

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ імені Г.С. ПИСАРЕНКА

**СЕРЕДА
АЛЬОНА ВІКТОРІВНА**



УДК 539.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ТВЕРДОСТІ ТА МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА
РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНДЕНТУВАННЯ**

05.02.09 – Динаміка та міцність машин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України.

Науковий керівник: академік НАН України,
доктор технічних наук, професор
Харченко Валерій Володимирович
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН
України (м. Київ), провідний науковий співробітник
відділу чисельних і експериментальних методів
дослідження конструкційної міцності

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чаусов Микола Георгійович
Національний університет біоресурсів і
природокористування України (м. Київ),
професор кафедри механіки

доктор технічних наук, професор
Марущак Павло Орестович
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя (м. Тернопіль),
проректор з наукової роботи,
професор кафедри автоматизації технологічних
процесів і виробництв

Захист відбудеться “ 21 ” травня 2026 року о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.241.01 в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України за адресою 01014, м. Київ, вул. Садово – Ботанічна, 2.

З дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://ipp.kiev.ua/> та у науковій бібліотеці Інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, 01014, м. Київ, вул. Садово - Ботанічна, 2.

Автореферат розісланий “ 16 ” квітня 2026 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.241.01
кандидат технічних наук



Олег КОНОНУЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Оцінка механічних характеристик конструкційних сталей є одним із ключових аспектів забезпечення надійності та довговічності відповідальних елементів технічних виробів, зокрема у промисловому, енергетичному, транспортному та будівельному секторах. Традиційні методи механічних випробувань, такі як одновісний розтяг або ударний вигин, є руйнівними, потребують виготовлення зразків та складної підготовки, що обмежує їх використання для експрес-контролю та оцінки залишкового ресурсу конструкцій без демонтажу.

Метод інструментованого індентування, який базується на аналізі діаграми безперервного деформування матеріалу індентором, є перспективним неруйнівним підходом для визначення механічних характеристик широкого кола матеріалів, зокрема сталей з різним хімічним складом та структурною неоднорідністю.

Водночас, актуальною проблемою залишається вдосконалення методик оцінки механічних властивостей конструкційних сталей за результатами індентування, врахування впливу неоднорідності матеріалу, експлуатаційного напручування та інших факторів, що можуть змінювати характеристики міцності і твердість сталі в процесі її експлуатації.

Не менш важливим є питання стандартизації таких методик для забезпечення їх відтворюваності та впровадження в промислову практику. Це дозволить отримувати дані про поточний стан матеріалу, оперативно оцінювати якість нових та експлуатованих конструкцій і приймати обґрунтовані рішення щодо їх подальшої експлуатації або необхідності ремонту.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розвиток та вдосконалення методик визначення механічних характеристик конструкційних сталей за допомогою інструментованого індентування, є актуальними та мають вагомe значення для підвищення надійності та безпечної експлуатації технічних виробів.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася у відділі чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності Інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України в рамках бюджетних тем № 240/2020-03/02 «Розвиток методології моніторингу пошкоджуваності матеріалів особливо відповідального обладнання та елементів конструкцій при нормальних та екстремальних умовах експлуатації для прогнозування та подовження ресурсу» (№ ДР 0120U102943); «Цільова науково-технічна програма оборонних досліджень НАН України» проекту ІПМіц 2020/1 «Розробка комплексу методик оцінки механічних характеристик високоміцних матеріалів в широкому діапазоні швидкостей деформації, характерних для динамічних навантажень при експлуатації» (№ ДР 0119U101759); № 1640 «Розробка комплексу методик оцінки механічних характеристик високоміцних матеріалів в широкому діапазоні швидкостей деформації, характерних для динамічних

навантажень при експлуатації» (№ ДР 0120U000023Д); Відомча тематика «№ 240/2022-03/01 «Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів конструкційних елементів особливо відповідального обладнання з урахуванням впливу деформаційної анізотропії та історії навантаження на їх поточний стан для прогнозування і подовження ресурсу» (№ ДР 0122U000301); № 3.6/23-П «Комплекс сучасних експериментально-розрахункових методик визначення міцності матеріалів та елементів конструкцій для прогнозування ресурсу особливо відповідального обладнання з урахуванням деформаційної історії та екстремальних умов навантаження» (№ ДР 0123U100937); «Ядерні та радіаційні технології для енергетичного сектору і суспільних потреб» № 22К-01-03 «Застосування вдосконалених методик для оцінки поточного технічного стану та пошкодження металу корпусів реакторів та інших компонентів I контуру АЕС при обґрунтуванні подовження їх безпечної експлуатації» (№ ДР 0122U000103); № 3.3/25-П «Новітні експериментально-розрахункові методи оцінки граничного стану матеріалів, міцності та ресурсу критичних елементів складних механічних систем за екстремальних умов експлуатації» (№ ДР 0125U000397); Відомча тематика № 1.3.4.2209 «Розробка комплексної експериментально-розрахункової методології визначення граничного стану матеріалів та елементів відповідальних конструкцій за різних видів термосилового навантаження з урахуванням складного напруженого стану, деформаційної анізотропії та дефектності» (№ ДР 0122U200515).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності широкого спектру конструкційних сталей із різним ступенем анізотропії за результатами інструментованого індентування та розробка науково обґрунтованих підходів до їх нормативної оцінки під час вхідного контролю й у процесі виробництва промислової продукції.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі задачі:

- розробка та удосконалення методологічних основ визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей з різною структурною анізотропією методом інструментованого індентування, включаючи модернізацію експериментального обладнання для використання у системах вхідного контролю та промислового виробництва;
- підвищення точності визначення твердості високоміцних сталей шляхом розроблення нової методології кількісної оцінки впливу знеуглецьованого поверхневого шару на результати вимірювань;
- розробка науково обґрунтованих принципів стандартизації методів неруйнівного контролю експлуатаційних характеристик конструкційних сталей із використанням інструментованого індентування;
- отримання нових експериментальних даних щодо початкових та поточних характеристик твердості й міцності конструкційних сталей, включаючи їх зміни після тривалого експлуатаційного навантаження, для відповідальних елементів обладнання різних галузей промисловості.

Об'єкт дослідження – вуглецеві, теплостійкі, високоміцні сталі та елементи відповідального обладнання з них після експлуатаційного напруження; методики визначення механічних характеристик за результатами інструментованого індентування та вимірювання твердості конструкційних матеріалів технічних виробів.

Предмет дослідження – механічні характеристики конструкційних сталей та їх зміна під впливом експлуатаційних факторів, особливості їх визначення методами інструментованого індентування.

Методи дослідження – експериментальні методи дослідження механічних характеристик конструкційних сталей.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- удосконалено та стандартизовано методики неруйнівного контролю поточних характеристик широкого класу конструкційних матеріалів за параметрами діаграми інструментованого індентування та отримано нові експериментальні дані щодо вихідних та поточних характеристик міцності ряду конструкційних сталей при вхідній атестації та виробництві промислової продукції;

- розроблено методику визначення твердості за Брінеллем конструкційних матеріалів із використанням методу інструментованого індентування, що забезпечило підвищення точності та відтворюваності результатів у широкому діапазоні вимірювань значень твердості (110...630 HBW) та уніфікацію вибору навантаження при проведенні випробувань;

- розроблено нову методику визначення товщини знеуглецьованого шару за результатами вимірювань твердості портативними приладами у макродіапазоні зусиль індентування, що дало змогу підвищити інформативність та ефективність контролю якості високоміцних сталей.

