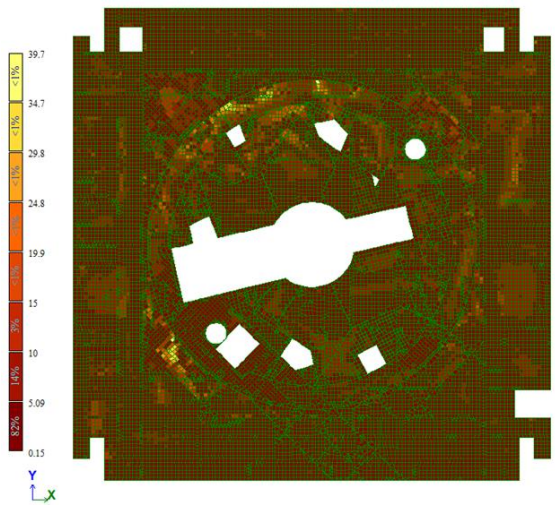


Рис. 1. Мозаїка значень інтегрального параметра HCLPF пластинчастих залізобетонних елементів плити перекриття реакторного відділення ВВЕР-1000 на відм. +28.800 та +29.400

Описуються підходи до використання лінійно-спектрального методу при розрахунку на сейсмічний вплив, з урахуванням демпфування будівельних конструкцій та визначенням динамічних характеристик ґрунту згідно зі СНиП 2.02.05-87 «Фундаменти машин із динамічними навантаженнями» [4].

Окреслюються підходи визначення безрозмірного коефіцієнту непружного поглинання енергії Fμ для оцінки сейсмостійкості металевих конструкцій з урахуванням переважаючих деформацій стиску, вигину, зсуву.

Метод граничної сейсмостійкості забезпечує визначення параметра HCLPF, значення якого використовується для оцінки фактичного запасу сейсмостійкості конструкцій АЕС та є вихідними даними для сейсмічного ймовірнісного аналізу безпеки.

1. СОУ НАЕК 182:2025 «Інженерна, наукова та технічна підтримка. Кваліфікація обладнання систем, важливих для безпеки енергоблоків атомних електростанцій, на сейсмічні впливи. Загальні вимоги»;
2. SSG-89 Evaluation of Seismic for Nuclear Installations. IAEA, Vienna, 2024;
3. Electric Power Research Institute «A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1)», Rep. EPRI-NP-6041-SL, Palo Alto, CA (1991) (Електроенергетичний науково-дослідний інститут, Методологія оцінки сейсмостійкості АЕС (ред. 1), Каліфорнія, 1991).
4. СНиП 2.02.05-87 «Фундаменти машин із динамічними навантаженнями».

Methodological approaches to assessing the seismic resistance of building structures of nuclear power plant facilities

I. Trusov[a1]

[a]Affiliate «SS STC» JSC «NNEGC «Energoatom», Kyiv, Ukraine.

[1] i.trusov@direkcy.atom.gov.ua

In accordance with the requirements of SOU NAEK 182, seismic assessment of NPP elements is performed on the basis of national standards, taking into account international approaches and IAEA recommendations, in particular the maximum seismic resistance method used to reassess NPP units, including those with WWER reactors. The paper discusses the features of determining the HCLPF parameter for steel frame buildings of critical infrastructure using the linear spectral method, which allows assessing the level of seismic resistance of structures and comparing it with the design PGA value. The application of linear spectral analysis is described, taking into account the damping of structures and soil properties in accordance with SNiP 2.02.05-87, as well as approaches to determining the inelastic energy absorption coefficient Fμ for metal structures dominated by compression, bending, or shear.

Keywords: maximum seismic resistance, coefficient of inelastic energy absorption, linear spectral method, HCLPF.

Розрахунок поверхових спектрів відгуку будівель і споруд енергоблоків атомних електростанцій з урахуванням заглиблення фундаментів

В.І. Щербій[1], І.О. Трусов[2], Л.Ф. Первушова[3]

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] v.shcherbii@direkcy.atom.gov.ua
[2] i.trusov@direkcy.atom.gov.ua
[3] l.pervushova@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: поверховий спектр відгуку, акселерограма, сейсмостійкість, демпфування.

Поверховий спектр відгуку - сукупність абсолютних значень максимальних прискорень лінійних осциляторів при їх реакції на вплив, заданий поверховою акселерограмою [1].

Оцінка небезпеки коливань ґрунту майданчика атомних станцій здійснюється детерміністичними та імовірнісними методами: імовірнісний аналіз включає побудову сейсмотектонічних моделей, визначення параметрів джерел землетрусів, вибір рівнянь загасання, розрахунок кривих небезпеки та врахування місцевих ґрунтових умов, тоді як детерміністичний підхід передбачає розгляд максимально можливих землетрусів у найближчих до майданчика точках сейсмогенних структур або зон розсіяної сейсмічності, аналіз наявності розломів, урахування фокальної глибини та розмірів джерела й застосування кількох рівнянь прогнозування руху ґрунту для визначення можливих сейсмічних впливів з урахуванням невизначеностей моделі та локальних умов.

В доповіді описано моделювання взаємодії основи та споруди методом еквівалентних динамічних характеристик, отримання поверхових акселерограм в результаті розрахунку вимушених коливань будівлі на дію розрахункових акселерограм та отримання поверхових спектрів в результаті розрахунку вимушених коливань лінійних неконсервативних осциляторів на дію поверхових акселерограм.

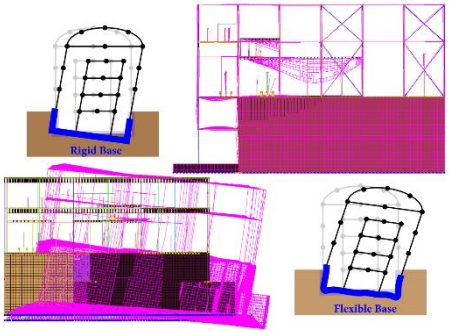


Рис. 1. Схеми розрахункових моделей з врахуванням різних типів основ

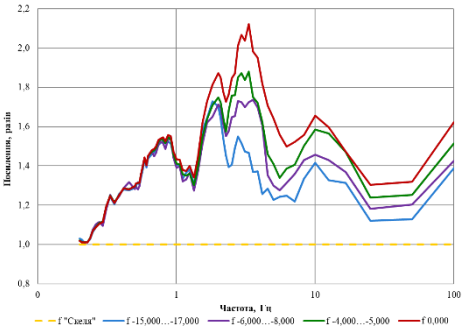


Рис. 2. Середні функції посилення геологічного середовища для різних відміток заглиблення фундаментів

Представлено виконання розрахунку динаміки в часі для врахування демпфування з використанням матриці дисипації Релея заданням коефіцієнтів пропорційності маси α і жорсткості β розрахованих для двох перших власних частот зі значним внеском в збір мас, розрахунок коефіцієнтів затухання у зв'язку з

випромінюванням відбитих від споруди пружних хвиль для горизонтальних, вертикальних переміщень та обертання відносно горизонтальних та вертикальний осей.

Описано отримання поверхових спектрів відгуку для детерміністичного та імовірнісного аналізів сейсмічної небезпеки на фундаментах споруд згідно з вимогами нормативу ASCE 4-16 [2] з врахуванням впливу верхньої частини розрізу до відповідної відмітки фундаменту споруди.

Запропоновані методичні підходи забезпечують отримання поверхових спектрів відгуку в будь-якій точці будівлі з урахуванням взаємодії «основа–споруда» та ефектів заглиблення фундаменту. Урахування конструктивного демпфування та відбиття від будівлі пружних хвиль, а також впливу верхньої частини геологічного розрізу дає змогу коректно визначати динамічні параметри руху споруди та формувати спектри відгуку, придатні для подальших оцінок сейсмостійкості у рамках детерміністичного та імовірнісного аналізів сейсмічної небезпеки.

1. НП 306.2.208-2016 «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій»;
2. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures.

The calculation of the floor response spectra for buildings and structures of nuclear power plant power units, with consideration for foundation depth.

V. Shcherbii[1], I. Trusov[2], L. Pervushova

[a]Affiliate «SS STC» JSC «NNEGC «Energoatom», Kyiv, Ukraine.

[1] v.shcherbii@direkcy.atom.gov.ua
[2] i.trusov@direkcy.atom.gov.ua
[3] l.pervushova@direkcy.atom.gov.ua

The floor response spectrum is the set of maximum absolute accelerations of oscillators responding to a floor accelerogram. Seismic hazard is assessed using probabilistic modeling and deterministic analysis of maximum credible earthquakes. The present paper sets out an approach to modelling the interaction between foundation and structure using the equivalent dynamic characteristics method. In addition, it provides a detailed derivation of floor-level accelerograms and spectra by calculating the forced vibrations of the building and linear oscillators. The calculation of time dynamics using the direct integration method with the Rayleigh dissipation matrix is described, particularly the determination of damping coefficients for horizontal, vertical and angular displacements. The text goes on to describe the determination of response spectra for deterministic and probabilistic seismic hazard analyses of building foundations in accordance with ASCE 4-16. In this section, the influence of the upper part of the geological section down to the foundation level is taken into account.

Keywords: surface response spectrum, accelerogram, seismic resistance, damping.

Обґрунтування цілісності та герметичності гермооб'єму та ГСО енергоблоку ВВЕР-1000 при розширених проєктних умовах категорії Б (важких аваріях)

Л.Ф. Первушова

Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

l.pervushova@ direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: захисна оболонка, герметизувальне сталеве облицювання (ГСО), РПУ (розширені проєктні умови) категорії Б (важка аварія), будівлі та споруди енергоблоків атомних станцій

Захисна оболонка реакторного відділення енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 є елементом системи глибокоешелонованого захисту реакторної установки. Надійність та працездатність захисної оболонки в умовах потенційно можливої аварії, забезпечується герметичним огородженням, а саме сумісною роботою залізобетонних огороджувальних конструкцій (ЗОК), зокрема, системою попередньої напруги захисної оболонки, та ГСО. Герметичне огородження входить до складу системи герметичного огородження локалізуючих систем безпеки (ЛСБ), яка забезпечує обмеження поширення радіоактивних речовин у навколишнє природне середовище під час важких аварій та захист персоналу і населення від іонізуючого випромінювання.

Розглянуті особливості розрахунку ЗОК та ГСО при важких аваріях, проаналізований досвід виконаних на даний момент розрахунків для різних енергоблоків та результати цих розрахунків та експериментальних досліджень. Акцент зроблений на обґрунтуванні цілісності та герметичності ГСО при важких аваріях. Проблема міститься в недостатній нормативно-методологічній базі для розрахунку ГСО, а також відсутності алгоритмів та методик розрахунку герметичності ГСО для ВВЕР-1000 в документах міжнародних та іноземних організацій МАГАТЕ, NRC, ASME та інших, оскільки реактори типу ВВЕР-1000 встановлені в обмеженому ряді країн.

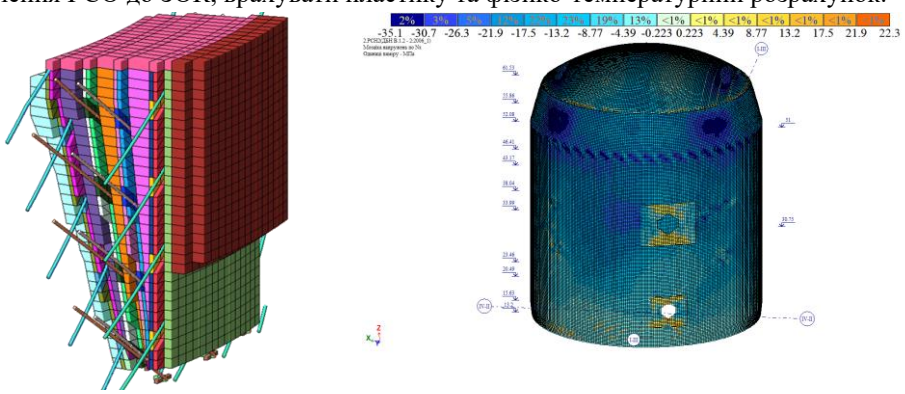
На сьогодні введені в дію документи [2],[3], які встановлюють нові вимоги до улаштування та безпечної експлуатації ЛСБ, в тому числі ГСО, при розширених проєктних умовах категорії Б (важких аваріях). Параметри оточуючого середовища попередньо консервативно прийняті: температура середовища в середині СГО – 250°С; тиск в середині СГО – 0,5 МПа.

До цих вимог розрахунки проводились для проєктної аварії. Результати розрахунків глобальної математичної скінчено-елементної моделі показали втрату стійкості та текучість матеріалу ГСО. Тому було проведено експериментальне дослідження фрагменту, моделюючого роботу ЗОК+ГСО під впливом температури 100°С та тиску 0,35 МПа, яке підтвердило збереження цілісності ГСО при заданих параметрах [1].

Наразі для оцінки працездатності ГСО аналітичним методом, враховуючи попередній досвід та значне підвищення параметрів при важких аваріях, розроблено дві окремі розрахункові моделі:

1. Глобальна розрахункова модель, яка моделює реальну траєкторію та зусилля в армоканатах (АК), призначена для визначення напружено-деформованого стану (НДС) в ГСО від власної ваги конструкцій, зусилля натягу АК та внутрішнього тиску при аварії.

2. Фрагмент циліндричної частини оболонки, який призначений для визначення НДС в ГСО від температурного впливу при РПУ категорії Б. Деталізована схема фрагменту дозволяє врахувати роботу закладних деталей та анкерних кріплень, реальних розмірів листів ГСО, зварних з'єднань, тим самим змоделювати піддатливе кріплення ГСО до ЗОК, врахувати пластику та фізико-температурний розрахунок.



а *б*

Рис. 1. Глобальна модель: *а* – візуалізація траєкторії АК в глобальній моделі ; *б* – результати розрахунку ГСО на комбінацію власної ваги конструкцій, зусилля натягу АК та внутрішнього тиску при аварії.

За результатом розрахунку двох розрахункових моделей буде визначений НДС ГСО. Такий підхід дозволяє зберегти прийнятну з точки зору обчислювальних витрат складність глобальної моделі з можливістю зміни значень зусиль АК для кожного енергоблоку для збереження універсальності розрахункової схеми, а також коректно врахувати вплив піддатливості закладних деталей на НДС ГСО при температурних впливах, та дозволити ітераційно визначити значення температури, при впливі якої аналітичними методами можна обґрунтувати герметичність ГСО.

1. Бамбура А.М., Сазонова І.Р., Карпенко О.А., Жарко Л.О. та ін., Експериментальні дослідження фрагменту попередньо напруженої захисної оболонки енергоблоку атомної станції. *Ядерна та радіаційна безпека*, (1(89), 2021, 49–58. https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(89).06.
2. НП 306.2.218-2018 «Правила улаштування та безпечної експлуатації ЛСБ»
3. НП 306.2.245-2024 «Загальні положення безпеки атомних станцій».

