

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

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



*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

СЕРЕДА АЛЬОНА ВІКТОРІВНА

УДК 539.4

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.02.09 «Динаміка та міцність машин»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



А. В. Середа

Науковий керівник:
Харченко Валерій Володимирович
академік НАН України,
доктор технічних наук, професор

Київ 2025

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 розвиток та 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 РІІТ-02М для визначення характеристик міцності елементів конструкцій в умовах експлуатації методом інструментованого індентування. Модернізація системи кріплень переносної установки РІІТ-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.

Удосконалено методику знаходження параметра A , що дало змогу підвищити точність визначення характеристик міцності.

Обґрунтовано доцільність заміни назви параметра a з «параметр пропорційності пластичного індентування» на більш фізично коректну – «параметр локального опору пластичній деформації». Нова назва точніше відображає сутність величини як кількісну характеристику опору матеріалу локалізованою пластичним деформуванням в зоні контакту з індентором. Значення параметра a суттєво залежить від вибраного діапазону апроксимації діаграми індентування і має своє максимальне значення. Таке значення найбільш повно відображає здатність матеріалу протистояти залишковій

локальній деформації і є інформативним індикатором його 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 ($110 \dots 630 \text{ HBW}$) 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 [58] і СОУ 56-38-2021 [59], що відповідно регламентують застосування методу інструментованого індентування для експрес-контролю і вхідної атестації матеріалів спеціального призначення.

Удосконалено методику визначення твердості за методом Брінелля, що адаптована до сучасних вимог національного і міжнародного нормування. Розроблено стандарт СОУ 56-36-2021 [57], який забезпечує високу достовірність результатів, зокрема для високоміцних сталей типу Hardox 450 та Armax 500T. Отримано патент України № 151934 від 05.10.2022 р. на спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей із застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем.

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

також успішно реалізована для дослідження зварних з'єднань сталей, зокрема марки 09Г2С. Встановлено, що індентування забезпечує виявлення локальних змін механічних властивостей у зоні термічного впливу. Отримано експериментальні свідчення підвищеної міцності металу в зоні шва, що підтверджує належну якість зварного з'єднання та високу інформативність методу.

Отримано 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. 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 modernization of the fastening system of the portable RIIT-02M unit enabled testing not only on cylindrical surfaces but also on flat surfaces, including rolled sheet metal and structures fabricated from it. This enhancement increased testing productivity and expanded the operational scope of the unit.

The procedure for determining parameter A was improved, which made it possible to increase the accuracy of strength characterization.

The expediency of renaming parameter a from “plastic indentation proportionality parameter” to the more physically justified term “parameter of local resistance to plastic deformation” has been substantiated. The proposed designation more accurately reflects the physical meaning of the quantity as a quantitative characteristic of a material’s resistance to localized plastic deformation within the contact zone with the indenter. The value of parameter a significantly depends on the selected approximation range of the indentation diagram and exhibits a maximum. This maximum value most comprehensively characterizes the material’s ability to resist residual localized deformation and serves as an informative indicator of its strength. 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 proposed methodologies and the corresponding regulatory documents have been implemented in the practice of mechanical property control of special-purpose steels at the enterprises Techimpex, PrAT «NPO «Praktika», and Feromax. The application of the instrumented indentation method enhances the objectivity of mechanical property assessment and reduces the likelihood of supplying substandard products, which is critically important for armored vehicle manufacturing.

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. Experimental evidence of increased metal strength in the weld zone has been obtained, confirming the proper quality of the welded joint and the high informativeness of the method.

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.

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 І 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., Kravchuk R.V., **Sereda A.V.**, Shvets V.P. Analysis of the methods for determination of strength characteristics of NPP main equipment metal from the results of hardness and indentation measurements. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 59–65.

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.003>

12. 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:

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНДЕНТУВАННЯ І ВИМІРЮВАНЬ ТВЕРДОСТІ	23
1.1 Аналіз методів непрямого контролю механічних властивостей конструкційних матеріалів	23
1.2 Метод інструментованого індентування у порівнянні з традиційними механічними випробуваннями: переваги, обмеження та тенденції розвитку	25
1.3 Аналіз методик визначення механічних характеристик за результатами інструментованого індентування: раніше розроблені підходи та подальші напрямки удосконалення	31
1.4 Особливості неруйнівного контролю механічних характеристик конструкційних матеріалів	41
1.4.1 Анізотропія механічних властивостей конструкційних сталей та її вплив на результати вимірювань	42
1.4.2 Особливості визначення твердості високоміцних сталей методом Брінелля: проблеми точності та відтворюваності результатів	44
1.5 Постановка цілі та задач дослідження	48
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ	49
2.1 Модернізація переносної установки для випробувань методом інструментованого індентування	49

	12
2.2 Вдосконалення і стандартизація методик визначення параметрів індентування за діаграмою локального деформування матеріалу індентором	56
2.2.1 Вдосконалення методики визначення параметра пластичності A	56
2.2.2 Уточнення визначення параметра пропорційності пластичного індентування a	59
2.3 Вдосконалення власної методики визначення твердості конструкційних сталей за результатами інструментованого індентування	65
2.3.1 Розробка власного підходу щодо визначення твердості за результатами випробувань на індентування	66
2.3.2. Порівняння результатів випробувань на індентування і вимірювання твердості	70
2.4 Нормування процедури визначення характеристик міцності конструкційних сталей за результатами вимірів твердості та індентування	73
2.4.1 СОУ 56-37-21	73
2.4.2 СОУ 56-38-21	77
2.4.3 Визначення характеристик міцності за результатами вимірювання твердості та інструментованого індентування	83
2.5 Висновки за розділом 2	87
РОЗДІЛ 3 УРАХУВАННЯ АНІЗОТРОПІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОВЕРХНЕВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПРИ ОЦІНЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ	90
3.1 Визначення механічних характеристик умовно ізотропних конструкційних сталей за результатами інструментованого індентування	90
3.2 Вплив анізотропії механічних характеристик на результати випробувань методом інструментованого індентування	93

	13
3.2.1 Виявлення анізотропії механічних характеристик на прикладі сталей 15X2НМФА та 08X18Н10Т	93
3.2.2 Оцінка достовірності використання кореляційних залежностей, встановлених для ізотропних матеріалів, при визначенні механічних характеристик анізотропних сталей за результатами індентування Оцінка коректності застосування кореляцій між твердістю та міцністю для анізотропних сталей	102
3.2.3 Розробка рекомендацій щодо виявлення анізотропії і неруйнівного контролю такого стану конструкційних матеріалів за результатами індентування	103
3.3 Визначення механічних характеристик високоміцних сталей з поверхневим знеуглецьованим шаром	105
3.3.1 Проблеми точності вимірювання твердості за методом Брінелля для високоміцних сталей та шляхи їх усунення	105
3.3.2 Розробка експрес-методу виявлення знеуглецьованого шару за результатами вимірювання твердості	117
3.3.3 Необхідність урахування поверхневої неоднорідності при оцінюванні поточних значень міцності основного металу	126
3.4 Рекомендації щодо урахування анізотропії та поверхневої неоднорідності при інтерпретації результатів інструментованого індентування	131
3.5 Висновки за розділом 3	132
РОЗДІЛ 4 МОНІТОРИНГ ПОТОЧНОГО СТАНУ МЕТАЛІВ	
ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ	
АНІЗОТРОПІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І	
ПОВЕРХНЕВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ	
	135
4.1 Визначення механічних характеристик високоміцних сталей листового прокату з урахуванням поверхневої неоднорідності . . .	135

4.1.1 Оцінка впливу поверхневої неоднорідності на результати вимірювання твердості сталі ARMOX 500T (ТОВ «Техімпекс») та сталі MIILUX PRKT.UA (ПРАТ «НВО «Практика») за твердістю .	135
4.1.2 Проведення вхідного контролю (атестації) металопрокату на підприємствах оборонного призначення	138
4.2 Контроль технічного стану зварних з'єднань мостової сталі з урахуванням анізотропії механічних характеристик	142
4.3 Оцінка деградації механічних характеристик металу живильного трубопроводу АЕС з урахуванням експлуатаційних впливів і структурної неоднорідності	146
4.4 Висновки за розділом 4	168
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	174
Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	195
Додаток Б. Список опублікованих праць за темою дисертації	196

ВСТУП

Актуальність роботи. 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 напруження та інших факторів, що можуть змінювати міцність 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 отримати достовірні дані про поточний стан матеріалу, оперативно оцінювати якість нових і експлуатованих конструкцій та 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 вагоме

значення для підвищення надійності та безпечної експлуатації технічних виробів.

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

Дисертаційна робота виконувалась 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» проєкту 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 І 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 екстримальних 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 та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей із різним ступенем анізотропії за результатами ідентифікації та формування науково обґрунтованих підходів до їх нормативної оцінки під час вхідного контролю й у процесі виробництва промислової продукції

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- розробка та удосконалення методологічних основ визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей з різною структурною анізотропією методом інструментованого ідентифікації, 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 ідентифікації;
- 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 конструкційні 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:

– 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 одержаних 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 рішення можуть бути впроваджені у практику технічної діагностики для оцінки залишкового ресурсу, контролю зон зварювання, термічного впливу або структурної неоднорідності.

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, 13–17] – 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 p.); 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.

У першому розділі 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.

У другому розділі проведено модернізацію переносної установки, удосконалення та стандартизацію методик інструментованого індентування, розробку власного підходу до визначення твердості, порівняння результатів із класичними вимірюваннями та впровадження галузевих стандартів СОУ

56-37-21 і СОУ 56-38-21 для нормування процедур оцінки механічних характеристик сталей.

У третьому розділі досліджено вплив анізотропії та поверхневої неоднорідності на результати інструментованого індентування, оцінено достовірність кореляцій між твердістю та міцністю для анізотропних сталей, визначено особливості вимірювання високоміцних сталей із знеуглецьованим шаром та запропоновано рекомендації для коректної інтерпретації результатів.

У четвертому розділі здійснено моніторинг поточного стану металів відповідального обладнання з урахуванням анізотропії та поверхневої неоднорідності, оцінено вплив цих факторів на твердість високоміцних сталей, проведено вхідний контроль металопрокату, контроль зварних з'єднань мостової сталі та оцінку деградації металу живильного трубопроводу АЕС.

У висновках представлено вирішену 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.

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

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНДЕНТУВАННЯ І ВИМІРЮВАНЬ ТВЕРДОСТІ

1.1 Аналіз методів непрямого контролю механічних властивостей конструкційних матеріалів

Оцінювання залишкового ресурсу та визначення технічного стану металевих конструкцій [36, 55, 74, 159] вимагає достовірної інформації про поточні характеристики міцності матеріалу з урахуванням їх деградації під час експлуатації. Ці дані є ключовими для виконання розрахунків на міцність, прогнозування довговічності та обґрунтування можливості подовження терміну служби обладнання.

Традиційні руйнівні методи, такі як статичні випробування на розтяг [24], залишаються основним джерелом нормативних характеристик міцності. Проте їх застосування у реальних умовах експлуатації часто обмежене, оскільки потребує виготовлення зразків, що неминуче призводить до пошкодження матеріалу. Зразки-свідки або мініатюрні вирізки частково дозволяють обійти цю проблему, але вони не завжди адекватно відображають реальний стан металу через відмінності в умовах навантаження та старіння, а також обмежують кількість можливих випробувань.

Альтернативою є методи непрямого (неруйнівного) контролю, які дозволяють оцінювати характеристики міцності без вилучення зразків і пошкодження конструкцій. Ці методи умовно ділять на фізичні і механічні.

Фізичні методи [6, 8, 13, 14, 30, 99, 101, 103, 125, 130, 132, 133] базуються на аналізі фізичних явищ у матеріалі. До них належать магнітний, акустичний, вихрострумний, електрорезистивний контроль тощо. Вони чутливі до дефектності, мікроструктурних змін і пошкоджуваності матеріалу, проте їх результати здебільшого носять непрямий характер і потребують додаткової верифікації.

Механічні методи передбачають локальний вплив на поверхню матеріалу та аналіз його реакції. Вони безпосередньо пов'язані з оцінкою пружно-пластичних властивостей і тому набули широкого поширення у практиці контролю. До них належать:

- метод «зрізу різьби» [28, 30] – для оцінки міцності різьбових з'єднань;
- метод відриву зі сколюванням [75, 103, 104] – для визначення адгезійної міцності покриттів;
- методи твердості [10, 17, 19, 68, 85, 145, 147, 153, 158] – класичні (Брінелля, Роквелла, Віккерса), динамічні (відскоку/Шмідта), мікро- та нанотвердості;
- метод LM-твердості [38, 47], заснований на масових вимірюваннях і статистичній оцінці однорідності матеріалу, що корелює з його пошкоджуваністю та залишковим ресурсом [37, 39];
- метод інструментованого індентування [6, 32, 70, 95, 99, 100, 105, 110, 124, 125, 130,], який реєструє повну криву «навантаження – глибина вдавлювання» і дозволяє оцінювати не лише твердість, але й параметри пружної та пластичної деформації, роботу деформації та навіть прогнозувати границі міцності.

На рис. 1.1 подано узагальнену класифікацію методів визначення характеристик міцності металів.

Таким чином, серед різноманіття методів непрямого контролю саме випробування на твердість, і особливо інструментоване індентування, мають найбільший потенціал для непрямого визначення характеристик міцності при розтягу без пошкодження конструкцій.

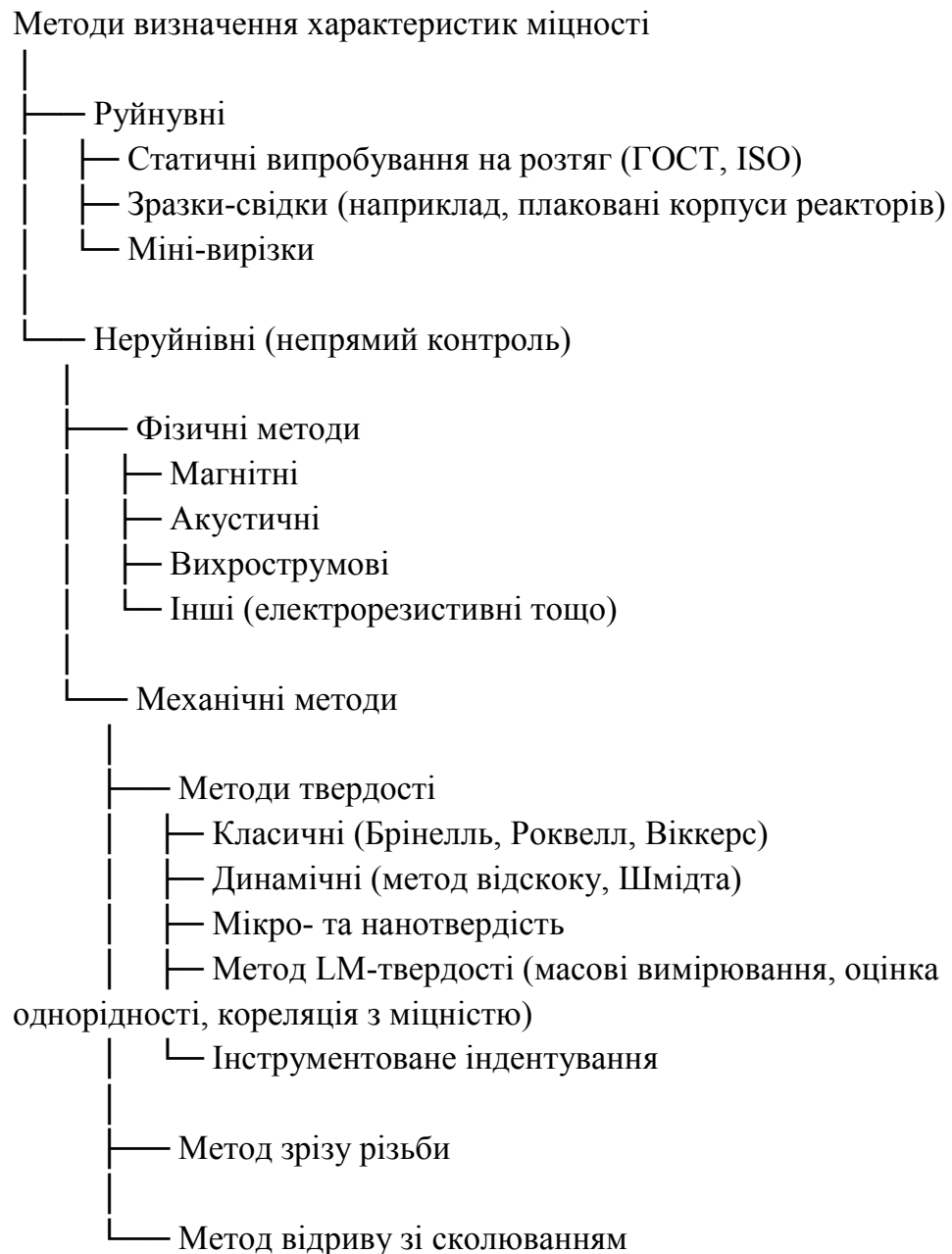


Рис. 1.1 – Класифікація методів визначення характеристик міцності металів.

1.2 Метод інструментованого індентування у порівнянні з традиційними механічними випробуваннями: переваги, обмеження та тенденції розвитку

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. На відміну від традиційних методів вимірювання твердості (Брінелля, Віккерса, Роквелла), які стандартизовані й широко застосовуються в Україні та світі, інструментоване індентування забезпечує суттєво вищу точність у визначенні механічних характеристик і дозволяє досліджувати матеріали на нано, мікро та макрорівнях з мінімальною кількістю випробувань.

Разом із тим ключова відмінність між цими підходами полягає у ступені їхньої нормативної регламентації: якщо методи твердості давно унормовані міжнародними та національними стандартами і є базовим інструментом контролю якості металопродукції, то інструментоване індентування перебуває на стадії активного розвитку. Попри наявність окремих міжнародних стандартів ISO 14577-1:2015 [105], відсутність в Україні діючих нормативних документів та узгодженої методики розрахунку характеристик за діаграмами індентування істотно обмежує його широке впровадження. Саме тому сучасні дослідження спрямовані як на вдосконалення методичних підходів, так і на створення уніфікованої нормативної бази, що забезпечить практичну інтеграцію цього методу у систему неруйнівного контролю матеріалів і виробів.

На сьогоднішній день основним діючим міжнародним нормативним документом, який регламентує застосування методу інструментованого індентування є стандарт ISO 14577-1:2015 [105]. Цей стандарт встановлює вимоги до проведення випробувань на інструментоване індентування на макро, мікро і нано-рівнях з визначенням твердості по Мартенсу (HM , HM_s , HM_{diff}), твердості при індентуванні H_{IT} , модуля Юнга при індентуванні E_{IT} , характеристик повзучості C_{IT} та релаксації R_{IT} при індентуванні, а також пружну W_{elast} і пластичну W_{plast} складові роботи при індентуванні. Запропонований в стандарті комплекс фізико-механічних властивостей матеріалів не знайшов широко застосування як в промисловості, так і в

науково дослідних закладах. Тому в світі продовжуються роботи з розвитку методик визначення за результатами індентування характеристик механічних властивостей таких як, границь плинності та міцності, відносних видовження та звуження [6, 32, 42, 82, 97, 102, 111, 118, 121, 128, 135, 138, 143, 148], характеристик повзучості [77, 131, 142, 156], характеристик тріщиностійкості [84, 91, 129, 137, 157], побудови кривої деформування зразків на одновісний розтяг [89, 90, 95, 100, 123], дослідженні залишкових напружень [96] та інших. На жаль більшість цих методик справедливі для окремих класів матеріалів, що дає широке поле діяльності для їх вдосконалення.

Міжнародною організацією зі стандартизації, було опубліковано технічний звіт ISO/TR 29381:2008 [109], що встановлює вимоги до визначення характеристик механічних властивостей за результатами випробувань металів методом інструментованого індентування. Даний стандарт розроблений з посиланням на ISO 14577-1:2002 [105], так як не містить вимог до обладнання та процедури випробувань. В стандарті розглянуті лише підходи щодо визначення механічних характеристик за результатами індентування: типові напруження і деформації, зворотній аналіз методом скінченних елементів та нейромережевий підхід. Нажаль, в документі [109] наведені лише схеми та структури розрахунків без однозначного визначення всіх ключових параметрів.

При визначенні механічних характеристик велике значення відіграє об'єм деформованого індентором матеріалу. Дійсно, при продовженні ресурсу відповідального обладнання більш доцільно визначати характеристики міцності саме на макрорівні. Але при цьому потрібно дотримуватися балансу – утворений відбиток не повинен завдати шкоди об'єкту дослідження, а деформований матеріал повинен характеризувати конструкцію в цілому.

З цієї точки зору найбільш доцільно при індентуванні на макрорівні застосувати сферичний індентор. В процесі вдавлювання кульки на різні глибини середній тиск у відбитку змінюється в залежності від кута

вдавлювання або від ступеня деформації. Вдавлювання кульки під дією різних навантажень дозволяє отримати діаграму індентування, яка дає істотно більшу інформацію, ніж результати вдавлювання конуса або піраміди, що відповідають лише одній точці на цій діаграмі. Побудова діаграм твердості за допомогою конічного або пірамідального індентора вимагає використання декількох інденторів зі змінним кутом при вершині. Оскільки при їх вдавлюванні на різні глибини утворюються подібні відбитки, що створюють подібні поля деформацій в зоні відбитка. Середній тиск на поверхні відбитка виявляється постійною величиною. Саме тому кульку можна розглядати як універсальний індентор зі змінним кутом загострення, зростаючим в міру заглиблення [69].

В стандарті ISO 14577-1:2002 [105] основну увагу приділено індентуванню саме на мікро та нано-рівнях з використанням конічного або пірамідального інденторів. Так, наприклад, в оновленій редакції стандарту навіть виділено в окрему частину індентування тонких покриттів [105]. Зазначаються нові способи очищення поверхні випробування від забруднень за рахунок використання газових потоків, розчинників, протирання тканиною, змоченою в розчиннику, а також ультразвукових методів. Проте забруднення такого типу та відповідні способи очистки на макрорівні неактуальні. При дослідженні матеріалів конструкцій працюючого обладнання, зокрема в атомній промисловості, такі способи підготовки з однієї сторони є абсолютно не придатними, а з іншої – не практичними. Тим більше, що вплив забруднень, які можна зняти при підготовці поверхні за запропонованим способом при індентуванні на макрорівні суттєво не вплине на достовірність результатів.

Слід відмітити, що стандарт ISO 14577-1:2015 [105] містить великий об'єм інформації – оскільки охоплює всі діапазони індентування (макро, мікро та нанорівні), а також передбачає використання широкого кола інденторів: алмазний індентор у формі ортогональної піраміди з квадратною основою (піраміда Віккерса); алмазна піраміда з трикутною основою

(наприклад, модифікована піраміда Берковича); твердосплавна кулька; алмазний конічний індентор із сферичним наконечником. Спроба передбачити всі вимоги до проведення таких випробувань у принципово відмінних рівнях в одному стандарті є не дуже зручною особливо при його практичному застосуванні, так як вимоги до обладнання та інші важливі сторони даного типу випробувань на таких рівнях можуть суттєво відрізнятися. З цієї точки зору доцільно при створенні такого роду стандарту поділити на окремі частини які містили в собі конкретну область ідентування та певну форму індентора.

Доцільність врахування функції поверхні наконечника індентора при аналізі діаграм ідентування на макрорівні також викликає питання. Дійсно результати ідентування пірамідальним або конічним інденторами на глибину менше 2 мкм будуть залежити від дотримання геометричних розмірів вершини індентора при його виготовленні. Прецензійне обладнання все рівно вносить похибку при виготовленні таких інденторів. Із-за малої глибини ідентування похибка при отриманні діаграм буде суттєво впливати на одержані результати. Зовсім інша ситуація при ідентуванні кулькою на макрорівні. Глибина ідентування може складати більше третини діаметру індентора, що не потребує такої точності врахування геометричних розмірів функції поверхні кульки.

При поточному контролі обладнання та елементів конструкцій важливо враховувати анізотропію та неоднорідність металу. Класичним прикладом анізотропії матеріалу є відмінність механічних характеристик у взаємно перпендикулярних напрямках. В інженерній практиці досить часто таку картину можна спостерігати в металі трубопроводів. Прикладом неоднорідності є наявність в матеріалі поверхневого шару, який за своїми властивостями може відрізнятися від основного. На практиці, це явище можна спостерігати в листовому прокаті, внаслідок знеуглецьовування поверхневого шару або у випадку небажаного наклепу, утвореного в результаті виготовлення виробу або викликаного механічною обробкою його

поверхонь. Достатньо видалити поверхневий шар для визначення механічних характеристик таких об'єктів.

Проте неабияк важливо при визначенні механічних характеристик за результатами індентування враховувати вплив залишкових напружень. В деяких випадках ці поверхневі напруження, утворені за рахунок наклепаного шару бувають дуже корисними, оскільки здатні сповільнювати зародження і зростання поверхневих втомних тріщин. Однак при індентуванні такі залишкові напруження можуть спотворити результати досліджень, яскравим прикладом є гиб трубопроводу.

Нажаль ні один із розглянутих документів не враховує розглянутих чинників, що можуть вплинути на результати визначення механічних характеристик. Згадані чинники не враховуються і в документах атомної енергетики. В подальшому при формуванні вимог до проведення досліджень на індентування слід обов'язково враховувати можливу технологію виготовлення та обробки матеріалу, щоб уникнути отримання некоректних даних.

Не зважаючи на все вищесказане в Україні на сьогодні не існує національного нормативного документу який би регламентував використання методу інструментованого індентування для визначення механічних характеристик або встановлював вимоги до обладнання. Існує лише стандарт Інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України СОУ-56-28-2018 [56], який був розроблений за результатами комплексних досліджень щодо розробки обладнання та методики для визначення механічних характеристик за допомогою інструментованого індентування.

1.3. Аналіз методик визначення механічних характеристик за результатами інструментованого індентування: раніше розроблені підходи та подальші напрямки удосконалення

Класичний підхід до визначення механічних характеристик матеріалів за результатами вимірювання твердості є основою багатьох методик, що й досі застосовуються у промисловості. Він ґрунтується на простих, але перевірених часом принципах і передбачає встановлення емпіричних залежностей між значенням твердості та іншими механічними властивостями. Серед усіх механічних характеристик найкраща кореляція за класичним підходом спостерігається між твердістю *HBW* та границею міцності R_m . Ще наприкінці XIX – на початку XX століття А. Тетмаєр, а пізніше й інші дослідники, показали, що для конструкційних сталей існує пропорційність між значенням твердості за Брінеллем (*HBW*) та границею міцності. У спрощеному вигляді ця залежність виглядає так:

$$R_m \approx k \cdot HBW \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Стійка кореляція пояснюється тим, що обидві ці характеристики відображають опір матеріалу пластичній деформації. Твердість — це здатність матеріалу чинити опір локальній пластичній деформації під дією індентора тоді як границя міцності — це максимальне напруження, яке матеріал витримує перед загальним руйнуванням, тобто максимальний опір пластичній деформації, що поширюється на весь об'єм. Оскільки обидва явища є наслідком одних і тих же фізичних механізмів (наприклад, щільності дислокацій, розміру зерен і наявності легуючих елементів), між ними існує пряма залежність, яка дозволяє з високою точністю (для більшості сталей до

10–12%) перетворювати одне значення в інше за допомогою емпіричних коефіцієнтів.