Достовірність отриманих у дисертації результатів забезпечується використанням сучасного сертифікованого випробувального обладнання та методик, що відповідають міжнародним стандартам (ISO, ASTM), дотриманням вимог метрологічного контролю, проведенням оцінки точності застосованих методів і схем розрахунку механічних характеристик за результатами індентування, а також порівнянням отриманих даних із результатами стандартних механічних випробувань, що підтвердило їх задовільну збіжність.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та вдосконаленні методичних підходів до визначення механічних характеристик конструкційних сталей методом інструментованого індентування, що забезпечує можливість неруйнівної локальної оцінки твердості, границі плинності та границі міцності без виготовлення зразків і демонтажу конструкцій. На основі проведених досліджень розроблено низку нормативних документів, які регламентують як процедури оцінювання параметрів локального деформування матеріалу за діаграмою індентування, так і алгоритми розрахунку механічних характеристик за її результатами. Запропоновані технічні та методичні рішення визнано актуальними для практичної діяльності філії ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом» та рекомендовано до використання при

перегляді нормативно-технічної документації, що регламентує оцінку механічних характеристик металу обладнання АЕС. Отримані результати створюють наукове та нормативно-методичне підґрунтя для стандартизації методу індентування у промисловому контролі.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Вибір теми, формулювання завдань та аналіз результатів досліджень виконано спільно з науковим керівником.

У опублікованих працях, написаних у співавторстві, автору належить:

[1 – 3, 5, 8 – 14] – удосконалення та стандартизація методики вимірювання твердості та міцності конструкційних сталей; [3, 4] – модернізація конструкції випробувального обладнання, зокрема заміна механічної системи кріплень переносної установки на електромагнітну, що забезпечило можливість проведення індентування як на циліндричних, так і на плоских поверхнях, включно з листовим прокатом та конструкціями з нього; [1, 2, 5, 12–17] – розробка та апробація методики визначення твердості за методом Брінелля з використанням інструментованого індентування, що підвищило точність і відтворюваність результатів у широкому діапазоні вимірювань (100...630 HBW) та уніфікувало вибір навантаження при проведенні випробувань, підготовка нормативних документів, що відповідають сучасним національним і міжнародним вимогам; [1, 2, 10] – розробка методики визначення товщини знеуглецьованого шару за результатами вимірювань твердості портативними приладами у макродіапазоні зусиль індентування що підвищило інформативність та ефективність контролю якості високоміцних сталей; [5, 6] – нові експериментальні дані вихідних і поточних характеристик міцності ряду конструкційних сталей, отриманих під час вхідної атестації та виробництва промислової продукції; [2, 3, 6, 7, 11] – комплексна експериментальна апробація модернізованого обладнання та методик визначення характеристик твердості та міцності за результатами індентування конструкційних матеріалів різної структури та призначення, що підтвердило їх точність, відтворюваність та придатність для практичного застосування у промисловому контролі якості матеріалів і зварних з'єднань. [3, 14, 16] – наукове обґрунтування принципів стандартизації методів неруйнівного контролю експлуатаційних характеристик широкого класу конструкційних сталей за параметрами діаграми інструментованого індентування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких наукових форумах, міжнародних науково-технічних конференціях: науково-практична конференція під ред. Ю. М. Посипайка. Міжнародна Асоціація «Зварювання». Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану (Київ, 2021 р.); Report on 1-st Virtual international conference “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction”(Ternopil, Ukraine, 2021p.); Праці конференції Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 70-річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, проф. Яснія Петра Володимировича «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій» (Тернопіль, Україна, 2022 р.);

Міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми механіки - 2023» до 145-річчя від дня народження С. П. Тимошенка. (Київ, 2023 р.); I Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладна механіка» присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Ч. В. Пульки. (Київ, 2024 р.).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 17 наукових праць: 6 статей у фахових виданнях України (з них 5 – у Scopus/Web of Science), 5 тез наукових конференцій, 1 патент на корисну модель та 5 стандартів підприємства (СОУ).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 199 сторінок. Дисертація містить 48 рисунків, 27 таблиць, список використаних джерел із 159 найменувань, 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, завдання та основні напрями досліджень. Подано аналіз сучасного стану наукової проблеми відповідно до поставленої мети. Сформульовано наукову новизну, практичне значення та обґрунтовано отримання результатів. Наведено відомості про апробацію основних положень дисертації, її структуру, зміст і обсяг.

У першому розділі представлено огляд літературних джерел за темою дисертації. Проведено аналіз методів непрямого визначення механічних характеристик конструкційних сталей, зокрема інструментованого індентування та вимірювання твердості, порівняно з традиційними механічними випробуваннями. Визначено їхні переваги, обмеження та перспективи розвитку. Розглянуто особливості неруйнівного контролю, вплив анізотропії та локальних змін властивостей матеріалу на точність і відтворюваність результатів, окреслено проблеми визначення твердості високоміцних сталей методом Брінелля та напрямки удосконалення методик для практичного застосування і стандартизації.

Метод інструментованого індентування посідає особливе місце серед сучасних способів визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів, оскільки дає можливість безпосередньо за діаграмою індентування визначати цілий комплекс механічних властивостей – від твердості до механічних характеристик при розтягу. Інструментоване індентування забезпечує суттєво вищу точність у визначенні механічних характеристик і дозволяє досліджувати матеріали на нано, мікро та макрорівнях з мінімальною кількістю випробувань.

Проведено аналіз методик визначення механічних характеристик за результатами інструментованого макроіндентування. Питанням встановлення кореляційних взаємозв'язків параметрів твердості з характеристиками міцності та пластичності присвячено фундаментальні праці Ю.А. Брінелля, Е. Мейера, М.М. Давиденка, О.Ю. Ішлінського, М.П. Марковця, М.С. Дрозда, Д. Тейбора та

Р. Хілла. Розвиток фізичних основ кінетичного індентування на різних масштабних рівнях пов'язаний із роботами С.О. Фірстова, Ю.В. Мільмана, С.М. Дуба та І.М. Закієва. Прикладні аспекти розробки розрахунково-експериментальних моделей кореляції для діагностики металу обладнання тривалої експлуатації розвинуто у дослідженнях Ф. Хаггака, М.Б. Бакірова, В.М. Матюніна, М. Китки, В.В. Харченка, О.А. Катка та В.В. Шабанова. Питаннями метрологічного забезпечення вимірювань, стандартизації та удосконалення чисельних алгоритмів оберненого аналізу для уточнення кореляційних залежностей займалися К. Геррманн, В. Ван, Я. Ченг та Дж. Лі. На сьогодні актуальність таких досліджень зумовлена необхідністю підвищення точності відновлення повної діаграми деформування конструкційних сталей шляхом мінімізації похибок існуючих методів кореляції. Актуальність таких досліджень не зменшилась і сьогодні, проте, найчастіше увага фахівців зосереджена на підвищенні саме точності кореляцій.

Подальші напрямки удосконалення методик включають зменшення залежності від емпіричних коефіцієнтів, врахування мікроструктурних змін і комп'ютерне моделювання.