Justification of the integrity and leak-tightness of the Containment and the Containment Steel Liner (CSL) of a VVER-1000 power unit under Severe Accident Conditions (SAC)

L. Pervushova

Affiliated "SS STC" JSC "NNEGC "Energoatom", Kyiv, Ukraine.
l.pervushova@ direkcy.atom.gov.ua

The report is dedicated to the analytical justification of the Reinforced Concrete Containment (RCC) and the Containment Steel Liner (CSL), which together constitute the Containment and Confinement Systems forming part of the Safety Localization System under Severe Accident Conditions (SAC). The focus is placed on the ensuring the structural integrity and leak-tightness of the CSL under severe accidents, which is crucial for maintaining the functions of the Defence-in-Depth (DiD) strategy by isolating the reactor installation from the external environment and ensuring the retention and confinement of radioactive materials within the containment annulus in the event of potential severe accidents

Keywords: containment, containment steel liner (CSL), severe accident conditions (SAC), buildings and structures of nuclear power plant units

Досвід чисельного моделювання та оцінки міцності конструкцій будівель та споруд АЕС

М.С.Барабаш[a,б,1], О.В. Журавльов[a]

[a]ТОВ «ЛІРА САПР», Київ, Україна
[б]Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

[1]bmari.lira@gmail.com

Ключові слова: метод граничної сейсмостійкості, прямий динамічний метод, спектри відгуку, LIRA-FEM, показник HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure), акселерограма

У відповідь на сучасні виклики, ми розширюємо можливості LIRA-FEM для автоматизованого розрахунку захисних споруд та підвищення безпеки енергосистеми України. Зокрема, реалізовано методики аналізу сейсмостійкості АЕС відповідно до методу граничної сейсмостійкості.

За допомогою розрахункового комплексу LIRA-FEM виконується моделювання конструкцій спеціальних корпусів, вентиляційних труб, реакторних та турбінних відділень з урахуванням взаємодії з ґрунтовою основою, відповідно до державних будівельних норм України [1], рекомендацій МАГАТЕ та міжнародних стандартів. У розрахунках використовуються еквівалентні жорсткості та демпфери, визначені за стандартом ASCE 4-16, які далі інтегруються в моделі як демпферні та жорсткісні елементи. На рівні фундаменту до моделі прикладаються акселерограми, попередньо перетворені у відповідні сейсмограми.

Вплив сейсмограм розглядається по радіальному тангенціальному і вертикальному напрямах одночасно. Після розрахунку ми маємо результати НДС для кожного моменту часу. Це дає можливість побудувати анімації поведінки конструкцій під динамічним впливом. В кожному вузлі моделі отримуємо графіки амплітуди, прискорень, швидкостей. Використовуючи ці графіки ми можемо побудувати графіки спектрів (рис.1).

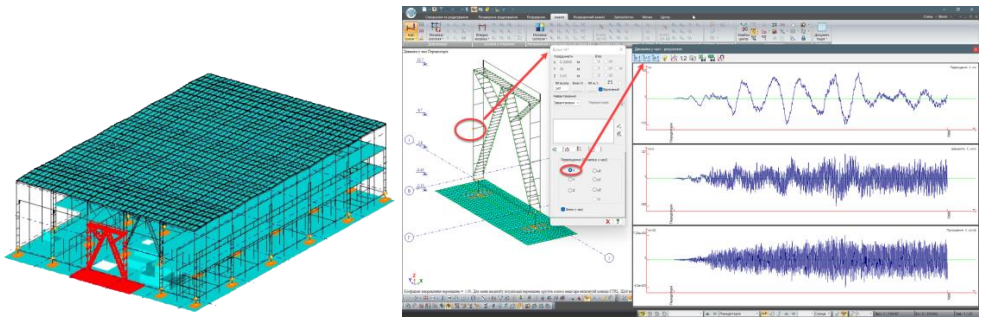


Рис. 1. Визначення зміни напружено-деформованого стану конструкції в часі

Розрахунки сейсмостійкості конструкцій виконуються прямим динамічним методом [2]. На кожній відмітці, де розташоване обладнання, що потребує перевірки, визначаються спектри відгуку, на основі яких в подальшому виконується оцінка

сейсмостійкості кожного елемента обладнання, необхідного для продовження експлуатації АЕС відповідно до програми підвищення безпеки.

Ця робота є особливо актуальною з огляду на те, що енергоблоки багатьох українських АЕС були зведені згідно з будівельними нормами, які вже не відповідають сучасним вимогам МАГАТЕ. Додатково на майданчиках АЕС встановлено системи сейсмомоніторингу, що забезпечують запис актуальних акселерограм, характерних для кожної конкретної станції. Розрахунки в LIRA-FEM виконуються вже на основі цих даних.

Завдяки реалізованим алгоритмам ми отримуємо повноцінний розрахунковий аналіз сейсмостійкості конструкцій і критичного обладнання, а також визначаємо інтегральний показник HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure), який є ключовим у контексті оцінки надійності роботи енергоблоків в умовах сейсмічного впливу.

1. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України: – [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд України.
2. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3038077155897509804?doc_type=2
3. Ю.В. Гензерський, М. С. Барабаш, І.О. Трусов, Л.Ф. Первушова. Методика оцінки сейсмостійкості будівельних конструкцій та споруд атомних електростанцій в ПК ЛІРА САПР. *Опір матеріалів і теорія споруд* №11, 2023.-С.125-139.

Experience in numerical modeling and structural strength assessment of NPP buildings and structures

M.S. Barabash[a,b1], D.Sc., Prof.

[a]LIRA SAPR Ltd., Kyiv, Ukraine
[b]State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine

[1]bmari.lira@gmail.com

The article examines the advanced capabilities of the LIRA-FEM software package for automating the structural analysis of Ukraine's energy system facilities amid modern security challenges. Particular attention is paid to the methodologies for seismic stability assessment of operating nuclear power plant (NPP) units within the framework of lifetime extension programs.
The study explores the algorithm for applying the direct dynamic method, the utilization of real accelerograms from seismic monitoring systems, and the generation of floor response spectra. The key result of the analysis is the determination of the integral reliability indicator HCLPF, which allows for an objective safety assessment of critical NPP equipment and structures under increased seismic impact levels.

Keywords: Seismic Margin Assessment (SMA), Time-History Analysis, Response Spectra, LIRA-FEM, HCLPF capacity (High Confidence of Low Probability of Failure), Accelerogram.

Визначення еквівалентних внутрішніх зусиль у пластинних аналогах методом скінченних елементів у LIRA-FEM при оцінці міцності будівельних конструкцій АЕС

М.А.Ромашкіна

ТОВ «ЛІРА САПР», Київ, Україна

romashkina.liraland@gmail.com

Ключові слова: пластинний аналог, об’ємні скінченні елементи, LIRA-FEM, інтегрування напружень, внутрішні зусилля, підбір армування, масивні конструкції.

При оцінці міцності і тримкості одним із важливіших етапів моделювання є вибір скінченних елементів (СЕ). СЕ підбираються таким чином щоб врахувати певні припущення та відворити умови роботи будівельних конструкцій АЕС максимально близькими до реальних. У випадках, коли конструктивний елемент, змодельований за допомогою об'ємних скінченних елементів, за характером роботи відповідає пластинам (ДБН В.2.6-98:2009 [1]), для коректного моделювання та подальшого аналізу доцільно застосовувати пластинні аналоги (ПА). Такий підхід забезпечує зручний аналіз внутрішніх зусиль, дозволяє виконувати перевірку міцності та тримкості, а також подальше моделювання елементів відповідно до вимог нормативних документів.

У LIRA-FEM 2025 реалізована система пластинних аналогів, яка дає змогу аналізувати складені конструкції, змодельовані об’ємними скінченними елементами (наприклад, плити великої товщини, тунелі, дамби тощо), у вигляді еквівалентних пластинних елементів.

Пластинний аналог (ПА) - це група скінченних елементів, об’єднаних логічним правилом для обчислення зусиль у так званих цільових пластинах.

Процес визначення зусиль складається з таких етапів:

1) Геометричний пошук: Для кожної цільової пластини формується напрямок пошуку об’ємних елементів, який визначається променем, проведеним перпендикулярно до площини пластини - уздовж її локальної осі Z1.

2) Визначення точок інтерполяції: промінь проходить крізь об’ємні елементи, визначаючи точки входу та виходу, у яких обчислюється тензор напружень шляхом інтерполяції значень із вузлів граней елементів (рис. 1, а).

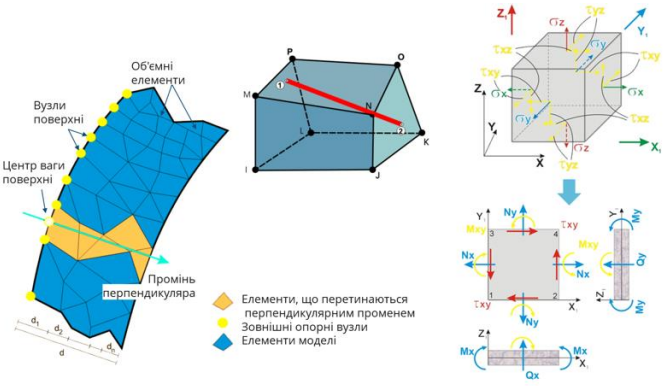
3) Група тензорів напружень визначається для всіх точок перетину вздовж променя:

$$\bar{\bar{\sigma}}_i^G = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_2 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_3 \end{bmatrix}, \; i = 1, n$$

де n – це кількість граней елементів, які перетинає промінь.

4) Інтегрування: підсумкові внутрішні зусилля у центрі цільової пластини ПА визначаються на основі напружень у вихідних об’ємних елементах. Мембранні сили ПА визначаються шляхом інтегрування нормальних і дотичних напружень за товщиною конструкції, згинальні моменти — шляхом інтегрування добутку

напруження на відповідну координату за товщиною, а поперечні сили — шляхом інтегрування дотичних напружень за товщиною [2] (рис.1, б).



а *б*

Рис. 1. Визначення зусиль у пластинному аналогові: *а* – пошук об'ємних елементів (ОЕ) уздовж променів, перпендикулярних до площини цільової пластини; *б* – інтеграція напружень по товщині ОЕ для визначення внутрішніх зусиль у цільовій пластині

1. ДБН В.2.6-98:2009. *Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі зміною №1. Актуалізований текст в останній редакції із внесеними змінами*: – [Чинні від 2011-06-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200410998024438840
2. Ingeciber, S.A., *CivilFEM Theory Manual*, Madrid, Spain, 2024. [Електронний ресурс]. Available: https://www.civilfem.com/

Determination of Equivalent Internal Forces in Plate Analogs Using the Finite Element Method in LIRA-FEM

M.A. Romashkina[a1], PhD

[a] LIRA SAPR Ltd., Kyiv, Ukraine

[1]romashkina.liraland@gmail.com

The problem of reinforcement design for massive structural elements modeled using 3D solid finite elements but behaving structurally as plates or shells is considered. To address this task, the software package LIRA-FEM 2025 implements the "Plate Analogues" (PA) tool, which enables the correct transformation of the complex stress tensor of a solid model into the internal forces of plate elements. The method is based on integration of stresses obtained in the original solid finite elements in order to determine equivalent sectional forces and moments in the cross-sections of the target plates. The resulting integral values make it possible to analyze the stress–strain state of the structure in the conventional form of shell internal forces commonly used in engineering design. This approach eliminates the need for manual stress averaging and enables automated reinforcement design in accordance with Eurocode or the Ukrainian national standards DBN.

Keywords: plate analogue, solid finite elements, LIRA-FEM, stress integration, internal forces, reinforcement selection, massive structures.

Нові обчислювальні методи динаміки конструкцій у LIRA-FEM: ритц-вектори, модальний аналіз із демпфуванням, модальна суперпозиція для оцінювання міцності елементів конструкцій обладнання АЕС

Б. Ю. Писаревський[1], PhD

Технічний центр НАН України, Київ, Україна

[1]mikst1234@gmail.com

Ключові слова: динаміка конструкцій, навантажувально-залежні ритц-вектори, модальний аналіз, демпфування, метод модальної суперпозиції, LIRA-FEM

Сучасні задачі динаміки конструкцій пов'язані із прогнозуванням реакції споруди на сейсмічні, вібраційні, імпульсні та техногенні впливи. Для елементів АЕС, зокрема опорних систем, рам, металоконструкцій, трубопроводів і допоміжного обладнання, адекватне врахування динамічних ефектів є важливою умовою забезпечення міцності, працездатності та експлуатаційної безпеки.

Класичний модальний підхід забезпечує повне розкладання рівнянь руху лише у випадку пропорційного демпфування [1]. Якщо матриця демпфування є непропорційною виникає потреба у використанні комплексних форм. У літературі [2] такий підхід пов'язують із переходом від системи другого порядку з матрицями *K, C, M* до узагальненої задачі на власні значення блочного вигляду

$$Av - \lambda Bv = 0 \qquad (1),$$

де $A = [M0][0 - K]$ та $B = [0M][MC]$.

Це означає перехід від спрощених моделей демпфування до більш універсальних алгоритмів, придатних для аналізу споруд з локальними демпферами, комбінованими матеріалами.

Для великих скінченно-елементних моделей класичний підхід, що базується на наборі власних форм, часто виявляється надмірно витратним з огляду на обчислювальні ресурси.

Одним із методів скорочення розмірності є використання ритц-векторів, які орієнтовані на характер зовнішнього навантаження. У роботах [3, 4] показано, що суперпозиція ритц-векторів здатна досягати тієї самої точності за меншої кількості векторів, ніж суперпозиція точних власних форм. Для конструкцій АЕС це дає можливість більш ефективного врахування реальних схем динамічного впливу, зокрема сейсмічних інерційних навантажень, вібрацій від роботи агрегатів і локальних імпульсних впливів.

Метод модальної суперпозиції [5] один з ефективних методів обчислення динамічної відповіді. Його перевага полягає в переході від великої системи рівнянь у фізичних координатах до меншої системи в модальних координатах. У випадку вдалого вибору базису - власних форм або ритц-векторів - можна значно зменшити обсяг обчислень без помітної втрати точності. Наприклад, у великорозмірних скінченно-елементних моделях цей підхід забезпечує помітне скорочення часу розрахунку, яке в окремих випадках може становити близько 30%.

Таким чином, реалізація в LIRA-FEM нових підходів до динамічного розрахунку конструкцій дає можливість точніше враховувати властивості елементів обладнання

АЕС, характер демпфування та особливості зовнішнього навантаження при одночасному скороченні часу розрахунку. Це підвищує ефективність оцінювання міцності, жорсткості та динамічної надійності конструкцій.

1. Barabash M. Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR programm)/ M. Barabash, B. Pisarevskyi, Y. Bashynskyi // *Civil and Environmental Engineering*, 2020. – Vol. 16, Issue 1, P. 63-70. https://doi.org/10.2478/cee-2020-0007
2. Silvano Erlicher, Pierre Argoul. Modal identification of linear non-proportionally damped systems by wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21, pp.1386-1421.
3. Ibrahimbegovic A., Chen H. C., Wilson E. L., Taylor R. L. *Ritz Method for Dynamic Analysis of Large Discrete Linear Systems with Non-Proportional Damping* // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1990. Vol. 19, No. 6. P. 877–889. https://doi.org.10.1002/eqe.4290190608.
4. Wilson E. L., Yuan M. W., Dickens J. M. *Dynamic Analysis by Direct Superposition of Ritz Vectors* // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1982. Vol. 10, No. 6. P. 813–821.
5. Joo, K.-J., Wilson, E. L., & Léger, P. (1989). Ritz vectors and generation criteria for mode superposition analysis. *Earthquake Engineering & StructuralDynamics*,18(2),149-167. https://doi.org/10.1002/eqe.4290180203

New Computational Methods for Structural Dynamics in LIRA-FEM: Load dependent Ritz Vectors, Modal Analysis with Damping, Mode Superposition method for Strength Assessment of Structural Elements of NPP Equipment

B. Y. Pysarevskyi[a1], PhD

[a]Technical center of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1]mikst1234@gmail.com

The paper considers approaches to the dynamic analysis of structures in the LIRA-FEM software package. The limitations of the classical modal approach in the case of non-proportional damping are discussed, and the need to use complex vibration modes is substantiated. An approach based on the transformation of the second-order system into a generalized block eigenvalue problem is presented. Special consideration is given to Ritz vectors as an effective tool for model order reduction and for constructing a basis consistent with the character of external loading. It is shown that the use of Ritz vectors together with the modal superposition method makes it possible to reduce computational effort without significant loss of accuracy. The practical efficiency of these approaches is emphasized for large finite element models, as well as for structures with local dampers and combined materials. It is concluded that new computational methods in structural dynamics allow a more complete consideration of structural behavior while reducing computation time.