Питанням взаємозв'язку механічних характеристик з твердістю займалось багато дослідників таких як М. М. Давиденко, О. Ю. Ішлінський, М. П. Марковець, В. В. Соколовський, Г. П. Зайцев, О. Д. Томленов, М. М. Хрущов, Г. Д. Дел, Дж.М. Вайнберг, Г.В. Ерікссон, В. В. Варнелло, М. С. Дрозд, Е. Мейер, Д. Тейбор, Р. Хілл та ін., які розробили ряд відповідних методик. Актуальність таких досліджень не зменшилась і сьогодні, проте, найчастіше увага фахівців зосереджена на підвищенні саме точності кореляцій [9,10, 29, 41, 42, 118], які базуються на статистичному аналізі великих масивів експериментальних даних. Їхні роботи сприяли формуванню стандартів, як-от ГОСТ 22761 [16], ДСТУ EN ISO 18265 [26] та DIN 50150 [88], що містять таблиці переведення твердості у границю міцності для широкого спектра металів. Водночас у стандартах наголошено, що переведення одних видів твердості в інші супроводжується значним розкидом і систематичними похибками, а перерахунок твердості у границю міцності при розтягу пов'язаний із ще більшим розсіюванням результатів. Однією з основних причин цього є вплив мікроструктурних змін матеріалу (наприклад, унаслідок термічної обробки чи холодної деформації), які можуть суттєво відрізнятися навіть у сталей однієї марки.

Доцільно зауважити, що визначення інших характеристик за результатами вимірювань твердості не завжди супроводжується таким чітко вираженим зв'язком, як у випадку з границею міцності. Як наслідок, це призводить до збільшення похибки у розрахунках. Встановлені залежності не мають універсального характеру й можуть застосовуватися лише з урахуванням специфіки певного класу матеріалів та умов їх термічної чи технологічної обробки.

Яскравим прикладом є зв'язок між твердістю за Брінеллем і границею плинності, який має менш виражений та менш стабільний характер, ніж із границею міцності. Це обумовлено тим, що границя плинності відповідає

початковій стадії пластичної деформації, тоді як твердості вимірюють здатність матеріалу чинити опір значній локальній деформації. Крім того, границя плинності дуже залежить від мікроструктури, дефектів, теплової обробки, що не завжди відображається пропорційно в показниках твердості. Часто використовують апроксимуючу формулу:

$$R_{0,2} \approx k_1 \cdot HBW \pm k_2 \quad (1.2)$$

де k_1 та k_2 — емпіричні коефіцієнти. Проте через велику похибку ці формули придатні лише для орієнтовних оцінок.

Незважаючи на значний обсяг робіт у цій галузі, на даний час державні стандарти не передбачають методик визначення границі плинності за результатами вимірювання твердості. Натомість застосовуються галузеві стандарти, зокрема СОУ-Н НАЕК 133 [63], РД 302-07-20-93 [51], СТ ЦКБА 091-2011 [67] у яких наведено емпіричні залежності.

Таким чином застосування емпіричних залежностей для оцінки границі плинності може забезпечити лише орієнтовний результат, прийнятний для попереднього аналізу. Проте точність таких оцінок істотно визначається технологічною історією та структурним станом матеріалу. У випадках, коли відхилення сягають 20% і більше, використання кореляційних формул є неприйнятним для інженерних розрахунків, що стосуються відповідального обладнання.

В Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України проведено комплекс досліджень щодо визначення механічних характеристик за твердістю за Брінеллем та запропоновано наступні кореляційні залежності:

$$R_{p0,2}^{HBW} = k_{1Rp0.2}^{HBW} \cdot HBW^2 + k_{2Rp0.2}^{HBW} \cdot HBW + k_{3Rp0.2}^{HBW} \quad (1.3)$$

$$R_m^{HBW} = k_{1Rm}^{HBW} \cdot HBW^2 + k_{2Rm}^{HBW} \cdot HBW + k_{3Rm}^{HBW}, \quad (1.4)$$

де $k_{1Rp0.2}^{HBW}$, $k_{2Rp0.2}^{HBW}$, $k_{3Rp0.2}^{HBW}$, k_{1Rm}^{HBW} , k_{2Rm}^{HBW} , k_{3Rm}^{HBW} – експериментально визначені коефіцієнти, які наведено в табл. 1.1.

Відхилення границь плинності та міцності сталей за результатами вимірів твердості з використанням запропонованих кореляційних залежностей від даних випробувань на одновісний розтяг не перевищує 10%.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнтів $k_{1Rp0.2}^{HBW}$, $k_{2Rp0.2}^{HBW}$, $k_{3Rp0.2}^{HBW}$, k_{1Rm}^{HBW} , k_{2Rm}^{HBW} і k_{3Rm}^{HBW}

Марка сталі	$k_{1Rp0.2}^{HBW}$	$k_{2Rp0.2}^{HBW}$	$k_{3Rp0.2}^{HBW}$	k_{1Rm}^{HBW}	k_{2Rm}^{HBW}	k_{3Rm}^{HBW}
22К	0	1,91	0	0	3,43	0
16ГС	0	3,4	-175	0,00088	2,66	103
09Г2С	0	5,34	-462	0	3,43	0
25Х1МФ	при HBW > 200			0	3,4	-90
	0	3,6	-240			
38ХН3МФА	при HBW > 200			0	3,4	-90
	0	3,6	-240			
10ГН2МФА	0,00216	2,33	-41,9	0	2,2	180
15Х2НМФА	0	2,86	0	0	3,4	0
08Х18Н10Г2Б	0	2,17	0	0	2,2	180

Аналіз стану в сфері стандартизації підходів до визначення механічних характеристик за твердістю за Брінеллем матеріалів відповідального обладнання показує на необхідність підвищення обґрунтованості та точності як кореляційних залежностей, так і самого вимірювання твердості. Крім того необхідно розпочати процес розробки нормативного документу який би став

основою національного нормативного документу для більш широкого застосування методики визначення механічних характеристик за твердістю.

Інструментизація процесу вдавлювання індентора за вимірювання твердості створила основу для розвитку нового методу – методу інструментованого індентування.

Перші спроби використати метод інструментованого індентування для оцінки механічних властивостей матеріалів належать до 70–80-х років ХХ століття. У цей період роботи Олівера і Фарра [143, 144] заклали основу сучасних методик інструментованого індентування, зокрема для визначення модуля пружності та умовної твердості на основі аналізу кривої розвантаження. Подальші дослідження, проведені Хаггтом, Вайнбергом, Марковцем, Матюніним, Бакіровим, були спрямовані на відновлення діаграм «напруження–деформація» за даними індентування та оцінку характеристик міцності, включно з границею плинності та границею міцності.

Ключовою перевагою інструментованого індентування є можливість отримання цілого комплексу механічних характеристик з одного випробування, тоді як класичні методи твердості обмежуються лише одним показником. Це зумовило появу різних алгоритмічних підходів: аналіз кривих навантаження – розвантаження [6, 7, 33, 95], моделі локального опору пластичній деформації [10, 33, 98, 113, 118, 154], енергетичні методи [41, 42, 92, 94, 97], а також чисельне моделювання [5, 67, 82–84, 97, 138, 141].

Нижче будуть представлені найбільш поширені підходи до визначення характеристик міцності.

Границя плинності методом інструментованого індентування найчастіше визначається за наступною методикою [83, 87, 94–96, 134], в якій використовується аналогія до степеневого зв'язку між напруженням та деформацією для одновісного розтягу у вигляді $\sigma = B\varepsilon^m$. Для цього діаграма індентування записується у вигляді співвідношення [92], що використовує поняття твердості за Мейєром [136]:

$$\frac{F}{d^2} = A \left(\frac{2\sqrt{h_t(D-h_t)}}{D} \right)^n \quad (1.5)$$

де A та n – постійні матеріалу, D – діаметр індентора, d – діаметр відбитку, h_t – глибина індентування.

Використовуючи даний підхід Хаггаг та інші [92, 94–96] пов’язали границю плинності з коефіцієнтом A за допомогою коефіцієнту кореляції β_m , використовуючи наступне співвідношення:

$$\sigma_{0,2} = \beta_m A. \quad (1.6)$$

При цьому коефіцієнт кореляції β_m встановлюється на основі експериментальних випробувань як для певного класу матеріалів, так і для конкретного матеріалу. Для прикладу нижче в табл. 1.2 приведено деякі значення цього коефіцієнту, отримані різними дослідниками.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнту β_m

Автори	Значення коефіцієнту β_m	Матеріал
George R. A. та ін. [90]	0,229	сталі
Haggag F. M. [94]	0,2285	вуглецеві сталі
Haggag F. M. [96]	0,191	нержавіючі сталі
Mathew M. D. та ін. [134]	0,23	сталь Alloy 625
Byun T. S. та ін. [83]	0,236	сталь SA508 Gr.3
Бакіров М. Б. [4, 6]	0,145 – 0,23	різні сталі

Границя міцності за допомогою інструментованого індентування визначається різними методиками. Поширеним є підхід [87, 100, 134, 137], що прив'язує діаграму розтягу в координатах істинних напружень σ^{tr} та істинних пластичних деформацій ε_p^{tr} у такому вигляді (1.7)

$$\sigma^{tr} = \frac{p_m}{\delta} = \frac{4F}{\pi d^2 \delta} = K(\varepsilon_p^{tr})^n \quad (1.7)$$

де p_m усереднене по проекції відбитку навантаження, n та K – постійні матеріалу, F – навантаження на індентор, d – діаметр відбитку, δ – коефіцієнт.

Для зменшення кількості невідомих у рівнянні (1.7) використовуються різні підходи до визначення тих чи інших параметрів. Наприклад Табор [151] використовував експериментальне співвідношення $\varepsilon_p^{tr} = 0,2 \left(\frac{d}{D} \right)$, де D – діаметр індентора, а d – діаметр відбитку, що знаходився із задачі Герца.

Результати індентування різних матеріалів [89, 95, 96] показали, що між коефіцієнтом δ та параметром ϕ можна встановити емпіричне співвідношення

$$\delta = f(\phi, \alpha_m) \quad (1.8)$$

де α_m – коефіцієнт, який залежить від швидкості деформування та зміцнення, а ϕ експериментально визначено [89] як:

$$\phi = \frac{\varepsilon_p^{tr} E_2}{0,43 \sigma^{tr}}. \quad (1.9)$$

Використовуючи ітераційну процедуру розрахунку відповідних параметрів та коефіцієнтів можна визначити границю міцності як:

$$\sigma_b = K \left(\frac{n}{e} \right)^n. \quad (1.10)$$

Протягом останніх десятиліть для визначення механічних характеристик методом інструментованого індентування набув широкого використання підхід [3–6, 76, 112, 123, 127, 139, 140, 155], заснований на зворотному аналізі з використанням експериментальної та чисельної кривої індентування. Для цього створюється дві чисельні моделі: індентування та одновісний розтяг. Далі з використанням початкових параметрів, що визначені за експериментальною діаграмою індентування, будується діаграма розтягу та закладається у розрахункову модель індентування. Визначається чисельна діаграма індентування і порівнюється з експериментальною. Якщо ці діаграми мають достатню збіжність, то використана діаграми для розрахунку вважається дійсною діаграмою розтягу досліджуваного матеріалу. В інакшому випадку ітераційний процес продовжується до досягнення необхідної збіжності.

В міжнародній практиці метод інструментованого індентування регламентується стандартами ISO 14577 [105–108].

В Інституті проведено комплекс досліджень щодо розробки обладнання та методик для визначення механічних характеристик за допомогою інструментованого індентування [33, 70, 71, 113, 121]. Створено лабораторну випробувальну установку UTM-20НТ [72] та переносний прилад РІТ-02 [48,69] для проведення індентування та вимірювання твердості як в лабораторних, так і в польових умовах.

Умовну границю плинності при індентуванні $\sigma_{0,2}^{ITT}$ визначали за вдосконаленою методикою Хаггага. Для сталей було отримано кореляційні залежності між оцінюваною за даними випробувань зразків на розтяг умовною границею плинності металу і параметром A , який характеризує запас пластичності матеріалу в рівнянні (1.6):

$$\sigma_{0,2}^{III} = k_{1\sigma 0,2}^{III} \cdot A + k_{2\sigma 0,2}^{III} \quad (1.11)$$

де $k_{1\sigma 0,2}^{III}$ і $k_{2\sigma 0,2}^{III}$ – експериментально визначені коефіцієнти, значення яких наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Значення коефіцієнтів $k_{1\sigma 0,2}^{III}$ і $k_{2\sigma 0,2}^{III}$ для визначення умовної границі плинності $R_{0,2}^{III}$

Марка сталі	$k_{1\sigma 0,2}^{III}$
22К	0,1923
16ГС	0,2203
09Г2С	0,2059
25Х1МФ	0,2455
38ХН3МФА	0,2629
10ГН2МФА	0,2248
15Х2НМФА	0,2434
08Х18Н10Г2Б	0,2162

* $k_{2\sigma 0,2}^{III} = 0$ для представлених матеріалів.

Порівняння результатів визначення умовної границі плинності за результатами випробувань на одновісний розтяг та методом інструментованого індентування з використанням кореляційної залежності (1.11) показали, що похибка визначення умовної границі плинності не перевищує 5%.

Методика визначення границі міцності методом інструментованого індентування ґрунтується на кореляційній залежності границі міцності σ_b , визначеної згідно [159], та коефіцієнтом пропорційності деформування при

індентуванні α , який дорівнює тангенсу кута нахилу γ діаграми інструментованого індентування в координатах «максимальне випробувальне навантаження $F_{\max}$ циклу навантаження – залишкова глибина індентування h_p після зняття випробувального навантаження цього циклу».

Кореляційна залежність має вигляд:

$$\sigma_s^{IT} = k_{1\sigma}^{IT} \cdot a + k_{2\sigma}^{IT} \quad (1.12)$$

де $k_{1\sigma}^{IT}$ і $k_{2\sigma}^{IT}$ – коефіцієнти, що визначені експериментальним шляхом для досліджуваних сталей та приймають значення 0,029 і 105,55 відповідно.

Слід відзначити, що кореляційна залежність (1.12) є єдиною для всіх досліджених матеріалів. Порівняння результатів визначення границі міцності за результатами випробувань на одновісний розтяг та методом інструментованого індентування з використанням кореляційної залежності (1.12) показало, що похибка визначення границі міцності методом інструментованого індентування не перевищує 5%.

Кореляційна залежність твердості HB від параметру a для сталей 45, 15X2МФА, 15X2НМФА та металів зварних швів 08ХГМНТА, 10ХМФТ мала лінійний вид:

$$HB = k_{1HB} \cdot a + k_{2HB} \quad (1.13)$$

де k_{1HB} і k_{2HB} – визначені експериментально параметри, рівні 0,009 мм⁻¹ і 28,5 МПа відповідно.

Слід зазначити, що метод інструментованого індентування є одним із перспективних неруйнівних методів визначення механічних характеристик матеріалів відповідального обладнання, проте він потребує розробки нормативних документів та рекомендацій для його застосування.

Таким чином, інструментоване індентування є визнаним методом в міжнародній практиці та регламентується стандартами ISO 14577 [105–108], які встановлюють вимоги до проведення випробувань та аналізу результатів.

Подальші напрямки удосконалення методик включають:

- зменшення залежності від емпіричних коефіцієнтів: Розробка більш універсальних моделей, які менше залежать від конкретних класів матеріалів та експериментальних даних.

- врахування мікроструктурних змін: Покращення моделей для врахування змін у металі, які виникають внаслідок тривалої експлуатації, що дозволить більш точно оцінювати стан матеріалу.

- комп'ютерне моделювання: Використання методів скінченних елементів для симуляції процесу індентування, що дозволяє отримати більш точні кореляції між параметрами індентування та механічними властивостями.

1.4 Особливості неруйнівного контролю механічних характеристик конструкційних матеріалів

Як показує практика, попри всі переваги та зручність у використанні неруйнівних методів та портативних приладів, існує багато факторів, які можуть тим чи іншим чином впливати на точність та обґрунтувань отриманих даних. Найчастіше увага приділяється таким чинникам як кваліфікація персоналу, якість проведених вимірювань, точність кореляцій та ін. Проте не менш важливим є розуміння того, наскільки досліджений об'єм матеріалу є характерним по відношенню до всього матеріалу чи конструкції.

1.4.1 Анізотропія механічних властивостей конструкційних сталей та її вплив на результати вимірювань

Анізотропія [43, 86, 132] в тій чи іншій мірі властива значній кількості конструкційних сталей. Випробування на одновісний розтяг, визначення твердості та індентування відображають по суті інтегральні характеристики певного об'єму матеріалу, в межах якого він вважається ізотропним. Проте, внаслідок особливостей технології виготовлення чи умов експлуатації значення механічних характеристик можуть носити не монотонний чи анізотропний характер. При цьому характеристики можуть бути відмінними в одному, в двох чи в трьох напрямках. Для прокатних матеріалів можуть бути відмінності не тільки між напрямками, а й в межах одного напрямку, як наприклад, внаслідок знеуглецювання поверхневих шарів прокату високоміцних матеріалів чи трубопроводів АЕС під дією опромінення [46]. При дослідженні тонких шарів металу, як то характерні зони в околі зварного шва чи антикорозійні наплавки також зручно застосовувати неруйнівні методи в силу малості геометричних розмірів шарів.

Тому існує необхідність аналізу особливостей визначення механічних характеристик за твердістю за Брінеллем та інструментованим індентуванням з урахуванням можливої неоднорідності їх розподілу в конструкції, а також підвищення об'єктивності та точності існуючих методик з подальшою розробкою відповідних рекомендацій та нормативних документів.

Метал головних парогонів ТЕС [64, 65] зазнає сумісного впливу низки технологічних чинників, що зумовлюють його деградацію. Останнім часом експлуатаційники, крім наводнювального середовища та жорстких температурно-силових умов експлуатації (температура пари в парогоні досягає 570°C , а тиск 24 МПа), виділяють ще одну причину втрати роботоздатності обладнання – часті зупинки технологічного процесу через експлуатацію блоків у маневровому режимі [96]. Нагрівання і охолодження труб під час зупинок блоків супроводжується виникненням додаткових

термічних напружень у їх перерізі, які сумарно з напруженнями від внутрішнього тиску можуть подекуди досягати критичних значень [12, 146]. Відомо, що стандартні механічні характеристики за розтягу на повітрі слабо реагують на деградацію металу внаслідок тривалої експлуатації [27]. Натомість, їх чутливість до деградації за наводнювання металу, яке завжди реалізується під час функціонування таких об'єктів, як парогони [11], відчутно зростає [66]. Тому стан металу парогону доцільно оцінювати за додаткового наводнювання. Не зважаючи на те, що властивості металу експлуатованих парогонів активно досліджували впродовж останніх 50-ти років [1, 2, 18, 46, 52], і надалі питання про придатність традиційних механічних характеристик для оцінювання роботоздатності експлуатованих сталей залишається відкритим. У документі [62], який регламентує допустимі значення механічних характеристик парогінних сталей, однозначно не вказано орієнтацію зразків та їх розташування в перерізі стінки труби.

Таким чином, анізотропія механічних властивостей конструкційних сталей істотно впливає 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 наплавок, а також відслідковувати їх зміни внаслідок експлуатації.

З огляду на те, що діючі нормативні документи [62] не регламентують ані орієнтацію зразків, ані місце їх відбору в перерізі стінки, виникає потреба у вдосконаленні підходів до стандартизації випробувань для експлуатованих сталей. Це передбачає:

- розроблення рекомендацій щодо врахування анізотропії властивостей при відборі та орієнтації зразків;
- поєднання традиційних випробувань з локальними методами (індентування, мікротвердості, мініатюрні зразки) для комплексної оцінки стану матеріалу;
- включення до нормативних документів вимог щодо оцінки неоднорідності та деградації металу в різних напрямках і по товщині перерізу конструктивних елементів.

Отже, 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.

1.4.2 Особливості визначення твердості високоміцних сталей методом Брінелля: проблеми точності та відтворюваності результатів

На сьогоднішній день із збільшенням об'єму виготовлюваної продукції з високоміцних сталей важливим напрямком в дослідженнях та контролі їх якості є коректне та достовірне вимірювання твердості [10, 19, 35, 41, 47]. На визначення твердості високоміцних та броньованих сталей можуть впливати ряд чинників, таких як напруженість матеріалу, що виникла внаслідок виготовлення листового прокату; сили тертя при індентуванні кулькою; знеуглецьований шар металу після прокату; неоднорідність структури; анізотропія листових матеріалів [44], чистота підготовки поверхні тощо. Проте існуючі нормативні документи, які регламентують методи визначення твердості високоміцних та 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. Подальший

розвиток методик визначення твердості необхідний і для вдосконалення промислових технологій, що засновані на використанні цієї важливої характеристики, про що свідчать звернення провідних організацій, що займаються поставкою таких сталей в Україну та розробкою нової військової техніки.

Для розробки достовірної методики визначення твердості високоміцних сталей за методом Брінелля (згідно ДСТУ ISO EN 6506-1 [20]) необхідно провести систематичні дослідження на прикладі листових сталей, таких як Armoх 500Т і Hardox 450. Такі дослідження повинні дозволити:

- з'ясувати характер розподілу твердості по товщині зразка;
- визначити товщину знеуглецьованого шару і оцінити його вплив на результати вимірювань, розробити методику контролю товщини такого слою;
- встановити необхідний рівень підготовки поверхні основного металу для отримання достовірних значень твердості;
- обґрунтувати вибір розміру кульки-індентора та величини навантаження, що забезпечує мінімізацію похибок вимірювань.

З огляду на важливість робіт, що стосуються підвищення точності визначення твердості матеріалів потрібно правильно вибрати діаметр кульки індентора та навантаження на нього. Автори провели дослідження по впливу вибору рівня навантаження та розміру індентора для визначення твердості високоміцних сталей за методом Брінелля. До недоліків методу Брінелля можна віднести те, що при використанні малих кульок і при малих навантаженнях під індентором деформується невеликий об'єм матеріалу, що в цілому не відображає інтегральну картину деформування матеріалу і відповідно занижує вимірювані числа твердості.

Не менше важливим для визначення достовірних значень твердості є правильний вибір матеріалу кульки індентора. В країнах, які в свій час були в СРСР, при вимірюванні твердості за Брінеллем найбільш поширеними являються твердоміри типу ТШ-2 і ТШ-2М із електричним приводом

важливого механізму навантаження. В основному такі прилади комплектувалися сталевими кульками різного діаметру. Із введенням в Україні гармонізованого стандарту ДСТУ EN ISO 6506-1 [20] використання цих кульок було відмінено, оскільки стандарт передбачає використання лише кульки із карбіду вольфраму. Проте ряд дослідників продовжує вимірювати твердість високоміцних та броньованих сталей сталеву кулькою. В результаті отримують занижені величини твердості, через пластичне деформування кульки, при цьому видаючи протоколи із невідповідністю продукції сертифікату.

Все це потребує жорсткої систематизації методики вимірювання твердості високоміцних і броньованих сталей, що передбачає: чітке визначення розміру і матеріалу кульки-індентора; оптимального рівня навантаження; суворе дотримання вимог підготовки поверхні зразка, включаючи контроль товщини знеуглецьованого шару, а також стандартизовану процедуру візування та вимірювання відбитків. Лише комплексний підхід до цих факторів дозволить мінімізувати похибки, підвищити точність і відтворюваність результатів, забезпечити достовірність оцінки механічних характеристик матеріалів і відповідність отриманих значень заявленим сертифікатним показникам.

Проблематичним при вимірюванні твердості є використання портативних приладів без належного обґрунтування, а тільки із посиланням на ДСТУ EN ISO 6506-2 [21]. На сьогоднішній день ринок України насичений великою кількістю різноманітних приладів вимірювання твердості, які слід розділяти за принципом роботи на прилади прямого вимірювання твердості за діаметром відбитку – стаціонарні та переносні статичної дії та непрямого вимірювання твердості – портативні, за якими значення твердості визначають за кореляційними залежностями між традиційною твердістю і параметром використовуваного в приладі методу.

Державний стандарт ДСТУ EN ISO 6506-1 [20] передбачає вимірювання твердості за методом Брінелля і поширюється лише на

стаціонарні та переносні прилади статичної дії. Нажаль в Україні на сьогоднішній час не існує стандартів таких як ASTM A956-02 [78], ISO 14577-1:2015 [105], за допомогою яких можна було б протарувати портативні прилади, що засновані на інших принципах роботи (динамічні, ультразвукові, імпедансного типу та ін.). Портативні прилади мають ряд незаперечних переваг таких як портативність, продуктивність, універсальність, і перш за все, можливість проводити контроль твердості в польових умовах у важкодоступних місцях, де використовувати стаціонарні твердоміри не представляється можливим. Дослідження виконані в рамках цієї роботи, показали, що при вимірюванні твердості еталонних мір портативними приладами [53] супроводжувалося різким зменшенням відтворюваності та підвищенням похибки вимірювання твердості. Найбільше відхилення мали при використанні портативних динамічних твердомірів.

Таким чином на основі проведених експериментальних досліджень і відповідного аналізу нормативних документів, що регламентують вимірювання твердості за методом Брінелля було розвинуто методику визначення твердості високоміцних та броньованих листових сталей, яка дозволяє отримувати більш точні значення деяких характерних ситуацій, що призводили на практиці до питань щодо невідповідності якості металу заявленим характеристикам. Крім дотримання вимог стандарту ДСТУ ISO 6506-1 [20], методика містить додаткові вимоги щодо врахування ряду факторів, характерних саме для цього класу матеріалів, зокрема підготовки поверхні, вибору кульки-індентора і рівня навантаження.

Враховуючи сучасні вимоги до контролю якості високоміцних та броньованих сталей, є необхідність розробки та впровадження вдосконаленої методики визначення твердості за методом Брінелля. Така методика повинна забезпечувати підвищену точність і відтворюваність результатів шляхом чіткого визначення параметрів вимірювань: діаметра та матеріалу кульки-індентора, рівня навантаження, підготовки поверхні зразка з урахуванням товщини знеуглецьованого шару, а також стандартизованого порядку

візування та вимірювання відбитків. Реалізація цих заходів дозволить зменшити похибки, отримати достовірні значення твердості та підвищити надійність оцінки механічних характеристик матеріалів, що особливо актуально для виробництва та сертифікації листових високоміцних сталей.

1.5 Постановка цілі та задач дослідження

Ціль дослідження полягає в удосконаленні методик визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей із різним ступенем анізотропії за результатами інструментованого індентування та розробленні науково обґрунтованих підходів до їх стандартизації і нормативної оцінки якості металопродукції на етапах вхідного контролю та у процесі виробництва.

Для досягнення поставленої цілі необхідно розв'язати такі задачі дослідження:

1. Розробити та удосконалити методики визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей із різним ступенем структурної анізотропії, передбачивши модернізацію експериментального обладнання для впровадження у практику вхідного контролю та промислового виробництва.
2. Обґрунтувати та реалізувати підхід до підвищення точності і достовірності визначення твердості високоміцних сталей шляхом створення методології кількісної оцінки впливу знеуглецьованого поверхневого шару на результати вимірювань.
3. Розробити науково обґрунтовані підходи до стандартизації методів неруйнівного контролю експлуатаційних характеристик конструкційних сталей на основі застосування інструментованого індентування.
4. Отримати нові експериментальні дані щодо вихідних і поточних характеристик твердості та міцності конструкційних сталей, зокрема їх змін і деградації після тривалого експлуатаційного навантаження.

РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ

2.1 Модернізація переносної установки для випробувань методом інструментованого індентування

Для розширення області застосування та зменшення підготовчого періоду до випробувань було модернізовано переносну установку РІТ-02 [48], зокрема, систему кріплення на об'єкті з механічної (крюки і ланцюги) на електромагнітну. Це дало змогу встановлювати її та проводити випробування не тільки на циліндричних, а й на плоских поверхнях, зокрема, листовому прокаті та конструкціях із нього.