Розглянуто анізотропію механічних властивостей конструкційних сталей і її вплив на результати вимірювань та їх інтерпретацію. Традиційні методи випробувань (розтяг, твердість за Брінеллем) у багатьох випадках не дозволяють коректно врахувати неоднорідність металу як за товщиною перерізу, так і за орієнтацією зразків. В умовах експлуатації, коли матеріал зазнає комбінованого впливу температурних, силових і хімічних факторів, розвиваються структурна та фазова неоднорідність, що посилює ефект анізотропії. У таких випадках найбільш чутливими та інформативними виявляються саме локальні методи контролю, зокрема інструментоване індентування, яке дозволяє визначати механічні характеристики у малих об'ємах матеріалу, у зонах зварних з'єднань або наплавлень, а також відслідковувати їх зміни внаслідок експлуатації.

Діючі нормативні документи не регламентують орієнтацію зразків і місце їх відбору в перерізі стінки, тому виникає потреба у вдосконаленні підходів до стандартизації випробувань для експлуатованих сталей.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію локальних методів контролю, зокрема інструментованого індентування, у систему нормативного забезпечення оцінки роботоздатності сталей та інших відповідальних елементів конструкцій.

Розглянуто особливості визначення твердості високоміцних сталей методом Брінелля. На сьогоднішній день зі збільшенням об'єму виготовлюваної продукції з високоміцних сталей важливим напрямком в дослідженнях та контролі їх якості є коректне та достовірне вимірювання твердості.

Існуючі нормативні документи, які регламентують методи визначення твердості високоміцних і броньованих сталей, не в повній мірі забезпечують отримання достовірної інформації про поточні властивості матеріалів. Все це потребує більш детального вивчення та розробки рекомендацій щодо зменшення похибок визначення твердості.

За результатами огляду літературних джерел підкреслено актуальність обраної теми дисертації, сформульовані мета та задачі роботи.

У другому розділі викладено результати вдосконалення обладнання та методик визначення характеристик твердості й міцності конструкційних сталей за результатами інструментованого індентування, спрямовані на підвищення достовірності й відтворюваності отримуваних даних. Модернізовано переносну установку РІТ-02М для визначення характеристик міцності елементів конструкцій в умовах експлуатації методом інструментованого індентування відповідно до вимог ISO 14577. Модернізація системи кріплень переносної установки РІТ-02М дала змогу проводити випробування не тільки на циліндричних, а й на плоских поверхнях, зокрема на листовому прокаті і конструкціях із нього, що збільшило продуктивність випробувань та розширило область застосування установки. Проведені порівняльні випробування на листовій конструкційній вуглецевій сталі 20 товщиною 12 мм із використанням попередньої механічної системи кріплення і нової (електромагнітної) показали, що отримані діаграми індентування добре накладаються одна на одну. За результатами випробувань високоміцних сталей встановлено, що установка дає змогу як у лабораторних, так і виробничих умовах із високою точністю реєструвати процес вдавлювання індентора у зразки конструкційних матеріалів і відповідно визначати їх механічні характеристики методом інструментованого індентування.

З метою підвищення точності оцінки механічних властивостей проаналізовано основні тенденції вдосконалення параметрів індентування та їх стандартизації. Удосконалено методику визначення параметра пластичності A , що характеризує локальні пластичні властивості матеріалу: усунуто вплив пружної деформації вузла вимірювання на визначення глибини відбитка за рівнянням Олівера-Фарра, введено циклічний режим індентування для підвищення достовірності фіксації залишкової глибини та оптимізовано інтервал апроксимації діаграми ($d/D = 0,2 \dots 0,5$), що забезпечує стабільність результатів.

У результаті аналізу параметра, який описує залежність між максимальним навантаженням і залишковою глибиною індентування в циклічному режимі, обґрунтовано доцільність заміни його традиційної назви «параметр пропорційності пластичного індентування» на більш фізично коректну – «параметр локального опору пластичній деформації». Така інтерпретація точніше відображає сутність величини як кількісної характеристики опору матеріалу локалізованому пластичному деформуванню в зоні контакту з індентором. Встановлено, що значення цього параметра залежить від меж апроксимації діаграми індентування: зі збільшенням діапазону α спочатку зростає до максимуму, а потім знижується, що дозволяє визначати репрезентативне значення α_{max} , яке найбільш повно характеризує здатність матеріалу протистояти залишковій локальній деформації та може використовуватись як індикатор міцності.

Разом із тим встановлено технологічні обмеження під час випробування високоміцних сталей: індентори з карбіду вольфраму не завжди забезпечують

необхідну глибину проникнення без ризику руйнування при $R_m > 1200$ МПа, що зумовлює потребу у подальших дослідженнях щодо використання інденторів із надтвердих і зносостійких матеріалів.

За результатами досліджень удосконалено методику визначення твердості за Брінеллем методом інструментованого індентування. Використання параметра локального опору пластичній деформації дозволило усунути похибки, пов'язані з візуальними вимірюваннями, підвищити точність і метрологічну надійність результатів, а також забезпечити реєстрацію глибини вдавлювання для аналізу локальних процесів пластичної деформації в зоні контакту індентора з матеріалом. Запропонований підхід дозволив уникнути прив'язки до конкретних матеріалів завдяки застосуванню повірених еталонних мір твердості, розширити діапазон вимірювань (110...630 HBW) та узгодити результати з сучасними вимогами українських нормативних документів.

Апробацію вдосконаленої методики проведено на конструкційних, теплостійких і високоміцних сталях – 3, 20, 45, 09Г2С, 16ГС, 10ГН2МФА, 15Х2НМФА, Hardox 450 і Arмох 500Т. Встановлено, що відхилення отриманих значень твердості від результатів вимірювань за стандартною методикою Брінелля не перевищує 3,9%.

На основі аналізу сучасних підходів до визначення механічних характеристик конструкційних, теплостійких та спеціальних сталей методом інструментованого індентування, результатів проведених експериментальних досліджень та узагальнення вимог нормативних документів розроблено та впроваджено стандарти Інституту СОУ 56-37-2021 і СОУ 56-38-2021, що регламентують застосування методу інструментованого індентування для експрес-контролю та входної атестації матеріалів енергетичного, машинобудівного й спеціального призначення.

Розроблене в Інституті устаткування, удосконалені методики та їх стандартизація створюють науково-технічне підґрунтя для комплексного застосування методу інструментованого індентування під час контролю механічних характеристик металевих матеріалів.

У третьому розділі розглянуто вплив анізотропії та поверхневої неоднорідності на результати інструментованого індентування конструкційних, теплостійких та спеціальних сталей. Узагальнено основні напрями дослідження структурної та поверхневої неоднорідності, що впливають на визначення механічних характеристик за параметрами індентування. На основі експериментальних даних та теоретичного аналізу виділено три характерні типи напружено-деформованого стану матеріалу – умовна ізотропія, анізотропія та наявність поверхневого шару. Такий підхід дав змогу сформулювати цілісне уявлення про чинники, які визначають надійність кореляцій між твердістю та міцністю, і став основою для подальшого аналізу особливостей індентування сталей різних класів міцності.

Найбільш показовим і теоретично обґрунтованим випадком, що відображає принципові можливості методу інструментованого індентування, є дослідження умовно ізотропних сталей. До цієї категорії належать сталі з

однорідною структурою. На прикладі оцінювання характеристик міцності конструкційних сталей (сталі Ст 3, сталі 20 і сталі 45), продемонстровано коректність застосування методу інструментованого індентування (рис. 1).