Keywords: structural dynamics, load-dependent Ritz vectors, modal analysis, damping, mode superposition method, LIRA-FEM.

Підходи до розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації кабельних конструкцій енергоблоків АЕС

А. А. Келін[1], Т.П. Донець[2]

Філія «ВП «Науково-технічний центр», АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1] a.kelin@direkcy.atom.gov.ua; [2] t.donets@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: кабельні конструкції, сейсмостійкість, строк експлуатації, продовження строку експлуатації, мозаїка напружень.

Для безпечного та надійного функціонування АЕС у понад проєктний період експлуатації необхідно забезпечити належне функціонування технологічного обладнання, конструкцій будівель та споруд. Кабельні конструкції виконують важливі функції при нормальній експлуатації, порушенні нормальної експлуатації та при виникненні вихідних подій. Враховуючи зазначене, а також з урахуванням великої кількості конструкцій застосованих на АЕС для безпечної експлуатації кабельних конструкцій у понад проєктний період необхідно виконувати ряд заходів, а саме:

- виконання обходів усіх кабельних трас енергоблока з метою визначення найбільш навантажених кабельних конструкцій та конструкцій які мають дефекти та пошкодження;
- визначення представницьких кабельних конструкцій та їх натурне обстеження згідно [1] для подальшого розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації;
- розрахункове обґрунтування безпечної експлуатації кабельних конструкцій, а саме визначення міцності, сейсмостійкості, гнучкості та стійкості з урахуванням положень [2,3].

Під час довгострокової експлуатації через постійні модернізації систем безпеки існуючі кабельні конструкції з часом доповнюються кабелями через що виникає надмірне навантаження (перевантаження), тому методологічну основу дослідження технічного стану кабельних конструкцій становлять візуальні обстеження конструкцій, співставлення термінів експлуатації та фактичного навантаження зі встановленими нормативними значеннями і використання методу скінченних елементів (МСЕ) для побудови скінчено-елементних моделей (СЕМ) представницьких конструкцій.

Оскільки модернізації обладнання – процес постійний, періодичні натурні обстеження конструкцій дають змогу зафіксувати наявні перевищення допустимого навантаження, а також надмірні деформації та осередки появи корозії. Для таких представницьких конструкцій необхідно виконати чисельне моделювання для оцінки фактичних напружень що виникають при «НЕ» та «НЕ+МРЗ», «НЕ+ПА+МРЗ».

В публікації [4] висвітлюються питання особливостей розробки СЕМ, визначення сейсмостійкості та методу граничної сейсмостійкості (МГС) .

Зміна вимог нормативних документів зумовлює необхідність перегляду підходів до моделювання конструкцій та обладнання АЕС. Також слід відзначити що деякі коефіцієнти можуть мати різні значення в декількох нормативних документах. Так значення коефіцієнтів сполучення навантаження ψ можуть відрізнятись в межах від 0,7 до 1,0. Значення коефіцієнту k_1, що враховує непружні деформації і локальні

пошкодження може прийматись в межах від 0,5 до 1,0 в залежності від категорії сейсмостійкості обладнання та відповідальності об'єкту. З урахуванням відповідальності для функціонування АЕС кабельних конструкцій, забезпечення ними виконання покладених функцій та врахуванням консервативних підходів щодо безпеки АЕС слід проводити додаткові аналізи при визначені значень коефіцієнтів.

Запропоновані підходи до оцінки технічного стану кабельних конструкцій дозволяють обґрунтувати безпечне та надійне функціонування і продовжити термін експлуатації з урахуванням їх поточних умов експлуатації та технічного стану.

1. ПМ-Т.0.03.338-24 «Типова програма обстеження технічного стану та продовження строку експлуатації кабельних конструкцій енергоблоків АЕС»
2. МТ-Т.0.41.326-22 «Методика розрахункового аналізу сейсмостійкості елементів діючих АЕС у рамках методу граничної сейсмостійкості»
3. МТ-Т.0.03.185-23 Методика оцінки сейсмостійкості кабельних трас енергоблоків АЕС
4. М.А. Мустафін, Д.І. Рижов, О.П. Шугайло та ін., Особливості застосування методу граничної сейсмостійкості при оцінці конструкцій, систем та елементів атомних електростанцій за допомогою розрахункових комплексів, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Київ (2020). https://doi.org/10.15407/pmach2020.01.046

Approaches to the calculation-based justification of safe operation of cable structures in nuclear power plant units

A. Kelin[1], T. Donets [2]

Affiliate «Separate Subdivision «Scientific and Technical Centre» of the Joint Stock Company «National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom»

[1] a.kelin@direkcy.atom.gov.ua; [2] t.donets@direkcy.atom.gov.ua

The paper presents approaches to the justification of safe operation of cable structures of nuclear power plant units during long-term operation beyond the design lifetime. The methodology includes inspection of cable routes, identification of representative structures, and numerical modeling using the finite element method. The calculations allow evaluation of the stress–strain state, strength, and seismic resistance of the structures. If the calculated stresses exceed allowable values, strengthening measures are proposed to ensure safe operation.

Keywords: cable structures, seismic resistance, service life, service life extension, stress mosaic.

Оцінка цілісності підземних трубопроводів системи технічного водопостачання відповідальних споживачів АЕС при обґрунтуванні довгострокової експлуатації

А. Богдан[a1], В. Гусак[b], В. Антонченко[a]

[a] ТОВ «ІПП-ЦЕНТР», Київ, Україна.
[b] Філія «ВП «Хмельницька АЕС» АТ «НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ», Нетішин, Україна

[1] bohdan-av@ipp-centre.com.ua

Ключові слова: підземний трубопровід, сейсмічні впливи, землетрус, довгострокова експлуатація, взаємодія трубопроводу та ґрунту, лінійно-спектральний метод.

Відповідно до звіту [1] (2018), програми управління старінням (ПУС) для підземних трубопроводів системи технічного водопостачання відповідальних споживачів (ПТ СТВВС) АЕС ще не довели свою ефективність через відносно недавнє впровадження.

У контексті довгострокової експлуатації (ДСЕ) виникають дві ключові проблеми. Перша пов’язана з підземним розташуванням трубопроводів, що обмежує можливість їх контролю традиційними методами. Відповідно, обґрунтування безпечної експлуатації базується на діагностуванні доступних ділянок і застосуванні непрямих методів неруйнівного контролю.

Друга проблема стосується оцінки міцності розгалужених трубопроводів, оскільки методи розрахунку для підземних систем менш розвинені та верифіковані порівняно з іншим обладнанням АЕС.

Метою дослідження є узагальнення досвіду обґрунтування ДСЕ ПТ СТВВС для українських АЕС. Робота включає огляд методів неруйнівного контролю та чисельне моделювання для оцінки міцності. В Україні такі оцінки регламентуються документом [2], розробленим на основі [3], який містить підходи до врахування специфічних навантажень при статичному аналізі, але не дає однозначних рекомендацій щодо сейсмічних впливів для розгалужених систем.

Документом [2] при сейсмічному аналізі рекомендуються враховувати два типи навантаження: залишкові ґрунтові деформації, викликані землетрусом, та звичайні коливальні навантаження. У зв’язку з відсутністю чіткої методики визначення коректного значення залишкових ґрунтових деформацій після сейсмічного впливу, як вхідні дані авторами використовуються сейсмічні акселерограми відповідної інтенсивності.

Напружено-деформований стан при дії постійних ґрунтових переміщень визначається за допомогою нелінійного чисельного розв’язку задачі взаємодії «труба–ґрунт» (Рис. 1). Для коливальних навантажень при сейсмічному впливі в роботі запропоновано ефективну чисельну модель розгалуженого трубопроводу, засновану на лінійно-спектральному методі.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для удосконалення методів оцінки цілісності ПТ СТВВС, представлених в існуючих нормативних документах та, як наслідок, забезпечити безперешкодне обґрунтуванню ДСЕ ПТ СТВВС.

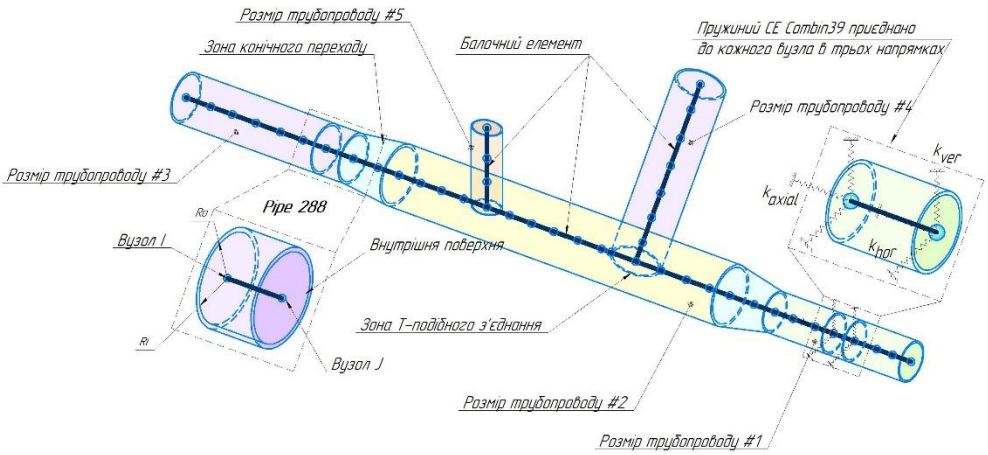


Рис. 1. Числова модель взаємодії трубопроводу та ґрунту.

1. European Nuclear Safety Regulators Group. (2018, October). *1st topical peer review report on ageing management*.
2. *Методика расчета на прочность подземных трубопроводов системы технического водоснабжения ответственных потребителей ОП «Запорожская АЭС» с учетом сейсмических воздействий* (00.ГЦ.VF/VG.MT.02-14).
3. American Society of Civil Engineers. (2001). *Guideline for the design of buried steel pipe*.

NPPs Essential Service Water Systems Buried Pipelines Integrity Assessment for LTO Justification

A. Bohdan[a1], V. Antonchenko[a], V. Gusak[b]

[a]IPP-Centre LLC, Kyiv, Ukraine
[b]Khmelnytskyi Nuclear Power Plant, Netishyn, Ukraine

[1] bohdan-av@ipp-centre.com.ua

According to the ENSREG report (2018), ageing management programmes (AMPs) for buried pipelines at nuclear power plants have not yet proven their effectiveness. In the context of long-term operation (LTO), two main challenges arise: limited accessibility for inspection due to underground location and insufficiently developed methods for strength assessment of multibranched pipelines. This study presents recent experience in LTO justification for Ukrainian NPP buried pipelines, including non-destructive testing approaches and numerical modelling techniques. Seismic analysis considers both permanent ground-induced deformation and dynamic loading. A nonlinear pipe–soil interaction model and a linear spectral method for multibranched systems are applied. The results support improvement of integrity assessment methods and enhance the reliability of LTO justification.

Keywords: buried pipeline, seismic effects, earthquake, long-term operation (LTO), pipe–soil interaction, response spectrum method

IAEA activities in support to long term operation and ageing management

G. Petofi

IAEA, Vienna, Austria

e-mail: G.Petofi@iaea.org

As of March 2025, 55% of the 413 nuclear power reactors operating are beyond 40 years, while the average ages is above 33. To achieve a Net Zero Emission Goal by 2050 and ensure energy security under the complex geopolitical situation, long term operation (LTO) of nuclear power plants has become a top priority for many nuclear power fleets.

The International Atomic Energy Agency (IAEA) supports Member States in LTO preparation and management of ageing through the publication of related safety standards, ensuring platforms for information and experience exchange, like the International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL) programme and providing the Safety Aspects of Long Term Operation (SALTO) peer review service to assist in the application of these standards.

The most important requirements in these topics are included in the IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1), while detailed guidance is available in the SSG-48 document published in 2018. The revision of SSG-48 started in 2025 and 36 review aspect were identified to improve it.

The SALTO peer review service and the IGALL programme form the backbone of the IAEA's support in the implementation of these safety standards. The two initiatives work in close cooperation, complementing each other by providing a solid foundation of technical guidance, good practices, and evaluation mechanisms that help Member States enhance the safety and reliability of their nuclear power plants throughout their operational lifetime.

The presentation will focus on the SSG-48 revision and it will give an overview of the SALTO missions and the current tasks implemented in the IGALL programme.

OECD/NEA Project on 'LTO Beyond 60 Years' and LTO Beyond 60 Years Perspectives

Robert Krivanek, Ph.D.[a1]

[a]Research and Development Manager, Strategy and Business Development, UJV Rez, Rez, Czech Republic.

[1] robert.krivanek@ujv.cz

Keywords: Ageing management; long term operation; nuclear power plant; structures; components; nuclear safety.

The objective of this paper is to describe objectives, scope and results of the OECD/NEA research project 'LTO beyond 60 Years'. 'LTO beyond 60 Years' was a collaborative task with the objective to perform a survey and provide an overview of the current status of knowledge regarding long term operation (LTO) of nuclear power plants, and to determine the gaps in knowledge and technology which need to be addressed, to enable safe LTO of NPPs beyond 60 years. It builds on previously published articles [1-3] as well as electricity market studies [4]. The key results of the project were published as an OECD Nuclear Energy Agency status report [5].

The study was focused mainly on pressurized water reactors, including VVERs, being the most common design, but the study also considered other major designs like boiling water reactors and pressurized heavy water reactors. This task was performed in cooperation with international nuclear organizations, utilities operating nuclear power plants, regulatory authorities, research institutes and technical support organizations. A project team of approximately 85 experts from 14 countries and 3 international organizations (including OECD/NEA, IAEA, WNA) was established to perform project tasks. The work was coordinated by R.Krivanek, NRG and C.Mocanu, NRG in October 2022 to September 2024 and in later phase by R.Krivanek, UJV and S.Kumar, NRG in October 2024 until project completion in June 2025. The final project report was published by the OECD/NEA in January 2026 [5].

Firstly, the project aimed in identification of what is known with regard to technical (but also non-technical) challenges important for LTO beyond 60 and safety requirements important for LTO beyond 60, incorporating both laboratory and operational experience knowledge in a status report. Secondly, the 'existing gaps in the current knowledge state' were assessed to identify possible 'areas for enhancement'. The final part of the report recommends actions to address the areas of enhancement identified. The recommendations are exclusive and up to each individual organization (e.g., periodic component replacement at prescribed intervals may work just as well as launching into research to better understand ageing progression and remaining life).