Загальний вид переносної модернізованої установки для випробувань методом інструментованого індентування РІТ-02М показано на рис. 2.1. Вона складається з пристрою навантаження, що кріпиться до столика, який за допомогою мікрометричного гвинта можна переміщати вздовж зразка. Пристрій навантаження і столик змонтовано на основі, знизу якої прикріплено два електромагніти, що притискають установку до зразка.

Переносна установка для визначення характеристик міцності елементів конструкцій працює у такий спосіб. Основу пристрою навантаження за допомогою механічних або електромагнітних елементів кріплення фіксують на підготовленій для індентування ділянці труби чи листа таким чином, щоб між вершиною індентора і поверхнею конструкції був зазор.

Після завершення підготовчих операцій запускають програму управління установкою, куди вводять вихідні дані та формують закон навантаження. За введеними даними програма автоматично підводить вершину індентора до поверхні випробування, після чого він із заданою швидкістю вдавлюється в поверхню об'єкта, що досліджується. Водночас

датчики генерують сигнали, які в блоці вимірювання трансформуються і в цифровому вигляді передаються у вузол обробки результатів – персональний комп’ютер, де проводиться їх аналіз та реєстрація діаграми інструментованого індентування.

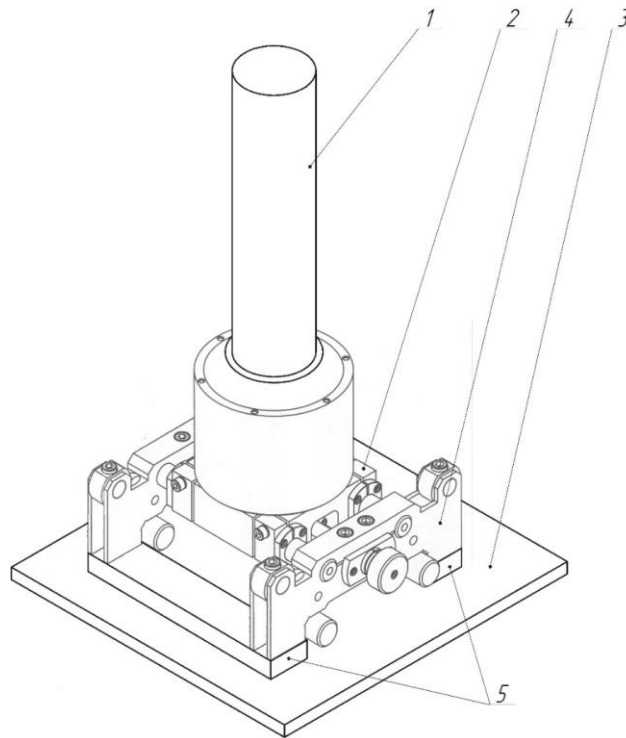


Рис. 2.1 – Загальний вид переносної установки РІТ-02М для випробувань методом інструментованого індентування: 1 – пристрій навантаження; 2 – столик; 3 – зразок; 4 – основа; 5 – електромагніти.

Датчик глибини індентування розташований безпосередньо на інденторі, що суттєво зменшує вплив деформування конструкційних елементів установки на точність отриманих результатів. Після першого випробування індентор піднімають, основу переміщують уздовж об’єкта дослідження, фіксують положення основи, знову індентор опускають допоки його вершина не торкнеться поверхні конструкції та проводять наступне випробування.

У разі зникнення зусилля притискання до об'єкта випробування передбачено аварійне відведення пристрою навантаження у вихідне положення. Притискання переносної установки за допомогою електромагнітів до об'єкта випробування дало змогу значно зменшити час на підготовку до проведення інструментованого індентування.

Із метою відпрацювання методик визначення механічних характеристик та порівняння результатів, отриманих методом інструментованого індентування з використанням лабораторної UTM-20НТ [72] та переносної РІТ-02М [114] установок, було модернізованого вузол індентування останньої. Для цього було використано нову оправу для індентора у формі кульки діаметром 2,5 мм із карбіду вольфраму. Під оправу було сконструйовано нове кріплення датчика переміщень.

Проведено порівняльні випробування на листовій конструкційній вуглецевій сталі 20 товщиною 12 мм із використанням попередньої механічної системи кріплення і нової – електромагнітної (рис. 2.2). Для цього модернізовану переносну установку болтами кріпили до випробувальної плити та проводили серію випробувань. Потім її притискали за допомогою електромагнітного кріплення до тієї самої плити і проводили випробування. Діаграми індентування в координатах зусилля F – глибина вдавлювання h та визначені механічні характеристики листової сталі 20, отримані з використанням обох кріплень (табл. 2.1), показали, що електромагнітне кріплення не вплинуло на результати випробувань (рис. 2.3). Зокрема, діаграми інструментованого індентування, що отримані з використанням модернізованої переносної установки РІТ-02М з різною системою кріплення, добре накладаються одна на одну (рис. 2.3).

Із результатів, наведених у табл. 2.1, видно незначну різницю у значеннях характеристик (у межах похибки), тобто зміна системи кріплення установки не впливає на результати випробувань.

Таблиця 2.1 – Механічні характеристики листової вуглецевої сталі 20 за діаграмами інструментованого індентування з використанням механічного й електромагнітного кріплення

Механічне кріплення		Електромагнітне кріплення		Різниця, %	
Границя плинності $R_{p0.2}$, МПа	Границя міцності R_m , МПа	Границя плинності $R_{p0.2}$, МПа	Границя міцності R_m , МПа	Границя плинності $R_{p0.2}$, МПа	Границя міцності R_m , МПа
293,1	461,8	298,2	464,5	1,7	0,5



(a)



(б)

Рис. 2.2 – Переносна установка РПТ-02М з механічним (а) та електромагнітним (б) кріпленням.

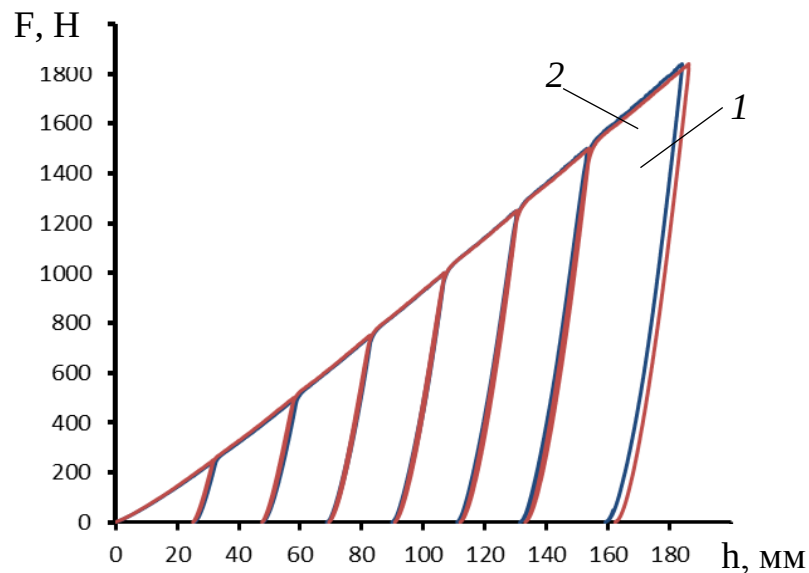


Рис. 2.3 – Діаграми інструментованого індентування конструкційної вуглецевої сталі 20, отримані переносною установкою РІТ-02М із використанням механічного (1) та електромагнітного (2) кріплень.

Переносна установка РІТ-02М призначена, впершу чергу, для організацій, які оцінюють характеристики міцності неруйнівними методами контролю. Її можна використовувати для неруйнівного контролю стану матеріалу відповідальних конструкцій у процесі їх виготовлення, експлуатації та ремонту в тепловій і ядерній енергетиці, нафтогазовій промисловості, а після модернізації – при вхідній атестації металопродукції в оборонній, будівельній та інших індустріях. Нову систему кріплення установки було використано при вхідній атестації листового прокату з високоміцних сталей марок Armoх 500Т, Hardox 450 товщиною 10 мм у стані постачання, які використовуються для виробництва конструкцій спеціального призначення (рис. 2.4). Якість металу листового прокату оцінювали за показниками твердості за Брінеллем та характеристиками міцності, а саме: за границями плинності та міцності. Застосування такого класу обладнання пришвидшило процедуру вхідного контролю продукції та відповідно знизило витрати на її проведення.

У табл. 2.2 наведено значення характеристик міцності і твердості високоміцних сталей, що були визначені шляхом розрахунку згідно з методиками [58, 59] за діаграмами інструментованого індентування. Усі значення отримано осередненням результатів не менше п'яти випробувань, що підтверджується даними при одновісному розтягу.



Рис. 2.4 – Переносна установка РІТ-02М з електромагнітним кріпленням при вхідній атестації листового прокату з високоміцної сталі Армох 500Т.

Таблиця 2.2 – Характеристики міцності і твердості за методом Брінелля листового прокату товщиною 10 мм високоміцних сталей марок Hardox 450 і Армох 500Т

Марка сталі	$R_{p0.2}$, МПа	R_m , МПа	HBW
Hardox 450	~ 1195	~ 1392	~ 453
Армох 500Т	~ 1331	~ 1700	~ 507

Отже, ця установка може успішно застосовуватись для контролю поточного стану матеріалів конструкцій спеціального призначення як на стадії вхідного контролю, так і в процесі експлуатації.

Висновки. Модернізовано переносну установку РІТ-02М для визначення характеристик міцності елементів конструкцій в умовах експлуатації методом інструментованого індентування відповідно до вимог ISO 14577-1:2015 [105]. 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 установлено, 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. Отримано позитивні результати щодо її використання при вхідній атестації листового прокату з високоміцних сталей марок Armoх 500Т, Hardox 450, що дало можливість оперативно здійснювати вхідний контроль.

2.2 Вдосконалення і стандартизація методик визначення параметрів ідентування за діаграмою локального деформування матеріалу індентором

2.2.1 Вдосконалення методики визначення параметра пластичності A

В сучасних умовах розвитку неруйнівних методів механічного контролю значного поширення набуло інструментоване ідентування, зокрема, з метою непрямого оцінювання механічних характеристик матеріалів – таких як границя плинності, границя міцності і модуль пружності [82, 97, 144].

Одним із ключових параметрів, що характеризують пластичні властивості матеріалу при локальному навантаженні, є параметр пластичності A . Параметр пластичності A визначають шляхом апроксимації кривої рівнянням (2.1), що описує діаграму ідентування в координатах «напруження на поверхні відбитку F_{max}/d^2 – деформація d/D »:

$$\frac{F}{d^2} = A \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^m, \quad (2.1)$$

де m – параметр зміцнення; A – параметр пластичності діаграми ідентування; F_{max}/d^2 – напруження у відбитку; d/D – деформація у відбитку.

Для апроксимації діаграми в координатах «напруження у відбитку – деформація» рівнянням (2.1) для визначення параметра пластичності A можна використовувати стандартні пакети комп'ютерних програм для чисельного аналізу даних.

Базовий підхід до визначення параметра A було запропоновано Хаггагом [93].

Ординати діаграми «напруження на поверхні відбитку F_{max}/d^2 – деформація d/D » дістають діленням прикладеного максимального

навантаження на індентор F_{max} на діаметр відбитка в квадраті d^2 , а абсциси – діленням діаметра відбитка d на діаметр кульки індентора D (рис. 2.5).

Для визначення діаметра відбитка d використовують рівняння:

$$d = 2\sqrt{t \cdot D - t^2} \quad (2.2)$$

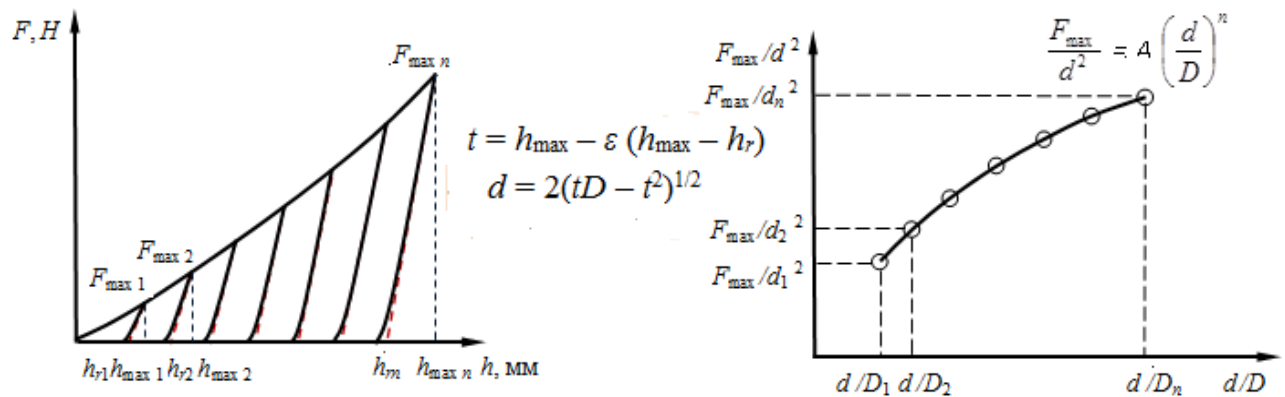


Рис. 2.5 – Схема визначення границі плинності методом інструментованого індентування.

На відміну від підходів, реалізованих у ASTM E 2546-15 [81] і ISO 14577-1:2015 [105], де зосереджено увагу на розрахунках модулів пружності, твердості та контактної площі, у методиці Хаггага параметр A безпосередньо пов'язується з границею плинності за допомогою емпіричних кореляцій. Втім, у початковій формі методика не враховує низку важливих чинників – впливу пружної деформації вузла вимірювання глибини вдавлювання індентора на вимірювання глибини відбитка, похибки вимірювання залишкової глибини та нестабільність апроксимації при крайових значеннях деформації.

У межах дисертаційної роботи зазначену методику було вдосконалено шляхом впровадження таких нововведень:

1). Усунення впливу пружної деформації вузла вимірювання глибини вдавлювання індентора на вимірювання глибини відбитка.

Для усунення впливу пружної деформації вузла вимірювання глибини вдавлювання індентора на вимірювання глибини відбитка слід використовувати рівняння Олівера–Фарра [143, 144]:

$$t = h - \varepsilon (h - h_p), \quad (2.3)$$

де h – глибина індентування, мм; h_p – залишкова глибина індентування після зняття випробувального навантаження, мм.

Максимальне навантаження циклу індентування і відповідну глибину відбитка розраховують із циклічної діаграми індентування.

Це дозволяє значно зменшити похибки, особливо для конструкційних матеріалів із високою пружною деформацією.

2). Використання циклічного режиму індентування.

Для підвищення достовірності визначення залишкової глибини і реєстрації максимального зусилля введено інструментальне індентування в циклічному режимі. Що дало можливість забезпечити кращу відтворюваність результатів.

3). Оптимізація інтервалу апроксимації.

З метою стабілізації процедури апроксимації встановлено обмеження для інтервалу деформації: $d/D = 0,2 \div 0,5$. Це дозволяє виключити вплив початкової стадії деформації (яка містить значну частку пружної компоненти) та крайові ефекти.

4). Стандартизація методики.

Запропонована методика була формалізована і покладена в основу галузевого стандарту СОУ 56-37-2021 «Матеріали металеві. Випробування на інструментоване індентування. Метод випробування за кімнатної температури», затвердженого Інститутом проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України [58]. У стандарті передбачено вимоги до:

– побудови діаграми в координатах «напруження на поверхні відбитку $F_{\max}/d^2$ – деформація d/D ;

- використання циклічного індентування;
- визначення глибини вдавлювання індентора за рівнянням Олівера–Фарра;
- апроксимації у вказаному діапазоні значень деформації.

Порівняно з методиками ASTM E 2546-15 [81] і ISO 14577-1:2015 [105], де основну увагу приділено модулю Юнга, контактній жорсткості і твердості, вдосконалена методика дозволяє здійснити параметричну оцінку границі плинності, що особливо актуально для конструкційних сталей з неоднорідною структурою, зварних з'єднань та матеріалів, які експлуатувалися в складних умовах.

Запропонований нормативний документ встановлює метод випробування металевих матеріалів на інструментоване індентування кулькою із карбіду вольфраму діаметром 2,5 мм в макродіапазоні навантажень при кімнатній температурі і визначає параметри індентування, які можуть бути оцінені в рамках застосування цього методу.

Основні положення створеного стандарту відповідають вимогам першої та другої частин міжнародного нормативного стандарту ISO 14577-1:2015 [105].

Таким чином, удосконалена методика визначення параметра A забезпечує підвищену точність, стандартизацію та практичну значущість при технічному діагностуванні й контролі властивостей металевих матеріалів.

2.2.2 Уточнення визначення параметра пропорційності пластичного індентування a

У класичному підході [118] параметр α , що визначається з апроксимації залежності між максимальним навантаженням $F_{\max}$ і залишковою глибиною вдавлювання h_p , позначається як параметр пропорційності пластичного

індентування. Проте така назва, хоч і історично усталена, є радше формальною і не повною мірою відображає фізичну суть явища.

З фізичної точки зору, цей параметр відображає локальний опір матеріалу залишковій пластичній деформації, яка виникає внаслідок дії контактного локального навантаження матеріалу індентором. Дійсно, залишкова глибина h_p є мірою пластичної деформації, яка залишилася після зняття навантаження, а в свою чергу навантаження $F_{\max}$ є зусиллям, необхідним для досягнення такої деформації. Таким чином, відношення $F_{\max}/h_p = \alpha$ відображає локальний опір пластичному деформуванню матеріалу. В результаті аналізу результатів досліджень було встановлено, що при зростанні значення α зростає навантаження, необхідне для формування певної залишкової глибини проникнення, що узгоджується з класичним розумінням опору пластичному деформуванню в умовах локального навантаження.

З огляду на це, у подальшому тексті роботи параметр α буде іменуватися як параметр локального опору пластичній деформації, що, на думку автора, є більш фізично обґрунтованим і придатним до широкого застосування у методах механічної діагностики матеріалів.

Як зазначалося вище запропонований у роботі параметр локального опору пластичній деформації α відображає здатність матеріалу чинити опір залишковому пластичному вдавлюванню індентора при локальному навантаженні. Хоча його фізичний сенс не тотожний границі міцності за розтягу σ_m , обидві характеристики описують опір матеріалу до розвитку незворотних деформацій, але в різних умовах навантаження.

Границя міцності визначається як максимальне напруження, яке витримує матеріал у процесі рівномірного розтягування до моменту руйнування. Натомість параметр α оцінюється в умовах концентровано прикладеного навантаження індентором і відображає опір локальній пластичній деформації без макроскопічного руйнування. В експериментальних дослідженнях, проведених у роботі, встановлено стійку

кореляцію між значеннями σ_m та α для низки конструкційних сталей (09Г2С, 20, 15ХСНД, 15Х2НМФА тощо). Зокрема, при графічному аналізі залежностей $\sigma_m = f(\alpha)$ спостерігається майже лінійний характер змін (коефіцієнт кореляції $r > 0,95$), що дає підстави розглядати параметр α як емпіричний індикатор міцності, придатний для непрямої кількісної оцінки.

Така узгодженість підтверджує доцільність використання параметра локального опору пластичній деформації в якості альтернативного чи додаткового критерію оцінки міцності матеріалу на етапах неруйнівного контролю або локальної діагностики технічного стану металевих елементів.

У процесі дослідження дисертантом було встановлено, що значення параметра локального опору пластичній деформації α залежить від вибраного діапазону апроксимації ділянки діаграми індентування $F_{\max} - h_p$. Зі зміною меж апроксимації, тобто із поступовим розширенням інтервалу залишкових глибин h_p , у якому проводиться лінійне наближення. Значення α спочатку зростає, досягає максимуму, а потім зменшується (рис. 2.6).

Такий характер зміни параметра є не монотонним і, як показано в роботі, має фізичне обґрунтування: у початкових циклах індентування домінує пружно-пластичний режим, а в подальших – відбувається насичення деформації і зростає частка пластичної релаксації. У результаті, при переході до глибших проникнень, локальна жорсткість знижується, що пояснює спадання параметра α після досягнення максимуму.

Аналогічний підхід застосовувався у роботі Марковця [40], де для сталей було показано, що твердість, визначена за вдавлюванням сталеві кульки, також залежить від глибини вдавлювання, і її максимум (так звана максимальна твердість $H_{\max}$) добре корелює з границею міцності σ_m . За аналогією, у цій роботі максимальне значення параметра α ($\alpha_{\max}$) запропоновано використовувати як надійну кількісну характеристику локального опору пластичній деформації, яка найбільш повно відображає міцнісні властивості матеріалу.

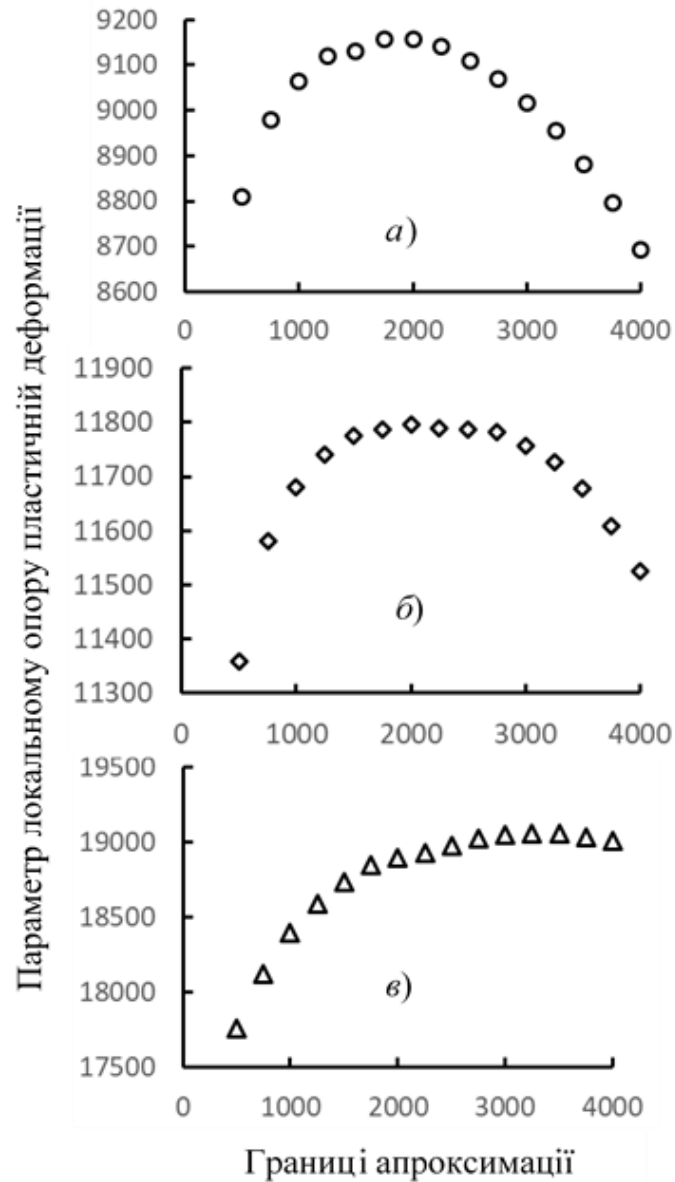


Рис. 2.6 – Схематичне представлення кривої «параметр локального опору пластичній деформації α – границі апроксимації» для визначення максимального значення параметру пропорційності пластичного індентування: а) сталь ст. 3; б) сталь 20; в) сталь 45.

Таким чином, замість використання фіксованого діапазону апроксимації, як це передбачено у класичному підході, дисертантом запропоновано побудову залежності:

$$\alpha = f(h_{p1} \div h_{pi}), \quad (2.4)$$

де $h_{p1} \div h_{pi}$ – границі апроксимації α . Це дозволяє ідентифікувати максимум цієї функції й отримати $\alpha_{\max}$ як репрезентативний показник міцності.

Слід зазначити, що при реалізації запропонованого підходу до визначення максимального значення параметра локального опору пластичній деформації $\alpha_{\max}$ виникає низка технологічних обмежень, що пов'язані з використанням матеріалу індентора. Особливо яскраво це спостерігається при індентуванні високоміцних сталей. Зокрема, застосування стандартних сталевих кульок інденторів є обмеженням – до твердості вище 450 HB, оскільки спостерігається значне деформування або пошкодження індентора, що унеможливорює точні вимірювання.

У зв'язку з цим, у промисловій та дослідницькій практиці здійснено перехід до використання кульок із карбіду вольфраму, що дозволило розширити верхню межу діапазону твердості за Брінеллем до 630 одиниць, відповідно до чинних стандартів [20]. Однак навіть карбід-вольфрамові індентори не завжди забезпечують стабільність геометрії при індентуванні сталей із надвисокою межею міцності (понад 1500 МПа), особливо у разі багаторазових циклів навантаження.

У контексті реалізації методу визначення $\alpha_{\max}$, де навантаження має охоплювати повну пластичну відповідь матеріалу, це обмеження є критичним, оскільки неможливо досягти глибини проникнення, необхідної для побудови повної залежності $F_{\max} - h_p$ без ризику руйнування індентора.

Таким чином, подальше вдосконалення методу потребує проведення пошукових досліджень щодо вибору інденторів із ще більш високою твердістю (наприклад, на основі надтвердих матеріалів – кубічного нітриду бору, полікристалічного алмазу тощо), а також розробки корегуючих моделей, які б дозволяли враховувати граничні ефекти за використання інденторів з обмеженою механічною довговічністю.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу параметра, що описує зв'язок 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 кількісну характеристику опору матеріалу локалізованою пластичним деформуванням в зоні контакту з індентором.

Дисертантом також виявлено, що значення цього параметра суттєво залежить від вибраного діапазону апроксимації діаграми індентування. Зі зміною меж апроксимації спостерігається немонотонна поведінка – параметр α зростає до певного максимуму, після чого зменшується, що дозволило виділити максимальне значення. Таке значення найбільш повно відображає здатність матеріалу протистояти залишковій локальній деформації і є інформативним індикатором його міцності, за аналогією до методики Марковця з визначення максимальної твердості при індентуванні. Разом із тим, у ході реалізації методики було виявлено технологічні обмеження, що виникають при індентуванні високоміцних сталей. Зокрема, навіть застосування кульок із карбіду вольфраму не завжди дозволяє безпечно досягнути необхідної глибини проникнення, оскільки при навантаженнях, характерних для високоміцних матеріалів ($\sigma_m > 1200$ МПа), спостерігається ризик руйнування інденторів. Це обмежує можливість достовірного визначення $\alpha_{\max}$ та обумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі вибору інденторів із вищою твердістю та зносостійкістю.

2.3 Вдосконалення власної методики визначення твердості конструкційних сталей за результатами інструментованого індентування

У попередніх розділах було проаналізовано традиційні підходи до визначення твердості за Брінеллем, їх нормативне забезпечення, а також основні фактори, що впливають на точність та відтворюваність результатів. Поряд із застосуванням класичної методики, що базується на вимірюванні діаметра відбитка після розвантаження, все ширше впроваджуються підходи, у яких твердість визначається за глибиною вдавлювання індентора, що автоматично реєструється в процесі навантаження.

Такий підхід дозволяє усунути похибки, пов'язані з візуальними вимірюваннями, та створює передумови для підвищення точності й метрологічної надійності результатів. Крім того, реєстрація глибини вдавлювання відкриває можливості для детального аналізу локальних процесів пластичної деформації в зоні контакту індентора з матеріалом.