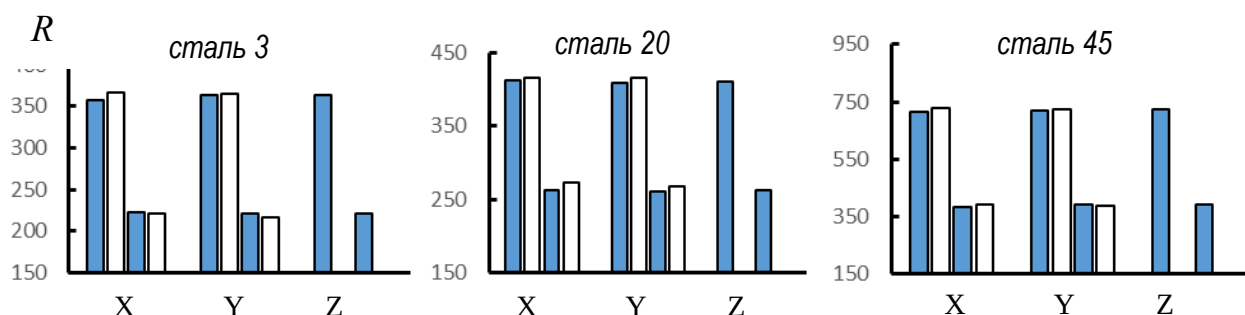


Рис. 1. Характеристики міцності $R_{p0.2}$ і R_m вуглецевих сталей Ст 3, сталі 20 і сталі 45, отриманих на одновісний розтяг (синій колір) і інструментоване індентування (білий колір) в трьох взаємно ортогональних напрямках (X, Y, Z).

Експериментально встановлено, що розбіжності значень границі міцності R_m та границі плинності $R_{p0.2}$, визначених на одновісний розтяг і за параметрами індентування у трьох взаємно ортогональних напрямках, не перевищують 5%. Це підтверджує застосовуваність методу інструментованого індентування для неруйнівної оцінки інтегральних механічних властивостей металу та створює основу для подальших досліджень матеріалів з анізотропною і поверхнево неоднорідною структурою.

Для сталей з вираженою текстурою та спрямованою структурою, що формується внаслідок недотримання оптимальних режимів технологічних процесів – прокатування, кування чи термомеханічного оброблення, – характерною є анізотропія механічних властивостей. Для демонстрації цього випадку обрано сталі 15X2НМФА та 08X18Н10Т, відібрані з масиву експериментальних досліджень, проведених в Інституті.

Експериментально отримано характеристики міцності теплостійкої конструкційної сталі 15X2НМФА за результатами даних твердості HBW і кореляційними залежностями та методом інструментованого індентування у трьох ортогональних напрямках як середні значення за результатами не менше 10 випробувань і величини відхилень у відсотках в порівнянні з $R_{p0.2}$ і R_m отриманими на одновісний розтяг. (табл. 1).

З табл. 1 видно, що відхилення значень границі міцності R_m визначених за результатами вимірювань твердості та індентування в трьох ортогональних напрямках від таких, що отримані на розтяг не перевищує 10%, тоді як відхилення границі плинності $R_{p0.2}$ відповідно перевищує 20%. Найкраща збіжність за показником границі плинності спостерігається для напрямку (OY), де похибка не перевищує 6,6 – 7,1%, що свідчить про менший вплив прокатної текстури на результати індентування в цій площині.

Табл. 1. Характеристики міцності, що отримані за результатами даних твердості *HBW* і методом інструментованого індентування, теплостійкої конструкційної сталі 15X2НМФА визначених в трьох взаємно ортогональних напрямках

Напрямки визначення механічних характеристик	За твердістю <i>HBW</i>		Метод інструментованого індентування	
	Границя плинності $R_{p0,2}^{HBW}$, МПа	Границя міцності R_m^{HBW} , МПа	Границя плинності $R_{p0,2}^{ind}$, МПа	Границя міцності R_m^{ind} , МПа
Напрямок <i>OX</i>	363 (-21,4)*	663 (-7,4)*	364 (-21,2)*	652 (-8,9)*
Напрямок <i>OY</i>	368 (-7,1)*	673 (0,7)*	370 (-6,6)*	667 (-0,2)*
Напрямок <i>OZ</i>	365 (-11,8)*	667 (-1,8)*	364 (-12)*	656 (-3,4)*

* – в дужках показані величини відхилення у відсотках визначених характеристик міцності $R_{p0,2}^{HBW}$ і R_m^{HBW} за результатами даних твердості *HBW* і характеристик міцності $R_{p0,2}^{ind}$ і R_m^{ind} за методом інструментального індентування сталі 15X2НМФА у порівнянні з $R_{p0,2}$ і R_m отриманими на одновісний розтяг.

Це підтверджує, що індентування «середньо інтегрує» локальні механічні властивості матеріалу в межах мікрооб'єму і є чутливим до анізотропії та місця вирізки зразків. На відміну від сталі 15X2НМФА, аустенітна сталь 08X18Н10Т з фрагменту трубопроводу Ду 325 демонструє більшу анізотропію. За результатами випробувань на розтяг границя міцності в тангенціальному і поздовжньому напрямках становить 647,0 та 620,7 МПа відповідно, тоді як за результатами інструментованого індентування ці значення складають відповідно 569,2 і 539,3 МПа, що на 12 та 13,1% менше даних розтягу. При застосуванні інструментованого індентування, беручи значення границі міцності в радіальному напрямку як базове, різниця між значеннями в тангенціальному і радіальному напрямках (зовнішнім і внутрішнім) досягає 9,6 – 12,7% відповідно, що свідчить про наявність анізотропії і повинно враховуватися при оцінці залишкового ресурсу трубопроводів. Отримано патент України № 151934 від 05.10.2022 р. на спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей з застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем.

Табл. 2. Характеристики міцності, за результатами випробувань на розтяг і методом інструментованого індентування зразків, виготовлених з фрагментів трубопроводів Ду 159 зі сталі 08X18Н10Т у трьох ортогональних напрямках

Напрямок	Границя міцності R_m , МПа, розтяг	Границя міцності R_m^{ind} , МПа, індентування
Поздовжній	627,3	612,8
Тангенціальний	656,0	632,6
Радіальний (зовн.)	–	611,1
Радіальний (внутр.)	–	610,0

Табл. 3. Характеристики міцності, за результатами випробувань на розтяг і методом інструментованого індентування зразків, виготовлених з фрагментів трубопроводів Ду 325 зі сталі 08X18H10T у трьох ортогональних напрямках

Напрямок	Границя міцності R_m , МПа, розтяг	Границя міцності R_m^{ind} , МПа, індентування
Тангенціальний	647,0	569,2
Поздовжній	620,7	539,3
Радіальний (зовн.)	—	519,2
Радіальний (внутр.)	—	504,9

Окрему групу становлять сталі з поверхневою неоднорідністю, зумовленою наявністю знеуглецьованого шару, який утворюється внаслідок тривалого нагрівання під час термічної обробки або зварювання. Такий шар характеризується зниженою твердістю та границею плинності порівняно з основним металом, що може спричиняти спотворення результатів індентування за відсутності контролю глибини відбитка.

Випробування товстолистової високоміцної сталі Hardox 450 проводились шляхом пошарового видалення знеуглецьованого шару.

Спочатку з фасадних поверхонь зразків знімали шари товщиною 50 мкм, що забезпечило чистоту поверхні зразків без раковин, сколів, слідів корозії та інших дефектів і дозволило отримати вихідні значення твердості. Далі по черзі знімалося по 30 мкм металу. На кожному етапі обробки поверхонь вимірювали твердість на стаціонарному твердомірі ТШ-2 і для порівняння – портативним твердоміром Ernst Computest SC.