The 'LTO beyond 60 Years' project report achieved to describe the status of knowledge regarding LTO of nuclear power plants and determine the areas for enhancement in knowledge and technology which need to be addressed, to enable safe LTO of nuclear power plants beyond 60 years.

68 areas for enhancement identified as the project outcome represent broad portfolio of topics which needs to be addressed in upcoming years by relevant organizations and institutes

to secure safe LTO beyond 60 years. Dispositioning of areas for enhancement could lead to activities of the following types:

- Research and development projects to fully characterize and manage ageing effects;
- Development of new/enhanced testing, monitoring, inspection, diagnostics or repair methods;
- Training on ageing management and LTO preparation;
- Development of codes, standards, procedures, methodologies;
- Other solutions (e.g., extended collaborative network for obsolescence/supply chain issues).

After completion of the OECD Nuclear Energy Agency project, multiple dissemination activities were performed. It includes also presentations for WANO LTO Sub-group meeting and WANO Equipment Reliability Working Group, paper and presentation for SMiRT28 conference, presentation in European Nuclear Society webinar, presentation in IAEA International Generic Ageing Lessons Learned Steering Committee meeting, presentation in EU OFFERR Steering Committee meeting, OECD Nuclear Energy Agency workshop focused on the results of the project. This effort should reach out to all major players involved in LTO of nuclear power plants such as operators, regulators, universities, support and research organizations, and encourage them to initiate dispositioning of identified areas for enhancement.

1. R. Krivanek, J. Fiedler, Main deficiencies and corrective measures of nuclear power plants in ageing management for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design 323, 78–83 (2017), doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.07.035.
2. R. Krivanek, J. Fiedler, Main corrective measures in an early phase of nuclear power plants' preparation for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design 316, 125–130 (2017), doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.03.002.
3. R. Krivanek, Factors limiting lifetime of nuclear power plants with pressurized-water reactors, Nuclear Engineering and Design 370 110872 (2020), doi: 10.1016/j.nucengdes.2020.110872.
4. International Energy Agency, Electricity Market Report, IEA (2022).
5. OECD Nuclear Energy Agency, Status Report on Long Term Operation beyond 60 Years, Paris, France (2026).

Нормативні особливості оцінки ресурсу корпусу реактора ВВЕР-440 у період після відновлювального відпалу

О. В. Тригубенко[a1], Е.М. Чалий[a], С.А. Радченко[a], В.М. Ревка[б]

[a]Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна
[б]Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

[1] o.trygubenko@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: корпус реактора ВВЕР-440, радіаційне окрихчування, зразки-свідки, критична температура крихкості, відновлювальний відпал.

Особливістю багатьох корпусів реакторів (КР) ВВЕР-440 є підвищений вміст фосфору і міді в металі зварного шва (ЗШ) № 4, що призводить до прискореного окрихчування матеріалу і обмеження ресурсу КР. Одним із ефективних заходів, що суттєво зменшує наслідки радіаційного пошкодження металу КР є термічний відпал. Відпал зазвичай проводять з метою відновлення механічних властивостей та температури крихко-в'язкого переходу матеріалів. У період з 1987 по 2021 роки проведено відновлювальний відпал більшості корпусів реакторів ВВЕР-440, що мають хімічний склад з високим вмістом домішок P і Cu.

В Україні цю роботу було проведено для одного з корпусів ВВЕР-440 у період 2009-2010 років і вона була ключовою умовою для подовження ресурсу енергоблоку на понадпроектний період експлуатації.

Ресурс КР фактично визначається досягненням критичної температури крихкості (КТК) металу T_K гранично допустимої температури T_{ka}, яка встановлюється за результатами розрахунків на опір крихкому руйнуванню. Ця умова діє як для первинного опромінення (до відпалу), так і повторного (після відпалу).

Під час первинного опромінення визначення критичної температури крихкості можливе за нормативною кривою окрихчування, наведеною у нормах ПНАЕ Г-7-002-86 [1], форма якої залежить від хімічного складу металу, зокрема від вмісту фосфору і міді у зварному шві, або на основі результатів випробувань зразків-свідків (ЗС), виготовлених із металу відповідного корпусу.

Разом з тим, для деяких корпусів ВВЕР-440 характерною є неоднорідність металу ЗШ № 4 за вмістом фосфору. За результатами поведення хімічного аналізу ЗС виявлено градієнт концентрації фосфору зі збільшенням його вмісту від кореня шва до поверхні [2]. Така особливість обмежує стандартне використання зразків-свідків для оцінки окрихчування металу КР. У зв’язку з цим, програма ЗС на період після відновлювального відпалу повинна враховувати цей аспект, тобто включати групи зразків з консервативною концентрацією шкідливих домішок. У випадку, якщо архівного матеріалу досліджуваного КР недостатньо для виконання цієї умови, до програми ЗС додаються декілька матеріалів зварних швів, виготовлених за штатною технологією корпусів реакторів ВВЕР-440, з різним вмістом фосфору, включаючи консервативне значення. При цьому зразки-свідки нової програми використовуються не для визначення форми кривої окрихчування, а для підтвердження консервативності прийнятої в обґрунтуванні безпечної експлуатації моделі окрихчування. Згідно з

нормативно-технічним документом [2] для КР ВВЕР-440 має застосовуватись модель окрихчування, яка в літературі вказується як модель «горизонтального зсуву» [3].

Зазначений підхід до визначення КТК під час повторного опромінення після відновлювального відпалу не регламентується чинними національними нормативними документами і наведений лише у застарілому документі рф [2].

У роботі виконано аналіз застосування такого підходу під час оцінювання ресурсу корпусу реактора після відновлювального відпалу. Показано, що використання застарілих методичних положень може призводити як до недооцінки швидкості радіаційного окрихчування, так і до внесення надлишкового консерватизму під час прогнозування ресурсу КР. Запропоновано альтернативний підхід, який базується на узагальненні оцінювання окрихчування корпусів реакторів ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 та забезпечує обґрунтований рівень консерватизму.

Із застосуванням запропонованого підходу виконано оцінку ресурсу КР енергоблоку ВВЕР-440, що за певних умов дозволяє обґрунтувати безпечну експлуатацію корпусу протягом періоду близько 60 років. Водночас для випадку планування подальшої експлуатації енергоблоку понад 60 років визначено перелік необхідних випереджувальних заходів, зокрема переоцінку гранично допустимої температури крихкості, можливість повторного відновлювального відпалу КР та розроблення нової програми ЗС.

1. ПНАЭ Г 7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
2. H.-W. Viehrig, U. Rindelhardt, J. Schuhnecht., Postmortem Investigation of NPP Graifswald WWER-440 Reactor pressure Vessel, Proceeding of 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Toronto, Canada, August 12-17, 2007, paper 1458.
3. МКТ 02-98 «Методика определения КТХ КР при его эксплуатации после отжига», Москва 1998 г.
4. J. Kohopaa, R. Ahlstrand, Re-embrittlement behaviour of VVER-440 reactor pressure vessel weld material after annealing, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **77**, 575–584 (2000). https://doi.org/10.1016/S0308-0161(00)00029-6

Regulatory features of the VVER-440 RPV life assessment for the period after recovery annealing

O. Trygubenko[a1], E. Chalyi[a], S. Radchenko[a], V. Revka[b]

[a]Affiliate “SS “Scientific and Technical Centre” of JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine.
[b]Institute for Nuclear Research, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] o.trygubenko@direkcy.atom.gov.ua

The paper analyzes the application of the current approach in assessing the reactor pressure vessel (RPV) life after recovery annealing. It is shown that the use of outdated methodological provisions may lead to an underestimation of radiation embrittlement rate or, conversely, excessive conservatism in predicting the RPV life. An alternative approach, which is based on generalization of the assessment of VVER-440 and VVER-1000 reactor pressure vessels embrittlement and provides a reasonable level

of conservatism is proposed. The assessment of the VVER-440 RPV life was performed using the proposed approach, which, under certain conditions, allows justifying the safe operation of the RPV for a period of about 60 years. At the same time, for the case of planning further operation of the power unit for more than 60 years, a list of necessary preventive measures has been determined, in particular, reassessment of the maximum permissible temperature of brittleness, RPV re-annealing, and development of a new surveillance program.

Keywords: VVER-440 reactor pressure vessel, radiation embrittlement, surveillance-specimens, critical temperature of brittleness, recovery annealing.

Створення бази даних матеріалів корпусів реакторів АЕС за підсумками реалізації проєкту ENTENTE (EURATOM)

С. М. Банько[1], О. П. Шугайло, Д. С. Брік, А. М. Колупаєв

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ, Україна

[1]sm_banko@sstc.ua

Ключові слова: ENTENTE, база даних, моделювання, експеримент, окрихчення.

Безпечна довгострокова експлуатація АЕС критично залежить від програм управління старінням, де ключовим об'єктом є корпус реактора. Головним викликом є деградація властивостей металу (зміцнення та окрихчення) під впливом постійного нейтронного опромінення, що потребує ретельного дослідження та оцінки цілісності.

Проєкт ENTENTE (2020–2024) [1] був спрямований на створення передової європейської бази даних для багатомасштабного моделювання радіаційного пошкодження сталей корпусів реакторів [2]. Основна мета полягала в інтеграції експериментальних і модельних даних з дотриманням принципів FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability and Reusability) – можливість знайти, доступність, взаємодія та багаторазове використання.

Проєкт ENTENTE базується на трьох ключових напрямах:

– розроблення бази даних: створення архітектури та уніфікованих форматів для автоматизації управління, зберігання та обміну експериментальними й модельними даними;

– експерименти та моделювання: дослідження та моделювання зміни міцнісних характеристик сталі корпусів реакторів під впливом радіаційного опромінення;

– інноваційний аналіз та гібридні моделі: застосування машинного навчання та новітніх симуляцій для зв'язку мікроскопічних явищ із макроскопічними властивостями та схильністю матеріалів до руйнування [3].

Важливим результатом проєкту стала розробка уніфікованих форматів даних у вигляді Excel-шаблонів для різних методик, зокрема: механічних випробувань, трансмісійної електронної мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії, атомно-зондової томографії, даних моделювання [4-5] тощо.

У межах проєкту ДНТЦ ЯРБ доклав вагомих зусиль у наповненні та верифікації бази даних, підготувавши масиви відомостей про механічні властивості (розтяг, ударний згин) металу корпусів реакторів ВВЕР-440 після відновлювального відпалу та повторного опромінення. Окрім цього, фахівці ДНТЦ ЯРБ разом із партнерами FRA-G та HZDR здійснювали технічне тестування інтерфейсу платформи, що дозволило усунути помилки завантаження та оптимізувати процес подання даних.

Офіційний запуск платформи відбувся 11 червня 2024 року. Створена база даних дозволяє уникати дублювання експериментів та забезпечує надійну основу для управління старінням і оцінки цілісності компонентів АЕС під час довгострокової експлуатації.

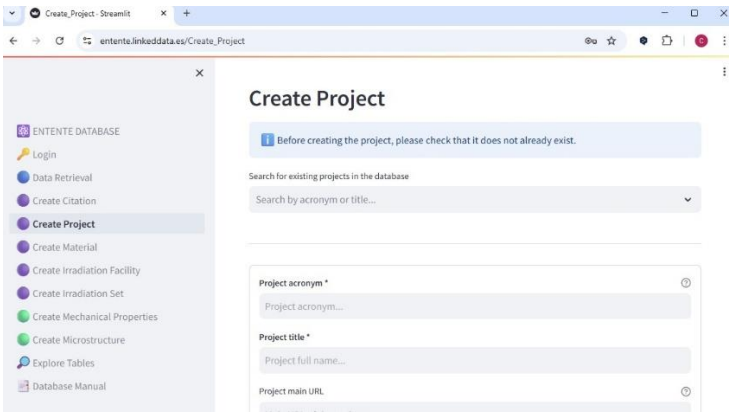


Рис. 1. Інтерфейс бази даних

1. https://snetp.eu/portfolio-items/entente-2/
2. Grant Agreement number: 900018 – ENTENTE – NFRP-2019-2020.
3. С. М. Банько, О. П. Шугайло, Д. С. Брік, А. М. Колупаєв, Участь ДНТЦ ЯРБ у створенні бази даних щодо властивостей матеріалів корпусів реакторів АЕС у межах міжнародного проєкту ENTENTE. *Ядерна та радіаційна безпека* 4(104).2024. https://doi.org/10.32918/nrs.2024.4(104).02
4. Malerba L., Serrano M., Perez M. S., Arenas J., Sanahuja J., Karlsen W., Chekhonin P., Styman P., Ulbricht A., Bonny G., Hein H., Olsson P., Becquart C., Monnet G., Brumovski M., Costa D. *ENTENTE Data ommittees kick-off meeting*, 18 january 2021.
5. Serrano M., Hein H. and et al. Deliverable D2.3 – *Metadata and data format: Mechanical properties*. Entente Project, 2022.

Creation of a database of NPP reactor vessel materials based on the results of the ENTENTE project (EURATOM)

S. Banko[1], O. Shugailo, D. Brik, A. Kolupaiev

State Enterprise “State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, Kyiv, Ukraine.

[1] sm_banko@sstc.ua

The ENTENTE project focused on the development of a database of reactor vessel materials exposed to neutron irradiation. The project created a platform for managing experimental and model data based on the FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability and Reusability) principles. The SSTC NRS provided reliable datasets on the mechanical properties of the VVER-440 reactor vessel metal after annealing and re-irradiation. The project results, including unified data formats and artificial intelligence-based analysis tools, are aimed at supporting the safety and integrity of nuclear reactors during long-term operation.

Keywords: ENTENTE, database, modelling, experiment, embrittlement.

Особливості обґрунтування безпечної експлуатації КР ХАЕС-1 для ДСЕ

М. Заразовський[a1], С. Агеєв[a], В. Гусак[b]

[a]ТОВ «ІПП-Центр», Київ, Україна
[b]Філія «ВП «Хмельницька АЕС», Нетішин, Україна

[1] zarazovskii-mm@ipp-centre.com.ua

Keywords: критична температура крихкості, корпус реактора, тріщиностійкість

Критична температура крихкості є однією з найважливіших характеристик металу КР, оскільки вона визначає ресурс КР. Для забезпечення консерватизму Норми [1] регламентують визначати її з певним запасом – у відповідності із методикою, п. 5.5 Додатку 2 [1]. Тому на заводі-виробнику КР проводилися випробування на ударну в'язкість зразків Шарпі з метою визначення початкової КТК, T_{K0}. Ці дані заносяться в паспорт КР. При цьому, на визначення T_{K0} може знадо-битися до 36-ти зразків.

З причини обмеження кількості ЗС, що завантажуються в реактор, і нерівномірності їх опромінення, визначити КТК металу КР після напрацювання у відповідності до п. 5.5 Додатку 2 [1] – неможливо. Тому КТК металу КР після напрацювання, визначають непрямим методом – по ідеології зсуву КТК.

$$T_К = T_{К0} + \Delta T_К, \text{ де } \Delta T_К = T_{кF} + T_{ки} \qquad (1)$$

де: $T_К$ – розрахункова КТК після опромінення, $\Delta T_К$ – зсув КТК, $T_{кF}$ і $T_{ки}$ – КТК металу після опромінення і КТК металу у вихідному стані відповідно, визначені експериментально з опромі-нених та контрольних ЗС за методикою п. 8 Додатку 2 [1]. Для простоти розуміння метод визначення консервативної КТК згідно з п.5.5 Додатку 2 [1] будемо називати Метод 1, а метод п. 8 Додатку 2 [1] – Метод 2.