У зв'язку з цим, у межах даного дослідження вдосконалено підхід до інтерпретації результатів визначення твердості за Брінеллем шляхом введення фізично обґрунтованого параметра – локального опору пластичній деформації [115]. Застосування цього параметра дозволяє підвищити інформативність вимірювання, а також забезпечити кількісне оцінювання локальної деформаційної здатності матеріалу з урахуванням його структурної неоднорідності.

У цьому підрозділі наведено основні положення вдосконаленого підходу, його теоретичне обґрунтування, алгоритм розрахунку відповідного параметра та особливості його практичного застосування для конструкційних сталей із різною історією обробки.

2.3.1 Розробка власного підходу щодо визначення твердості за результатами випробувань на інdentування

У сучасній практиці матеріалознавчих досліджень усе більшого значення набувають методи інструментованого інdentування, що дозволяють отримувати розширений спектр механічних характеристик матеріалу шляхом локального навантаження інdentором із безперервною реєстрацією діаграми навантаження–глибина вдавлювання інdentора. Такий підхід має суттєві переваги перед традиційними методами вимірювання твердості, особливо в контексті неруйнівного контролю стану металу в реальних умовах експлуатації.

В Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України було запропоновано підхід до визначення твердості за Брінеллем на основі аналізу діаграми інструментованого інdentування у координатах максимальне випробувальне навантаження $F_{\max}$ – залишкова глибина вдавлювання інdentора h_{plast} після зняття навантаження. На основі цих координат вводиться параметр α , який є тангенсом кута нахилу γ прямолінійної апроксимації ділянки кривої деформування матеріалу інdentором:

$$\alpha = F_{\max} / h_{\text{plast}}. \quad (2.5)$$

Цей параметр характеризує локальний опір матеріалу пластичній деформації в умовах інdentування і чутливий до змін стану металу.

Початкова методика [57, 58] базувалася на реєстрації процесу деформування матеріалу інdentором у вигляді сталеві кульки діаметром 2,5 мм згідно з ГОСТ 9012-59 [15], що обмежувало діапазон визначення твердості до 400 HB. У зв'язку з переходом на міжнародний стандарт EN ISO 6506-1:2019 [20], у дослідженні реалізовано вдосконалення методики, а саме:

– використання карбід-вольфрамові кульки з позначенням твердості як HBW;

- розширення діапазону твердості до 110...630 HBW;
- побудову універсальної кореляційної залежності $HBW = f(\alpha)$ на основі еталонних мір твердості, повірених і сертифікованих.

Для побудови універсальної кореляційної залежності твердості за Брінеллем визначалась на повірених еталонних мірах твердості, що охоплюють широкі діапазони значень:

- № В10557 – 104 HBW;
- № В208520 – 190 HBW;
- № В2107179 – 375 HBW;
- № В2109314 – 527 HBW;
- № В69221 – 632,5 HBW.

Випробування проводились на лабораторній установці UTM-20НТ [72] у режимі циклічного навантаження. Для кожного циклу фіксувались значення $F_{\max}$ і h_{plast} , за якими обчислювався параметр α . В результаті було отримано масив значень (α, HBW) , що апроксимувались різними функціональними залежностями: лінійною, поліноміальною, кусково-лінійною та степеневою. Найбільш зручною та прийнятною для практичного використання виявилась лінійна функція, яка й була прийнята як основа для вдосконаленої методики.

Для вибору оптимального вигляду функції залежності $HBW = f(\alpha)$ були розглянуті чотири типи функцій:

Лінійна залежність:

$$HBW = k_{1HBW} \cdot \alpha + k_{2HBW}. \quad (2.6)$$

Поліном другого порядку:

$$HBW_{ind} = k_{1HBW}^q \cdot a^2 + k_{2HBW}^q \cdot a + k_{3HBW}^q \quad (2.7)$$

Кусково-лінійна функція:

$$\begin{cases} HBW_{ind} = k_{1HBW}^{l1} \cdot a + k_{2HBW}^{l1}, & \text{при } a < 40000 \\ HBW_{ind} = k_{1HBW}^{l2} \cdot a + k_{2HBW}^{l2}, & \text{при } a \geq 40000 \end{cases} \quad (2.8)$$

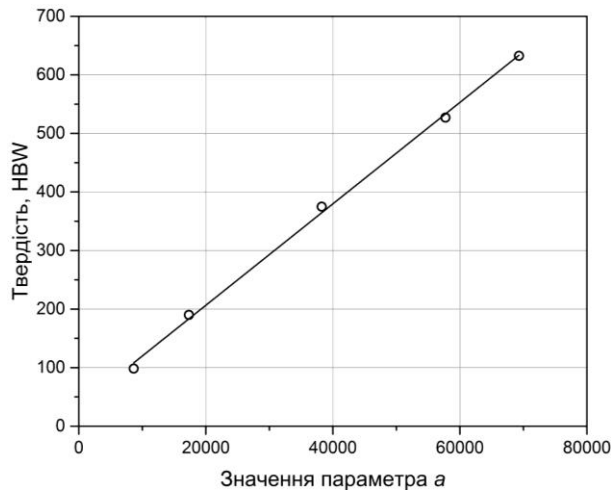
Степенева функція:

$$HBW_{ind} = k_{1HBW}^p + k_{2HBW}^p \cdot a^{k_{3HBW}^p}. \quad (2.9)$$

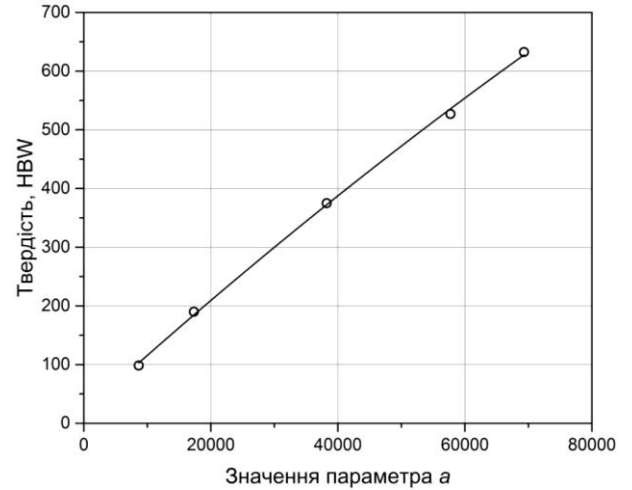
Результати апроксимацій чотирьох типів функцій предсавлені на рис. 2.7.

Апроксимація здійснювалась за методом найменших квадратів. Якість апроксимації оцінювалась за критерієм середньоквадратичного відхилення, яке наведено в табл. 2.3. Незважаючи на трохи кращу відповідність степеневій та поліноміальній функцій, лінійна залежність була прийнята як базова через простоту реалізації та інтерпретації у практичних умовах.

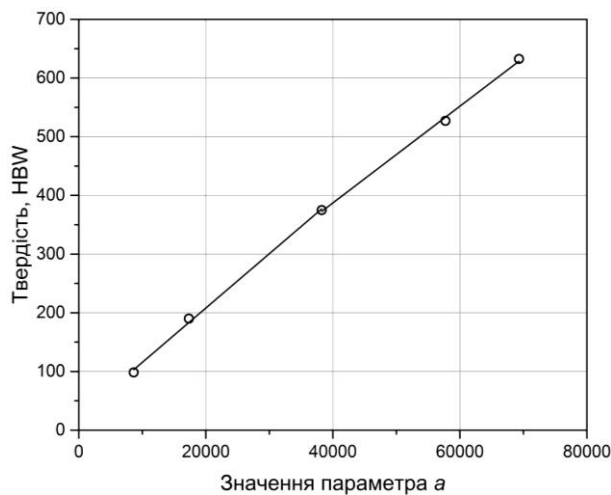
Суттєвим моментом є те, що при побудові залежності $HBW = f(\alpha)$ у цьому дослідженні використовували усереднене значення параметра α на всьому діапазоні циклів навантаження. Хоча з фізичної точки зору більш обґрунтованим було б використання максимального значення параметра $\alpha_{\max}$, яке характеризує граничну здатність матеріалу чинити опір локальній пластичній деформації. Проте реалізація такого підходу потребувала б збільшення навантаження на індентор, що виходить за межі допустимих навантажень для кульки з карбїду вольфраму діаметром 2,5 мм. Відповідно, для забезпечення стабільності та відтворюваності випробувань, а також збереження відповідності вимогам стандарту [20], було обрано усереднений параметр α , який залишився в межах допустимого навантаження.



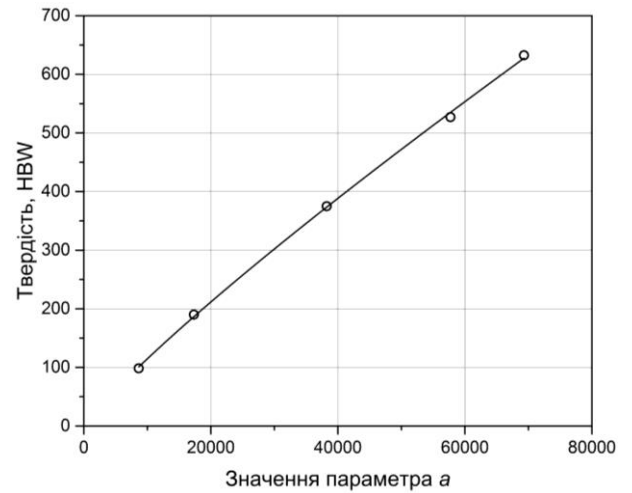
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2.7 – Апроксимація залежності параметра локального опору пластичній деформації від твердості за Брінеллем за допомогою різних функціональних моделей: лінійної (а), поліноміальної (б), кусково-лінійної (в) і степеневої (г).

Таким чином, у вдосконаленій методиці реалізовано компроміс між точністю оцінки локального опору пластичній деформації та практичною реалізованістю вимірювань в умовах обмеженого навантаження на індентор.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів у рівняннях кореляції (2.6)–(2.9) і середнього квадратичного відхилення

Рівняння кореляції							
(2.6)		(2.7)		(2.8)		(2.9)	
Параметр	Значення	Параметр	Значення	Параметр	Значення	Параметр	Значення
k_{1HBW}	0,00866	k_{1HBW}^q	$-1,47 \cdot 10^{-8}$	k_{1HBW}^{l1}	0,00926	k_{1HBW}^p	-3,146
k_{2HBW}	33,24	k_{2HBW}^q	$9,798 \cdot 10^{-3}$	k_{2HBW}^{l1}	22,89	k_{2HBW}^p	0,04004
		k_{3HBW}^q	19,07	k_{1HBW}^{l2}	0,00824	k_{3HBW}^p	0,8671
				k_{2HBW}^{l2}	57,63		
Значення середнього квадратичного відхилення							
0,99854		0,99921		0,99823		0,99945	

З метою подальшого вдосконалення підходу до визначення твердості доцільно розглядати можливість використання інденторів із більш твердих матеріалів, що дозволить підвищити допустимий рівень навантаження без ризику пошкодження індентора. Це, у свою чергу, дасть змогу реалізувати визначення максимального значення параметра $\alpha_{\max}$, який має кращу фізичну відповідність локальному опору матеріалу пластичній деформації та потенційно забезпечить вищу точність методу.

Результати досліджень лягли в основу стандарту СОУ 56-01-2025 [61].

2.3.2 Порівняння результатів випробувань на індентування і вимірювання твердості

Для апробації вдосконаленої методики було використано різні конструкційні, теплостійкі і високоміцні сталі [73, 115]:

- із листового прокату у стані постачання: сталі 3 (товщина 20 мм), 20 і 45 (товщина 12 мм), Hardox 450 і Arмох 500Т (товщина 10 мм);
- із трубопроводів і оболонок: сталі 20 (безшовний трубопровід живильної води $\varnothing 426 \times 24$ мм), 09Г2С (обичайка $\varnothing 3272 \times 36$ мм корпусу демонтованого підігрівача високого тиску типу ПВ 2500-97-10А), 16ГС (демонтована котушка $\varnothing 630 \times 25$ мм зі зварним з'єднанням вхідного патрубка зворотного клапана 1RA30S02 Ду 600 трубопроводу “свіжого” пару від ПГ-3);
- із поковок: сталі 10ГН2МФА (припуск контрольного зварного з'єднання ГЦТ $\varnothing 990 \times 70$ мм), 15Х2НМФА (корпуси, кришки та інші вузли реакторних установок АЕС).

Зразки для вимірювання твердості виготовляли на фрезерному верстаті із заготовок, вирізаних із темплетів металу на стрічкопильному верстаті з використанням охолодження. Після фрезерування зразки піддавали шліфуванню з подальшим поліруванням робочої поверхні до шорсткості $R_z = 0,25$ мкм.

Значення твердості за Брінеллем *HBW* згаданих вище сталей отримано шляхом осереднення результатів 10 вимірювань відповідно до [20] (табл. 2.4). Видно, що відхилення значень твердості, отриманих із використанням удосконаленої методики і традиційним методом [24], не перевищує 4,5% та знаходиться в межах похибки її визначення згідно з державними стандартами.

На рис. 2.8 для наочності приведено порівняння результатів вимірювань твердості за Брінеллем згідно з ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20] та методом інструментованого індентування з використанням вдосконаленої методики. Пунктирними лініями показано 5%-ний інтервал між значеннями твердості, які отримано за вдосконаленою методикою і загальноприйнятим методом за Брінеллем.

Таблиця 2.4 – Значення твердості за Брінеллем конструкційних сталей

Сталь	HBW		Відхилення (в %) від результатів твердоміра ТШ-2
	Твердомір ТШ-2	Удосконалена методика	
Листовий прокат			
3	107,3	106,8	-0,5
20	117,3	121,5	3,6
45	205,5	196,7	-3,8
Hardox 450	428	424,2	-0,9
Armox 500T	499	490,2	-1,8
Трубопроводи й оболонки			
20	146,3	140,9	-3,7
09Г2С	135,5	139,2	2,8
16ГС	161,4	167,8	3,9
Поковки			
15Х2НМФА	190,2	184,8	-2,9
10ГН2МФА	179	183,9	2,7

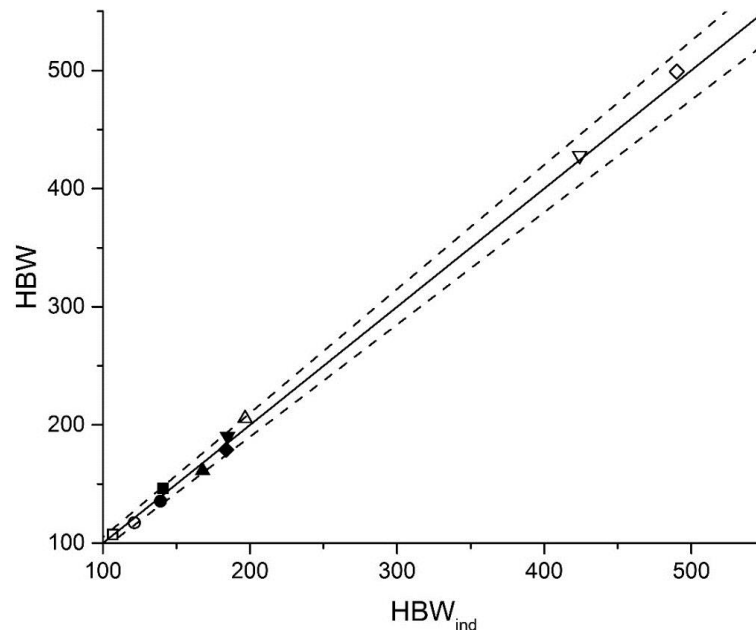


Рис. 2.8 – Порівняння значень твердості за Брінеллем, визначених стаціонарним твердоміром ТШ-2 (HBW) та методом інструментованого індентування (HBW_{ind}). Листовий прокат: сталі $\circ$ – 3, $\square$ – 20, Δ – 45, ∇ – Hardox 450, $\diamond$ – Armox 500T; трубопроводи: сталі $\bullet$ – 20, $\blacksquare$ – 09Г2С, $\blacktriangle$ – 16ГС; поковки: сталі $\blacktriangledown$ – 10ГН2МФА, $\blacklozenge$ – 15Х2НМФА).

Отже, розроблена методика може бути успішно використана для діагностування поточного стану матеріалів інженерних виробів, що знаходяться в процесі виробництва й експлуатації.

За результатами проведених досліджень було 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*) та врахувати сучасні вимоги українських нормативних документів. Проведено апробацію вдосконаленої методики. Результати досліджень свідчать, що відхилення величин, які визначено за цією методикою, від вимірювань твердості за Брінеллем згідно з [20] не перевищує 3,9%.

Розроблене устаткування та вдосконалена методика можуть бути використані у лабораторіях науково-дослідних і учбових інститутів, центральних заводських лабораторіях і спеціалізованих підрозділах різної підпорядкованості та в інших організаціях, що займаються моніторингом стану діючого відповідального обладнання та встановленням термінів його подальшої експлуатації як в лабораторних, так і польових умовах.

2.4 Нормування процедур визначення характеристик міцності конструкційних сталей за результатами вимірів твердості та індентування

2.4.1 СОУ 56-37-21

В Інституті проведено комплекс досліджень, направлених на розробку обладнання для проведення випробувань, а також на удосконалення і розробку нових методик визначення характеристик міцності за результатами випробувань методом інструментованого індентування в лабораторних та

промислових умовах в макродіпазоні зусиль індентування [113, 118, 126]. Досягнуті результати лягли в основу створеного стандарту Інституту СОУ 56-37-2021 «Матеріали металеві. Випробування на інструментоване індентування. Метод випробування за кімнатної температури» [58].

Основні положення створеного стандарту відповідають вимогам першої та другої частин міжнародного стандарту ISO 14577-1:2015 [105].

Запропонований нормативний документ встановлює метод випробування металевих матеріалів на інструментоване індентування кулькою із карбіду вольфраму діаметром 2,5 мм в макродіпазоні навантажень при кімнатній температурі і визначає параметри індентування, які можуть бути оцінені в рамках застосування цього методу.

В стандарті приведені вимоги до експериментального обладнання для випробувань металів за методом інструментованого індентування в лабораторних та промислових умовах при різноманітних режимах статичного і циклічного навантаження в макродіпазоні зусиль індентування. Особлива увага приділяється піддатливості експериментального обладнання. Оскільки неврахування пружної деформації призводить до завищення значень вимірюваної глибини індентування, які визначаються піддатливістю випробувальної машини. Що в свою чергу призводить до виникнення додаткової похибки при визначенні механічних характеристик металу за результатами індентування.

Регламентовано методику підготовки поверхні випробування зразка або конструктивного елемента до дослідження, а також підготовку експериментального обладнання. Описано методику випробувань металів методом інструментованого індентування. Зокрема приведено процедуру визначення моменту дотику вершиною індентора випробувальної поверхні (момент дотику вершини індентора поверхні випробування визначається за величиною нижньої границі макродіпазону індентування, за якої $F > 2 H$).

Для запобігання удару індентора по випробувальній поверхні та зменшення часу випробування, встановлення моменту дотику вершиною

індентора поверхні випробування запропоновано здійснювати переміщенням індентора на трьох швидкостях, ступенево автоматично знижуючи його швидкість:

- початкова швидкість може бути не менша, ніж 200 мкм/с – від початкового положення до контакту датчика вимірювання глибини індентування з випробувальною поверхнею;

- швидкість зближення не повинна перевищувати 20 мкм/с – від початку реєстрації переміщення індентора до безпечного зазору 200 мкм між вершиною індентора і поверхнею випробування;

- швидкість в момент дотику вершини індентора поверхні випробування не повинна перевищувати 2 мкм/с – остання ступінь, на якій здійснюється безпечний дотик вершини індентора (кульки) поверхні випробування.

Приведені вимоги до товщини зразка або конструктивного елементу і відстані між центрами двох суміжних відбитків та відстані між центром відбитка і краєм зразка.

В залежності від параметра, який визначається, описано вимоги до формування режиму навантажування та вибору швидкості індентування.

Швидкість індентування залежить від режимів навантажування, що реалізуються при випробуваннях:

- з постійною швидкістю навантажування;
- з постійною швидкістю переміщення індентора.

Режим навантажування формується в залежності від параметра, який потрібно визначити.

Режим навантажування при визначенні параметру пропорційності пластичного індентування α . Визначення параметра локального опору пластичного деформування виконується в режимі постійності швидкості переміщення індентора діаметром 2,5 мм для реєстрації циклічної діаграми індентування в такій послідовності:

а) навантажування до максимальної величини навантаження першого циклу (250 Н – рекомендований крок навантаження) зі швидкістю переміщення індентора $8,3 \cdot 10^{-4}\text{ мм/с}$;

б) розвантажування до нульового рівня навантаження після першого циклу навантажування зі швидкістю переміщення індентора $8,3 \cdot 10^{-4}\text{ мм/с}$;

в) навантажування до максимальної величини навантаження другого циклу навантажування (500 Н) зі швидкістю переміщення індентора $8,3 \cdot 10^{-4}\text{ мм/с}$;

г) розвантажування до нульового рівня навантаження після другого циклу навантажування зі швидкістю переміщення індентора $8,3 \cdot 10^{-4}\text{ мм/с}$;

д) і так далі до n -го циклу навантажування.

Максимальна величина навантаження при індентуванні вибирається в залежності від твердості матеріалу (рис. 2.9) і повинна забезпечувати появу точки перегину на кривій у координатах «параметр пропорційності пластичного індентування a – границя апроксимації $h_{p1} \div h_{pi}$ ».

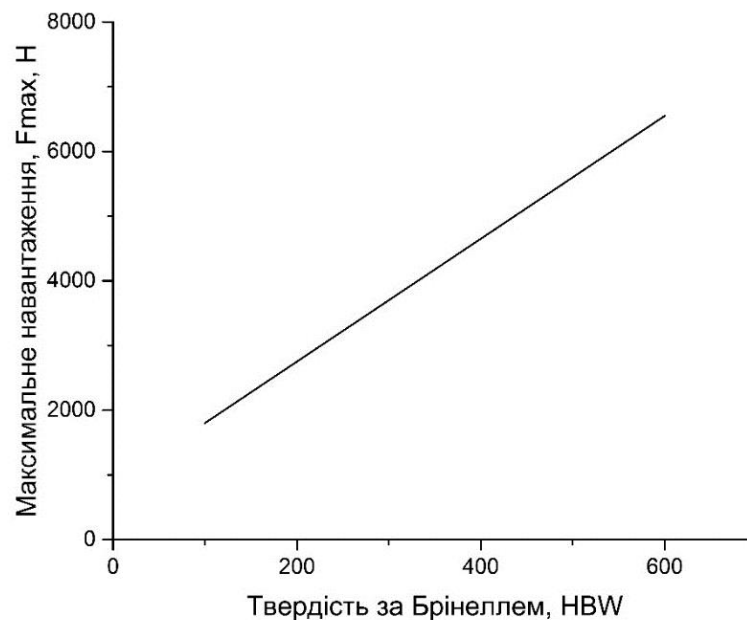


Рис. 2.9 – Максимальна величина навантаження при індентуванні в залежності від твердості матеріалу.

Режим навантажування при визначенні параметра пластичності A .

Для визначення параметра пластичності A здійснюється реєстрація діаграми індентування, як і при визначенні границі плинності за ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24], в режимі постійної швидкості переміщення індентора діаметром 2,5 мм:

а) навантажування до максимальної величини 4000 Н зі швидкістю переміщення індентора $8,3 \cdot 10^{-4}$ мм/с;

б) розвантажування зі швидкістю переміщення індентора $8,3 \cdot 10^{-4}$ мм/с.

Визначення параметра пластичності A описано в п. 2.2.1, а параметра локального опору пластичного деформування a в п. 2.2.2.

На основі аналізу основних тенденцій підходів до визначення механічних характеристик високоміцних та броньованих сталей методом інструментованого індентування, проведених експериментальних досліджень і аналізу нормативних документів створено Стандарт Інституту СОУ 56-37-2021 [58], що регламентує застосування методу інструментованого індентування для експрес-контролю матеріалів спеціального призначення.

2.4.2 СОУ 56-38-21

При розробці стандарту СОУ 56-38-2021 «Матеріали металеві визначення механічних характеристик за результатами вимірювання твердості та індентування. Методи розрахунку» [59] використано методики, які розроблено в Інституті [57, 58]. На відміну від існуючих методик, механічні властивості сталей згідно приведеної в стандарті методики визначаються за параметром пропорційності пластичного індентування. Параметр локального опору пластичній деформації α пропорційний тангенсу кута нахилу γ діаграмі «максимальне випробувальне навантаження F_{max} циклу навантаження – залишкова глибина індентування після зняття випробувального навантаження h_p цього циклу». При такому підході

визначення границі міцності металів не залежить від пружної деформації вузла вимірювання глибини вдавлювання індентора.

Визначення показників механічних характеристик за результатами вимірів твердості за Брінеллем

Визначення значень умовної границі плинності конструкційних матеріалів за результатами вимірювання твердості за Брінеллем ґрунтується на кореляційній залежності між умовною границею плинності $R_{p0,2}$, визначеною при випробуваннях зразків на розтяг відповідно ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24] та показниками твердості за Брінеллем, які виміряно відповідно ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20]:

$$R_{p0,2}^{HBW} = f(HBW), \quad (2.10)$$

де $R_{p0,2}^{HBW}$ – умовна границя плинності, що визначена за результатами вимірювання твердості за Брінеллем, МПа; HBW – твердість за Брінеллем; $g(HBW)$ – функція залежності умовної границі плинності визначеної з випробувань зразків на розтяг відповідно ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24] та показниками твердості за Брінеллем, виміряних відповідно ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20].

Для листового прокату із низько та середньо вуглецевих сталей ця залежність має вигляд:

$$R_{p0,2}^{HBW} = 1,58 HBW + 67. \quad (2.11)$$

Для листового прокату із високоміцної сталі Hardox 450 та броньованої сталі Arмох 500Т ця залежність така:

$$R_{p0,2}^{HBW} = 8,62 HBW - 154,9. \quad (2.12)$$

Визначення значень границі міцності конструкційних матеріалів за результатами вимірювання твердості за Брінеллем ґрунтується на кореляційній

залежності між границею міцності R_m , визначеною при випробуваннях зразків на розтяг відповідно ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24] та показниками твердості за Брінеллем, які виміряно відповідно ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20]:

$$R_m^{HBW} = f(HBW), \quad (2.13)$$

де R_m^{HBW} – границя міцності, визначена за результатами вимірювання твердості за Брінеллем, МПа; HBW – твердість за Брінеллем; $f(HBW)$ – функція залежності умовної границі плинності визначеної з випробувань зразків на розтяг відповідно ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24] та показниками твердості за Брінеллем, виміряних відповідно ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20].

Для листового прокату із низько та середньо вуглецевих сталей ця залежність приведена нижче:

$$R_m^{HBW} = 3,58 HBW - 8. \quad (2.14)$$

Для листового прокату із високоміцної сталі Hardox 450 та броньованої сталі Arмох 500Т ця залежність наступна:

$$R_m^{HBW} = 3,4 HBW. \quad (2.15)$$

Визначення показників механічних характеристик за результатами індентування.

Визначення умовної границі плинності $R_{p0,2}^A$ методом інструментованого індентування ґрунтується на кореляційній залежності між границею плинності, визначеною з діаграми деформування зразка на одновісний розтяг за ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24], та коефіцієнтом пластичності A , визначеним відповідно СОУ 56-37-2021 [58]:

$$R_{p0,2}^A = f(A), \quad (2.16)$$

де $f(A)$ – функція залежності між параметром пластичності A та умовною границею плинності $R_{p0,2}$, визначеною з діаграми деформування зразка на одновісний розтяг, МПа.