Процедуру пошарового зняття металу повторювали до тих пір, поки твердість не починала збігатися до одного значення при вимірюваннях на різних твердомірах та при використанні кульок різного діаметру. На рис. 2 показано розподіл твердості при пошаровому знятті металу з листа сталі Hardox 450.

Експериментальні дослідження показали, що за наявності знеуглецьованого шару товщиною понад 0,2–0,3 мм, спостерігається істотне зниження розрахованих за параметрами індентування значень границі міцності сталі Armoх 500Т – до 1376 МПа, що на 18,1 % менше значень міцності металу без поверхневих дефектів (1680,0 МПа).

На основі проведених експериментальних досліджень і аналізу нормативних документів, що регламентують вимірювання твердості за методом Брінелля, удосконалено методику визначення твердості високоміцних і броньованих сталей з урахуванням впливу знеуглецьованого шару. Методика передбачає додаткові вимоги щодо підготовки поверхні, вибору індентора, рівня навантаження та контролю глибини відбитка, що забезпечує отримання достовірних результатів навіть у разі наявності поверхневої неоднорідності.

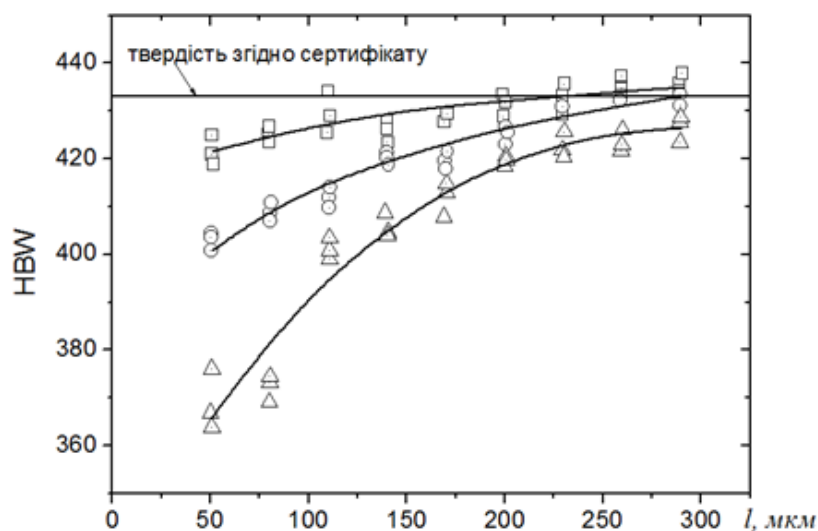


Рис. 2. Зміна значень твердості при пошаровому знятті металу сталі Hardox 450.
 □ – ТШ-2, $P = 29,42$ кН, $d = 10$ мм; ○ – ТШ-2, $P = 1,839$ кН, $d = 2,5$ мм;
 Δ – Ernst Computest SC.

Розроблено нову методику визначення товщини знеуглецьованого шару за результатами вимірювань твердості портативними приладами у макродіпазоні зусиль індентування, що підвищує ефективність контролю якості високоміцних сталей.

В четвертому розділі представлено результати застосування розроблених методик визначення механічних характеристик за даними індентування та вимірювань твердості для моніторингу технічного стану конструкційних сталей, що експлуатуються в умовах складного напружено-деформованого стану, з урахуванням анізотропії та поверхневої неоднорідності. В межах розділу здійснено моніторинг поточного стану металів відповідального обладнання, оцінено вплив зазначених факторів на твердість високоміцних сталей, проведено вхідний контроль металопрокату, контроль зварних з'єднань мостової сталі та оцінено ступінь деградації металу живильного трубопроводу АЕС.

Запропоновані методики контролю та відповідні нормативні документи впроваджено в практику оцінювання механічних властивостей сталей спеціального призначення на підприємствах ТОВ «Феромакс» та ПрАТ «НВО «Практика». На прикладі листових високоміцних легованих сталей Armoх 500T і Miilux PRKT.UA проведено апробацію стандарту СОУ 56-36-2021. Встановлено закономірності зміни твердості по товщині прокату (рис. 3). Після видалення поверхневого шару металу товщиною близько 350 мкм твердість сталі Armoх 500T відображає реальний стан матеріалу, про що свідчить збіг результатів вимірювань твердості, отриманих за допомогою твердоміра ТШ-2, із даними, наведеними у сертифікаті EN 10 204-3.1. Максимальне відхилення середнього значення твердості для двох поверхонь не перевищує 1 HBW ($510 \pm 1 \text{ HBW}$).

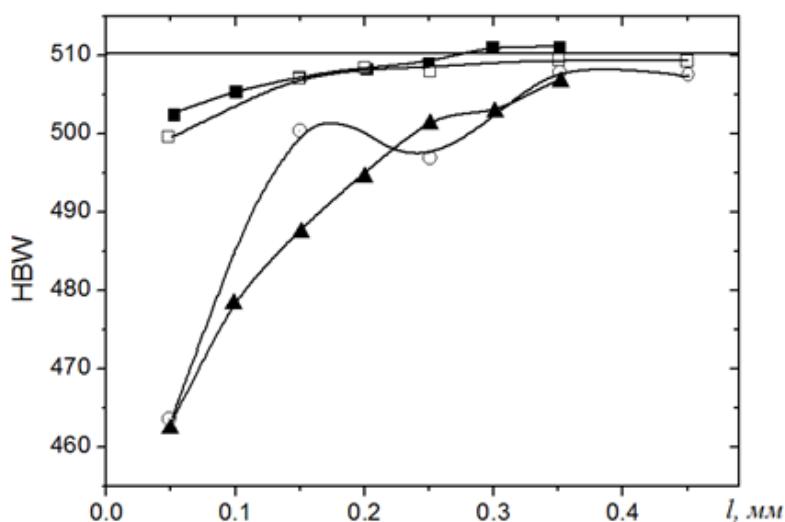


Рис. 3 Зміна твердості HBW при пошаровому знятті металу з обох поверхонь зразка із сталі Arмох 500Т, визначена за результатами випробувань твердоміром ТШ-2 (□, ■) згідно з ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 та портативним приладом Computest SC (○, ▲).

Встановлено, що результати вимірювань твердості за Брінеллем, виконані відповідно до вимог СОУ 56-36-2021, збігаються в межах допустимої похибки з даними сертифіката виробника за умови попереднього видалення знеуглецьованого шару. Застосування розроблених підходів підвищує інформативність і оперативність контролю якості високоміцних сталей та зменшує ризик постачання неякісного металопрокату для бронетехніки й конструкцій спеціального призначення.

Дослідження з контролю технічного стану зварних з'єднань мостової сталі 09Г2С виконувалось у співпраці з Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України. В рамках цієї роботи результати традиційних випробувань було доповнено застосуванням методу інструментованого індентування для оцінювання локальних механічних властивостей окремих ділянок зони термічного впливу поблизу зварного шва. Перевагою такого підходу є можливість визначення характеристик міцності та твердості у локальних зонах, тоді як випробування на розтяг відображає лише інтегральні властивості зразка, переважно для його найслабшої ділянки.