Однією найважливіших проблем при обґрунтуванні ресурсу КР АЕС України є проблема з "недовизначення" T_{K0}. Через людський фактор майже в половині випадків на заводі-виготовлювачі КР при проведенні експериментів відповідно до Методу 1 експерименти чомусь зупиняли при певній температурі і не виконувалися далі при нижчих температурах, при яких би умови T_{K0} Методу 1 не виконалися б.

На рис. 1а показаний приклад заводських випробувань для визначення T_{K0} – видно що експерименти зупинили при досягненні температури -65°С. В паспорті КР вказано T_{K0}=-65°С, хоча очевидно, що рівень критеріальних значень ударної в'язкості, при яких перевіряються умови Методу 1 для її підтвердження/не підтвердження значення T_{K0} не досягнуто (для достовірного визначення T_{K0} експерименти з поступовим зменшенням температури випробування повинні проводитися доти, поки умови Методу 1 не будуть виконуватися). Тобто насправді в даному випадку ми маємо не T_{K0}=-65°С, а T_{K0}=≤-65°С. Цей приклад не є критичним, якщо висловлюватися в термінах ресурсу КР, оскільки отримане доволі низьке значення T_{K0}. Однак, для випадків, коли внаслідок недовизначення, значення T_{K0} для металу зварного шва (ЗШ) більше -30°С в сукупності з низьким значенням $T_{ки}$ (тобто коли відмінність між T_{K0} і $T_{ки}$ 20°С і більше) ми можемо отримати формальне не забезпечення ресурсу КР.

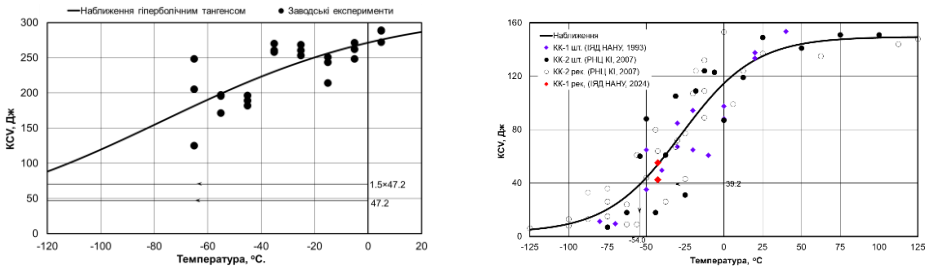


Рис. 1 (а) – Результати здаточних випробувань (паспортні дані) основного металу нижньої обичайки КР ХАЕС-1, які виконані на заводі-виготовлювачі КР в рамках визначення T_{K0} (47.2 Дж і 1.5×47.2 Дж – критеріальні зна-чення ударної в'язкості при яких перевіряється, чи виконуються умови Методу 1 для підтвердження T_{K0}; (б) - об'єднана вибірка даних випробувань ударної в'язкості металу ЗШ КР ХАЕС-1, що складена з паспортних даних, першого і другого контрольних комплектів ЗС, реконструйованих ЗС, а також випробувань в рамках робіт з ДСЕ.

З метою вирішення цієї проблеми запропоновано об'єднати результати випробувань паспорту КР та всіх КК ЗС, а ткож реконструвати додаткові зразки, які випробуати при -42.5°C і до цієї вибірки застосувати Метод 1. Обґрунтуванням цього підходу є те, що і при здаточних випробуваннях, і при дослідженні ЗС КК використовувалися зразки ідентичного типорозміру, які вирізані з одного і того ж металу і випробовувалися відповідно одних і ти же вимог (до зразків, ударного копра, вимірювання, обробки результатів, тощо). На рис. 1б показана об'єднана вибірка даних ударної в'язкості металу ЗШ КР ХАЕС-1, з якого видно, що у випадку "недовизначення" T_{K0} з врахуванням даних КК ЗС можна отримати повний спектр енергій руйнування (як за в'язкого і крихкого руйнування, так і в перехідній зоні) і в повній відповідності із Нормами [1] визначити T_{K0}.

Застосування даного підходу дозволило обґрунтувати безпечну екплуатацію КР ХАЕС-1 більш ніж на 60 років та знизити температуру гідровипробувань на 50°C в порівнянні з реглементими значеннями, що має значний економічний ефект.

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

Features of the KhNPP-1 RPV Safety Justification for LTO

M. Zarazovskii[a1], S. Aheiev[a], V. Husak[b]

[a]IPP-Centre LLC, Kyiv, Ukraine
[b]Khmelnytskyi Nuclear Power Plant, Netishyn, Ukraine

[1] zarazovskii-mm@ipp-centre.com.ua

The paper describes a practical issue of underestimation of the critical brittleness temperature (CBT) of WWER reactor pressure vessel (RPV) materials in the initial state. Using the KhNPP-1 RPV as an example, it is quantitatively demonstrated how this factor leads to an artificial reduction of the RPV service life. The approach for determining the initial CBT is proposed which is based on a combined dataset of Charpy impact test results, including passport data and surveillance specimen sets.

Keywords: critical temperature of brittleness, reactor pressure vessel, fracture toughness

Особливості переходу від радянських стандартів до національних для основних та зварювальних матеріалів, дозволених до використання на АС України

Я.П. Черняк[a1], О.П. Шугайло[a], А.А. Бабінець[a], К.С. Бендюг[a]

[a] ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ, Україна

[1] yp_chernyak@sstc.ua

Ключові слова: *експертний аналіз, сталь, напівфабрикат, сталь-аналог, сталь-еквівалент, зварювальний матеріал, хімічний склад, фізико-механічні властивості.*

Одним із важливих аспектів забезпечення міцності елементів і конструкцій на етапі проєктної та довгострокової експлуатації є використання відповідних конструкційних матеріалів, що дозволені до використання на АС України. Проєкти всіх ядерних реакторів, що експлуатуються в Україні, засновані на нормативно-правовій базі 70-80-х років минулого сторіччя, отже проєктування тисячі компонентів реакторної установки і використання матеріалів базувалось на державних стандартах радянського союзу, який розпався понад 30 років тому. З практики застосування під час виготовлення та ремонту обладнання і трубопроводів систем, важливих для безпеки, АЕС України європейських / національних стандартів стало зрозумілим, що підхід до визначення основних та зварювальних матеріалів, які замінять існуючі за радянськими стандартами, потребує ретельного та глибокого опрацювання.

На підставі досвіду Експлуатуючої організації та ДНТЦ ЯРБ запропоновано до практичного застосування процедуру визначення іноземних матеріалів за європейськими/та національними стандартами на заміну матеріалів за радянськими стандартами. В межах реалізації процедури введені поняття «матеріалі еквівалент», «матеріал аналог» та сформовано їх визначення.

У загальному вигляді процедуру визначення матеріалів еквівалентів, аналогів представлено в такому вигляді:

1. Визначення сталі за ГОСТ для подальшого зіставлення.
2. Підбір подібних сталей за європейськими / національними стандартами для проведення аналізу (деякі нормативні документами визначають сталі-еквіваленти / аналоги за європейськими стандартами до сталей за ГОСТами (див. наприклад, NTD ASI–II–2016 [1], ОТТ-87 [2] та ДСТУ 8781:2018 [3]).
3. Визначення напівфабрикату або виробу (листи, труби, поковки, кріпильні вироби, сортовий прокат, виливки) і підбір відповідних документів згідно з вимогами СОУ НАЕК 158:2020 [4].
4. Детальне співставлення визначених матеріалів за напрямами: аналіз хімічного складу; аналіз фізико-механічних властивостей (під час виконання цього аналізу враховується вид виробу / напівфабрикату); аналіз тривкості до міжкристалічної корозії та хімічної корозії; аналіз вимог до якості поверхні напівфабрикатів; аналіз вимог до внутрішніх дефектів напівфабрикатів; аналіз вимог до контролювання і випробування напівфабрикатів тощо.

Для визначення зварювального матеріалу-замінника запропоновано такий порядок:

1. Обрання марки зварювального матеріалу за ГОСТ та визначення його класифікації за новими європейськими / національними стандартами.
2. Виконання підбору марок зварювальних матеріалів, рекомендованих сучасними виробниками, які можуть бути замінниками марок за ГОСТ, що були рекомендовані ПНАЭ Г-7-009-89 [5].
3. Встановлення замінника. Замінник можна визначити як зварювальний матеріал, що максимально наближений за хімічним складом та механічними властивостями наплавленого металу до зварювального матеріалу за ГОСТ. Підставою для визнання зварювального матеріалу замінником є технічний висновок експертної організації (вимоги до експертної організації встановлені в розділі 5.3 СОУ НАЕК 158:2020 [4]).

Вказані вище процедури втілені в експлуатаційну практику, успішно апробовані на низці матеріалів і зазначений підхід визнано прийнятним для подальшого застосування

1. NTD ASI–II–2016. Normativně Technická Dokumentace A.S.I. Charakteristiky Materiálů Pro Zařízení A Potrubí Jaderných Elektráren Typu VVER. Sekce II.
2. ОТТ-87. Арматура для оборудования и трубопроводов АС. Общие технические требования с изменением № 1.
3. ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні вимоги.
4. СОУ НАЕК 158:2020. Обеспечение технической безопасности. Технические требования к устройству и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Затверджено наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 02.11.2020 № 880.
5. ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения.

Peculiarities of the transition from Soviet standards to national standards for base and welding materials approved for use at Ukrainian nuclear power plants

Ya.P. Cherniak[a1], O.P. Shugailo[a], A.A. Babinets[a], K.S. Bendiuh[a]

[a] State Enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety», Kyiv, Ukraine

[1] yp_chernyak@sstc.ua

Abstract

The projects of all nuclear reactors currently operated in Ukraine have their roots in the 1970s and 1980s and are based on the regulatory framework of that time. This means that the design of thousands of reactor components and the use of materials were based on the state standards (GOST) of the former Soviet Union, which no longer exists for over 30 years. In order to apply the European/national standards (EN) for producing and and maintenance of equipment and pipes important to safety of Ukrainian nuclear power plants, it became clear that the approach to determining materials to replace the existing ones specified in the Soviet GOST, OST, etc., requires careful and in-depth analysis.

Keywords: expert analysis, steel, semi-fabricated goods, steel analogue, steel equivalent, welding materials, chemical composition, physical-mechanical properties.

Експериментально-розрахункові дослідження процесів зародження та розповсюдження тріщини в сталі 22К

Є.О. Кондряков [a1], А.В. Кравчук[a], В.В. Харченко[a]

[a]Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] kondryakov@ipp.kiev.ua

Ключові слова: зразок Шарпі, модель пошкоджуваності матеріалу GTN, метод скінчених елементів, енергія руйнування, температура в'язко-крихкого переходу

У роботі проведено експериментально-розрахункові дослідження процесів деформування і руйнування конструкційної сталі 22К, що широко застосовується у відповідальних елементах енергетичного обладнання та трубопроводів. Актуальність таких досліджень обумовлена необхідністю підвищення достовірності оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій, зокрема за умов можливого крихкого руйнування. Для цього важливим є як експериментальне визначення енергетичних характеристик, так і використання сучасних моделей деформування та руйнування матеріалів для опису процесів зародження та розповсюдження тріщин.

Експериментальна частина роботи присвячена дослідженню впливу напрямку вирізки зразків Шарпі зі сталі 22К та орієнтації концентратора відносно осі трубопроводу на енергетичні характеристики руйнування та температуру в'язко-крихкого переходу. Випробування проводились на інструментованому вертикальному копрі, обладнаному багатоканальною системою реєстрації зусиль, в широкому діапазоні температур [1]. Досліджувались стандартні зразки Шарпі, виготовлені з трубної заготовки зі сталі 22К. Зразки вирізались у двох напрямках відносно напрямку прокатки матеріалу: повздовжньому та поперечному.

За результатами ударних випробувань отримано діаграми навантаження-час P(t), що дозволило визначити повну енергію деформування і руйнування, а також її складові: енергію зародження тріщини, енергію в'язкого підростання тріщини, енергію проскоку крихкої тріщини та енергію в'язкого долому [2]. Показано, що орієнтація зразка та напрямок розповсюдження тріщини суттєво впливають на енергетичні характеристики руйнування. Для зразків з різною орієнтацією надрізу спостерігаються відмінності у величині поглинутої енергії, що пояснюється анізотропією структури прокатаної сталі та особливостями розвитку вторинних тріщин. На основі температурних залежностей енергії руйнування та результатів фрактографічного аналізу визначено температури в'язко-крихкого переходу.

Проведено чисельне моделювання процесів зародження та розповсюдження тріщин з використанням методу скінчених елементів та моделі пошкоджуваності матеріалу Гарсона-Твергаарда-Нідлмана (GTN), яка дозволяє враховувати механізми зародження, росту та злиття мікропор у процесі пластичного деформування матеріалу [3]. Ця модель широко використовується для опису як в'язкого, так і квазікрихкого руйнування металів та може бути ефективно застосована для аналізу складних напружено-деформованих станів у зоні вершини тріщини.

Параметри моделі визначалися шляхом співставлення результатів чисельного моделювання з експериментальними діаграмами деформування для циліндричних

зразків при одновісному розтязі та для ударних випробувань зразків Шарпі [4]. У ході моделювання визначались поля напружень і деформацій у зоні концентрації напружень, а також кінетика розвитку пошкоджуваності матеріалу. Порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними дозволило визначити параметри моделі GTN для сталі 22К, зокрема параметри, що характеризують зародження пор, їх ріст та критичні умови злиття.

Отримані параметри моделі забезпечують адекватний опис процесів деформування та руйнування матеріалу при різних типах навантаження. Проведено чисельне моделювання СТ зразків товщиною 0.5Т та 2Т. Збільшення розміру СТ зразка до 2Т дозволяє реалізувати плоский деформований стан, який наближений до реального елементу конструкції. Таким чином показано, що модель GTN, з визначеними із експериментів значеннями параметрів може бути використана для чисельного моделювання процесів розповсюдження тріщини як у зразках різних типів при різних видах навантаження, так і в елементах конструкцій.

1. Харченко В.В., Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Бабуцкий А.А., Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности, *Надёжность и долговечность машин и сооружений*, 27, 121-130 (2006).
2. А.В. Кравчук, Є.О. Кондряков, О.В. Панасенко, В.В. Харченко, Дослідження впливу орієнтації концентратора відносно осі трубопроводу на складові енергії руйнування та температуру в'язко-крихкого переходу зразків Шарпі зі сталі 22К, *Вісник Машинобудування та транспорту*, № 1, 63-72 (2018).
3. Tvergaard V., Needleman A., Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metall*, 32, №1, 157–169 (1984).
4. Є.О. Кондряков, А.В. Кравчук, В.В. Харченко, Чисельне моделювання процесів зародження та розповсюдження тріщини в зразках різних типів з використанням моделі пошкоджуваності матеріалу GTN, *Mech. Adv. Technol*, 5, №1, 1-8 (2021).

