

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Середи Альони Вікторівни
«Удосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності
конструкційних сталей за результатами ідентування»
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.09 – Динаміка та міцність машин.

Актуальність теми.

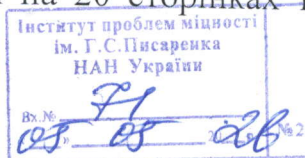
Відомо, що в процесі експлуатації відповідальних конструкцій, які працюють в складних умовах термо-силового навантаження, початкові механічні властивості практично всіх конструкційних матеріалів змінюються, матеріали деградують. Для достовірної оцінки залишкового ресурсу конструкцій необхідно знати реальні механічні властивості матеріалів після заданого терміну напрацювання. В даному випадку традиційні руйнівні методи механічних випробувань не придатні, тому альтернативою є методи непрямого (неруйнівного) контролю. Не зважаючи на велику кількість розроблених методів неруйнівного контролю, на жаль немає універсального методу, тому що кожний із подібних методів має як свої переваги, так і недоліки.

Метод інструментованого ідентування в цьому плані, мабуть, найбільш перспективний, оскільки він дає можливість безпосередньо за діаграмою ідентування визначати цілий комплекс механічних властивостей – від твердості до механічних властивостей при розтягу. Крім того, слід відзначити його високу точність, простоту використання, можливість автоматизації процесу, а також можливість дослідження механічних властивостей на нано-, мікро- та макрорівнях.

Таким чином, робота є актуальною як з наукової так і з практичної точки зору. Робота виконувалася в розвиток наукового напрямку відділу чисельних та експериментальних методів дослідження конструкційної міцності Інституту проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, який пов'язаний з вдосконаленням методик визначення механічних характеристик конструкційних сталей за допомогою інструментованого ідентування. Кінцевою метою цих досліджень є створення національного стандарту з визначення механічних характеристик сталей за результатами ідентування.

Загальна характеристика роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 159 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 199 сторінок машинописного тексту, включаючи 48 рисунків, 27 таблиць, список літератури на 20 сторінках та 2 додатків.



Метою роботи є удосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності широкого класу конструкційних матеріалів, як ізотропних так і анізотропних, за результатами інструментованого ідентування та розробка відповідної нормативної бази для впровадження методу інструментованого ідентування в практику контролю механічних властивостей відповідальних конструкцій як на стадії виготовлення, так і в процесі напручування.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, визначено мету, завдання, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, приведено відомості про апробацію результатів та представлено відомості про публікації авторки.

У **першому розділі** авторкою аналізується література за напрямком роботи, визначаються переваги і недоліки конкретних методів неруйнівного контролю механічних властивостей конструкційних матеріалів. Особливу увагу авторка приділяє аналізу основного діючого міжнародного стандарту ISO 14577-1:2015, якій регламентує застосування методу інструментованого ідентування. Запропонованій в стандарті комплекс фізико-механічних властивостей не зачіпає визначення таких механічних властивостей як, межі плинності та міцності, відносні видовження та звуження, залишкові напруження, анізотропію, неоднорідність металу та ін., і тому в світі продовжуються роботи з розвитку методик визначення характеристик механічних властивостей матеріалів за результатами ідентування. Слід підкреслити, не зважаючи на перспективність методу інструментованого ідентування в Україні на сьогодні не існує національного стандарту, якій би регламентував використання методу інструментованого ідентування для визначення механічних властивостей матеріалів та встановлював вимоги до обладнання.

Далі в розділі 1 аналізуються раніше розроблені підходи з визначення механічних характеристик за результатами інструментованого ідентування та подальші напрямки удосконалення цих методів. Зокрема, і методи, які розроблені в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України щодо визначення механічних властивостей за твердістю за Брінеллем. Тут у рецензента виникає питання, як можна пояснити, що для сталей з різними початковими механічними властивостями і різним початковим хімічним складом кореляційні залежності 1.12 і 1.13 є єдиними з однаковими коефіцієнтами (сторінка 40 дисертації)?

В розділі 1 також розглядаються питання впливу анізотропії механічних властивостей на результати вимірювань і проблеми, які пов'язані з точністю і відтворенням результатів вимірювань для розробки достовірної методики визначення твердості високоміцних сталей за методом Брінелля. Вказанні

конкретні заходи, реалізація яких дозволить зменшити похибки вимірювань і підвищити надійність оцінки механічних властивостей матеріалів.

В кінці розділу сформульовані задачі дослідження.