Проведено контроль зварних з'єднань із урахуванням анізотропії механічних властивостей металу. За результатами індентування встановлено локальні зміни твердості в межах зони термічного впливу та підвищену міцність металу шва (540...616 МПа) порівняно з основним металом (514...542 МПа), що свідчить про високу якість виконання зварного з'єднання (рис. 4). Отримані результати підтверджується їх відповідністю даним випробувань на розтяг, виконаних Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України. Метод інструментованого індентування показав високу чутливість до структурних неоднорідностей і може бути рекомендований для експрес-контролю якості зварювання.

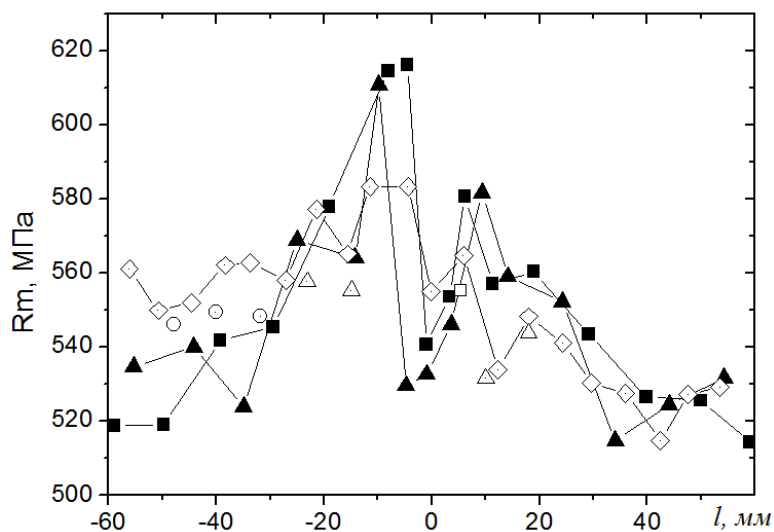


Рис. 4. Розподіл величин границі міцності вздовж стикового зварного з'єднання з сталі 09Г2С, що розраховані за результатами вимірювання твердості за Брінеллем з використанням стандарту СОУ 56-28-2018 (▲, ■), індентування (◇) і за результатами випробувань на розтяг, що були вирізані з різних зон стикового зварного з'єднання (Δ, ○, □). Нуль – середина зварного шва.

Для оцінки поточного стану металу живильного трубопроводу АЕС розроблено комплексний підхід, що базується на випробуваннях на розтяг, інструментованому індентуванні, вимірюванні твердості та аналізі показників розсіювання. Модельним матеріалом обрано сталь 20 у стані поставки та після тривалої експлуатації, що дозволяє оцінити зміни фізико-механічних характеристик, пов'язані з експлуатаційним навантаженням.

Границі міцності та плинності у поверхневих шарах (ближче до внутрішньої та зовнішньої поверхні) перевищують значення центральної частини на 10–30%, тоді як відносне звуження, навпаки, знижується на 10–40% (рис. 5). Такі відхилення свідчать про системний шаруватий характер деградації металу та прояв анізотропії механічних властивостей, що є критично важливим для оцінки ресурсу трубопроводу.

Дані інструментованого індентування дозволили оцінити локальні значення механічних характеристик металу по товщині стінки трубопроводу. Для сталі після тривалої експлуатації встановлено, що границі плинності та міцності змінюються по товщині стінки, що свідчить про прояв анізотропії та системну деградацію матеріалу. Для сталі у стані поставки значення механічних характеристик по товщині стінки не змінюються, що підтверджує однорідність матеріалу. Результати інструментованого індентування узгоджуються з даними випробувань як стандартних зразків, так і мікрозразків на розтяг.

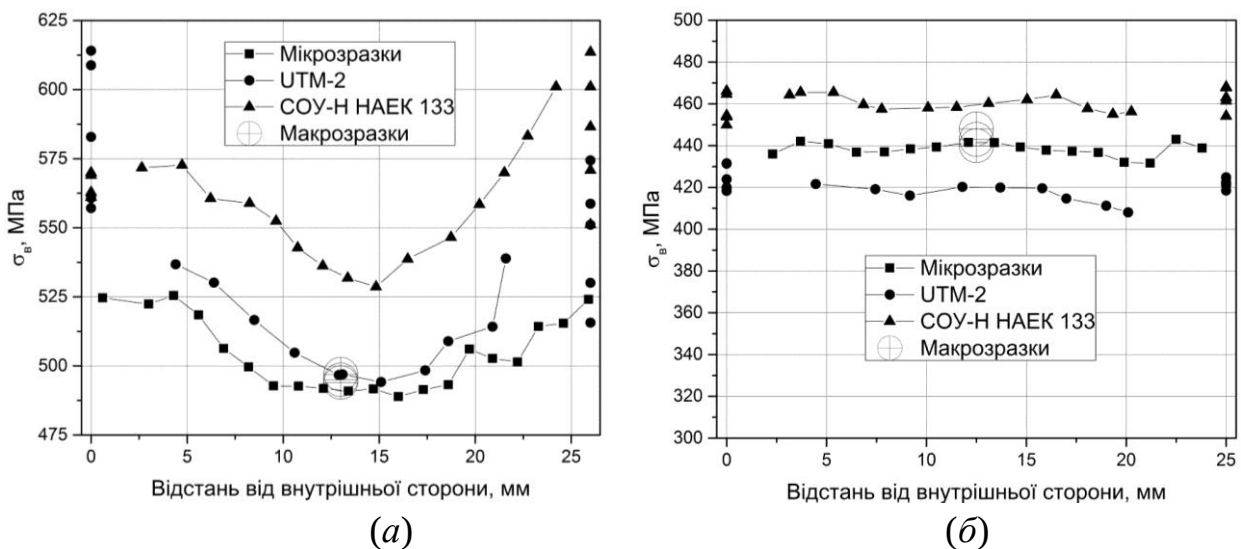


Рис. 5. Розподіл границі міцності по товщині стінки труби із сталі 20 на торцевій поверхні зразка з напрацюванням (а) і в стані поставки (б).

Отримані результати підкреслюють ефективність інструментованого індентування для неруйнівного контролю деградації металу трубопроводів АЕС з урахуванням анізотропії та неоднорідності властивостей по товщині стінки, що дозволяє здійснювати більш точну оцінку залишкового ресурсу відповідального обладнання.

У додатку наведено довідку про впровадження результатів дисертаційної роботи, і список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення достовірності та ефективності визначення механічних характеристик конструкційних сталей за допомогою методу інструментованого індентування шляхом удосконалення методик випробувань, модернізації експериментального обладнання та розробки нормативної бази для практичного застосування.

1. Модернізовано конструкцію переносної установки РІТ-02М шляхом заміни механічної системи кріплень на електромагнітну. Це забезпечило можливість проведення випробувань методом інструментованого індентування як на циліндричних, так і на плоских поверхнях, у тому числі на елементах листового прокату, що значно розширило сферу практичного застосування випробувального обладнання та підвищило продуктивність випробувань.

2. Розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо підвищення точності визначення механічних властивостей матеріалів за результатами індентування з урахуванням їх структурної неоднорідності та особливостей технічного стану. Виконано систематизацію конструкційних матеріалів за групами та адаптовано параметри випробувань для кожної групи. Результати експериментальних досліджень покладено в основу галузевого стандарту СОУ

56-38-2021, який регламентує визначення механічних характеристик металевих матеріалів за результатами інструментованого індентування та вимірювання твердості.