Для листового прокату із низько та середньо вуглецевих сталей ця залежність наступна:

$$\begin{aligned} R_{p0,2}^A &= 0,119 \cdot A + 127 \quad \text{при } A \geq 1300; \\ R_{p0,2}^A &= 0,294 \cdot A - 102,7 \quad \text{при } A < 1300. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Для листового прокату із високоміцної сталі Hardox 450 та броньованої сталі Армох 500Т ця залежність наступна:

$$R_{p0,2}^A = 0,38 \cdot A - 718. \quad (2.18)$$

Методика визначення границі міцності R_m методом інструментованого ідентування ґрунтується на кореляційній залежності границі міцності R_m , визначеної згідно з ДСТУ ISO 6892-1 [24], від параметра локального опору пластичній деформації α : визначеного відповідно СОУ 56-37-2021 [58], який є кількісною характеристикою опору матеріалу проникненню індентора у пластичному режимі:

$$R_m^a = f(a), \quad (2.19)$$

$f(a)$ – функція залежності між параметром локального опору пластичній деформації a та границею міцності R_m визначеною з діаграми деформування зразка на одновісний розтяг, МПа.

У цій методиці реалізовано фізично обґрунтований підхід, який полягає у зіставленні максимального напруження в зразку при розтягуванні та максимального значення локального напруженого стану в зоні контакту індентора. У результаті численних експериментів на зразках конструкційних сталей було встановлено кореляційну залежність між максимальним значенням параметра локального опору $a_{\max}$ і границею міцності:

$$R_m = 0,0374 \cdot a_{\max} + 26,4. \quad (2.20)$$

Використовуючи цю залежність, було показано, що для низьковуглецевих і середньовуглецевих сталей (Ст 3, Сталь 20, Сталь 45) відхилення результатів, отриманих за допомогою індентування, від стандартного визначення R_m згідно з ДСТУ ISO 6892-1 [24] не перевищує 2%, що знаходиться в межах допустимої похибки для механічних випробувань.

Однак із підвищенням твердості матеріалу фіксується тенденція згладжування максимуму параметра a на кривій навантаження. Зокрема, для сталі 45 вже при навантаженні до 4000 Н спостерігається плавний спад напруження в процесі індентування, що свідчить про втрату можливості достовірно визначити $a_{\max}$. (див пункт 2.2.2). Цей ефект аналогічний до ускладнень, що виникають при оцінці границі плинності через коефіцієнт пластичності – для більш твердих матеріалів реєстрація пластичної деформації потребує вищих навантажень, що може виходити за межі можливостей вимірювального обладнання.

З метою розширення діапазону застосування методики було запропоновано експрес-підхід, що ґрунтується на визначенні середнього значення локального опору пластичного деформування a в діапазоні навантажень від 0 до 4000 Н, без фіксації максимуму. Для цього режиму встановлено альтернативну кореляційну залежність:

$$R_m = 0,035 \cdot a + 54,38. \quad (2.21)$$

Похибка визначення границі міцності за цим підходом не перевищує 5%, що підтверджено для групи вуглецевих сталей. Даний експрес-метод виявився особливо ефективним у разі застосування інденторів із твердосплавних матеріалів, коли визначення $a_{\max}$ ускладнене та не потребує досить високої точності.

З урахуванням вищезазначеного, при нормуванні процедури визначення характеристик міцності конструкційних сталей за результатами індентування в рамках створення внутрішнього стандарту Інституту було вирішено орієнтуватися саме на експрес-методику, як на основну та уніфіковану для промислового застосування.

Для листового прокату із низько та середньо вуглецевих сталей ця залежність наступна:

$$R_m^a = 0,03 \cdot \alpha + 117. \quad (2.22)$$

Для листового прокату із високоміцної сталі Hardox 450 та броньованої сталі Armoх 500Т справедлива залежність (2.22).

Слід зазначити, що визначення характеристик міцності за результатами вимірювання твердості і методом інструментованого індентування є непрямим оцінюванням. Тому відхилення величин характеристик міцності, що визначаються цим стандартом, від величин характеристик міцності визначених за результатами випробувань на розтяг не повинно перевищувати 10 %.

На основі експериментальних випробувань на розтяг, індентування і твердість розроблено стандарт для визначення характеристик міцності за результатами вимірювання твердості та індентування СОУ 56-38-2021 [59], який було розроблено з метою впровадження експрес-методів оцінювання міцності на основі параметра локального опору деформації.

У документі:

- описано порядок калібрування функціональних залежностей типу (2.22);
- наведено рекомендації щодо вибору індентора та навантажень;

- встановлено межі допустимих похибок;
- регламентовано процедури верифікації точності та повторюваності вимірювань;
- подано приклади застосування залежностей для різних марок сталей.

Таким чином, нормування методики визначення границі міцності R_m за результатами інструментованого індентування було реалізовано на основі інтеграції фізичного підходу (через локальний опір) та нормативного обґрунтування, що дозволяє впевнено застосовувати її в умовах виробництва, діагностики та неруйнівного контролю.

Проведені дослідження експериментально підтвердили дієвість представлених методик, що дозволяє досить швидко отримувати інформацію про стан матеріалу і коригувати подальші дії.

2.4.3 Визначення характеристик міцності за результатами вимірювання твердості та інструментованого індентування.

Розроблені нормативні документи [57, 58] було використано при вхідній атестації листового прокату із високоміцних сталей марок 28ГХНМР (Armox 500T), 20ГР (Xardox 450) товщиною 10 мм і марок 30Х2СН2МФА (сталь 71) і 28ГРА (Miilux 500) товщиною 6 мм в стані поставки, які використовуються для виробництва конструкцій спеціального призначення, а також конструкційних сталей: ст 3; сталей 20, 45, 09Г2С, 16ГС, 10ГН2МФА, 15Х2НМФА, 38ХН3МФА, 25Х1МФ, що використовуються в енергетичному машинобудуванні [31, 120, 122]. Результати, отримані методом інструментованого індентування та випробуваннями на твердість, підтверджені даними випробувань на одновісний розтяг.

На рис. 2.10 і 2.11 представлено залежності значень границі міцності R_m , що отримані з випробувань на одновісний розтяг, які відкладали по осі ординат, від значень границі міцності, що визначені шляхом розрахунку за

параметром пропорційності пластичного індентування R_m^{ind} і за твердістю за Брінеллем R_m^{HBW} , відкладали по осі абсцис.

На рис. 2.12 і 2.13 представлено залежності значень границі плинності $R_{p0.2}$, що отримані з випробувань на одновісний розтяг, які відкладали по осі ординат, від значень границі плинності, що визначені шляхом розрахунку за параметром пластичності при інструментованому індентуванні $R_{p0.2}^{ind}$ і за твердістю за Брінеллем $R_{p0.2}^{HBW}$, які відкладали по осі абсцис.

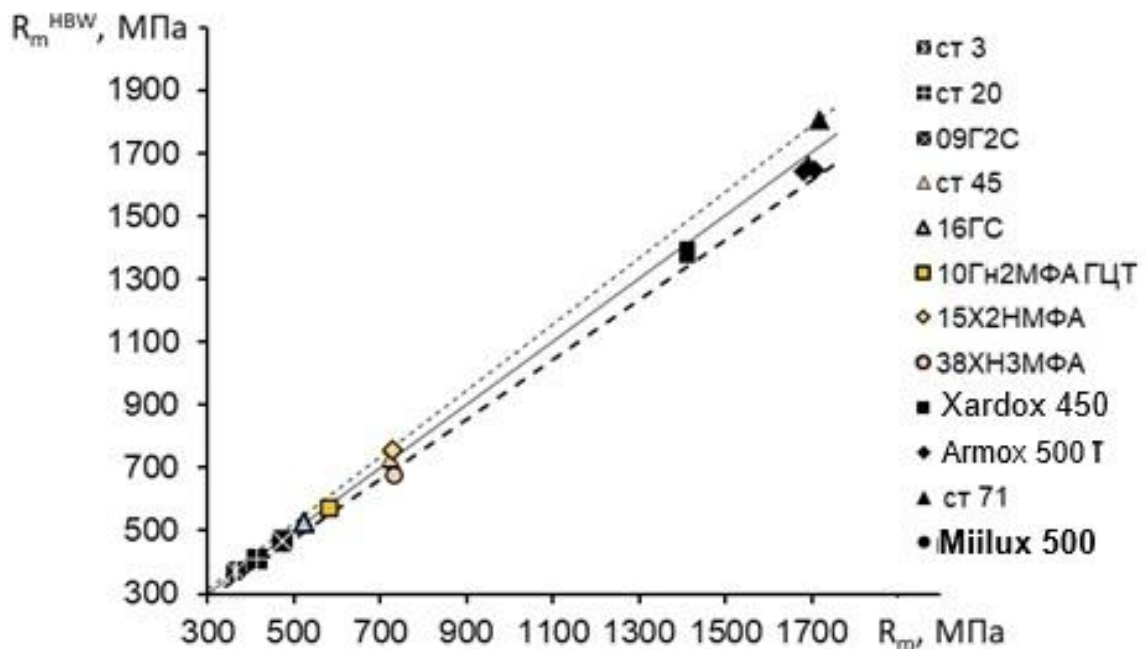


Рис. 2.10 – Залежності значень границі міцності R_m , що отримані з випробувань на одновісний розтяг (вісь абсцис), від значень границі міцності визначених шляхом розрахунку за твердістю за Брінеллем R_m^{HBW} (вісь ординат). Позначення: ■ – ст 3; ▣ – ст 20; ▤ – 09Г2С; △ – ст 45; ▲ – 16ГС; ◼ – 10ГН2МФА; ◈ – 15Х2НМФА; ◉ – 38ХН3МФА; ■ – Xardox 450; ◆ – Armox 500T; ▲ – сталь 71; ● – Miilux 500.

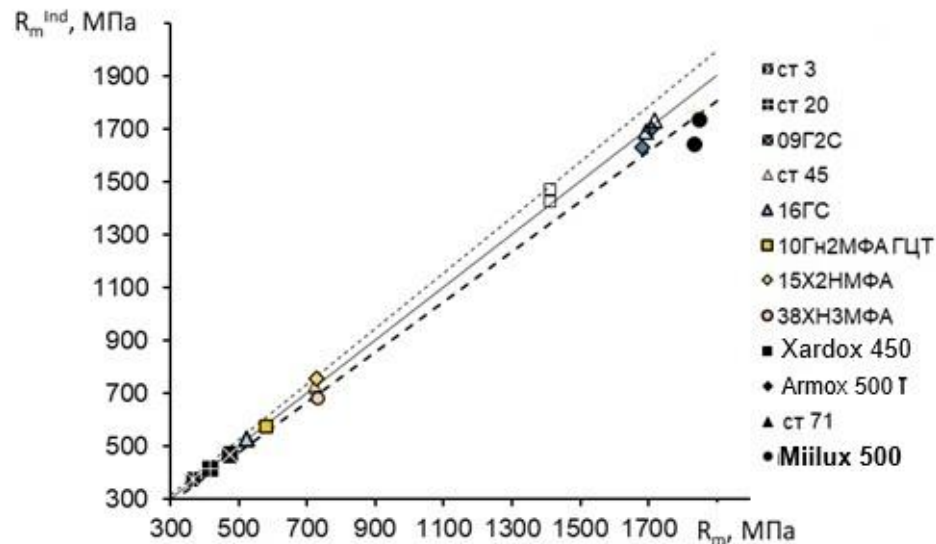


Рис. 2.11 – Залежності значень границі міцності R_m , що отримані з випробувань на одновісний розтяг (вісь абсцис), від значень границі міцності визначених шляхом розрахунку за параметром пропорційності пластичного індентування R_m^{ind} (вісь ординат). Позначення: ■ – ст 3; ■ – ст 20; ▲ – ст 45; ■ – 09Г2С; ▲ – 16ГС; ■ – 10ГН2МФА; ♦ – 15Х2НМФА; ○ – 38ХН3МФА; ■ – Xardox 450; ♦ – Armoх 500Т; ▲ – сталь 71; ● – Miilux 500.

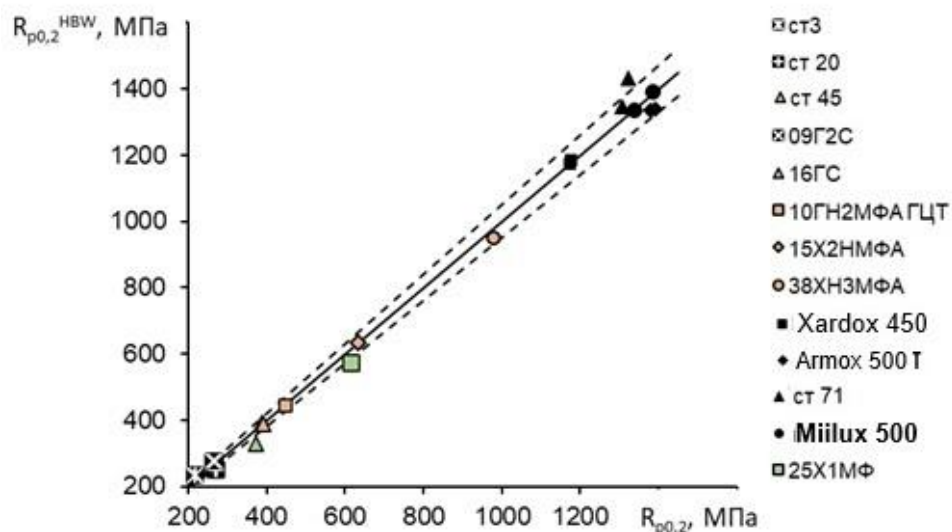


Рис. 2.12 – Залежності величин границі плинності $R_{p0.2}$, що отримані з випробувань на одновісний розтяг (вісь абсцис), від величин границі плинності визначених шляхом розрахунку за твердістю за Брінеллем $R_{p0.2}^{HBW}$ (вісь ординат). Позначення: ■ – ст 3; ■ – ст 20; ▲ – ст 45; ■ – 09Г2С; ▲ – 16ГС; ■ – 10ГН2МФА; ♦ – 15Х2НМФА; ○ – 38ХН3МФА; ■ – Xardox 450; ♦ – Armoх 500Т; ▲ – сталь 71; ● – Miilux 500; ■ – 25Х1МФ.

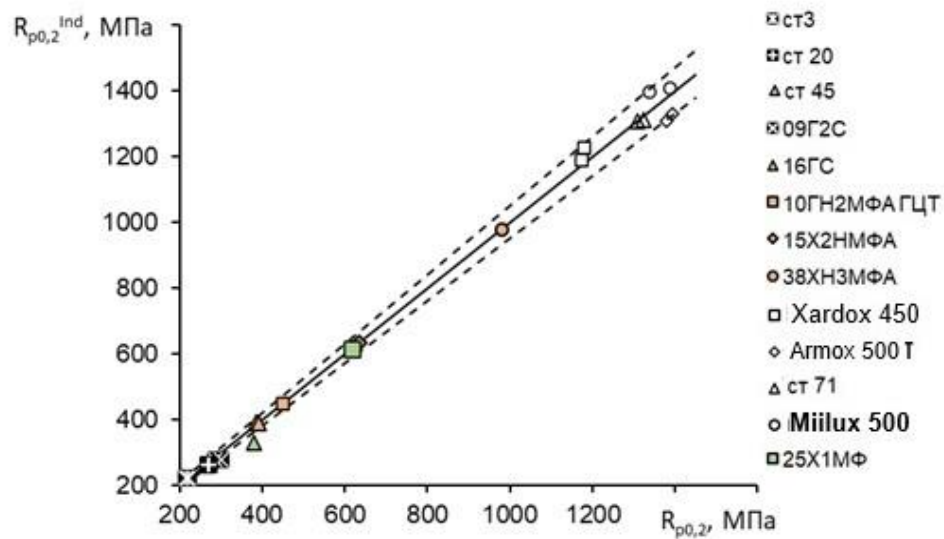


Рис. 2.13 – Залежності величин границі плинності $R_{p0,2}$, що отримані з випробувань на одновісний розтяг (вісь абсцис), від величин границі плинності визначених шляхом розрахунку за параметром пластичності при індентуванні $R_{p0,2}^{ind}$ (вісь ординат). Позначення: $\blacksquare$ – ст 3; $\blacksquare$ – ст 20; $\blacktriangle$ – ст 45; $\boxtimes$ – 09Г2С; $\triangle$ – 16ГС; $\blacksquare$ – 10ГН2МФА; $\blacklozenge$ – 15Х2НМФА; $\circ$ – 38ХН3МФА; $\square$ – Xardox 450; $\diamond$ – Armoх 500Т; $\triangle$ – сталь 71; $\circ$ – Miilux 500; $\blacksquare$ – 25Х1МФ.

На рис. 2.10 – 2.13 проведені штрих-пунктирні лінії показують границі 5% відхилень від значень R_m і $R_{p0,2}$ на розтяг.

Як видно з рис. 2.10 і 2.12 відхилення визначених характеристик міцності $R_{p0,2}^{HBW}$ і R_m^{HBW} високоміцних сталей, що визначені за результатами даних твердості HBW , в порівнянні з $R_{p0,2}$ і R_m отриманими на одновісний розтяг, не перевищували 10%. В той час відхилення характеристик $R_{p0,2}^{ind}$ і R_m^{ind} міцності, що отримані методом інструментованого індентування, від характеристик міцності, що отримані на розтяг, не були більшими від 5,2 %.

Таким чином, дана методика може успішно застосовуватись для експрес-контролю поточного стану матеріалу конструкцій спеціального призначення як на стадії вхідного контролю, так і в процесі експлуатації.

2.5 Висновки за розділом.

1. Модернізовано переносну установку РПТ-02М для визначення характеристик міцності елементів конструкцій в умовах експлуатації методом інструментованого індентування відповідно до вимог ISO 14577 [105]. Модернізація системи кріплень установки дала змогу проводити випробування не тільки на циліндричних, а й на плоских поверхнях, зокрема на листовому прокаті та елементах конструкцій із нього, що збільшило продуктивність випробувань та розширило область практичного застосування установки. Отримано позитивні результати щодо її використання при вхідній атестації листового прокату з високоміцних сталей марок Armoх 500Т та Hardox 450.

2. Удосконалено методику визначення параметра A , що дало змогу підвищити точність визначення характеристик міцності під час технічного діагностування та контролю властивостей металів і сплавів. В результаті проведеного аналізу параметра a , що описує зв'язок між максимальним навантаженням і залишковою глибиною індентування в циклічному режимі, обґрунтовано доцільність зміни його традиційної назви «параметр пропорційності пластичного індентування» на більш фізично коректну – «параметр локального опору пластичній деформації». Така інтерпретація точніше відображає фізичну сутність величини як кількісної характеристики опору матеріалу локалізованій пластичній деформації в зоні контакту з індентором.

3. Показано, що значення параметра a суттєво залежать від вибраного діапазону апроксимації діаграми індентування. Зі зміною меж апроксимації спостерігається немонотонна поведінка параметра: він зростає до певного максимуму, після чого зменшується, що дозволило виділити максимальне значення. Таке значення найбільш повно характеризує здатність матеріалу протистояти залишковій локальній деформації та є інформативним показником його міцності. Встановлено технологічні обмеження при

індентуванні високоміцних сталей ($\sigma_m > 1200$ МПа), що ускладнює достовірне визначення $\alpha_{\max}$ та обумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі вибору інденторів із вищою твердістю та зносостійкістю.

4. У вдосконаленій методиці реалізовано компроміс між точністю оцінки локального опору пластичній деформації та практичною реалізованістю вимірювань в умовах обмеженого навантаження на індентор. Це забезпечує визначення параметра $\alpha_{\max}$, який має кращу фізичну відповідність локальному опору матеріалу пластичній деформації та потенційно підвищує точність методу.

5. За результатами проведених досліджень було 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*) та врахувати сучасні вимоги українських нормативних документів. Апробація вдосконаленої методики показала, що відхилення результатів вимірювання твердості за нею від стандартних випробувань за Брінеллем [20] не перевищує 3,9%.

6. На основі аналізу сучасних нормативних документів, тенденцій розвитку підходів до визначення механічних характеристик високоміцних та броньованих сталей методом інструментованого індентування і проведених експериментальних досліджень створено стандарти Інституту СОУ 56-37-2021 [58] і СОУ 56-38-2021 [59], що регламентують застосування методу інструментованого індентування для експрес-контролю та вхідної атестації матеріалів спеціального призначення.

7. Розроблене устаткування та вдосконалена методика можуть бути використані у лабораторіях науково-дослідних і навчальних установ, центральних заводських лабораторіях та спеціалізованих підрозділах, що здійснюють моніторинг стану відповідального обладнання й оцінювання залишкового ресурсу як в лабораторних, так і польових умовах.

8. Проведені дослідження експериментально підтвердили ефективність розробленого обладнання і запропонованих методик, які забезпечують можливість швидкого отримання інформацію про стан матеріалу та оперативного коригування подальших дій при технічному контролі.

РОЗДІЛ 3. УРАХУВАННЯ АНІЗОТРОПІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОВЕРХНЕВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПРИ ОЦІНЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

3.1 Визначення механічних характеристик умовно ізотропних конструкційних сталей за результатами інструментованого індентування

Ізотропні матеріали характеризуються однаковими фізико-механічними властивостями у всіх напрямках. У контексті визначення механічних характеристик за допомогою методів інструментованого індентування або випробувань на розтяг, матеріал вважається ізотропним, якщо розбіжності між відповідними параметрами (твердість, границя плинності, границя міцності) у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (X , Y , Z) не перевищують границь допустимої похибки випробувального методу. У даному дослідженні така межа була обмежена значенням $\pm 5\%$, що узгоджується з типовими метрологічними допусками методів неруйнівного та квазіруйнівного контролю відповідно до ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20], ISO 14577-1:2015 [105], ASTM E 2546-15 [81].

Ізотропність матеріалу має принципове значення при використанні емпіричних або напівемпіричних кореляцій для визначення механічних характеристик за методами твердості або інструментованого індентування, оскільки такі залежності, як правило, встановлюються для одного напрямку навантаження. У випадку ізотропного матеріалу правомірним є застосування цих моделей у будь-якому напрямку, що значно розширює діапазон використання методів індентування для діагностики властивостей матеріалів у реальних умовах експлуатації.

У рамках даного дослідження проведено експериментальний аналіз ізотропності механічних властивостей конструкційних матеріалів на

прикладі конструкційних вуглецевих сталей марок Ст 3, сталі 20 і сталі 45. Для кожної марки сталі виконано повноцінний цикл випробувань:

- випробування на розтяг зразків, вирізаних у трьох головних напрямках прокату (X , Y , Z);
- інструментоване індентування в тих самих напрямках;
- розрахунок механічних характеристик за результатами індентування на основі апробованих кореляційних залежностей, описаних в розділі 2.

Порівняння результатів представлених в табл. 3.1 показало, що відхилення параметрів границі плинності та границі міцності, визначених за індентуванням у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, не перевищували межі 5%, а отже, ці сталі можна вважати ізотропними з точки зору механічної поведінки при пружно пластичному деформуванні. Це дозволило застосувати однакові емпіричні моделі в усіх напрямках, що, у свою чергу, підтвердило достовірність підходу до визначення механічних характеристик за результатами індентування незалежно від орієнтації навантаження.

Наукове обґрунтування такого підходу ґрунтується на положеннях механіки суцільного середовища, згідно з якими для ізотропних матеріалів механічна відповідь не залежить від орієнтації системи координат. Це означає, що тензори напружень і деформацій, а також похідні від них характеристики, зокрема локальні параметри опору деформації, які визначаються методом індентування, залишаються інваріантними відносно напрямку навантаження. За умови мікроструктурної однорідності в зоні контакту індентора з матеріалом, результати індентування відображають істинні механічні властивості матеріалу, незалежно від орієнтації поверхні або напрямку прикладання навантаження.

Таблиця 3.1 – Механічні характеристики випробувань на одновісний розтяг і інструментоване індентування вуглецевих сталей ст 3, сталі 20 і сталі 45 в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (X, Y, Z)

Напрямок	Характеристики механічних властивостей			
	Одновісний розтяг		Індентування	
	Границя плинності $R_{0,2}$, МПа	Границі міцності R_m , МПа	Границя плинності $R_{0,2}$, МПа	Границі міцності R_m , МПа
<i>Сталь Ст 3</i>				
X	220,3	366,4	222,8	356,6
Y	216,2	365,3	221,1	362,8
Z	–	–	221,5	363,4
<i>Сталь 20</i>				
X	272,9	416,8	262,1	412,1
Y	268,7	415,4	261,3	408,3
Z	–	–	262,5	410,1
<i>Сталь 45</i>				
X	391,7	727,1	385,5	716,9
Y	387,7	722,1	391,2	719,9
Z	–	–	392,4	722,2

Таким чином, теоретично доказано і експериментально обґрунтовано, що для ізотропних сталей Ст 3, сталі 20 та сталі 45 результати індентування можуть бути надійно використані для визначення механічних характеристик у будь-якому напрямку, що підтверджує доцільність застосування методу індентування як ефективного засобу локальної діагностики матеріалів з однорідною ізотропною структурою.

3.2 Вплив анізотропії механічних характеристик на результати випробувань методом інструментованого індентування

Як було показано в попередньому пункті, що однією з ключових передумов застосування методу інструментованого індентування для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів є припущення про ізотропність матеріалу. У рамках цього припущення механічна відповідь у будь-якому напрямку навантаження повинна бути однаковою, що дозволяє використовувати стандартні кореляційні залежності між твердістю та характеристиками міцності. Проте в реальних умовах більшість промислових матеріалів, особливо деформовані, термічно оброблені або зварені, виявляють ту чи іншу ступінь анізотропії, яка може значною мірою впливати на результати випробувань.

Анізотропія механічних властивостей проявляється у відмінностях характеристик деформації та міцності залежно від напрямку навантаження. Причинами цього можуть бути макро- або мікротекстура, залишкові напруження, фазова неоднорідність, напрямна зерен або наявність технологічно зумовлених структурних зон. Така структурна анізотропія створює виклик для інтерпретації результатів локального навантаження, зокрема індентування, яке відбувається у мікроскопічному масштабі, але використовує емпіричні моделі, орієнтовані на макроскопічні ізотропні характеристики.

3.2.1 Виявлення анізотропії механічних характеристик на прикладі сталей 15X2НМФА та 08X18Н10Т

У процесі досліджень, виконаних в Інституті, було встановлено, що для окремих конструкційних сталей спостерігається значна невідповідність між значеннями механічних характеристик, визначених за результатами випробувань методом інструментованого індентування та значеннями,

отриманими традиційними методами, зокрема випробуваннями на розтяг. У ряді випадків відхилення перевищує 10 %, що значно перевищує допустимі межі похибки для інженерних розрахунків.

Для встановлення причин таких розбіжностей було проведено спеціальний експериментальний цикл експериментальних досліджень на прикладі темплету розміром $300 \times 150 \times 2000$ мм із теплостійкої сталі 15X2НМФА і фрагментів трубопроводів Ду 159 та Ду 325 із нержавіючої сталі 08X18Н10Т. Основною метою було оцінити вплив анізотропії механічних характеристик на результати випробувань методом інструментованого індентування та визначити ступінь її впливу на точність кореляцій між твердістю та границями міцності/плинності.

Із темплету сталі 15X2НМФА були вирізані зразки в трьох ортогональних напрямках (рис. 3.1):

OX – в напрямку прокатки;

OY – в напрямку поперечному прокатці;

OZ – в напрямку товщини.