У **другому розділі** описані шляхи модернізації переносної установки РПТ-02 для випробувань методом інструментованого індентування. Зокрема, додатково розроблена система кріплення установки на плоских поверхнях за рахунок електромагнітів, що значно розширило номенклатуру досліджуваних об'єктів. Було модернізовано вузол індентування установки. Для цього використано нову оправу для індентора у формі кульки діаметром 2,5 мм із карбіду вольфраму і під цю оправу було сконструйовано нове кріплення датчика переміщень. Тут слід підкреслити, що, на жаль, не всі матеріали магнітні і тому є обмеження для використання кріплення за рахунок електромагнітів. Наприклад, дуже розповсюдженні в промисловості аустенітні сталі AISI 304 і AISI 316 немагнітні.

В роботі авторка також зосередила зусилля на вдосконаленні параметра пластичності A у базовому підході, запропонованому Хаггагом [93]. Запропоновані нововведення були формалізовані і покладені в основу галузевого стандарту СОУ 56-37-2021. Ця удосконалена методика на відміну від відомих методик дозволяє здійснювати параметричну оцінку межі плинності матеріалу, що особливо важливо для напрацьованого матеріалу.

Експерименти з розробки власного підходу щодо визначення твердості за результатами випробувань на ідентування на лабораторній установці UTM-20НТ дозволили реалізувати компроміс між точністю оцінки локального опору пластичній деформації та практичною реалізованістю вимірювань в умовах обмеженого навантаження на індентор, коли використовується кулька з карбіду вольфраму діаметром 2,5 мм. Порівняння результатів вимірювань твердості на 10 марках сталей за Брінеллем згідно з ДСТУ ISO 6506-1:2019 і за методом інструментованого ідентування з використанням вдосконаленої методики показало 5%-вий інтервал між значеннями твердості. Це дозволяє використовувати цю методику для моніторингу стану діючого відповідального обладнання, причому у розширеному діапазоні вимірювань (110...630 *HBW*)

Результати досліджень лягли в основу стандарту СОУ 56-01-2025.

На думку рецензента, параграф 2.4 розділу 1, де детально описаний зміст стандартів СОУ 56-37-21, СОУ 56-38-21, СОУ 56-38-2021, треба винести в окремий додаток.

Розробленні стандарти СОУ 56-36-2021, СОУ 56-37-2021, було використано при вхідній атестації листового прокату із 12 сталей різних класів для оцінки меж плинності $R_{p0.2}$ і міцності R_m . В результаті встановлено, що

відхилення характеристик меж плинності і міцності досліджуваних сталей, за методом інструментованого ідентування, від відповідних характеристик, що отриманні на розтяг, не більше 5,2 %. В той же час відхилення характеристик меж плинності і міцності, що визначенні за результатами даних твердості *HBW* до 10 %. Таким чином, дана методика може успішно застосовуватись для експрес-контролю поточного стану матеріалу конструкцій.

У третьому розділі спочатку експериментально обґрунтовано доцільність застосування методу ідентування для надійного визначення меж плинності і міцності у будь-якому напрямку для ізотропних сталей Ст 3, 20 і 45.

Подальші дослідження на анізотропних сталях 15Х2МНФА і 08Х18Н10Т були зроблені з метою оцінки впливу анізотропії механічних характеристик на результати випробувань методом інструментованого ідентування і визначення її впливу на точність кореляції між твердістю та межами плинності і міцності.

Досліди на теплостійкій сталі 15Х2МНФА показали, що за результатами вимірювання твердості за методом Брінелля *HBW* в трьох ортогональних напрямках (відхилення результатів не перевищує 0,5 %) практично неможливо спрогнозувати реальні значення меж плинності і міцності, отриманими при випробуваннях на одновісний розтяг. Особливо це стосується оцінки межі плинності. Максимальне відхилення межі плинності в різних напрямках, визначене за результатами випробувань на одновісний розтяг, складає 16,7 %. Для межі міцності це відхилення складає 7,2 %. Метало-фізичними дослідженнями підтверджено суттєві ознаки анізотропії даної сталі в різних напрямках.

Аналогічні оцінки меж плинності і міцності для сталі 15Х2МНФА з даних твердості *HBW* і за методом інструментованого ідентування показали, що ці методи є чутливими до анізотропії, однак дають значно більші помилки, у порівнянні з результатами випробувань на одновісний розтяг. Так, зокрема, дані за твердістю *HBW* в напрямку ОХ вирізки зразків показали відхилення значень меж плинності і міцності, у порівнянні з результатами на одновісний розтяг, 21,4 % та 7,4 % і за методом інструментованого ідентування, відповідно, 21,2 % і 8,9 %. Характеристики міцності, що отримані за результатами випробувань на розтяг і методом інструментованого ідентування зразків з фрагментів трубопроводів Ду 325 із анізотропній сталі 08Х18Н10Т також показали значні відхилення: в тангенціальному напрямку до 13,7 % і в повздовжньому – до 15,1 %. Цікаво відмітити, що дані неруйнівного контролю показують консервативні оцінки і визначення межі плинності мають значно більші відхилення.