3. Удосконалено методику визначення твердості за методом Брінелля для високоміцних і броньованих сталей із урахуванням особливостей підготовки поверхні та параметрів індентування. Методика відповідає вимогам ДСТУ EN ISO 6506- 1:2019 і враховує додаткові фактори, що впливають на результати, зокрема вплив знеуглецьованого шару. На її основі розроблено стандарт СОУ 56- 36- 2021. Експериментально встановлено, що твердість після зняття знеуглецьованого шару для високоміцних та броньованих сталей є істотно вищою, ніж при вимірюванні без його зняття. У деяких випадках різниця становить 10 ... 40 HBW, що забезпечує більш точну оцінку механічних властивостей матеріалу.

4. Розроблено експрес-методику визначення товщини знеуглецьованого шару за результатами вимірювань твердості портативними приладами у макродіапазоні зусиль індентування. Методика апробована на високоміцній сталі Агтох 500Т, показавши глибину знеуглецьованого шару до 0,8 мм, що підтверджено вимірами мікротвердості та металографічними дослідженнями.

5. Удосконалено методику вимірювання твердості за методом Брінелля з використанням інструментованого індентування та проведено її експериментальну апробацію на модернізованій переносній установці РІТ-02М. Показано, що методика забезпечує розширення робочого діапазону вимірювань (110 ... 630 HBW), усунення залежності від типу матеріалу та узгодження з сучасними вимогами національних стандартів. Встановлено, що розбіжність між результатами індентування та класичного методу Брінелля не перевищує 3,9 %, що підтверджує високу точність і відтворюваність отриманих результатів.

6. Запропоновані методики та відповідні нормативні документи впроваджено в практику контролю механічних властивостей сталей спеціального призначення на підприємствах «Феромакс», ПрАТ «НВО «Практика». Отримані в роботі результати показали, що застосування методу інструментованого індентування сприяє підвищенню об'єктивності оцінювання механічних характеристик, зменшенню ймовірності постачання неякісної продукції, що є критично важливим для виробництва бронетехніки.

7. Розроблено комплексний підхід до оцінювання механічних характеристик конструкційних матеріалів відповідального обладнання на прикладі трубопровідної сталі 20 за результатами вимірювання твердості за Брінеллем та інструментованого індентування. Встановлено системний шаруватий характер розподілу механічних властивостей по товщині стінки труби після експлуатаційного напрацювання, що підтверджує необхідність врахування просторової неоднорідності матеріалу для коректного визначення залишкового ресурсу обладнання.

8. Показано ефективність застосування методики інструментованого індентування для дослідження зварних з'єднань на прикладі сталі 09Г2С.

Перевагою такого підходу є можливість визначення не лише твердості, а й характеристик міцності у локальних зонах металу, тоді як випробування на розтяг відображає лише інтегральні властивості зразка. За результатами індентування встановлено локальні зміни механічних властивостей у межах зони термічного впливу та вищий рівень границі міцності металу шва (540...616 МПа) порівняно з основним металом (514...542 МПа), що підтверджує високу якість зварного з'єднання. Отримані результати свідчать про високу чутливість і інформативність методу інструментованого індентування, який може бути використаний для експрес-контролю якості зварювання за умови подальшої стандартизації параметрів випробування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, опубліковані в журналах, які індексуються науково-метричними базами Scopus / Web of Science:

1. Katok O.A., Muzyka M.R., Shvets' V.P., **Sereda A.V.**, Kharchenko V.V., Bisyk S.P. Determination of hardness of high-strength steels by the Brinell method. Part 1. Improvement of measurement accuracy. *Strength of Materials*. 2021. Vol. 53 № 6. P. 902-908. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00358-7>
2. Katok O.A., Muzyka M.R., Shvets V.P., **Sereda A.V.**, Kharchenko V.V., Bisyk S.P. Determination of hardness of high-strength steels by Brinell method. Part 2. Improvement of the method and measurement results. *Strength of Materials*. 2022. Vol. 54 № 5. P. 802-808. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00456-6>
3. **Sereda A.V.**, Kravchuk R.V., Katok O.A., Rudnytskyi M.P., Kharchenko V.V. Equipment and methodology for studying the behavior of high-strength steels under static pressing of plate specimens. *Strength of Material*. 2023. Vol. 55 № 4. P. 743-750. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00564-x>
4. Katok O.A., Kravchuk R.V., **Sereda A.V.**, Kharchenko V.V., Rudnytskyi M.P. Updating of a portable installation for determining the strength characteristics of structural elements by instrumented indentation. *Strength of Materials*. 2023. Vol. 55 № 5. P. 954-959. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00586-5>
5. Katok O.A., Kravchuk R.V., **Sereda A.V.**, Rudnytskyi M.P., Kharchenko V.V. Improvement of a procedure for determining the Brinell hardness of structural steels based on the results of instrumented indentation. *Strength of Materials*. 2024. Vol. 56 № 2. P. 298-304. <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00649-1>

Статті, опубліковані в наукових фахових виданнях:

6. Kharchenko V., Katok O., Kravchuk R., Kravchuk A. **Sereda A.** An experimental technique for studying the behavior of high-strength steel under static punching. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. Vol. 103 № 3. P. 117–122. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/37711>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Каток О. А., Кравчук Р. В., **Середа А. В.** Неруйнівний контроль поточного стану конструкційних матеріалів технічних виробів за результатами індентування / В кн.: Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану (Одеса, готель «Аркадія» 6-10 вересня 2021 р). Тези допов. II наук. практ. конф. під ред. Ю.М. Посипайка / Київ: Міжнар. Асоціація “Зварювання”. 2021. С. 56.

https://patonpublishinghouse.com/proceedings/NK_Tezisy_2021.pdf

8. Каток О.А., Харченко В.В., Кравчук Р.В., **Середа А.В.**, Рудницький М.П., Швець В.П., Бісик С.П. Вимірювання твердості високоміцних легованих сталей із застосуванням стандарту СОУ 56-36-2021. / В кн.: “Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій” Праці Міжнар. наук.-техн. конф. (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.) – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 2022. –С. 81 – 83. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39105>

9. Харченко В.В., **Середа А. В.**, Кравчук Р.В., Рудницький М.П. Особливості визначення твердості за Брінеллем методом інструментованого індентування. / Матеріали доповідей Міжнар. наук. конф. “Актуальні проблеми механіки” до 145-річчя від дня нар. С.П. Тимошенка (Київ, 14-16 листопада 2023 р.) Київ, Дніпро, Львів, Харків. 2023. С. 350–351.

https://inmech.kyiv.ua/doc/news/2023/actual_problems_of_mechanics/abstracts.pdf

10. **Середа А.В.**, Кравчук Р.В., Каток О.А., Рудницький М.П., Швець В.П., Харченко В.В. Визначення знеуглецьованого шару легованих високоміцних сталей за результатами вимірів твердості. / Матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф. «Прикладна механіка» присв. 80-річчю з дня народж. проф. Ч. В. Пульки (Тернопіль, 6-7 червня, 2024 р.) – Тернопіль : Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. 2024. – С 353–356.

https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/45542/2/AM_2024_Sereda_A-Determination_of_the_decarbonized_353-356.pdf

11. Kharchenko V.V., Katok O.A., **Sereda A.V.**, Rudnitskyi M.P., Kravchuk R.V., Bisyk S.P. Determination of strength characteristics of high-strength sheet steels by hardness and instrumented indentation. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 277–283. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.035>

Стандарти підприємства (СОУ) та патенти, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Харченко В.В., Каток О.А., Музика М.Р., Швець В.П., **Середа А.В.** СОУ 56-36-2021. Матеріали металеві. Високоміцні та броньовані листові сталі. Визначення твердості за методом Брінелля. *Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*. С.22. Чинний від 17.12. 2021.