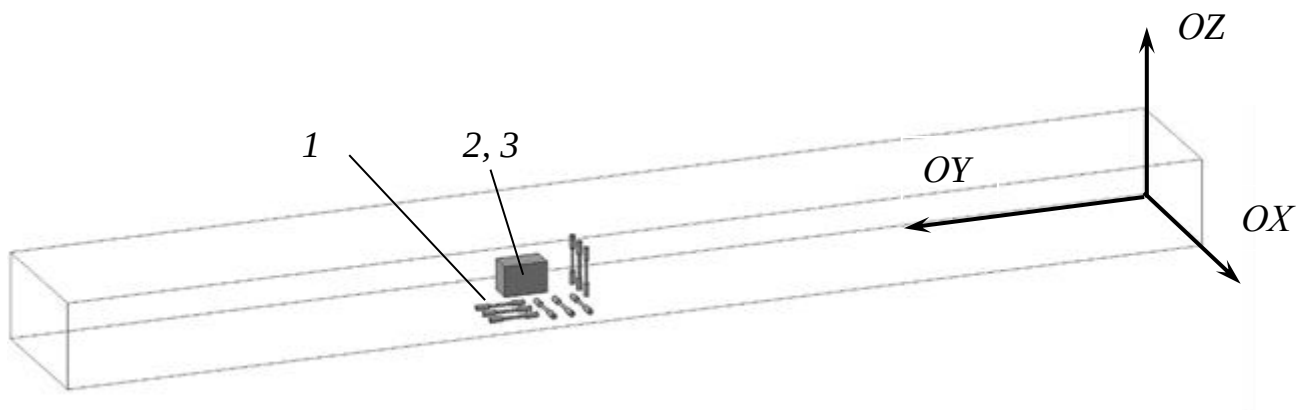


Рис. 3.1 – Схема вирізки заготовок і зразків для випробувань з сталі 15X2НМФА: 1 – одновісний розтяг, 2 – вимірювання твердості та індентування, 3 – металографічні дослідження.

З кожної орієнтації були виготовлені зразки для: випробувань на розтяг (стандартні зразки з пропорційною частиною) і прямокутні зразки для проведення випробувань на твердість та індентування.

Різними методами, а саме: випробуваннями на одновісний розтяг, вимірюванням твердості за Брінеллем і методом інструментованого індентування у трьох ортогональних напрямках проведено комплексні дослідження механічних характеристик теплостійкої конструкційної сталі 15X2НМФА.

Випробування на одновісний розтяг проводились згідно ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24] на сервогідравлічній машині Instron 8802 за кімнатної температури з використанням пропорційних циліндричних зразків. Вимірювання деформації зразків проводилось шляхом автоматичної реєстрації деформації за допомогою встановленого на зразку тензорезисторного перетворювача. Характеристики міцності за даними випробувань визначались згідно [24].

Зразки для випробувань методами твердості за Брінеллем і інструментованого індентування також виготовляли у трьох ортогональних напрямках із того ж металу. Випробування на твердість проводили на стаціонарному твердомірі ТШ-2 кулькою 2,5 мм за стандартом ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20]. Інструментоване індентування проводилось згідно ISO 14577-1:2015 [105] в циклічному режимі навантаження кулькою діаметром 2,5 мм на лабораторній установці UTM-20НТ [126].

Металографічні дослідження проводили на оптичному інвертованому мікроскопі «AXIOVERT 40 MAT» з програмним забезпеченням ZEN core v. 3.1 з фіксацією мікроструктур цифровою фотокамерою AXIOSAM 305 при збільшеннях в діапазоні 50...500. Мікрошліфи для металографічних досліджень виготовлялись на установці Alpha & Beta (виробник ТМ BUEHLER) за стандартною методикою з подальшим виявленням макро- та мікроструктури методом хімічного травлення в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Вирізку зразків для металографічних досліджень проводили в трьох взаємно перпендикулярних площинах – XOY , YOZ та XOZ (див. рис. 3.1).

В табл. 3.2 наведені характеристики міцності, що були визначені з випробувань на одновісний розтяг і результати вимірювання твердості за методом Брінелля *HBW*, сталі 15X2НМФА в трьох ортогональних напрямках. Значення механічних характеристик, що внесені в таблицю, отримані шляхом осереднення результатів: не менше трьох для випробувань на розтяг і десяти вимірювань твердості у всіх напрямках.

З табл. 3.2 видно, що теплостійка сталь 15X2НМФА за величинами твердості у трьох ортогональних напрямках ізотропна. Відхилення результатів вимірювання твердості у трьох ортогональних напрямках не перевищує 0,5%. В той же час вона проявляє анізотропію за характеристиками міцності визначеними за результатами випробувань на одновісний розтяг. Відхилення значень $R_{p0.2}$ і R_m , визначених при одновісному розтягу в напрямку осі *OX* порівняно з напрямком *OY* складають 16,7 і 7,2% відповідно, а відхилення значень в напрямку осі *OX* від значень в напрямку *OZ* – 11,6 і 5,4% відповідно.

Таблиця 3.2 – Характеристики міцності, що отримані з випробувань на розтяг і твердості за Брінеллем *HBW*, теплостійкої конструкційної сталі 15X2НМФА визначених в трьох взаємно ортогональних напрямках

Напрямки визначення механічних характеристик	Твердість за Брінеллем <i>HBW</i> , МПа	Одновісний розтяг	
		Границя плинності $R_{p0.2}$, МПа	Границя міцності R_m , МПа
Напрямок <i>OX</i>	189	462	716
Напрямок <i>OY</i>	190	396	668
Напрямок <i>OZ</i>	189	414	679

Досліджувана сталь 15Х2НМФА характеризується різномасштабною неоднорідністю. На шліфах після травлення в ортогональних перерізах виявляється різна макроструктурна неоднорідність (рис. 3.2,а). Так, в напрямку $\vec{y}$, відповідно в перерізах (YOZ) та (YOX), при невеликих збільшеннях спостерігається характерна неоднорідна волокнистість, що формується в напрямку течії металу при гарячій термомеханічній обробці (ковці) литої заготовки (рис. 3.2,а). Волокниста будова металу характеризується ліквацийною неоднорідністю, яка проявляється навіть в межах одного перерізу (рис. 3.2,б).

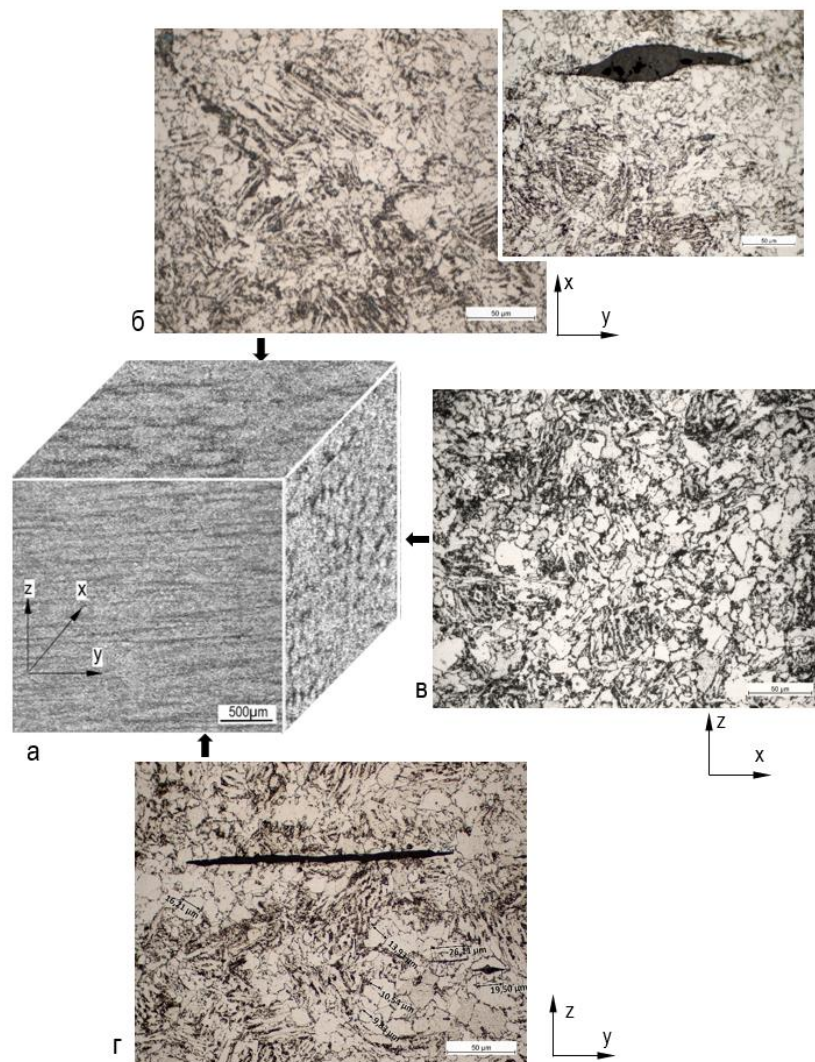


Рис. 3.2 – Мікроструктура сталі 15Х2НМФА в трьох взаємно ортогональних перерізах при різних збільшеннях.

На мікрорівні сталь представляє феритно-бейнітну мікроструктуру з дрібнодисперсними карбідами та поодинокими (видовженими в напрямку $\vec{Y}$) включеннями сульфідів марганцю (рис. 3.2,(б-г)).

Хоча на мікрорівні сталь в досліджуваних перерізах представляє феритно-бейнітну мікроструктуру, групи феритних і бейнітних зерен перемежуються в різних співвідношеннях в залежності від зони вирізки зразків. Тобто, на мікрорівні структура також неоднорідна.

Таким чином, волокниста структура обумовлює виражену анізотропію властивостей в різних перерізах заготовки, а неоднорідна мікроструктура – розкид властивостей в різних зонах вирізки зразків. За структурними показниками (найкращі механічні властивості) більш високі значення міцності отримані при випробовуваннях вповдовж осі $\vec{Y}$.

Експериментально були отримані характеристики міцності теплостійкої сталі за результатами даних твердості *HBW* з табл. 3.2 за кореляційними залежностями [95] та за 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. 3.3).

Як видно з табл. 3.3 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%. Очевидно, що таке відхилення можна пояснити ступенем анізотропії механічних властивостей досліджуваного матеріалу.

За результатами випробувань на твердість за Брінеллем в трьох взаємно ортогональних напрямках матеріал ізотропний. Результати випробувань на розтяг показують протилежне – матеріал анізотропний. Тому при встановленні кореляційних залежностей між твердістю і характеристиками міцності слід враховувати анізотропію границь плинності і міцності в трьох взаємно ортогональних напрямках.

Таблиця 3.3 – Характеристики міцності, що отримані з даних твердості *HBW* і за методом інструментованого індентування, теплостійкої конструкційної сталі 15Х2НМФА, 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 15Х2НМФА у порівнянні з $R_{p0,2}$ і R_m отриманими на одновісний розтяг.

Відхилення результатів, отриманих методами неруйнівного контролю (*HBW* та інструментованого індентування), від показників одновісного розтягу залежить від орієнтації зразків і для досліджуваної сталі 15Х2НМФА становить від 0,2% до 21,4%. 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. Таким чином, було підтверджено, що індентування «середньоінтегрує» локальні властивості матеріалу в межах мікрооб'єму і є чутливим до анізотропії, а також до місця вирізки зразків.

Дослідження проводилися також на фрагментах трубопроводів Ду 159 та Ду 325, виготовлених зі сталі 08Х18Н10Т. Для зразків із труб проводили:

- розтяг в поздовжньому та тангенціальному напрямках;
- індентування на зовнішній та внутрішній поверхні труби;
- індентування з боку торця (радіальний напрямок);
- індентування (тангенціальний напрямок).

Зразки на розтяг, для індентування і вимірювання твердості виготовлялись у трьох ортогональних напрямках. Схема вирізки заготовок для зразків із темплетів представлена на рис. 3.3.

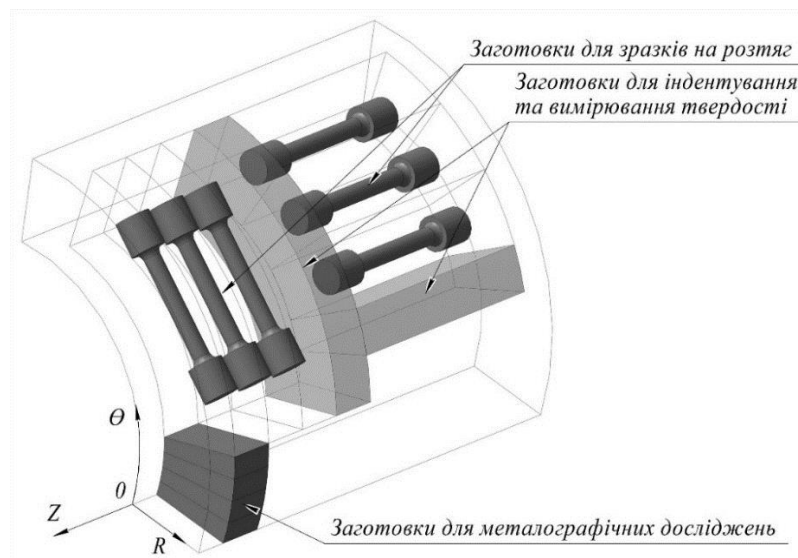


Рис. 3.3 – Схема вирізки темплетів та заготовок для зразків: Z , Θ , R – поздовжній, тангенціальний і радіальний напрямки відповідно.

Випробування проводили за методиками, що описані вище для сталі 15X2НМФА.

Результати випробувань представлені в табл. 3.4 і 3.5.

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.

Таблиця 3.4 – Характеристики міцності, що отримані за результатами випробувань на розтяг і методом інструментованого індентування зразків виготовлених з фрагментів трубопроводів Ду 159 зі сталі 08X18N10T визначених в трьох взаємно 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

Таблиця 3.5 – Характеристики міцності, що отримані за результатами випробувань на розтяг і методом інструментованого індентування зразків виготовлених з фрагментів трубопроводів Ду 325 зі сталі 08X18N10T визначених в трьох взаємно 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

Крім того, індентування дозволяє отримати унікальну інформацію про механічні властивості в напрямках, які неможливо дослідити традиційними

методами без руйнування – зокрема, в радіальному напрямку на внутрішній та зовнішній поверхнях труб.

На основі експериментальних досліджень сталей 15X2НМФА та 08X18Н10Т встановлено, що розбіжності між механічними характеристиками, визначеними методом інструментованого індентування та традиційними випробуваннями на розтяг, можуть досягати понад 10 %, що зумовлено анізотропією властивостей матеріалу. Зменшення похибки при випробуваннях у трьох взаємно перпендикулярних напрямках в одному локальному об'ємі підтверджує, що метод індентування чутливий до просторової неоднорідності структури та текстури. Отримані результати свідчать про необхідність врахування анізотропії при інтерпретації результатів індентування, а також демонструють потенціал методу для неруйнівного виявлення напрямкової залежності механічних властивостей у складних об'єктах, таких як елементи трубопроводів.

3.2.2 Оцінка коректності застосування кореляцій між твердістю та міцністю для анізотропних сталей

Застосування методу інструментованого індентування для оцінки характеристик міцності конструкційних сталей базується на емпіричних або напівемпіричних кореляціях між твердістю (HBW , HV) та границями міцності/плинності (R_m , $R_{p0.2}$). У випадку ізотропних матеріалів ці залежності забезпечують прийнятну точність (похибка $\leq 5-7\%$), проте для анізотропних сталей така точність не гарантується.

У процесі досліджень сталей 15X2НМФА і 08X18Н10Т виявлено, що використання стандартних кореляцій [152] для напрямків, відмінних від базового (переважно поздовжнього), призводить до систематичних відхилень результатів. Зокрема, для сталі 15X2НМФА у поперечному напрямку (OX)

різниця між R_m , визначеною за розтягом і за індентуванням, перевищувала 64 МПа, що відповідає похибці понад 8,9 %.

Аналіз показав, що хоча значення твердості у межах однієї орієнтації змінювалася незначно (до 0,5 %), механічні характеристики при одноосьовому розтягу демонстрували значні відмінності (5,4–7,1 %), що порушує фундаментальне припущення кореляцій: однакова твердість відповідає однаковій міцності. Це дозволяє стверджувати, що анізотропія структури матеріалу (текстура, мікросегрегація, напрямки ковзання) змінює механізм деформації, не будучи належним чином відображеною у показниках твердості.

Крім того, на прикладі зразків з труб зі сталі 08X18H10T встановлено, що індентування в радіальному напрямку, який недоступний для традиційних випробувань на розтяг, демонструє знижені значення R_m порівняно з тангенціальним або поздовжнім напрямками. Така інформація є критично важливою при оцінці ресурсу трубопроводів, де навантаження переважно діє у тангенціальному напрямку, а потенційно слабкі місця можуть бути орієнтовані радіально.

3.2.3 Розробка рекомендацій щодо виявлення анізотропії і неруйнівного контролю такого стану конструкційних матеріалів за результатами індентування

З огляду на результати експериментальних досліджень сталей 15X2НМФА і 08X18H10T, у яких спостерігалися значні відмінності у величинах твердості та похідних механічних характеристик (границь плинності і міцності) залежно від напрямку індентування, сформульовано ряд рекомендацій для забезпечення достовірного контролю стану матеріалу з урахуванням анізотропії.

Деякі рекомендації з виявлення анізотропії:

– для виявлення анізотропії необхідно проводити серію випробувань у принаймні в трьох взаємно ортогональних напрямках (наприклад, поздовжньому, поперечному або радіальному для прокату і труб відповідно). Виявлені систематичні відмінності в значеннях механічних характеристик (більше ніж 5%) свідчать про наявність анізотропії;

– побудова характеру зміни величин твердості або характеристик міцності по товщині зразка або труби дозволяють виявити градієнти властивостей, що супроводжують анізотропну поведінку матеріалу;

– застосування локального усереднення і статистичного аналізу результатів індентування в межах однорідної мікроструктурної області дасть змогу мінімізувати вплив випадкових мікронеоднорідностей і виявити закономірну орієнтаційну залежність характеристик.

Рекомендації за урахування впливу анізотропії при здійсненні контролю характеристик міцності конструкційних сталей:

– вибір напрямку індентування: якщо відомо, що матеріал має виражену текстурну анізотропію (наприклад, після прокатки або кування), контроль слід проводити в напрямку, що відповідає найбільш навантаженому у реальних умовах експлуатації (наприклад, для труб — у тангенціальному напрямку).

– уточнення кореляційних залежностей між індентуванням та розтягом: за наявності підтвердженої анізотропії, використання універсальних кореляцій типу $\sigma_m = f(HV)$ є некоректним. Необхідно або вводити поправочні коефіцієнти для кожного орієнтаційного напрямку, або застосовувати емпіричні залежності, побудовані для даного типу матеріалу з урахуванням орієнтації;

– мінімізація похибки оцінки: при практичному використанні методу індентування для оцінки залишкового ресурсу або діагностування – варто використовувати найменше значення отриманих характеристик у різних напрямках як консервативну оцінку, особливо для відповідальних елементів;

– документування напрямку індентування: протоколи випробувань повинні обов'язково містити інформацію про просторову орієнтацію прикладання навантаження (відносно виробу), що дозволяє згодом зіставити результати з іншими методами контролю або результатами випробувань.

– використання локальних карт механічних характеристик, побудованих на основі даних індентування в різних напрямках, дозволяє враховувати вплив анізотропії під час прогнозування поведінки матеріалу в умовах складного напруженого стану.

Таким чином, метод інструментованого індентування, як показали дослідження, має високу чутливість до анізотропії механічних характеристик конструкційних сталей, що може викликати значні відмінності у результатах залежно від напрямку індентування. Для забезпечення достовірності неруйнівного контролю слід не лише виявляти анізотропію через орієнтовані індентування, але й враховувати її вплив під час розрахунку механічних характеристик. Це дозволить зменшити похибку оцінки поточного стану металу і контролювати відповідальні вироби з напрацюваннями, що мають складну історією навантажень і неоднорідну структуру.

3.3 Визначення механічних характеристик високоміцних сталей з поверхневим знеуглецьованим шаром

3.3.1 Проблеми точності вимірювання твердості за методом Брінелля для високоміцних сталей та шляхи їх усунення

Процес гарячої прокатки проходить при високих температурах. Таке нагрівання металу призводить до утворення поверхневого знеуглецьованого шару металу на поверхнях прокату. Знеуглецьований шар має різні розміри по товщині і не дозволяє достовірно визначати твердість на фасадних поверхнях листів.

В основу методу [34, 57] поставлена задача створення такого способу визначення твердості товстолистових високоміцних сталей, який би був більш достовірним за рахунок попереднього видалення з ділянки досліджень фасадної поверхні листа знеуглецьованого шару металу.

Метод включає операції підготовки поверхні листового матеріалу до вимірів, вдавлювання індентора у поверхню металу і вимірювання розмірів відбитку, який залишають на поверхні, за якими судять про твердість сталі за Брінеллем [20]. Під час підготовки товстолистової високоміцної сталі до вимірів твердості виконують пошарове видалення знеуглецьованого шару металу на ділянках проведення вимірювання твердості товщиною 30–50 мкм шляхом чистового шліфування, або травлення поверхні листа. Після зняття кожного шару проводять вимірювання твердості, при цьому видалення шарів металу ведуть до моменту, при якому після зняття чергового шару металу значення твердості не змінюють порівняно з попереднім і яке приймають за значення твердості основного металу.

Товщину знеуглецьованого шару, знання якого потребує виробнича технологія виготовлення деталей з таких сталей, визначають за сумою товщин видалених шарів металу до досягнення поверхні основного металу.

При виборі місця вдавлювання індентора потрібно уникати повторного утворення відбитку. Відстань від центру відбитка до краю зразка має бути не менше 3-х середніх діаметрів відбитка. Відстань від центрів двох сусідніх відбитків має бути не менше 5-ти середніх діаметрів відбитка. При вимірюванні твердості кульками різних діаметрів відстань між центрами двох сусідніх відбитків розраховується за більшим діаметром.

Роботу методики продемонстровано на прикладі вимірювання твердості листової броньованої сталі Hardox 450.

З досліджуваного листа металу високоміцної низьколегованої сталі Hardox 450, що поставляється у вигляді листового прокату, твердістю 432 HBW виготовляли зразки розмірами 200×200×10,5 мм. Зразки вирізали з листа у двох взаємно перпендикулярних напрямках по відношенню до осі

прокатки, щоб один торець пластини був розташований по осі прокату, а другий – поперек. Перед вимірюванням твердості поверхні торців пластин зачищали у відповідності до вимог стандарту на вимірювання твердості.

Випробування товстолистової високоміцної сталі Hardox 450 проводились шляхом пошарового видалення знеуглецьованого шару шляхом травлення поверхні зразка за допомогою спеціально підібраних хімічних реагентів, та виконання вимірювань твердості з двох сторін листового прокату [116, 117].

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 з навантаженням 187,5 кгс і кульки з карбіду вольфраму діаметром 2,5 мм, а також навантаженням 3000 кгс та кульки з карбіду вольфраму діаметром 10 мм і для порівняння – портативним твердоміром Ernst Computest SC [53] з конусним індентором.

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. 3.4 показано розподіл твердості при пошаровому знятті металу з листа сталі Hardox 450.

З рис. 3.4 видно, що у товстолистових високоміцних сталей, які випробовували на твердість, знеуглецьований шар має товщину близько 240–250 мкм, який суттєво занижує реальні значення твердості. При видаленні цього шару забезпечується можливість вимірювання твердості основного металу, про що свідчить незмінність значень твердості при подальшому знятті шарів металу.

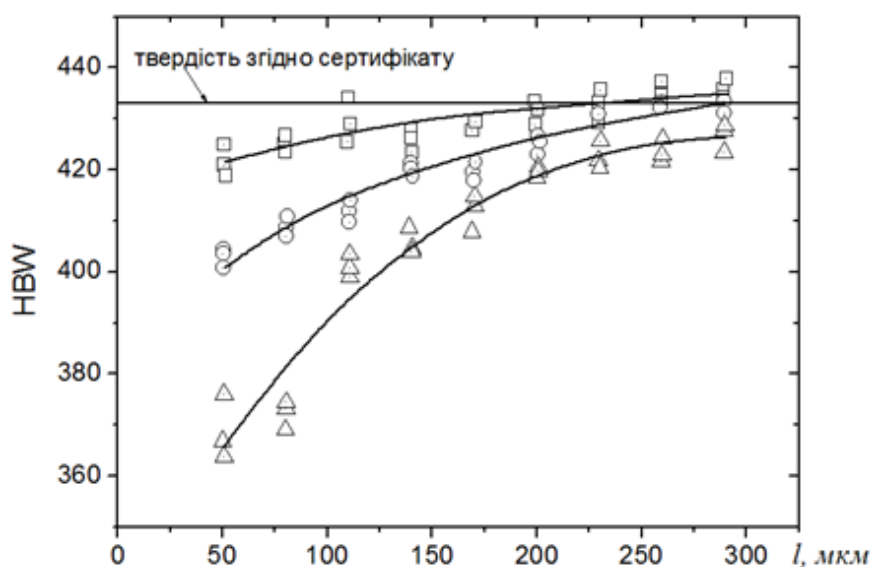


Рис. 3.4 – Зміна значень твердості при пошаровому знятті металу сталі Hardox 450. □ – ТШ-2, $P = 29,42$ кН, $d = 10$ мм; ○ – ТШ-2, $P = 1,839$ кН, $d = 2,5$ мм; Δ – Ernst Computest SC..

Отже, за результатами експериментів із вимірюванням характеристик твердості з метою більш достовірного контролю поточного стану високоміцних сталей необхідно перед випробуванням на твердість за методом Брінелля *HBW* зняти знеуглецьований шар металу, величина якого залежить від товщини листа і марки сталі.

Слід зауважити, що шліфування фасадних поверхонь листів для отримання чистоти поверхні може привести до появи залишкових напружень, які можуть спотворювати значення твердості. Вплив напруженості матеріалу на значення твердості встановлено експериментально [45].

Щодо чистоти поверхні основного металу тобто без знеуглецьованого шару, то насамперед необхідно визначити достатній для отримання коректних значень твердості рівень чистоти поверхні. З цією метою проводились випробування високоміцних сталей на твердість за методом Брінелля на металі без знеуглецьованого шару. Твердість вимірювали на зразках після чистового шліфування до 10 класу шорсткості ($R_z = 0,4 \div 0,8$

мкм) в порівнянні з полірованою поверхнею – 14 клас шорсткості ($R_z = 0,05 \div 0,025$ мкм). Результати випробування наведені в табл. 3.6.

При підготовці поверхні виробу шліфуванням для вимірювання необхідно вжити заходи проти можливої зміни значень твердості в наслідок нагрівання, місцевого припікання, або місцевого загартування поверхні, що не завжди можливо виконати в повній мірі.

При проведенні випробування за рекомендацією стандарту в якості індентора для листових матеріалів застосовувалася кулька діаметром 2,5 мм та 10 мм і навантаження 1,839 кН та 29,42 кН відповідно.

Розбіжність в значеннях твердості при зміні чистоти поверхні від 10 класу шорсткості до 14 для досліджуваних сталей склала 1–2%, що можна вважати в межах похибки.