I.O. Kondriakov[a1], A.V. Kravchuk[a], V.V. Kharchenko[a]

[a]G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] kondryakov@ipp.kiev.ua

The paper presents the results of experimental and numerical studies of crack initiation and propagation processes in 22K steel. Instrumented impact tests of Charpy specimens cut in different directions relative to the pipeline axis were carried out over a wide temperature range. The temperature dependences of the deformation and fracture energy, as well as their components, were determined. Based on fractographic analysis, the ductile-to-brittle transition temperatures were identified. To interpret the experimental results, numerical simulations of crack initiation and propagation processes were performed using the GTN damage model. It is shown that the identified model parameters make it possible to adequately describe fracture processes in specimens of different types.

Keywords: Charpy specimen, GTN damage model, finite element method, fracture energy, ductile-to-brittle transition temperature.

Методологія врахування двовісного навантаження за наявності коротких тріщин з використанням двопараметричного критерія руйнування.

А. М. Жовтобрюх, В.Г.Сидяченко[1], А.А.Котляренко

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

[1] Sydiachenko@ukr.net

Ключові слова: хрестоподібний зразок, скутість деформацій, двовісне навантаження, Майстер крива.

Розрахунок цілісності корпусу реактору ВВЕР типу на основі характеристик в'язкості руйнування отриманих при одновісному навантаженні в умовах плоскої деформації демонструє значний ступінь консерватизму. Урахування двовісності навантаження на береги постульованої тріщини підвищує точність оцінки і знижує її консерватизм [1]. Застосування двопараметричної механіки руйнування в даних умовах надає змогу враховувати зміну скутості деформацій у вершині тріщини [2]:

$$A_d^* = \delta_J/\delta_{Jref};\ J_c = J_{ref} + 367.6[(A_d^* - 1) + 0.983]^{3.28} - 374.16;$$
$$T_0 = T_{0ref} - 170.3(A_d^* - 1), \quad (1)$$

де δ_J, δ_{Jref} розкриття у вершині тріщини хрестоподібного і стандартного СТ-1 зразка при плоскій деформації (референсного); J_c, J_{ref} – J-інтеграл; T_0 , T_{0ref} температура що відповідає $K_{Jc(med)}$=100 МПа м$^{1/2}$ хрестоподібного і референсного зразків відповідно. Параметр A_d^* визначається шляхом моделювання методом скінченних елементів, а J_c і T_0 за емпіричними залежностями (1).

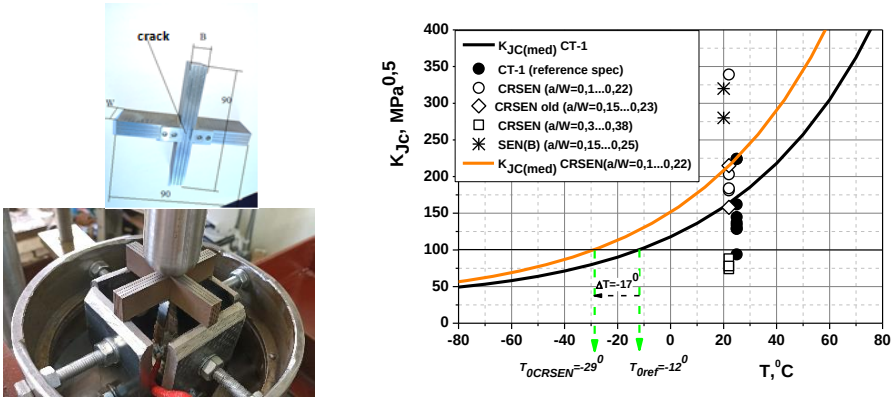
Експериментальне дослідження впливу двовісного згину, що моделює навантаження на береги постульованої тріщини в корпусі реактора при термошоці, на температурну залежність в'язкості руйнування, здійснювали на малогабаритному хрестоподібному зразкові з подальшим перерахунком на СТ-1 зразок за стандартом ASTM E1921(рис.1,а).

Встановлено, що при двовісному згині і наявності коротких тріщин, відбувається горизонтальний зсув Майстер кривої в область нижчих температур за рахунок зменшення скутості деформації за параметром A_d^*, що обумовлює резерви міцності для подовження ресурсу корпусів реакторів (рис.1,б), (табл.1). Термін «короткі тріщини» в даному випадку вживається в сенсі тріщин малої відносної глибини a/W= 0,1…0,2.

Таблиця 1.

Експериментально визначена референсна температура T_0 (ASTM E1921–17a) і розраховані температура T_{0p} (1), та параметр скутості A_d^* (1)

Тип зразка	a/W	T_{test}, ^{0}	T_0, ^{0}	T_{0p}, ^{0}	A_d^*
CT-1(компактий)	0,5	+23	-12	-	1,0
CRSEN(хрест.)	0,1…0,22	+21	-29	-37	1,152
SEN(B)(триточк.згин)	0,1…0,25	+21	-	-49	1,220



а *б*

Рис. 1. Хрестоподібний зразок (CRSEN) і його навантаження на пятиточковий згин (а); Майстер крива 15Х2НМФАА, побудована за однотемпературним методом ASTM E-1921 (б).

1. B.R Bass, W.J McAfee, P.T Williams, W.E Pennell, Fracture assessment of shallow-flaw cruciform beams tested under uniaxial and biaxial loading conditions, Nuclear Engineering and Design, 188(3), 259-288, (1999). https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00035-7
2. J.Y.Xiao, G.Z.Wang, J.X.Zhao, et al., A general correlation between ductile fracture toughness and unified constraint parameter for different materials, Eng Fract Mech, 285, 109296, (2023). https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109296

Methodology for accounting for biaxial loading in the presence of shallow cracks using a two-parameter fracture criterion.

A. Zhovtobriukh, V. Sidyachenko[1], A. Kotlyarenko

G.S. Pysarenko Institute of Problems of Strength, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] Sydiachenko@ukr.net

Experimental and computational studies have established the regularities of the influence of biaxial bending on the fracture toughness and the ductile-to-brittle transition temperature of reactor pressure vessel steel. It is shown that under biaxial bending and in the presence of shallow cracks, a horizontal shift of the Master Curve toward lower temperatures occurs due to a reduction in constraint, which provides strength reserves for extending the service life of reactor vessels.

Keywords: cruciform specimen, constrain, biaxial loading, Master curve.

Коригування порогового рівня енергії удару металу корпусів ядерних реакторів в процесі експлуатації

С. О. Котречко[а], К. Ф. Сорока[а1], В. М. Ревка[б]

[а]Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна
[б]Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

[1] katerina.oleschenko@gmail.com

Ключові слова: радіаційне окрихчення, тест Шарпі, реакторні сталі, пороговий рівень енергії удару, температура холодноламкості.

Основним методом визначення міри окрихчення корпусу реактора є випробування на ударний вигин зразків Шарпі. Ступінь окрихчення визначається за зсувом критичної температури крихкості сталі у вихідному та опроміненому станах.

Зазвичай величина критичної температури $T_к$ віднаходиться на температурній залежності енергії удару при деякому сталому пороговому значенні KV_{th} На сьогодні використовуються різні порогові значення поглинутої енергії J від 28 Дж до 56 Дж [1-3]. Проте, проблема полягає в тому, що критична температура $T_к$ може адекватно оцінювати крихкість металу лише за умови коригування величини порогового рівня KV_{th}, зокрема, в залежності від величини границі плинності, яка змінюється в процесі експлуатації корпусу реактора [4]. Спроба врахувати цей ефект робиться в стандарті ПНАЕ Г-7-002-86 [5]. Проте, в цьому випадку порогові рівні подаються не у вигляді монотонної функції величини границі плинності металу, а як фіксовані значення KCV_{th} для різних інтервалів значень $\sigma_{0,2}$, які обмежуються величиною $\sigma_{0,2}$ = 687 МПа.

В роботі запропоновано критерій визначення порогового рівня енергії удару, який передбачає інваріантність величини пластичної деформації руйнування при $T_к$. Показано, що в першому наближенні такий підхід може використовуватися при коригуванні порогового рівня енергії удару KV_{th} в залежності від величини границі плинності $\sigma_{0,2}$ металу. В інтервалі значень $\sigma_{0,2}$ = 400-690 МПа ця залежність узгоджується з пороговими значеннями, які наведені в стандарті ПНАЕ Г-7-002-86.

Показано, що в загальному випадку використання сталого рівня KV_{th} призводить до недооцінки або переоцінки міри радіаційного окрихчення металу корпусу реактора в залежності від границі плинності. Для високоокрихчених матеріалів, для яких зсув температури крихкості складає 160 °С або більше, стандартний метод ASTM E185 явно недооцінює радіаційний зсув, що може призвести до недооцінки радіаційного окрихчення сталі, а отже і її здатності чинити опір крихкому руйнуванню.

1. Kim, Seok Hun, et al. *Estimation of fracture toughness in the transition region using CVN data* // Transaction of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. August 15 – 20 1999. Seoul, Korea, 391 – 398.
2. *Standard Practice for Design of Surveillance Programs for Light-Water Moderated Nuclear Power Reactor Vessels*, ASTM E185-16 (2016)
3. Tanguy B., Parrot A., Cle´mendot F, Chas G. *Assessment of Pressure Vessel Steel Irradiation Embrittlement Up to 40 Years Using Local Approach to Fracture Modelling:*

Application to the French Surveillance Program // ASME Pressure Vessels and Piping Conference. J July 17–21, 2011 Baltimore, Maryland, USA, 701 – 708.
4. Kotrechko S., Revka V., Soroka K. *A new method for determining the threshold level of impact energy for reactor pressure vessel metal*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **216**, (2025). https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105509
5. ПНАЭ Г-7-002-86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Adjustment of the Threshold Impact Toughness of Reactor Pressure Vessel Steel in Service

S. Kotrechko[a], K. Soroka[a1], V. Revka[б]

[a]G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Institute for Nuclear Research, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[1] katerina.oleschenko@gmail.com

We present the results of approbation of a novel approach for finding the criterion level of impact energy to estimate a ductile to brittle transition temperature for ferrite and ferrite martensitic steels used for a manufacture of reactor pressure vessels (RPV). The idea of the proposed approach is that the value of the criterion level of impact energy is adjusted depending on the strength of the steel. The expediency of increasing the criterion level of impact energy KV_{th} with an increase in the strength of RPV steels is substantiated. The KV_{th} correction technique is described using the surveillance test data for Charpy impact and uniaxial tension tests. For highly embrittled RPV steels (the transition temperature shift is about 160 °C and more) the ASTM E185 standard method is shown to clearly underestimate the radiation shift compared to a physically based approach.

Keywords: radiation embrittlement, Charpy test, reactor steels, impact energy threshold, cold brittleness temperature.

Механічні властивості металевих матеріалів і втрата тримкої здатності елементів конструкцій під дією концентраторів напружень

Ю. Я. Мєшков[1], Г. П. Зіміна

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна

[1] meshkov0305@gmail.com

Ключові слова: міцність, пластичність, пружний ресурс пластичності, зламостійкість, концентратор напружень, критична тримка здатність.

В роботі розглядається оригінальна методологія визначення критичної втрати тримкої здатності зразка з концентратором напружень (КН) σ_{NF} на основі визначення критичного комплекса властивостей міцності $\sigma_{0,2}$ (умовна межа плинності) і пластичності у вимірі спеціального показника пружного ресурса пластичності (ПРП) $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$ (зламостійкості [1, 2]). Критерій критичної втрати тримкої здатності зразка з КН: $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$, якому відповідає критичний рівень зламостійкості $B_{rc} = S_{Kc} / \sigma_{0,2c}$ при відповідній температурі в'язко-крихкого переходу T_c зразка з КН.

В роботі аналізуються експериментальні дані щодо показників $\sigma_{0,2c}$, B_{rc} і σ_{NFc} при відповідних критичних температурах T_c на циліндричних зразках з різними видами надрізів і тонких пластинах з КН (включаючи наведені тріщини втоми) для двох модельних сплавів – армко-заліза і перлітної сталі У8 з метою дослідження впливу фактора сили концентрації напружень $\alpha_\sigma = \sigma_{1max}/\sigma_N$ на критичний рівень B_{rc}.

В іншій серії експериментів досліджували вплив властивостей міцності $\sigma_{0,2}$ і зламостійкості B_r на ступінь втрати тримкої здатності ($\sigma_{NF}/\sigma_{0,2}$) на зразках з тріщиною втоми з метою визначення критичного рівня механічних властивостей $B_{rc} = S_{Kc} / \sigma_{0,2c}$ за умовою $\sigma_{NF}=\sigma_{0,2}$ для конструкційних сталей різних класів міцності. Встановлено, що для даного виду КН B_{rc}=1,66 при кімнатних температурах випробувань (293 К).

В результаті роботи пропонується алгоритм розрахункового визначення критичного рівня механічних властивостей $\sigma_{0,2c}$ і B_{rc} згідно з критерієм критичної втрати тримкої здатності ($\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$) зразка з певним видом КН, призначеним для атестації конструкційних сталей з метою їх ранжировки при відповідній температурі експлуатації елемента конструкції з КН.

Пропонується метод визначення критичного рівня механічних властивостей $\sigma_{0,2c}$ і B_{rc} для запобігання крихкого руйнування сталей під дією факторів концентрації напружень і радіаційного зміцнення елементів конструкцій обладнання АЕС.

1. Ю.Я. Мєшков, Г.П. Зіміна, Механічна стабільність і крихкість металів і сплавів. Частина 1. Параметри і критерії стабільного стану, *Металофіз. новітні. технол.*, 45, № 8, 1029-1040 (2023). https://doi.org/10.15407/mfint.45.08.1029
2. Ю.Я. Мєшков, Г.П. Зіміна, Механічна стабільність і крихкість металів і стопів. Частина 2. Роль механічних властивостей, *Металофіз. новітні. технол.*, 46, № 4, 355-369 (2024). https://doi.org/10.15407/mfint.46.04.0355

Mechanical properties of metallic materials and loss of load-bearing capacity of structural elements under the influence of stress raisers

Yu. Meshkov, G. Zimina

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

This study considers an original technique to ascertain the critical loss of load-bearing capacity of a specimen with a stress raiser (SR), σ_{NF}*, based on determining the critical combination of conditional yield strength* $\sigma_{0.2}$ *and ductility as a special characteristic of the elastic ductility margin -* $B_r = S_K / \sigma_{0.2}$ *(break resistance). Criterion for the critical loss of load-bearing capacity of a specimen with SR:* $\sigma_{NF} = \sigma_{0.2}$*, which corresponds to the critical level of break resistance* $B_{rc} = S_{Kc} / \sigma_{0.2c}$ *at the corresponding temperature of the ductile-to-brittle transition* T_c *of a specimen with SR. A method is proposed for determining the critical level of mechanical properties* $\sigma_{0.2c}$ *and* B_{rc} *to prevent brittle fracture of steels under the influence of stress concentration factors and radiation hardening of structural elements of nuclear power plant equipment.*

Key words: strength, ductility, elastic ductility margin, break resistance, stress raiser, critical holding capacity.

Інженерно-адаптована версія Локального підходу до руйнування та її використання для прогнозування величини граничного флюенса на корпус реактора

С. О. Котречко[а1],Г. П. Зіміна [б], В. М. Ревка [в]

[а,б]Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна
[в]Інститут ядерних досліджень НАН Україна, Київ, Україна

[1] serkotr@gmail.com

Ключові слова: радіаційне окрихчення, локальний підхід до руйнування, радіаційний ресурс, водо-водяні реактори.