13. Харченко В.В., Каток О.А., Рудницький М.П., Кравчук Р.В., **Середа А.В.** СОУ 56-37-2021. Матеріали металеві. Випробування на інструментоване індентування. Метод випробування за кімнатної температури. *Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*. С.24. Чинний від 17.12. 2021.

14. Харченко В.В., Каток О.А., Рудницький М.П., Кравчук Р.В., **Середа А.В.** СОУ 56-38-2021. Матеріали металеві. Визначення механічних характеристик за результатами вимірювання твердості та індентування. Методи розрахунку. *Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*. С.19. Чинний від 17.12. 2021.

15. Музика М. Р., Ламашевський В. П., **Середа А. В.** СОУ 56-39-2021. Визначення рівня поверхневих залишкових напружень методом *LM*-твердості. *Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*. С.24. Чинний від 17.12.2021.

16. Харченко В.В., Каток О.А., Рудницький М.П., Кравчук Р.В., **Середа А.В.** СОУ 56-01-2025. Матеріали металеві вимірювання твердості методом Брінелля за результатами випробувань на індентування. Методи розрахунку. *Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*. С.9. Чинний від 01.07.2025.

17. Музика М.Р., Швець В.П., Каток О.А., Харченко В.В., **Середа А.В.** Патент на корисну модель 151934. *МПК G01N 3/00*. Спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей із застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем. Бюл. № 40 від 05.10.2022.

АНОТАЦІЯ

Середа А. В. Удосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей за результатами індентування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, 2025.

Дана робота присвячена дослідженням, спрямованим на вдосконалення методик визначення механічних характеристик конструкційних сталей за допомогою інструментованого індентування, що мають вагоме значення для підвищення надійності та безпечної експлуатації елементів відповідальних конструкцій.

Модернізовано переносну установку РІТ-02М для визначення характеристик міцності елементів конструкцій в умовах експлуатації методом інструментованого індентування. Вдосконалено методику знаходження параметра A , що дало змогу підвищити точність визначення характеристик міцності. У вдосконаленій методиці реалізовано визначення максимального значення параметра $R_{m \max}$, який має кращу фізичну відповідність локальному опору матеріалу пластичній деформації і забезпечує вищу точність методу. Вдосконалено методику визначення твердості за Брінеллем інструментованим індентуванням, що дало змогу уникнути прив'язки до певних матеріалів завдяки використанню повірених еталонних мір твердості, розширити діапазон вимірювань (110...630 *HBW*) і врахувати сучасні вимоги українських нормативних документів.

На основі аналізу основних тенденцій підходів до визначення механічних характеристик високоміцних сталей методом інструментованого індентування,

проведених експериментальних досліджень і аналізу нормативних документів створено Стандарти Інституту СОУ 56-37-2021 і СОУ 56-38-2021, що відповідно регламентують застосування методу інструментованого індентування для експрес-контролю і входної атестації матеріалів спеціального призначення.

Покращено методику визначення твердості за методом Брінелля, що адаптована до сучасних вимог національного і міжнародного нормування. Розроблено стандарт СОУ 56-36-2021, який забезпечує високу точність результатів, зокрема для високоміцних сталей типу Hardox 450 та Arмох 500Т. Отримано патент України № 151934 від 05.10.2022 р. на спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей із застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем.

Методика індентування успішно реалізована для дослідження зварних з'єднань сталей, зокрема марки 09Г2С. Встановлено, що індентування забезпечує виявлення локальних змін механічних властивостей у зоні термічного впливу. Отримані результати досліджень механічних характеристик трубного прокату Ду 426 мм сталі 20 у двох станах вказують на необхідність системного та всестороннього підходу до визначення механічних характеристик за результатами вимірювання твердості за Брінеллем чи індентування та їх похибки у порівнянні з даними одновісного розтягу, а також при розробці відповідних кореляційних залежностей, які складають основу нормативних документів. При таких дослідженнях варто слідкувати, щоб характеристики визначалися в одному і тому ж об'ємі матеріалу чи місці конструкції, інакше це може призвести до спотворення їх значень, невірно визначеного ресурсу та відповідно небажаних наслідків при експлуатації відповідального обладнання.

Ключові слова: механічні характеристики, методики, метод інструментованого індентування, твердість, одновісний розтяг, зразок, конструкційні сталі, зварне з'єднання.

ABSTRACT

Sereda A. V. Improvement of Methods for Determining Hardness and Strength Characteristics of Structural Steels Based on Instrumented Indentation Results. – Qualifying scientific work, manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines – G. S. Pisarenko Institute of Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

This work is devoted to studies aimed at improving methods for determining the mechanical characteristics of structural steels using instrumented indentation, which are of significant importance for increasing the reliability and safe operation of critical structural components.

The portable PIIT-02M setup was modernized for determining strength characteristics of structural components in in-service conditions by the instrumented indentation method. The procedure for determining parameter A was improved, which made it possible to increase the accuracy of strength characterization. In the improved procedure, the determination of the maximum value of parameter $R_{m,max}$ was

implemented; this parameter has better physical correspondence to the local resistance of a material to plastic deformation and provides higher accuracy of the method. The method for determining Brinell hardness by instrumented indentation was improved, which made it possible to avoid binding to specific materials through the use of calibrated reference hardness blocks, to extend the measurement range (110–630 HBW), and to account for current requirements of Ukrainian regulatory documents.

Based on an analysis of the main trends in approaches to determining the mechanical characteristics of high-strength steels by instrumented indentation, experimental studies, and analysis of regulatory documents, Institute Standards SOU 56-37-2021 and SOU 56-38-2021 were developed. These standards regulate, respectively, the application of the instrumented indentation method for express inspection and for incoming certification of special-purpose materials.

The Brinell hardness determination methodology was further improved and adapted to modern national and international standardization requirements. Standard SOU 56-36-2021 was developed, ensuring high reliability of results, in particular for high-strength steels such as Hardox 450 and Armox 500T. Ukrainian Patent No. 151934 was obtained for a method for determining the level of anisotropy of high-strength plates using the brinell hardness method.

The indentation methodology was successfully applied to the investigation of welded joints of steels, including grade 09G2S. It was established that indentation enables the detection of local changes in mechanical properties in the heat-affected zone. The obtained results of studies of the mechanical characteristics of pipe products of steel 20 with a diameter of 426 mm in two conditions indicate the need for a systematic and comprehensive approach to determining mechanical characteristics based on Brinell hardness or indentation measurements and their errors in comparison with uniaxial tensile test data, as well as when developing the corresponding correlation relationships that form the basis of regulatory documents. In such studies, it is necessary to ensure that the characteristics are determined in the same volume of material or at the same location in the structure; otherwise, this may lead to distortion of their values, incorrect estimation of service life, and, consequently, undesirable consequences during the operation of critical equipment.

Keywords: mechanical characteristics, methodologies, instrumented indentation method, hardness, uniaxial tension, specimen, structural steels, welded joint.

Підп. до друку 03.04.2026 Формат 60x84/16. Папір офс. №1
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,10 Обл.-вид. арк. 0,85
Тираж 100 прим. Зам. № 188.

Діленьниця оперативного друку ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11.