Таблиця 3.6 – Вплив підготовки поверхні та навантаження на індентор при вимірах твердості високоміцних матеріалів твердоміром ТШ-2

Матеріал і вид обробки поверхні		Твердість матеріалів за Брінелем, HBW	
		Навантаження 1,839 кН Кулька Ø2,5 мм	Навантаження 29,42 кН Кулька Ø10 мм
Армох 500Т	Чистове шліфування	494	501
	Полірування	502	510
Hardox 450	Чистове шліфування	421	427
	Полірування	427	431

Встановлено, що при зменшенні діаметра кульки і навантаження на індентор потрібно збільшувати чистоту поверхні, де здійснюються вимірювання твердості. Це можна пояснити тим, що при збільшенні навантаження та діаметра кульки властивості матеріалу відображають більш інтегральну картину в цілому і тому вимоги до підготовки поверхні значно

слабші. Слід зауважити, що чистота поверхні повинна відповідати вимогам, що приведені в інструкції по експлуатації вимірювального приладу.

При використуванні кульок малого діаметра і застосуванні малих навантажень у відповідності з методом Брінелля під індентором деформується невеликий об'єм матеріалу, що в цілому не відображає інтегральну картину матеріалу і відповідно занижує вимірювані числа твердості.

З огляду на важливість робіт, що стосуються підвищення точності визначення твердості матеріалів потрібно правильно вибрати діаметр кульки індентора та навантаження на нього. Автори провели дослідження по впливу вибору рівня навантаження та розміру індентора для визначення твердості високоміцних сталей за методом Брінелля. Дослідження були проведені на зразковій мірі твердості на стаціонарному твердоміру типу ТШ-2 (рис. 3.5). Відстань між центрами двох сусідніх відбитків становила за розміром до трьох діаметрів відновленого відбитку, що необхідно для забезпечення достовірності отримуваних експериментальних даних.

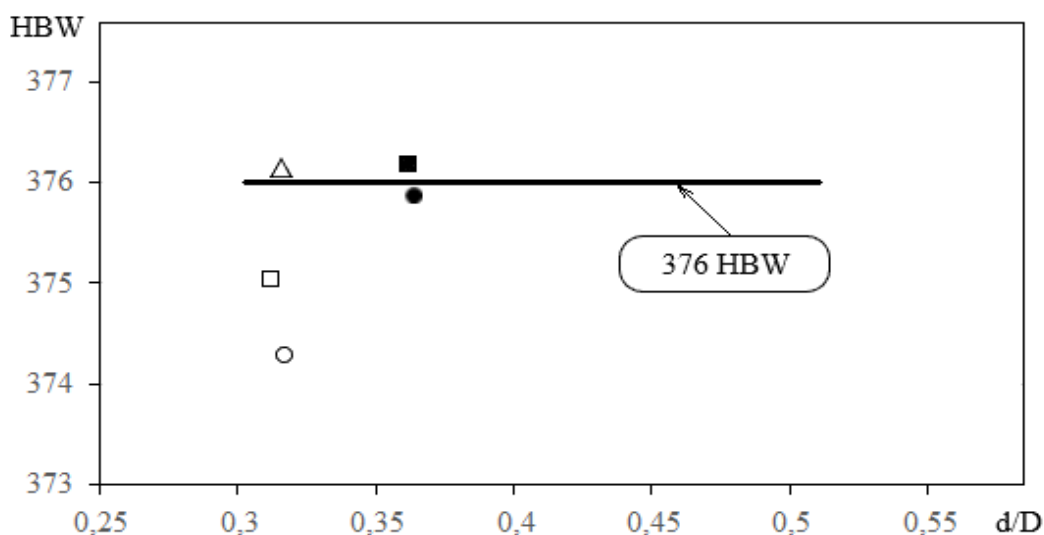


Рис. 3.5 – Дослідження співвідношення d/D на еталонній плитці з твердістю 376 HBW. □ - $D = 2,5$ мм, $P = 1,839$ кН; ■ - $D = 2,5$ мм, $P = 2,452$ кН; ○ - $D = 5$ мм, $P = 7,355$ кН; ● - $D = 5$ мм, $P = 9,807$ кН; Δ - $D = 10$ мм, $P = 29,42$ кН.

З рис. 3.5 видно, що за збільшення навантаження на кульку величини твердості найближче знаходяться до еталонної міри твердості при цьому співвідношення діаметра відбитка до діаметра кульки d/D знаходиться в межах від 0,3 до 0,4. В свою чергу ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20] передбачає для всіх металевих матеріалів співвідношення діаметрів в межах від 0,26 до 0,6, при якому випробування вважається коректним. Тобто, чим твердіше матеріал, тим співвідношення знаходиться до нижчої межі, що спричиняє спотворення достовірних значень твердості.

Для того, щоб підвищити точність визначення твердості високоміцних матеріалів потрібно збільшувати навантаження на індентор, проте ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20] передбачає максимальне навантаження 29,42 кН при застосуванні кульки Ø 10 мм, що є проблемою на сьогоднішній день. Про це свідчать результати досліджень, що наведені в табл. 3.7 де показана недостатність рівнів навантаження на індентор, які рекомендовані в ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20], при вимірюваннях твердості високоміцних сталей, таких як Armoх 500T і Hardox 450. Очевидно, що при вимірюванні твердості сталей твердістю більш ніж 600 *HBW*, відбуватиметься заниження реальних значень твердості внаслідок недостатнього прикладеного зусилля.

Таблиця 3.7 – Співвідношення діаметра відбитку до діаметра кульки досліджуваних матеріалів

Armoх A500			Hardox 450		
Ø 2,5 мм P=187,5 кгс	Ø 2,5 мм P=250 кгс	Ø 10 мм P=3000 кгс	Ø 2,5 мм P=187,5 кгс	Ø 2,5 мм P=250 кгс	Ø 10 мм P=3000 кгс
0,268 – 0,276	0,311 – 0,318	0,268- 0,275	0,292 – 0,297	0,341 – 0,349	0,291 – 0,297

Фізичний сенс співвідношення навантажень при випробуванні на твердість також поки ще не повністю з'ясований, тому відсутня точна

методика перерахунку параметрів твердості, визначених методом Брінелля з іншими методами. Однак, в цьому випадку на практиці для порівняння значень, отриманих при використанні різних способів визначення твердості, існують шкали перерахунку, складені за емпіричними даними.

Отримані значення твердості є лише наближеними і можуть бути неточними для конкретних випадків. Тобто таке порівняння чисел твердості, отриманих різними методами, має різну розмірність, позбавлене будь-якого фізичного сенсу, але є цілком практичним. Тому подібні перетворення можна використовувати лише в тих випадках, якщо неможливо випробувати матеріал у заданих умовах.

Обговорюючи причини розкиду результатів випробувань, різними дослідниками високоміцних сталей на твердість за методом Брінелля, слід привести причини невизначеності результатів вимірювань, які приводяться в ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 [20] – невизначеність результатів вимірювань є сукупністю невизначеностей ряду джерел.

У зв'язку з тим, що не завжди можна кількісно визначити внесок всіх наведених вище значень у невизначеність, то в цьому випадку оцінку стандартної невизначеності можливо отримати за допомогою статистичного аналізу результатів випробування за структурними параметрами, які визначаються за розсіюванням характеристик твердості за методом LM-твердості [39]. Це дозволяє провести оцінку стану структури кожного шару металу, що знімається тобто за ступенем їх пошкоджуваності і одночасно уточнити величину знеуглецьованого шару за станом структури. Великим значенням коефіцієнта гомогенності m відповідає низький рівень розсіювання характеристик твердості i , відповідно, краще організація структури, тобто низький ступінь пошкодження.

На рис. 3.6 наведені результати визначення стану структури за методом LM-твердості, де видно, що найбільш пошкоджену структуру в оцінці коефіцієнтом гомогенності m мають верхні шари знеуглецьованого шару, товщина якого для досліджуваної сталі становить 300 мкм.

Не менше важливим для визначення достовірних значень твердості є правильний вибір матеріалу кульки індентора. В країнах, які в свій час були в СРСР, при вимірюванні твердості за методом Брінелля найбільш поширеними являються твердоміри типу ТШ-2 і ТШ-2М із електричним приводом важільного механізму навантаження. В основному такі прилади комплектувалися сталевими кульками різного діаметру. Із введенням в Україні гармонізованого стандарту ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20], використання цих кульок було відмінено, оскільки стандарт передбачає використання лише кульки із карбіду вольфраму. Проте ряд дослідників продовжує вимірювати твердість високоміцних сталей сталевую кулькою. В результаті отримують занижені величини твердості, через пластичне деформування кульки, при цьому видаючи протоколи із невідповідністю продукції сертифікату.

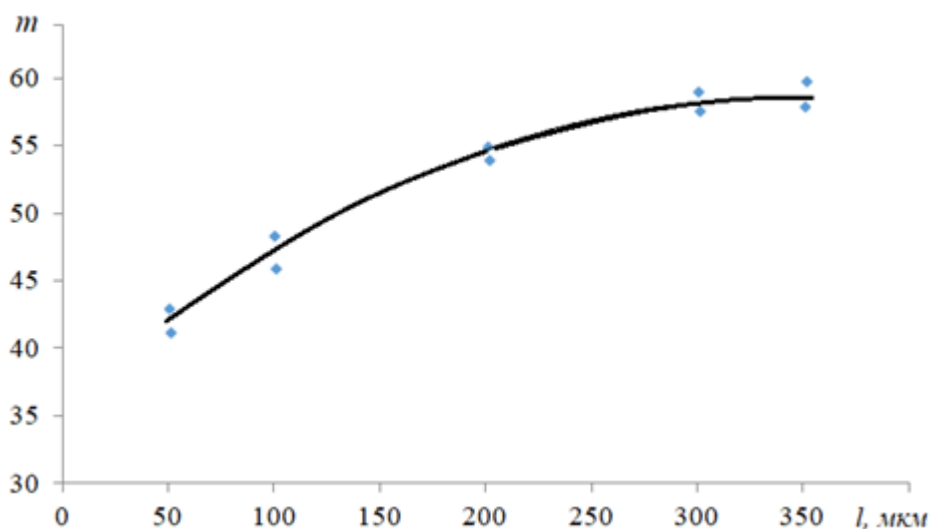


Рис. 3.6 – Зміна значень коефіцієнтів гомогенності сталі Hardox 450 при пошаровому знятті металу.

Проблематичним при вимірюванні твердості є використання портативних приладів без належного обґрунтування, а тільки із посиланням на ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20]. На сьогоднішній день ринок України насичений великою кількістю різноманітних приладів вимірювання

твердості, які слід розділяти за принципом роботи на прилади прямого вимірювання твердості за діаметром відбитку – стаціонарні та переносні статичної дії та непрямого вимірювання твердості – портативні, згідно з яким значення твердості визначають за кореляційними залежностями між традиційною твердістю і певним параметром використовуваного в приладі методу.

Державний стандарт ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20] передбачає вимірювання твердості за методом Брінелля і поширюється лише на стаціонарні та переносні прилади статичної дії. Нажаль в Україні на сьогоднішній час не існує стандартів таких як ASTM A956-02 [78], ISO 14577-1:2015 [105], за допомогою яких можна було б протарувати портативні прилади, що засновані на інших принципах роботи (динамічні, ультразвукові, імпедансного типу та ін.). Портативні прилади мають ряд незаперечних переваг таких як портативність, продуктивність, універсальність, і перш за все, можливість проводити контроль твердості в польових умовах у важкодоступних місцях, де використовувати стаціонарні та переносні твердоміри не представляється можливим. Дослідження виконані в рамках цієї роботи, показали, що при вимірюванні твердості еталонних мір портативними приладами супроводжувалося різким зменшенням відтворюваності та підвищенням похибки вимірювання твердості (рис. 3.7).

Максимальну похибку отримано при використанні портативних твердомірів динамічного типу. Найбільш стабільніші результати отримані на стаціонарному твердомірі ТШ-2 – похибка приладу не перевищувала 1%, а максимальне значення відтворюваності результатів вимірювань сягало 1,3%, що знаходилось в межах вимог цього стандарту ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 [20]. Так, говорячи про необхідність забезпечення при випробуваннях закону подібності [9], слід мати на увазі, що причиною його порушення навіть в разі геометрично подібних полів напружень, може бути пов'язаність зі змінами відбитків, а також відсутності схожості геометрії об'ємів, які деформуються, і режиму контактного тертя при переході від одного виду взаємодії

контактуючих тіл до іншого. Можливість виникнення такої ситуації звертав увагу ще М. М. Давиденков [17].

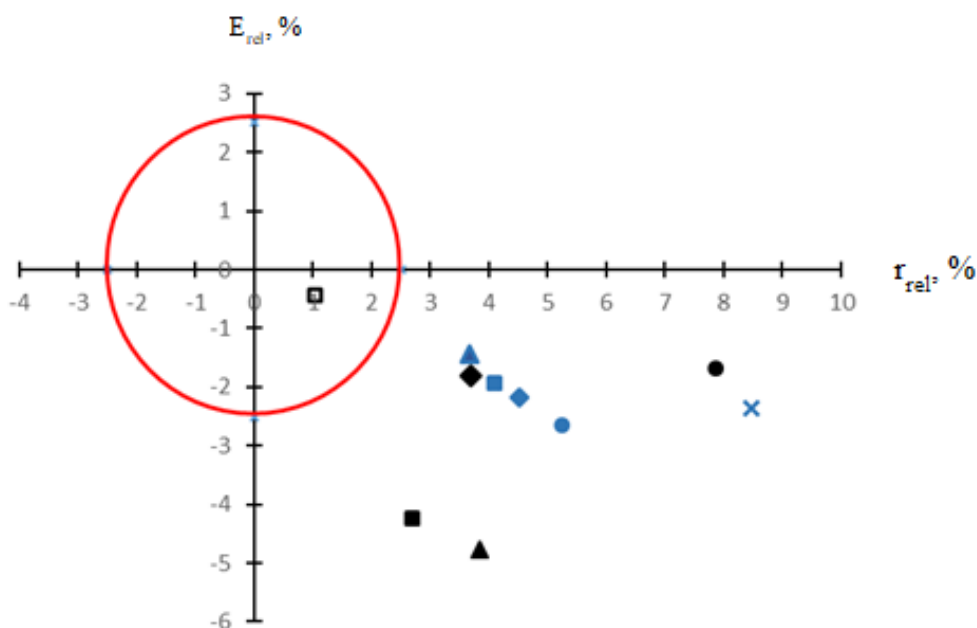


Рис. 3.7 – Залежність похибки E_{rel} від відтворюваності r_{rel} результатів 20-ти вимірювань твердості методом Брінелля еталонної міри твердості (527 HBW) різними типами твердомірів: □ – ТШ 2; ■ – Computest SC; ● – ТКР – 35; Δ – ТКМ 459С; ◇ – МЕТ У1; ◆ – ТД 32; ▲ – DYNE TEST.

Перед проведенням чергових випробувань матеріалів обов'язково перевіряється вимірювальна система (для кожного діапазону відношення величин зусилля–діаметр кульки та рівень твердості) з використанням контрольного відбитка на еталонній мірі твердості, каліброваного відповідно до ДСТУ EN ISO 6506-3:2017 [22] (входить в комплект поставки разом із приладом). Значення вимірюваного розміру відбитка має збігатися із сертифікованим значенням в межах 0,5% (табл. 2, ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 [21]).

Отже, при калібруванні портативного приладу необхідно звертати увагу не лише на похибку результатів вимірювань, а й на їх відтворюваність.

Чим вона гірша, тим більша вірогідність отримання неякісних результатів вимірювання твердості при малій кількості нанесення відбитків.

Перед проведенням випробувань на твердість листів високоміцних сталей у вихідному стані методом Брінелля необхідно відпрацювати методику на окремих зразках.

Для більш достовірного контролю поточного стану листів за результатами вимірювання характеристик твердості методом Брінелля потрібно дотримуватись таких рекомендацій.

1. Дотримання всіх вимог стандарту ДСТУ ISO 6506-1:2019 [20].

2. Підготовка до випробування на твердість включає наступне:

а) попередньо зняти знеуглецьований шар металу, який виникає внаслідок термообробки матеріалу, та встановлюється при підготовці поверхні до випробування на твердість шляхом пошарового шліфування.

б) при обробці поверхні необхідно досягати чистоти поверхні не менше 10 класу шорсткості, а також вимоги приведені в інструкції по експлуатації твердоміра;

в) при підготовці поверхні шляхом шліфування і доводки вжити заходи проти нагрівання та місцевого припікання.

г) у стаціонарних твердомірах типу ТШ використовувати кульку з твердого сплаву на основі карбіду вольфраму;

г) вибір навантаження на індентор підбирати таким чином, щоб відношення діаметра відбитка до діаметра кульки знаходилось в інтервалі 0,3...0,4.

3. При проведенні випробувань необхідно дотримуватися рекомендацій ДСТУ ISO 6506-1:2019 [20] щодо застосовування кульки діаметром 10 мм із навантаженням 29,42 кН, якщо немає інших рекомендацій з питань визначення твердості, приведених у ТУ організації, яка займається виготовленням виробів із металопродукату, що поставляється.

Висновки. Методика визначення твердості високоміцних листових сталей містить, крім дотримання всіх вимог стандарту ДСТУ ISO 6506-1:2019

[20], вимоги до підготовки поверхні лицьової площини листа металу шляхом зняття знеуглецьованого прошарку, величина якого залежить від технології виготовлення, чистоти поверхні, вибору кульки і навантаження. Для більш достовірного контролю вихідного чи поточного стану високоміцних сталей вимірюванням твердості рекомендується задавати напрямок лінії, вздовж якої проводяться випробування, по осі прокатки листа з подальшим визначенням середнього значення. Збільшення кількості відбитків істотно знижує похибку вимірювання через неоднозначність положення контуру відбитку, викликаного відвалом металу з лунки.

3.3.2 Розробка експрес-методу виявлення знеуглецьованого шару за результатами вимірювання твердості

Леговані високоміцні сталі застосовуються при виготовленні відповідальних деталей і елементів складних конструкцій спеціального призначення, які працюють в складних умовах статичного навантаження та короточасних інтенсивних динамічних навантажень в тому числі й імпульсних. Проведення вхідного контролю і контролю механічних характеристик під час виготовлення і експлуатації таких спеціальних конструкцій і їх елементів потребує вдосконалення методик контролю їх механічних характеристик. Особливо це стосується вуглецевих і легованих сталей з вмістом вуглецю не менше 0,3%, де є необхідність перевіряти наявність знеуглецьованого шару.

Нами пропонується визначати знеуглецьований шар а при необхідності його величину за допомогою експрес-методу твердості, що містить у собі відбірковий метод вимірювання твердості в макродіпазоні зусиль індентування [54, 137] на поверхні зразка і метод вимірювання мікротвердості для визначення глибини знеуглецьованого шару за [113].

Результати, отримані за наведеними методами випробувань, можуть бути використані для вхідного контролю якості матеріалу, що поставляється, для встановлення припусків на обробку різанням, а також для оцінки впливу технології виробництва на знеуглецювання.

Пропонований експрес метод застосовується для вуглецевих і легованих високоміцних сталей з вмістом вуглецю не менше 0,3%, у яких необхідно контролювати знеуглецьований шар та його глибину.

Присутність знеуглецювання визначають по різниці між твердістю на поверхні зразка і теоретичною максимальною твердістю для вмісту вуглецю в досліджуваній сталі. Цей метод найбільш підходить для сталей, що містять приблизно менше 0,55% вуглецю, але дозволяє також виявляти значне знеуглецювання в сталях з більш високим вмістом вуглецю. Метод не застосовується для сталей, що не зміцнюються при загартуванні, наприклад для низьковуглецевих сталей.

Вимоги до поверхонь, які підлягають контролю твердості. Окалину, присутню на поверхні зразка, видаляють дротяною щіткою, обдуванням скляним дробом і т. д., а потім проводять вимір твердості на поверхні, зазвичай за шкалою С твердоміра Роквелла.

Для більш детального дослідження для термічно зміцнених виробів, особливо в стані після загартування, від матеріалу, що піддається термічній обробці, відрізається короткий зразок, який потім обробляється за таким же режимом, як даний матеріал, або разом з ним. Цей зразок не піддається відпусканню.

Для контролю глибини знеуглецювання постає необхідність в зразках, що вирізають у поперечному напрямку матеріалу для виготовлення полірованих мікрошліфів, які найбільшою мірою підходить для термооброблених зразків з досить однорідною мікроструктурою. Він не рекомендується для зразків, які містять дві структурні складові, що значно відрізняються твердістю.

Оцінка загальної глибини знеуглецювання заснована на зміні мікротвердості в залежності від відстані від поверхні. Загальна глибина знеуглецювання відповідає глибині, на якій твердість стає постійною і дорівнює твердості всередині зразка. Також може визначатися глибина, що відповідає певному значенню твердості і називається "ефективна глибина знеуглецювання". Цей метод найкраще підходить для сталей з вмістом вуглецю нижче $\sim 0,55\%$. При більш високому вмісті вуглецю твердість не змінюватиметься, якщо не буде відбуватися зміна вмісту залишкових карбідів або залишкового аустеніту.

Полірування зразків слід здійснювати таким чином, щоб виключити закруглення їх кромek. Якщо не проводять монтування зразків і їх захист від заокруглення кромek, то задовільні результати можна отримати при використанні верстатів для автоматичного полірування. Слід застосовувати тканини з коротким ворсом. Якщо зазначені верстати відсутні, а також якщо зразки мають малі розміри або незручну форму для таких верстатів, то зразки слід монтувати в затискні пристрої або в різні монтувальні пластмаси. При використанні деяких монтувальних пластмас можна не одержати необхідного збереження кромek. Для зазвичай застосовуваних пластмас найкращого збереження кромek досягають шляхом запресовування зразків в матеріали на основі епоксидної смоли. Оптимальне збереження кромek забезпечують покриття, нанесені електролітичним або хімічним шляхом, які рекомендується використовувати в критичних випадках. Полірування слід здійснювати, використовуючи методи, які дозволяють виявити справжню мікроструктуру поверхневого шару в відповідності до ASTM E 3-01 [79].

На зразок наноситься ряд відбитків твердості через певні проміжки від поверхні до центру, використовуючи потрібні методи твердості, до тих пір, поки не буде досягнута постійна твердість в межах звичайного статистичного розкиду значень. Ці методи випробувань наведені в стандарті [80].

Перед вимірюванням твердості слід провести травлення і перегляд зразків для вибору типових ділянок або специфічних ділянок, які

представляють інтерес при випробуванні методом вимірювання твердості. При виконанні вимірювань твердості слід дотримуватися застережень відповідно до п. 7.12 ASTM E 384-22 [80].

Відстань між відбитками має не менше ніж в 2,5 рази перевищувати довжину діагоналі в напрямку, перпендикулярному поверхні, тобто в поперечному напрямку. Якщо необхідні проміжні вимірювання, то їх можна проводити на розташованій поблизу паралельній поперечній лінії.

Щоб визначити загальну глибину знеуглецювання або ефективну глибину, необхідно виконати повний цикл вимірювань по поперечній лінії від поверхні до внутрішньої частини зразка. В цілях мінімізації трудомісткості випробування можна використовувати часткові виміри по поперечній лінії на підставі спостережуваної мікроструктури.

Вимірювання тільки по одній поперечній лінії дозволяють визначити загальну або ефективну глибину знеуглецювання тільки в одному місці. Для досягнення більшої статистичної точності у визначенні цих значень можна виконати кілька часткових вимірювань по поперечних лініях в місцях, що обрані на підставі спостережуваної мікроструктури, а потім обчислити середнє значення.

Загальна глибина знеуглецювання відповідає такій глибині, на якій вміст вуглецю стає постійним і рівним його змісту всередині зразка в межах точності методу аналізу.

Зважаючи на специфіку виробництва та використання конструкцій спеціального призначення (включаючи листовий прокат) пріоритетним буде застосування апробованих методів неруйнівного контролю. Для цього підходить портативний твердомір ERNST Computest SC [53], що задовольняє всім вимогам методики експрес-методу.

Портативний твердомір Ernst Computest SC працює з статичним навантаженням за методом Роквелла: з попереднім (11,8 Н) і робочим (49 Н) навантаженнями. Перевагою застосування даного твердоміра є малі розміри відбитків, що дає змогу зменшити відстань між ними, за рахунок чого можна

уникнути використання методів мікроіндентування. За його допомогою можна проводити випробування твердості металів будь-якого типу без зміни індентора. Головна умова це попередньо оброблена досліджувана поверхня дослідження.

В якості робочого інструменту застосовується алмазний індентор у вигляді конуса з кутом 90° .

На підтвердження придатності експрес-методу визначення знеуглецьованого шару методом твердості були проведені порівняльні дослідження легованої високоміцної сталі марки Armoх 500Т.

Матеріалом для дослідження слугувала легована високоміцна сталь марки Armoх 500Т в стані поставки із листового прокату товщиною 6 мм, яка використовується для виробництва конструкцій спеціального призначення.

Різними методами, а саме твердістю за Брінеллем, металографічними дослідженнями мікроструктури у двох поперечних площинах, аналізом хімічного складу, мікротвердістю за Віккерсом і експрес-методом по товщині листа отримано результати механічних і металографічних досліджень в різних площинах листового матеріалу.

Схема вирізки заготовок для зразків з матеріалу листового прокату представлена на рис. 3.8.

Підготовку поверхні зразка проводили у відповідності до ASTM E 3-01 [79].

Зокрема було виміряно твердість за Брінеллем *HBW* досліджуваного матеріалу. Твердість за методом Брінелля *HBW* вимірювали згідно ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [20] на стаціонарному твердомірі типу ТШ-2. Значення твердості за Брінеллем *HBW*, що отримані шляхом осереднення результатів десяти вимірювань на поверхнях зразків в напрямках ОХ, ОУ і на поверхнях А та Б листового матеріалу, приведено в табл. 3.8.

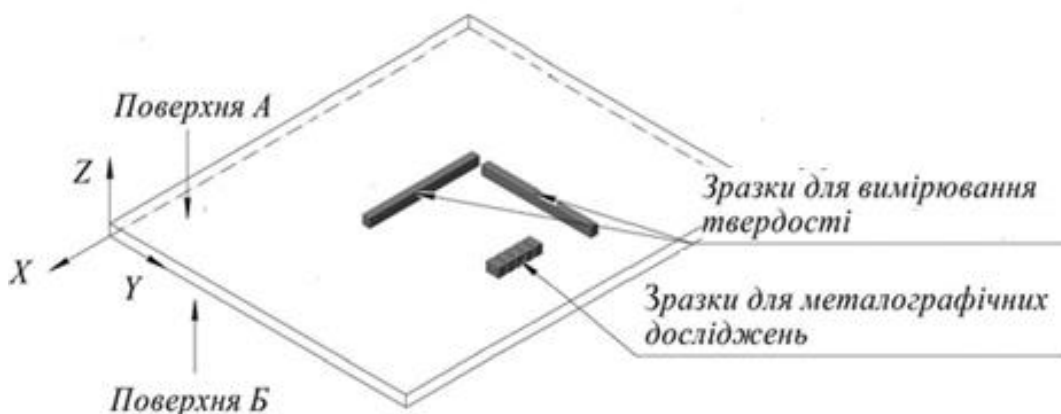


Рис. 3.8 – Схема вирізки заготовок та зразків для випробувань.

Як видно з даних, наведених в табл. 3.8, значення твердості за Брінеллем сталі Armoх 500Т, що визначені в поперечних напрямках ОХ та ОУ вищі ніж на поверхнях А та Б до 30%.