Локальний підхід до руйнування (ЛП) – міждисциплінарний підхід, який передбачає використання локального критерію ініціювання руйнування при прогнозуванні руйнування тіла з тріщиною/надрізом. При його розробці були великі сподівання на те, що він дозволить поставити механіку руйнування на міцний фізичний фундамент, оскільки ЛП передбачає врахування особливостей *мікромеханізмів* ініціювання руйнування металу з урахуванням його напружено-деформованого стану в околі вершини тріщини/надрізу. Проте, локальний підхід не отримав очікуваного поширення. Це, в значній мірі обумовлено прагненням спростити опис локального процесу ініціювання руйнування, що приводить до значних похибок при прогнозуванні величини в'язкості руйнування. З іншого боку, більш точні версії Локального підходу виявилися досить складними для інженерного (практичного) використання [1].

На сьогодні існує два варіанта ЛП, а саме, Локальний підхід до крихкого (скольного) руйнування та Локальний підхід до в'язкого руйнування. В доповіді розглядаються ключові проблеми ЛП до крихкого руйнування та показана можливість його адаптації для розв'язання прикладних задач, зокрема, прогнозування критичної величини флюенса на корпус реактора.

В доповіді розглядається розроблена авторами інженерна версія Локального підходу до крихкого руйнування, яка є спробою адаптувати ЛП до розв'язання прикладної задачі прогнозування радіаційного ресурсу корпусного металу. Ідея цієї версії полягає в тому, що за результатами випробувань зразків-свідків з тріщинами і гладких циліндричних зразків віднаходяться критичні рівні R_C^{PCVN} радіаційного зміцнення корпусного металу, за яких має місце крихке руйнування зразків-свідків з тріщинами. Для віднаходження відповідної критичної величини зміцнення R_C^{RPV} для корпусу реактора при температурі термошоку використовується отримана авторами наближена аналітична залежність для локального напруження руйнування та R_C. При цьому враховується довжина розрахункової тріщини в корпусі реактора та величина навантаження на корпус реактора в умовах термошоку. Для врахування ефекту впливу температури на величину R_C використовувалась наближена залежність, яка отримана в рамках фізичної версії Локального підходу [2]. Значення констант в цій залежності отримуються шляхом калібрувальної процедури за даними випробувань зразків-свідків.

Можливості практичного використання запропонованого підходу продемонстровані на прикладі прогнозування максимальної дози опромінення (критичного флюенсу) корпусного металу реакторів ВВЕР-1000.

Робота виконана за підтримкою гранту № 0126U001813 Національної академії наук України

1. C. Berdin, J. Besson, Bugat et al: *Local approach to fracture*, Published under the supervision of Jacques Besson: Les Presses de l'École des Mines Paris (2004).
2. S. Kotrechko, V. Kozák, O. Zatsarna, G. Zimina, N. Stetsenko, I. Dlouhý, Incorporation of temperature and plastic strain effects into local approach to fracture, *Materials*, 14(20), 6224 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14206224

Engineering-adapted version of the local approach to fracture and its application to predicting the critical fluence for reactor pressure vessels

S. Kotrechko[a1], G. Zimina[b], V. Revka[c]

[a,b]G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[c]Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[1] serkotr@gmail.com

A brief review of the Local approach to brittle fracture and the challenges associated with its application is presented. The main concept of the proposed engineering version of the Local approach is outlined, and an algorithm for its application to predicting the critical fluence of reactor pressure vessels is described. It is shown that the proposed approach provides a convenient tool for assessing the influence of key factors on the critical fluence, including the crack front length in the reactor pressure vessel, temperature and loading conditions under thermal shock, and the allowable probability of fracture. The capabilities of the proposed approach for practical applications are demonstrated by predicting the maximum irradiation dose (critical fluence) for the reactor pressure vessel steel of VVER-1000 reactors.

Keywords: radiation embrittlement, Local approach to fracture, irradiation lifetime, water-cooled water-moderated reactors (VVER).

Врахування ефекту втрати перенапруження при визначенні референсної температури на зразках-свідках типу PCVN

С.О. Котречко[а], О.В. Зацарна [а1], С. Радченко[б]

[а]Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна
[б]АТ НАЕК "Енергоатом", Київ, Україна

[1] alexsandra.ku@gmail.com

Ключові слова: референсна температура, ефект втрати перенапруження, тріщиностійкість, «Майстер крива», зразки-свідки.

На сьогоднішній день актуальною є проблема продовження терміну експлуатації корпусів ядерних реакторів. Останнім часом при прогнозуванні впливу нейтронного опромінення на величину в'язкості руйнування реакторних сталей ширико використовується метод Майстер кривої. В Україні цей метод ще не ввійшов у нормативні документи, проте Програма зразків-свідків [1] передбачає використання зразків-свідків типу PCVN. В той же час при відомо, що використання цього типу зразків призводить до завищення величини в'язкості руйнування корпусного метолу і, відповідно, до заниження величини референтної температури T_0 [2-4]. Як результат, це дає неконсервативну оцінку ступеня радіаційного окрихчення корпусного металу. Причиною цього є втрата перенапруження (constraint loss effect) в околі вершини тріщини у дрібномасштабному PCVN зразку в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу.

Мета роботи полягала у розробці методики яка враховує constraint loss effect при визначення величини в'язкості руйнування на зразках-свідках типу PCVN. Ідея цієї методики полягала у встановленні обмежень на величину локальної пластичної деформації в околі вершини тріщини для цього типу зразка. Це обмеження встановлено шляхом варіації величини параметра M, який використовується в ASTM E1921-24 [5] і характеризує ступінь перевищення довжини лігамента зразка з тріщиною над розміром області локальної плинності.

В якості об'єкта досліджень використовувалась реакторна сталь 15Х2НМФА (реактор типу ВВЭР 1000). Низькотемпературні випробування для визначення референсної температури проводились на трьох типах зразків : PCVN, CT-0,5T, CT-1T. Встановлено, що зменшення відносної величини максимально допустимої локальної деформації у два рази (перехід від стандартного значення M=30 до M=60) дозволяє отримати коректні значення в'язкості руйнування на зразках-свідках типу PCVN.

1. Типова програма контролю властивостей металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 по зразках-свідках : ПМ-Т.0.03.120-21. — К. : ДП «НАЕК «Енергоатом», 2021. — 42 с.
2. Lu, Y., et al. (2018). The Fracture Toughness Properties of China Manufactured RPV Steels Using Master Curve Method. Journal of Pressure Vessel Technology, 140(5), 051402

3. Yamamoto, M., et al. (2014). Constraint loss correction in determination using miniature C(T) specimens. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP).
4. He, X., et al. (2023). Size correction scheme to determine fracture toughness with mini-CT geometry based on Beremin model. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 127, 104047
5. ASTM E1921-24. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM International

Accounting for the constraint loss effect in determining the reference temperature using PCVN specimens

S. Kotrechko[a], O. Zatsarna[b1], S. Radhenko

[a]G.V. Kurdumov Institute of Metal Phisics, the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
[b]Energoatom, Kyiv, Ukraine.

[1] alexsandra.ku@gmail.com

Currently, the Master Curve methodology is widely used to determine the fracture toughness of reactor pressure vessel steels in particular, and structural steels in general. It is also well known that when determining the K_{Jc} value using small-scale specimens according to the ASTM E1921 standard, an overestimation of fracture toughness and, consequently, an underestimation of the reference temperature T_0 may occur. As a result, this leads to a non-conservative assessment of the radiation embrittlement degree for the reactor pressure vessel metal. Based on experimental data obtained for 15Kh2NMFA RPV steel, the following has been substantiated in this work: limiting the plastic deformation zone to a size of M=60 during tests on PCVN surveillance specimens allows for the determination of correct fracture toughness values.

Keywords: Reference temperature, Constraint loss effect, Fracture toughness, Master Curve, Surveillance specimens.

Вдосконалення (еволюція) розрахункової моделі парогенератора ПГВ-1000М при обґрунтуванні безпечної експлуатації на період ДСЕ енергоблоків АЕС України

Т. В. Пирогов[1], М.С. Скоромний, В.В. Ярмолюк

[a]Філія «ВП «Науково-технічний центр АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

[1]t.pyrohov@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: парогенератор ПГВ-1000М, розрахункова модель, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан

Парогенератори типу ПГВ‑1000М є ключовими елементами ядерних установок з реакторами типу ВВЕР‑1000, обґрунтування безпечної експлуатації яких, на період довгострокової експлуатації (ДСЕ) енергоблоків, базується на оцінці їхнього технічного стану. Метою даних робіт є підтвердження можливості подальшої безпечної експлуатації обладнання та його здатності, з урахуванням фактичного стану, виконувати свої проєктні функції. В межах цієї оцінки виконується аналіз відповідності попередніх розрахунків вимогам чинних нормативних документів та актуальним граничним умовам та, за необхідності, здійснюється їх актуалізація.

У XX столітті, на етапі проєктування, заводи-виробники надавали розрахунки міцності парогенераторів, що були виконані аналітичним шляхом та базувалися на класичних виразах опору матеріалів та теорії оболонок. Конструктивні складові парогенератора аналізувалися окремо, в межах спрощених розрахункових схем, які враховували температурну однорідність і симетричність навантажень. Це фактично виключало врахування локальних піків напружень у зонах їх концентрації та давало змогу лише оцінити загальний напружено-деформований стан (НДС) обладнання.

Сучасне розрахункове обґрунтування міцності базується на використанні тривимірних скінченно-елементних моделей, які дозволяють врахувати взаємний вплив вузлів обладнання, реальний розподіл температур та деталізовану геометрію зон концентрації напружень. Впровадження чисельних методів, насамперед методу скінченних елементів, суттєво підвищило точність оцінювання НДС обладнання в критичних вузлах конструкції.

Аналіз робіт з обґрунтування безпечної експлуатації парогенераторів типу ПГВ‑1000М показав, що на початковому етапі продовження експлуатації енергоблоків АЕС України застосування складних багатокомпонентних розрахункових моделей, для розрахунків міцності, було надто ресурсномістким. Через це, основну увагу приділяли НДС корпусних елементів, тоді як внутрішньо-корпусні елементи враховувалися спрощено або ігнорувалися, що ускладнювало оцінку їхнього впливу на інші компоненти парогенератора.

Розвиток обчислювальної техніки та використання сучасних розрахункових програмних комплексів дозволили перейти до створення детальної скінчено-елементної моделі парогенератора (рис.1), яка враховує як корпусні, так і внутрішньо-корпусні елементи та вплив їх контактів між собою, а також оцінити загальний НДС обладнання. При цьому, врахування комплексної взаємодії всіх елементів реальної

геометричної конструкції (враховуючи наявні модернізації обладнання), у поєднанні з теплогідравлічними процесами, динамічними навантаженнями та іншими граничними умовами, дозволили дослідити найбільш напружено-навантажені зони конструкції, які не розглядалися до цього.

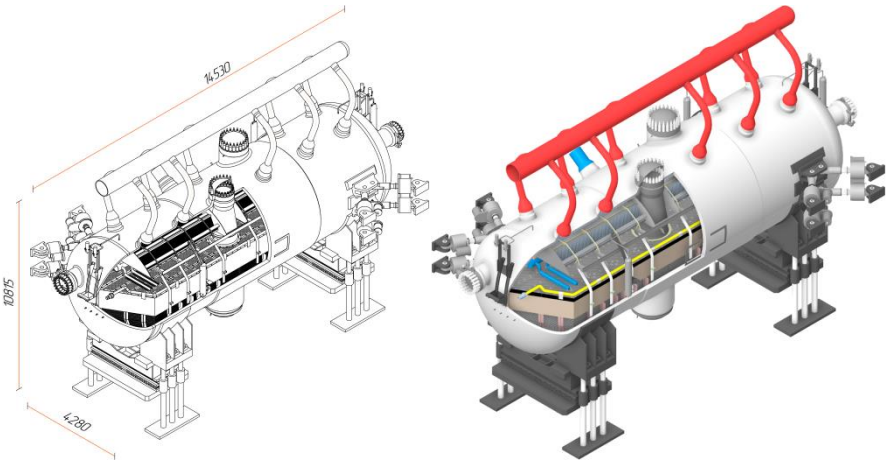


Рис. 1. Розрахункова модель парогенератора ПГВ-1000М.

Таким чином, еволюція розрахунків парогенераторів пройшла шлях від спрощених аналітичних схем до високодеталізованих чисельних моделей, що враховують складну геометрію, реальні умови експлуатації та багатофізичні процеси. Застосування сучасних чисельних методів обчислення дає змогу підвищити точність оцінювання НДС та забезпечити високий рівень безпечної та надійної експлуатації парогенераторів ПГВ-1000М та обладнання АЕС України в цілому.

Improvement (evolution) of the PGV-1000M steam generator calculation model in substantiating safe operation during the LTO of NPP in Ukraine

T. Pyrohov[a1], M. Skoromnyi[a], V. Yarmoliuk[a]

[a]Affiliated «SS STC» JSC «NNEGC «Energoatom», Kyiv, Ukraine.

[1]t.pyrohov@direkcy.atom.gov.ua

The paper presents the evolution of the development of finite element models of PGV-1000M steam generators aimed at substantiating their safe operation under long-term operation. It also includes an analysis of the main differences between the calculating models and provides a comparative assessment. Additionally, an advanced finite element model of the steam generator is presented, which accounts for internal components and equipment modernization. Based on this model, the overall stress–strain state of the structure is determined, taking into account the interaction between internal and structural components, as well as the influence of actual operating conditions and multiphysical processes.

Keywords: PGV-1000M steam generator, calculating model, Finite element method, stress-strain state

Обґрунтування безпечних меж зазорів аварійних опор ГЦТ на енергоблоках з ВВЕР-1000

А.І. Новіков [a1], О.С. Кучер[a], А.А. Ференець[a], С.Д. Мальований[a]

[a]Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна.

[1]a.novikov@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: аварійні опори, гільйотинний розрив, ГЦТ

У складі енергоблоків України з реакторами типу ВВЕР-1000 експлуатуються елементи кріплення трубопроводів Ду 850 (далі - аварійні опори), які призначені для сприйняття потенційних навантажень, викликаних гільйотинним розривом головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ).

Згідно п. 2 табл. 3.21 [1] після планово-попереджувального ремонту (ППР) енергоблока, включаючи перевантаження палива та розігрів до номінальних параметрів, персонал атомної електричної станції (АЕС) виконує контроль зазору між ребрами ложементу аварійних опор та колінами ГЦТ в центрі згину. Для усіх типів аварійних опор ГЦТ (на вході у парогенератор (ПГ), головний циркуляційний насос (ГЦН), на виході з ПГ, для реакторної установки (РУ) серій В-302, В-338 додатково контролюється зазор на верхній та нижній опорах холодної нитки ГЦТ) зазор регламентується у межах від 5 мм до 12 мм у відповідності до п. 2 табл. 3.21 [1].

Контроль зазору виконується відповідно до [2] та включає безпосередньо вимірювання зазору всередині опори при номінальних параметрах РУ, що призводить до теплового навантаження та підвищення колективної дози опромінення персоналу, залученого до виконання контролю.

Проєктною документацією ДКБ «Гідропрес» [3, 4] встановлено вимоги щодо значень зазорів між ребрами ложемента аварійних опор та колінами ГЦТ в центрі згину, які вимагаються тільки під час етапу гарячої обкатки енергоблока.

У зв’язку з невідповідністю проєктної документації [3, 4] та вимог [1], в частині обсягів та періодичності контролю, виникла необхідність провести розрахункове обґрунтування з метою визначення безпечних меж зазорів між аварійними опорами та колінами ГЦТ.