Дані проведених експериментів свідчать про те, що використання для оцінки меж плинності і міцності анізотропних матеріалів даних твердості *HBW*

і за методом інструментованого ідентування вимагають подальшого удосконалення цих методик.

В розділі 3 також детально розглянуті питання достовірної оцінки твердості товстолистових високоміцних сталей. Запропонована методика поетапного видалення знеуглецьованого шару дозволила отримати реальні значення твердості для двох марок сталей Arмох 500Т і Hardox 450. Для сталі Arмох 500Т виявлено глибину знеуглецьованого шару з двох сторін по товщині листа на рівні 0,8 мм, що підтверджено металографічними дослідженнями і вимірюванням мікротвердості за Віккерсом. Досліди з дослідження впливу поверхневого шару на визначення механічних характеристик на прикладі високоміцних сталей Arмох 500Т і Hardox 450 показали, що характеристики міцності, визначені за результатами ідентування без видалення поверхневого шару, нижчі, ніж властивості основного об'єму металу. Однак, тут виникає питання, чи потрібно враховувати якимось чином твердість цих поверхневих шарів, так як загальна товщина знеуглецьованих шарів сталі Arмох 500Т 0,8 мм при загальній товщині листа 10 мм, тобто складає 8 %?

Дані таблиці 3.10, де порівнюються характеристики меж плинності і міцності високоміцних сталей Arмох 500Т і Hardox 45 за результатами випробувань на розтяг і методом інструментованого ідентування показали, що для межі міцності це відхилення не перевищує 4 %, а для межі плинності – 5,2 %.

Обговорюючи причини розкиду результатів випробувань високоміцних сталей на твердість за методом Брінелля різними дослідниками авторка аналізує і звертає увагу на ряд основних факторів, які впливають на достовірність даних. Розкид даних, в першу чергу, залежить від матеріалу кульки індентора, конкретного приладу для вимірювання твердості і конкретного навантаження на індентор.

В четвертому розділі розглядаються питання моніторингу реального стану металів відповідального обладнання з використанням удосконалених методик визначення меж плинності і міцності за показниками твердості за Брінеллем *НВW* стандартним методом та інструментованим ідентуванням. Зокрема, досліджуються високоміцні сталі Arмох 500Т, Miilux RRKT.UA, Отримані дані підтвердили, що поверхневий шар листових високоміцних сталей в стані поставки занижує реальні значення твердості. Дослідження локальних механічних властивостей зварних з'єднань мостової сталі 09Г2С методом інструментованого ідентування дало змогу детально проаналізувати зміну характеристик міцності і твердості в зоні термічного впливу (ЗТВ) та безпосередньо у зварному шві. Проведений контроль підтвердив ефективність

методу інструментованого ідентування для діагностики зварних з'єднань мостових сталей. Найбільш комплексні дослідження проведенні на трубопровідній сталі 20, як в стані поставки, так і після напрацювання 100000 циклів в умовах експлуатації. За результатами випробувань стандартних зразків і мікроразків вирізаних із різних зон труби із сталі 20 на розтяг, а також випробувань на твердість за Брінеллем та інструментованим ідентуванням отриманні межі плинності, міцності та відносного видовження металу труби в різних станах і в різних зонах за різними методами оцінки. Основний висновок, зроблений авторкою за результатами комплексного підходу до оцінки поточного стану сталі 20, полягає в тому, що значення механічних характеристик сталі 20 з напрацюванням суттєво змінюються по товщині стінки труби. Причому, ближче до поверхонь відносно звуження зменшується на 10...40 %, у порівнянні з вихідним станом, а межі плинності і міцності, навпаки, збільшуються на 10...30%. Це проява явних ознак зкрихлення металу. Слід відмітити, що на відміну від сталі 20 з напрацюванням значення механічних характеристик по товщині труби сталі 20 у стані поставки майже не змінюються. Важливим є також той факт, що значення механічних характеристик, що визначено за твердістю по Брінеллю чи інструментованим ідентуванням за нормативними документами, у порівнянні з даними випробувань мікроразків на розтяг знаходяться в межах допустимої похибки цих документів. Не менш важливо, що дані на розтяг мікроразків і макроразків в центральній частині стінки труби із даної сталі практично співпадають. Відхилення знаходяться в межах декількох відсотків.