Враховуючи основне призначення аварійних опор ГЦТ – мінімізація наслідків гільйотинного розриву трубопроводу (МПА) з точки зору цілісності основного обладнання РУ (відсутність руйнування, або незворотних пластичних деформацій, які не дозволять експлуатувати це обладнання в подальшому), об’єктами розрахункового обґрунтування були критичні елементи першого контуру: конструктивні елементи КР, ПГ, ГЦН, ГЗЗ та патрубкові з’єднання ГЦТ.

До складу робіт з розрахункового обґрунтування входили:

- побудова комплексної розрахункової моделі трубопровідної системи з урахуванням приєднаного обладнання і трубопроводів;
- побудова, на підставі комплексної розрахункової моделі, моделей для отримання додаткових навантажень, що виникають при МПА.
- визначення граничних умов, що виникають при МПА;

- виконання розрахунків на міцність і сейсмостійкість для комбінацій навантажень відповідно до вимог [5].

При проведенні розрахунків передбачалося, що МПА ГЦТ може виникнути по проєктним зварним швам приєднання ГЦТ до обладнання.

Для визначення максимального значення критичного зазору між коліном ГЦТ і відповідною аварійною опорою для енергоблока, що розглядається, виконана розрахункова оцінка міцності згідно з вимогами [6] в кожному досліджуваному перетині, для кожної МПА ГЦТ.

За результатами виконаних розрахунків, отриманих для режимів МПА та при дії комбінацій навантажень (з урахуванням МПА та сейсмічних навантажень), обґрунтована максимально допустима відстань між кожним коліном ГЦТ і відповідною аварійною опорою для кожної петлі РУ досліджуваного енергоблока, при якій забезпечується міцність обладнання 1-го контуру (КР, ГЦН, ПГ, ГЗЗ і основних патрубкових з'єднань ГЦТ).

1. РГ-Т.0.03.193-21. Типовий регламент перевірок, випробувань і випробовувань систем, важливих для безпеки енергоблоків з ВВЕР-1000
2. МТ-Т.0.03.466-21. Методика контролю зазору між ребрами ложемента аварійних опор і колінами ГЦТ в центрі згину для енергоблоків АЕС ВВЕР-1000
3. 320.04.00.00.000 ПМ. Трубопровод главный циркуляционный. Программа и методика испытаний. Часть 1
4. 1.2-013 ПР. Методика монтажа аварийных опор ГЦТ
5. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проєктування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій
6. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок

Justification of safe clearance limits of emergency supports of main circulation pipelines at power units with VVER-1000

A. Novikov[a1], S. Kucher[a], A. Ferenets[a], S.Malovanyi[a]

[a]Affiliated "SS STC" JSC "NNEGC "Energoatom", Kyiv, Ukraine.

[1]a.novikov@direkcy.atom.gov.ua

According to the calculations performed for each power unit, the maximum permissible distance between each elbow of the main circulation pipeline and the corresponding emergency support is justified, at which the strength conditions of the equipment of the 1st circuit are confirmed, namely the reactor vessel, main circulation pump, steam generator, main shut-off valve and main connections of the main circulation pipeline branches in the event of a possible guillotine rupture, for the considered combinations of modes according to [5, 6], which include a guillotine rupture.

Keywords: emergency supports, guillotine rupture, main circulation pipeline.

Оцінка впливу температурної стратифікації теплоносія в розрахунках на міцність трубопроводів енергоблоків з ВВЕР-1000

А.І. Новіков [a1], О.С. Кучер[a], Р.П. Приходько[a], С.Д. Мальований[a]

[a]Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна.

[1]a.novikov@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: температурна стратифікація, НДС, ГЦТ

В реакторних установках (РУ) енергоблоків АЕС типу ВВЕР-1000 проєктів В-320 та В-302/338 компенсатор тиску (КТ) за допомогою врізки в нижнє днище КТ зв'язаний з головним циркуляційний трубопроводом (ГЦТ) з'єднувальним трубопроводом (ЗТ) [1]. Діаметр ЗТ КТ (Ø426/40 з урахуванням наплавлення) вибраний з умови не перевищення величини перепаду тиску між КТ і ГЦТ в нестаціонарних режимах. ЗТ складається з трубних вузлів, що з'єднуються між собою і КТ за допомогою зварювання. Радіуси гинів ЗТ – 1,7 м. Матеріал ЗТ - низьколегована сталь перлітного класу 10ГН2МФА з аустенітним наплавленням 08Х19Н10Г2Б.
Конфігурація ЗТ така, що в нормальному режимі експлуатації РУ на його горизонтальних ділянках виникає розшарування потоку теплоносія на більш гарячі шари зверху і більш холодні шари знизу. Цей ефект називається температурною стратифікацію і він призводить до того, що верхня частина перерізу трубопроводу сильніше розширюється, ніж нижня. Внаслідок цього в трубопроводі виникають додаткові згинальні моменти, що прагнуть деформувати трубопровід в певному напрямку.

Для визначення фактичної температури стінки трубопроводу використовуються дані з інтегрованої системи моніторингу втоми FAMOSi (Fatigue Monitoring System integrated) виробника AREVA. Вимірювання температури стінки ЗТ виконується за допомогою датчиків, що встановлені на зовнішню поверхню труби. Датчики встановлені півколом, від найвищої до найнижчої точки перерізу, у кількості 7 штук.

Аналіз результатів даних системи моніторингу показав, що система FAMOSi дозволяє відстежити ефект температурної стратифікації теплоносія на горизонтальних ділянках ЗТ шляхом заміру температури зовнішньої стінки трубопроводу.

На основі порівняння проведених у відповідності до [2] розрахунків статичної міцності ЗТ системи КТ з/без урахування температурної стратифікації встановлено, що її врахування призводить до зміни характеру НДС ЗТ КТ, а саме змінює розташування зон локального максимуму напружень, а відповідно має вплив і на оцінку конструкційної міцності суміжного патрубка ГЦТ та патрубкової зони КТ.

Відповідно до виконаних розрахунків встановлено, що вплив температурної стратифікації теплоносія на горизонтальних ділянках ЗТ не призводить до істотного погіршення критеріїв міцності для всіх проєктних режимів експлуатації РУ ВВЕР-1000 в проєктний строк експлуатації та у період довгострокової експлуатації енергоблоків.

В рамках даної роботи:

проведено обробку та аналіз даних, щодо температурної стратифікації, отриманих з використанням системи діагностики залишкового ресурсу;

встановлено закон розподілу температури по висоті перерізу ЗТ КТ та значення максимального перепаду між нижньою і верхньою твірною ЗТ КТ;

виконано розрахунковий аналізів напружень з та без врахування даних моніторингу температурної стратифікації з метою оцінки статичної, циклічної та крихкої міцності ЗТ КТ, патрубкової зони КТ та патрубкового з'єднання ГЦТ із ЗТ;

визначено вплив температурної стратифікації на НДС ЗТ КТ, патрубкової зони КТ та патрубкового з'єднання ГЦТ з трубопроводом КТ;

надано рекомендації до систем моніторингу температурної стратифікації та розроблено рекомендації щодо врахування температурної стратифікації теплоносія на горизонтальних ділянках ЗТ при виконанні розрахункових обґрунтувань ЗТ КТ.

За результатами аналізу даних та проведених розрахунків пропонується:

- прийняти на галузевому рівні для розрахункових обґрунтувань конструкційної міцності значення максимального температурного перепаду внаслідок температурної стратифікації теплоносія на горизонтальних ділянках ЗТ на рівні 65ºС з лінійним закон зміни температури по висоті перерізу;
- в рамках розрахункових обґрунтувань конструкційної міцності елементів 1-го контуру при періодичній переоцінці безпеки виконувати аналіз максимального значення температурного перепаду внаслідок температурної стратифікації теплоносія на горизонтальних ділянках ЗТ і у випадку перевищення заміряним значенням прийнятого референтного значення 65ºС використовувати його.

1. 320.3774.00.000 СБ. Трубопроводы системы компенсации давления. Трубопровод дыхательный. Сборочный чертеж
2. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с

Assessment of the influence of coolant temperature stratification in calculations on the strength of pipelines of power units with VVER-1000

A. Novikov [a1], S. Kucher[a], R. Prykhodko[a], S. Malovany[a]

[a]Affiliated "SS STC" JSC "NNEGC "Energoatom", Kyiv, Ukraine.

[1]a.novikov@direkcy.atom.gov.ua

In the reactor plants of the VVER-1000 series of NPPs of the V-320 and V-302/338 projects, the pressure compensator is connected to the main circulation pipeline by a connecting pipeline (CP) through a cut-in in the lower bottom. The configuration of the CP is such that in the normal operation mode of the reactor, stratification of the coolant flow into hotter layers at the top and colder layers at the bottom occurs in its horizontal sections. As a result, additional bending moments arise in the pipeline, which tend to deform the pipeline in a certain direction. According to the calculations performed, it was established that the effect of temperature stratification of the coolant on the horizontal sections of the CP does not lead to a critical deterioration of the strength criteria for all design operating modes of the VVER-1000 reactor during the design life of the reactor and during the period of the DSE of the power units. The law of temperature distribution along the height of the cross section and the value of the maximum difference have been established.

Keywords: *temperature stratification*, SSS, MCP

Підходи до виконання робіт з розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації трубопроводів та трубопровідних арматур

А.І. Новіков[a1], С.О. Кучер[a], Р.П. Приходько[a], М.Ю. Швець[a], С.Д. Мальований[a]

[a]Філія «ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна.

[1]a.novikov@direkcy.atom.gov.ua

Ключові слова: довгострокової експлуатація, продовження терміну експлуатації, НДС, АЕС

Розрахункове обґрунтування терміну довгострокової експлуатації (ДСЕ) трубопроводів та трубопровідних арматур енергоблоків АЕС України, встановленого при виконанні робіт з продовження терміну експлуатації (ПТЕ), проводиться в рамках обґрунтування безпечної експлуатації, виконання якої передбачено нормативними документами [1-2], з врахуванням заходів з управління старінням (ЗУС), спрямованих на прогнозування та утримання в прийнятих межах темпів можливої деградації матеріалів, а також врахування об'єктивних даних про технічний стан елементів систем важливих для безпеки (СВБ) на поточний час (граничних умов, теплогідравлічних параметрів, тощо).

Зазвичай об’єктами виконання розрахункового обґрунтування терміну довгострокової експлуатації трубопроводів та трубопровідних арматур (ТА) на кожному енергоблоці є елементи першого контуру, а саме:

- головний циркуляційний трубопровід (ГЦТ);
- трубопроводи систем компенсатору тиску (КТ) та систем аварійного охолодження зони (САОЗ);
- головні запірні засувки (ГЗЗ),
- та трубопроводи СВБ (300 одиниць) і трубопровідні арматури СВБ (1500 одиниць).

При розробці розрахункових моделей для проведення розрахунків на міцність трубопроводів та трубопровідних арматур враховуються вимоги нормативно-технічної документації, що діє в Україні, а також результати аналізу конструкторської, експлуатаційної та ремонтної документації:

- відступи від проєкту за весь період експлуатації допущені:
    - на етапах монтажу та пуско-налагоджувальних робіт;
    - під час виконання робіт з модернізації;
    - під час виконання ремонтів, усунення виявлених дефектів тощо;
- зміни фізико-механічних характеристик матеріалів залежно від температури;
- реальна вага приєднаного обладнання та ТА;
- реальні умови закріплення;
- урахуванням приєднаного обладнання та трубопроводів;
- теплогідравлічні параметри та їх зміна для різних сценаріїв;
- сейсмічні впливи рівня МРЗ та ПЗ;
- жорсткості колін, трійникових з'єднань, опор ГЦН та пружинних підвісок;
- додаткові специфічні навантаження такі, як:
    - температурна стратифікації дихального трубопроводу системи КТ;
    - овалізація поперечного перерізу колін ГЦТ.

Згідно з [3] при обґрунтуванні терміну ДСЕ мають бути виконані розрахунки на:

- статичну міцність для експлуатаційних режимів навантаження;
- міцність від сейсмічних впливів рівня МРЗ та ПЗ;
- опір крихкому руйнуванню;
- циклічну міцність.

Визначення розрахункових режимів із встановленням діючих навантажень:

- формування розрахункових перехідних режимів за результатами теплогідравлічних розрахунків;
- формування розрахункових режимів для аналізу статичної міцності із зазначенням температур та тиску;
- аналіз кількості відпрацьованих циклів та формування послідовності циклів навантаження для аналізу циклічної міцності із зазначенням температур та тиску;
- аналіз спектрів відгуку МРЗ та формування сейсмічних навантажень залежно від позначки розташування.

При виконанні розрахунку на міцність визначаються показники міцності (Р), що характеризують навантаження на матеріали елементів, що розглядаються, та відповідні їм показники міцності, що характеризують відповідні допустимі навантаження [Р]:

- (σ), [σ] – розрахункові та допустимі напруження від дії навантажень без урахування концентрації;
- (K_I),[K_{IC}] – розрахунковий та допустимий КІН;
- (a), [a_N] – розрахункове та допустиме накопичене втомне пошкодження;
- (N), [N] – розрахункове та допустиме число циклів навантаження.

1. НП 306.2.210-2017 «Загальні вимоги до управління старінням елементів і конструкцій та довгострокової експлуатації енергоблоків атомних станцій»;
2. НП 306.2.214-2017 «Вимоги до періодичної переоцінки безпеки енергоблоків атомних станцій»;
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с

Approaches to performing work on the calculation justification of the safe operation of pipelines and pipeline fittings

A. Novikov [a1], S. Kucher[a], R. Prykhodko[a], M. Shvets[a], S. Malovany[a]

[a]Affiliated “SS STC” JSC “NNEGC “Energoatom”, Kyiv, Ukraine.

[1]a.novikov@direkcy.atom.gov.ua

The calculation justification of the long-term operation term of pipelines and pipeline fittings of the power units of the Ukrainian NPPs, established during the performance of work on the extension of the operation term, is carried out within the framework of the justification of safe operation, the implementation of which is provided for by regulatory documents, taking into account aging management measures aimed at predicting and maintaining within the accepted limits the rates of possible material degradation, as well as taking into account objective data on the technical condition of the elements of the systems important for safety at the current time (boundary conditions, thermal hydraulic parameters, etc.).

Keywords: *long-term operation, extension of the service life, SSS, NPP*

Наукове видання

Тези доповідей
Міжнародної наукової конференції
АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ І МАШИНОЗНАВСТВА – 2026

26 – 28 травня, 2026

Видано в авторській редакції

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ (Україна)

Співголови:
Богданов В.Л., Назаренко В.М., Чирков О.Ю.

Учений секретар оргкомітету:
Кононученко О.В.

Члени організаційного комітету:
Бялонович А.В., Димитрієва Н.Ф., Єременко О.О., Калугіна Н.О., Кравчишин О.З., Лапіна Л.Г., Огліх В.В., Радченко С.А., Селіванов М.Ф., Старинко Р.С., Тарасовська С.О., Хоцяновський О.О., Шевченко В.Г., Шугайло О.П.

Підп. до друку 25.05.2026.
Ум.- друк. арк. 52.35

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України,
01014, Україна, м. Київ, вул. Садово-Ботанічна, 2

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК, № 8639 від 12.05.2026

Тел: (044) 285-16-87
Факс: (044) 286-16-84
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

ISBN 978-617-95433-0-2