Висновки містять в собі якісні та кількісні показники, є конкретними і оригінальними; вони відповідають поставленим задачам і підтверджені відповідними вимірюваннями.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Удосконалено та стандартизовано методики неруйнівного контролю механічних характеристик широкого класу конструкційних матеріалів за параметрами діаграм інструментованого ідентування.

2. Удосконалено методику вимірювання твердості за методом Брінелля з використанням інструментованого ідентування, що забезпечило розширення робочого діапазону вимірювань (110...630 *HBW*) і уніфікацію вибору навантаження на індентор. Висока точність і відтворюваність результатів розробленої методики підтверджена низькою розбіжністю між результатами ідентування та класичного методу Брінелля (до 3,9 %).

3. Удосконалено методику визначення твердості за методом Брінелля для високоміцних і броньованих листових сталей з урахуванням впливу знеуглецьованих поверхневих шарів.

Практичне значення роботи полягає в наступному.

1. Вдосконаленні методичні підходи до визначення меж плинності і міцності конструкційних сталей методом інструментованого індентування.
2. Отриманий на сталях різних класів великий масив експериментальних даних з оцінки меж плинності і міцності методом інструментованого індентування та порівняний з даними стандартних методів оцінки.
3. Результати експериментальних досліджень покладено в основу галузевих стандартів СОУ 56-38-2021 і СОУ 56-36 -2021.
4. Технічна новизна роботи підтверджена патентом на корисну модель.
5. Впровадження результатів роботи, зокрема, застосування інструментованого індентування в практиці неруйнівного контролю металу відповідального обладнання АЕС має велике значення і підтверджене відповідним документом, підписаним керівництвом НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ».

Достовірність результатів.

Авторка використовує сучасне сертифіковане випробувальне обладнання та методики, що відповідають міжнародним стандартам. По всіх результатах обчислень проводиться оцінка точності застосованих методів, а також порівняння отриманих даних із результатами стандартних механічних випробувань.

Повнота викладу основних результатів роботи.

Дисертація достатньо повно представлялась на українських та міжнародних конференціях і її всі матеріали опубліковані в достатній кількості статей. Певні розділи опублікована в міжнародних журналах, зокрема в журналах Strength of Materials і Procedia Structural Integrity.

Особистий внесок здобувача щодо публікацій, написаних у співавторстві відзначено в дисертації та авторефераті. Указані публікації відображають основний зміст дисертації, об'єм і характер проведених теоретичних і практичних досліджень.

Зміст дисертації і автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, наведені в самій дисертації.

У цілому, дисертація написана в зрозумілій формі, вона не містить непотрібних деталізацій, всі результати достатньо точно описані і прокоментовані. Тим не менше до роботи є деякі зауваження.

Зауваження та коментарі до дисертації:

Деякі зауваження по дисертації були висловлені при аналізі розділів дисертації, зокрема:

1. Як можна пояснити, що для сталей з різними початковими механічними властивостями і різним початковим хімічним складом кореляційні залежності 1.12 і 1.13 є єдині з однаковими коефіцієнтами (сторінка 40

дисертації)?

2. Параграф 2.4 розділу 1, де детально описаний зміст стандартів СОУ 56-37-21, СОУ 56-38-21, СОУ 56-38-2021, треба винести в окремий додаток.

3. Виникає питання, чи потрібно враховувати якимось чином твердість поверхневих шарів товстолистових високоміцних сталей, так як загальна товщина знеуглецьованих шарів сталі Armoх 500Т 0,8 мм при загальній товщині листа 10 мм, тобто складає 8 %?

Основне зауваження відноситься до оцінки методом інструментованого індентування меж плинності і міцності анізотропних конструкційних матеріалів. В дисертації не проведено глибокого аналізу причин значного відхилення значень меж плинності і міцності анізотропних матеріалів за методом інструментованого індентування, у порівнянні з результатами на одновісний розтяг.

Однак, відзначені недоліки та зауваження не знижують загального високого рівня роботи, не ставлять під сумнів кваліфікацію авторки, а направлені виключно на заохочення і покращання подальшої дослідницької роботи.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Середи Альони Вікторівні «Удосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей за результатами індентування», є завершеним науковим дослідженням, де розглядаються комплексні питання, які включають удосконалення методик випробувань, модернізацію експериментального обладнання та розробку нормативної бази для підвищення достовірності та ефективності визначення механічних характеристик конструкційних сталей різних класів за допомогою методу інструментального індентування.

Вважаю, що дисертаційна робота за своєю актуальністю, науковою новизною, теоретичним рівнем і практичною цінністю відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567, а її авторка – Середа Альона Вікторівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – Динаміка та міцність машин.

Професор кафедри механіки
НУБіП України,
доктор технічних наук, професор


1.05.2026
Микола ЧАУСОВ

Підпис засвідчую