Таблиця 3.8 – Результати визначення твердості за Брінеллем легованої сталі Armoх 500Т

Напрямок визначення твердості	Твердість за Брінеллем, HBW
ОХ (бокова поверхня вздовж прокатки)	503
ОУ (бокова поверхня поперек прокатки)	543
ОZ (поверхня А)	418
ОZ (поверхня Б)	424

Для визначення можливих причин відхилення значень характеристик твердості на поверхнях А і Б по відношенню до твердості в поперечних напрямках ОХ та ОУ було проведено металографічні дослідження мікроструктури, а також аналіз хімічного складу сталі Armoх 500Т. Металографічні дослідження проводили оптичним інвертованим мікроскопом «AXIOVERT 40 MAT» з фіксацією мікроструктур цифровою фотокамерою CANON A640 в програмі «AXIOVISION LE» при збільшеннях

від 100 до 1000. Мікрошліфи виготовляли на установці «BUEHLER» за стандартною методикою з подальшим виявленням мікроструктури травленням в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Вирізку зразків для металографічних досліджень проводили в трьох взаємно перпендикулярних площинах – XOY , YOZ і XOZ (див. рис. 3.8). Хімічний склад металу сталі аналізували спектрометром DFS-36 на глибині 0,1 – 0,25 мм від поверхні, а також в середині листа на глибині 3 мм.

При дослідженні мікроструктури виявлено, що в площинах XOZ та YOZ макро- і мікроструктура сталі на деякій відстані від поверхні листа в зоні 2 характеризується темно- і світлотравленими витягнутими смугами, щільність і ширина яких змінюється по товщині листа (рис. 3.9, а,в). Вони представляють собою сліди вихідної текстури прокатки (текстура після прокатки до термообробки), але якщо в площині YOZ світлотравлені смуги суцільні, то в площині XOZ листа – не суцільні (переривчасті).

Крім того, в площині XOZ листа спостерігається набагато більша кількість дефектів (мікропор, що виявились травленням) в порівнянні з площиною YOZ . Названі відмінності структури помітні лише при збільшеннях до 200 крат, але при 500...1000 кратних збільшеннях і вище в обох площинах помітних відмінностей мікроструктури, що ідентифікована як мартенсит, не виявлено (рис. 3.9,б,г).

Аналіз хімічного складу досліджуваної сталі вказує на те, що в шарах листа на відстані до 0,5 мм від поверхні (зони 1, 3 на рис. 3.9) у порівнянні з центральними (зона 2 на рис. 3.9) спостерігається менший вміст вуглецю. Це можна пояснити знеуглецюванням зовнішніх шарів матеріалу, викликаним технологічними чинниками (наприклад, особливостями прокатки та термообробки), що в свою чергу призвело до зміни мікроструктури та механічних характеристик визначених на поверхні листа. Хімічний склад досліджуваної сталі наведено в табл. 3.9.

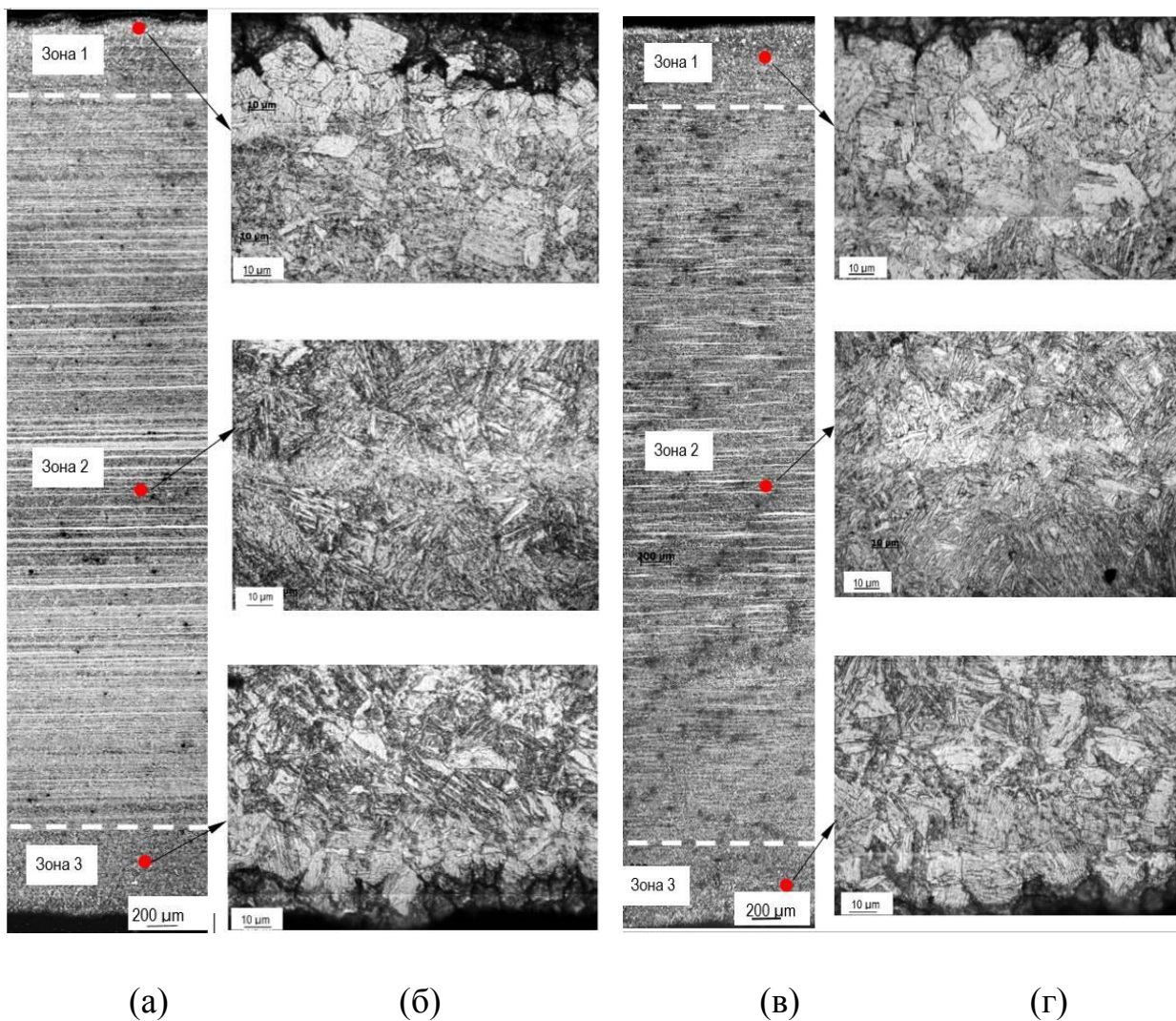


Рис. 3.9 – Макро- та мікроструктура сталі Armax 500T по товщині листа в площинах *XOZ* (а, б) і *YOZ* (в, г) при різних збільшеннях.

Як видно із рис. 3.9 мікроструктура сталі в знеуглецьованих зовнішніх шарах металу (в зонах 1 і 3) містить бейніт і мартенсит, при цьому доля мартенситної складової зростає по мірі віддалення від поверхні.

Таблиця 3.9 – Хімічний склад сталі Armoх 500Т

Джерело даних	Масовий склад елементів, %											
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P	Si	V	Al	Ti
Спектрометр DFS-36	0,13	0,63	1,60	2,23	0,47	0,007	0,008	0,013	1,19	0,20	-	-
Сертифікат	0,29	0,64	1,63	2,14	0,48	0,05	0,001	0,009	1,29	1,87	0,028	0,018

Також було визначено мікротвердість $HV_{0,1}$ і твердість за Брінеллем HB_{30} по товщині листа. Вимірювання мікротвердості $HV_{0,1}$ при навантаженні 100 г проводили мікротвердоміром ПМТ-3 згідно [23].

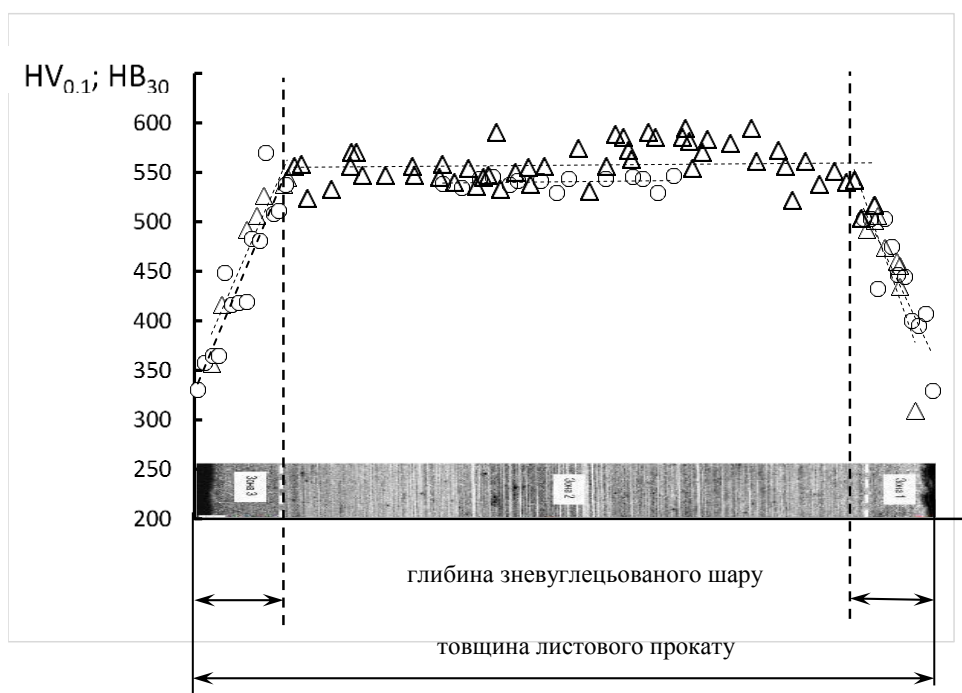


Рис. 3.10 – Розподіл по товщині листа мікротвердості за Віккерсом $HV_{0,1}$ (Δ) в напрямку OY та твердості за Брінеллем HB_{30} ($\circ$) в напрямках OY сталі Armoх 500Т.

Твердість за Брінеллем HB_{30} вимірювалась портативним твердоміром ERNST Computest SC [53]. Розподіл мікротвердості за Віккерсом $HV_{0,1}$ та твердості за Брінеллем HB_{30} по товщині листа представлено на рис. 3.10.

Таким чином, на основі металографічних досліджень виявлено неоднорідність мікроструктури листа високоміцної сталі по товщині, що зумовлює неоднорідність мікротвердості за Віккерсом $HV_{0,1}$ (рис. 3.10,а), значення якої змінюються від 300 одиниць біля поверхні (у зонах 1 і 3) до 530 в центральній області (зона 2). Розподіл твердості за Брінеллем по товщині листа також носить аналогічний характер, а зміна значень твердості HB_{30} (рис. 3.10,б) від 400 біля поверхні (у зонах 1 і 3) до 587 одиниць в центральній області (зона 2). Різниця значень сягає до 32%. Глибина знеуглецьованого шару становить біля 0,8 мм з обох сторін.

Як видно, застосування експрес-методу визначення знеуглецьованого шару і його величини методом твердості через визначення розподілу твердості по товщині листа найбільш близький за своїми значеннями до результатів твердості, отриманими на стаціонарному твердомірі типу ТШ-2.

Отримані результати свідчать про успішне застосування досить швидкої і економічної методики визначення величини знеуглецьованого шару за результатами вимірів твердості в макродіапазоні зусиль ідентування на прикладі листового прокату легованої сталі Armoх 500Т.

Запропонована методика може бути використана для вхідного контролю якості матеріалу, встановлення припусків на обробку різанням, та оцінки впливу технології виробництва на знеуглецювання.

Висновки. Представлено експрес-метод визначення знеуглецьованого шару методом твердості вуглецевих і легованих високоміцних сталей.

Проведено порівняльні дослідження легованої високоміцної сталі марки Armoх 500Т в стані поставки із листового прокату товщиною 6 мм, яка використовуються для виробництва конструкцій спеціального призначення для підтвердження працездатності експрес-методу.

Різними методами, а саме твердістю за Брінеллем, металографічними дослідженнями мікроструктури у двох поперечних площинах, аналізом хімічного складу, мікротвердістю за Віккерсом і експрес-методом по товщині листа отримано результати механічних і металографічних досліджень в різних площинах листового матеріалу, що показали свою схожість і обґрунтування.

Виявлено глибину знеуглецьованого шару в досліджуваному матеріалі товщиною близько 0,8 мм з обох сторін, що підтверджено металографічними дослідженнями і вимірюванням мікротвердості за Віккерсом.

3.3.3 Необхідність урахування поверхневої неоднорідності при оцінюванні поточних значень міцності основного металу

Поверхневі шари металу нерідко характеризуються іншими фізико-механічними властивостями, ніж об'ємна частина матеріалу. Ця різниця може виникати внаслідок технології виготовлення (прокат, штампування, наплавлення), режимів термічної або хіміко-термічної обробки (загартування, відпуск, цементация, азотування), а також під дією експлуатаційних факторів, таких як циклічне навантаження, контактний знос, корозійні процеси та локальне нагрівання. У результаті в приповерхневій зоні часто формується модифікований шар зі зміненою мікроструктурою, твердістю, залишковими напруженнями та анізотропією деформаційних властивостей.

Наявність такого шару може призводити до суттєвих похибок при визначенні характеристик міцності методами, що вимірюють переважно поведінку поверхні. Зокрема, відомі кореляційні залежності між твердістю за Брінеллем та механічними характеристиками при розтязі [40, 50], які широко використовуються в стандартах для інженерної оцінки стану металу. Проте ці залежності були отримані переважно для однорідних матеріалів, без

урахування градієнтів властивостей у поверхневій зоні. Як показує аналіз літературних даних [111, 128], навіть для сталей однієї марки значення границі міцності та границі плинності можуть істотно змінюватися в залежності від структури, стану поставки, режимів термообробки та наявності зміцнених або ослаблених поверхневих шарів.

У рамках даної роботи досліджено вплив поверхневого шару на визначення механічних характеристик на прикладі високоміцних сталей Armoх 500Т і Hardox 450, яким притаманна наявність поверхневого вуглецевого шару [119, 122, 150]. Як показано в попередньому пункті, цей шар суттєво змінює твердість у порівнянні з об'ємною частиною металу, що вимагає корекції стандартних методів розрахунку за результатами вимірів твердості.

Метою даної роботи було розроблення експрес-методики визначення поточних значень механічних характеристик листових легованих високоміцних сталей з урахуванням поверхневої неоднорідності металу за результатами вимірів твердості методом індентування.

Для апробації методики визначення характеристик міцності високоміцних сталей за результатами інструментованого індентування було обрано листовий прокат із високоміцних легованих сталей марок Armoх 500Т та Hardox 450 товщиною 10 мм в стані поставки, які використовуються для виробництва конструкцій спеціального призначення.

Механічні характеристики листових матеріалів досліджували методами одновісного розтягу, вимірювання твердості за Брінеллем та інструментованого індентування у двох ортогональних напрямках відносно напрямку прокатки (поздовжньому і поперечному), а також на поверхнях прокату як у вихідному стані, так і після видалення поверхневого шару.

Зразки для випробувань на одновісний розтяг вирізали в двох ортогональних напрямках. Випробування проводили згідно ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24] на сервогідравлічній машині Instron 8802 за кімнатної температури. При цьому використовувались пропорційні циліндричні зразки.

Вимірювання деформації зразків проводилось шляхом автоматичної реєстрації деформації за допомогою встановленого на зразку тензорезисторного перетворювача. Швидкість переміщення захвату складала 0,2 мм/хв. Характеристики міцності за даними випробувань визначались за ДСТУ ISO 6892-1:2019 [20].

Зразки для вимірювання твердості методами Брінелля і інструментованого індентування розмірами 60×40×8 мм виготовлялись у двох ортогональних напрямках із тих же листів металу, що й на розтяг. Випробування на твердість проводили на стаціонарному твердомірі ТШ-2 кульками 2,5 і 10 мм. Інструментоване індентування проводилось згідно ISO 14577-1:2015 [105] в циклічному режимі навантаження кулькою діаметром 2,5 мм. Діаграми індентування записували з постійною швидкістю переміщення індентора 0,05 мм/хв. Максимальне навантаження складало 4500 Н.

Випробування методом інструментованого індентування проводили на лабораторній установці UTM-20НТ [126], розробленій в Інституті у відповідності з вимогами [58]. Установка призначена для визначення характеристик міцності методом інструментованого індентування з використанням діаграм індентування і за твердістю методом Брінелля.

Характеристики міцності високоміцних сталей, визначені за результатами випробувань у поздовжньому та поперечному напрямках відносно напрямку прокатки, на розтяг і методом інструментованого індентування, наведені в табл. 3.10.

Як видно з таблиці, відхилення між значеннями границі міцності, визначеними за випробуваннями на розтяг і методом інструментованого індентування, не перевищує 4 %, а для границі плинності – 5,2 %.

Разом із тим, застосування даних кореляційних залежностей для оцінки механічних характеристик на поверхні прокату, що не потребує виготовлення зразків, може призвести до систематичного заниження оцінки як величини

твердості так і розрахованих характеристик міцності, якщо не враховувати наявність поверхневого вуглецевого шару.

Таблиця 3.10 – Характеристики міцності високоміцних сталей Arмох 500Т і Hardox 450 з випробувань на розтяг у поздовжньому та поперечному напрямках, а також методом інструментованого індентування

Сталь	Одновісний розтяг		Інструментоване індентування		Відхилення, %	
	Границя плинності $R_{0,2}$, МПа	Границя міцності R_m , МПа	Границя плинності $R_{p0,2}^{ind}$, МПа	Границя міцності R_m^{ind} , МПа	$R_{p0,2}^{ind}$ від $R_{0,2}$	R_m^{ind} від R_m
Армох 500Т вздовж прокатки	1393,1	1706,0	1331,4	1700,0	- 4,4	- 0,4
Армох 500Т поперек прокатки	1381,0	1680,0	1309,5	1629,6	- 5,2	- 3,0
Hardox 450Т вздовж прокатки	1180,0	1414,0	1226,2	1471,2	3,9	4,0
Hardox 450Т поперек прокатки	1175,0	1413,0	1190,5	1422,1	1,3	0,6

В роботі на прикладі сталі Армох 500Т проведено порівняльні випробування: вимірювання твердості листового прокату виконувалося як без видалення поверхневого шару, так і після його зняття, із подальшим розрахунком механічних характеристик за результатами вимірів твердості з використанням кореляційних залежностей [59]. Визначено відхилення розрахованої границі міцності від границі міцності на розтяг. Результати таких випробувань представлені в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Твердість *HBW* поверхневого шару сталі Armoх 500Т до і після його зняття і розраховані за параметром локального опору пластичній деформації [59] та відхилення в % від R_m , МПа на розтяг

Умова	Твердість <i>HBW</i>	Розрахована границя міцності R_m , (МПа)	Відхилення від R_m , на розтяг (%)
Поверхня 1 без зняття шару	418	1354	-20,6
Поверхня 2 без зняття шару	424	1376	-18,1
Поверхня 1 після зняття шару	504	1665	- 2,4
Поверхня 2 після зняття шару	510	1686	0,4

Як видно з таблиці, характеристики міцності, визначені за результатами індентування без видалення поверхневого шару, значно нижчі, ніж властивості основного об'єму металу. Це пояснюється фізичною природою поверхневого шару: його твердість та мікротвердість мають занижені значення через локальну крихкість, градієнт вуглецю та наявність структурних дефектів, які формуються в процесі прокатки та термообробки.

Після видалення поверхневого шару механічні властивості, визначені на поверхні, добре узгоджуються з характеристиками основного об'єму металу, що підтверджує необхідність врахування поверхневої неоднорідності при оцінці поточних значень границі міцності високоміцних сталей.

3.4 Рекомендації щодо урахування анізотропії та поверхневої неоднорідності при інтерпретації результатів інструментованого індентування

Ізотропний матеріал. Якщо матеріал є ізотропним по всьому поперечному перерізу виробу, а його механічні властивості однакові в усіх напрямках, то результати індентування на поверхні відображають характеристики не лише поверхневого шару, а й усього об'єму виробу в цілому (СОУ 56-36-2021 [57], СОУ 56-37-2021 [58] , СОУ 56-38-2021 [59]).

Рекомендації: у цьому випадку індентування можна розглядати як репрезентативний метод визначення характеристик міцності та пластичності для всього виробу. Додаткових корекцій чи спеціальних підходів не потрібно.

Поверхнева неоднорідність. Якщо поверхневий шар відрізняється за властивостями від більш ізотропної серцевини, то результати індентування на поверхні характеризують переважно властивості саме цього шару. Для отримання достовірної інформації про механічні властивості виробу необхідно видалити поверхневий шар і провести випробування у глибині матеріалу (СОУ 56-36-2021 [57], СОУ 56-37-2021 [58] , СОУ 56-38-2021 [59]).

Рекомендації: доцільно поєднувати індентування з металографічним аналізом, що дозволяє оцінити глибину та характер структурних змін. Для виробів з модифікованою поверхнею (зміцнення, корозійні шари, термообробка) варто виконувати індентування серійно на різних глибинах (методом пошарового шліфування або мікрорізків).

Анізотропна серцевина. Якщо в серцевині матеріалу спостерігається анізотропія, тобто механічні властивості в одному чи кількох напрямках відрізняються від інших, то індентування відображає характеристики лише в напрямку прикладення навантаження індентора. Інтерпретацію таких результатів слід здійснювати з урахуванням орієнтації випробування відносно текстури матеріалу [57–59].

Рекомендації: для анізотропних матеріалів варто проводити індентування в кількох орієнтаціях відносно головних напрямків текстури (наприклад, уздовж прокату, уперек та в товщину). Порівняння результатів дає можливість кількісно оцінити ступінь анізотропії та скоригувати визначення умовних характеристик міцності.

3.5 Висновки за розділом 3

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що для ізотропних сталей (Ст3, сталь 20, сталь 45) результати інструментованого індентування можуть надійно використовуватися для визначення механічних характеристик у будь-якому напрямку. Це підтверджує доцільність застосування індентування як ефективного засобу локальної діагностики матеріалів з однорідною структурою.

Встановлено чутливість індентування до анізотропії. На прикладі сталей 15X2НМФА та 08X18Н10Т показано, що розбіжності між результатами індентування та традиційних випробувань на розтяг можуть перевищувати 10 %. Випробування у трьох взаємно перпендикулярних напрямках засвідчили здатність індентування виявляти просторову неоднорідність та текстуру, що доводить необхідність врахування анізотропії під час інтерпретації результатів.

Розроблено та апробовано методику визначення твердості високоміцних листових сталей відповідно до вимог ДСТУ ISO 6506-1:2019, яка передбачає підготовку поверхні шляхом видалення знеуглецьованого шару, орієнтацію відбитків вздовж осі прокатки та збільшення їх кількості. На основі цієї методики створено та впроваджено галузевий стандарт СОУ 56-36-2021 [57], гармонізований з міжнародними вимогами. Виконаний цикл досліджень (Hardox 450, Arмох 500Т) дозволив визначити характер розподілу твердості по товщині, встановити глибину знеуглецьованого шару та обґрунтувати вимоги до чистоти поверхні. За результатами роботи отримано патент України № 151934 від 05.10.2022 р. на спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей із застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем.

Доведено можливість використання твердості як критерію оцінки знеуглецьованого шару. На прикладі сталі Armoх 500Т комплексні дослідження (твердість за Брінеллем, мікротвердість за Віккерсом, металографія, хімічний аналіз) підтвердили достовірність визначення його глибини (~0,8 мм).

Сформульовано рекомендації щодо урахування анізотропії та поверхневої неоднорідності при інтерпретації результатів інструментованого індентування. Для ізотропних матеріалів результати відображають властивості всього об'єму; для матеріалів із поверхневою неоднорідністю – лише модифікованого шару; для матеріалів з анізотропною серцевиною – характеристики в конкретному напрямку індентування. Це дозволяє забезпечити коректність інтерпретації результатів та знизити похибку оцінки механічних властивостей у конструкційних сталях.

Розроблено рекомендації для підвищення точності оцінки механічних властивостей за індентуванням, адаптовані до різних груп матеріалів та їхнього технічного стану. На основі проведених досліджень створено та впроваджено галузевий стандарт СОУ 56-38-2021 [59], який регламентує визначення механічних характеристик металевих матеріалів за результатами індентування та твердості. Документ забезпечує можливість використання методу індентування у завданнях імпортозаміщення, вхідної атестації та контролю якості нових матеріалів.

РОЗДІЛ 4. МОНІТОРИНГ ПОТОЧНОГО СТАНУ МЕТАЛІВ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОВЕРХНЕВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ

4.1. Оцінка впливу поверхневої неоднорідності на результати вимірювання твердості сталі ARMOX 500T (ТОВ «Техімпекс») та сталі MIILUX PRKT.UA (ПРАТ «НВО «Практика») за твердістю

4.1.1 Контроль якості металу листового прокату із сталі Armoх 500T за показниками твердості за Брінеллем

Сталі спеціального призначення типу Armoх 500 T, Hardox 450, Miilux PRKT.UA та ін. використовують при бронюванні військової техніки. Ідеальне поєднання твердості з ударною в'язкістю забезпечує цим сталям високий ступінь опору бронепробиттю та противибуховому захисту.

На кожну плавку, окремо, проводять випробування на твердість за Брінеллем відповідно до стандарту EN ISO 6506-1:2019 [20]. В свою чергу достовірне визначення твердості цих сталей, викликає деякі труднощі, за рахунок одержаного знеуглецьованого шару металу при його виготовленні. Методики, що використовуються в розробленому стандарті, передбачають як пошарове видалення знеуглецьованого шару так і всі заходи що передбачають більш достовірне визначення твердості за Брінеллем високоміцних та броньованих сталей.

Вимірювання твердості за методом Брінелля проводили відповідно до СОУ 56-36-2021 [57] з врахуванням вимог ДСТУ 6506-1:2019 [20]. Досліджували зразок розміром 150×150×8,6 мм із сталі Armoх 500T вирізаний із темплету листового прокату розміром 450×450×8,6 мм, що був переданий для досліджень ТОВ «Техімпекс».

Випробування листової сталі Armoх 500Т проводилось шляхом пошарового видалення поверхневого шару та виконання вимірювань твердості з двох зовнішніх сторін листового прокату. Спочатку з зовнішніх поверхонь зразка знімалися 50 мкм, що дозволило отримати вихідні значення твердості. Далі по черзі знімалося по 50 мкм металу з кожного боку. На кожному етапі обробки поверхонь вимірювали твердість на стаціонарному твердомірі ТШ-2 з навантаженням 3000 кгс та кульки з карбіду вольфраму Ø 10 мм (по п'ять вимірювань) та для порівняння – портативним твердоміром Ernst Computest SC [53] (п'ятнадцять вимірювань). Процедури відносно пошарового зняття шарів металу повторювали до тих пір поки твердість не починала набувати одного значення на двох останніх етапах. На рис. 4.1 показано розподіл твердості при пошаровому знятті металу.

З рисунка видно, що поверхневий шар занижує реальні значення твердості і при видаленні цього шару забезпечується можливість вимірювання твердості основного металу, про що свідчить незмінність значень твердості при подальшому знятті шару металу. Глибина такого шару для досліджуваної сталі становить 350 мкм.

Червоною лінією на рисунку показано величину твердості згідно сертифікату. З рис. 4.1 видно, що після видалення поверхневого шару металу товщиною 350 мкм твердість сталі відображає реальну картину матеріалу, про що свідчить збіг результатів вимірювань твердості за допомогою твердоміру ТШ-2 та заявлених виробником. Максимальні відхилення середньої величини твердості двох поверхонь з величиною твердості зазначеною в сертифікаті EN 10204-3.1 [25] для досліджуваної сталі склало 510 ± 1 HBW. В табл. 4.1 представлені результати вимірювань твердості поверхонь металу із видаленим поверхневим шаром.

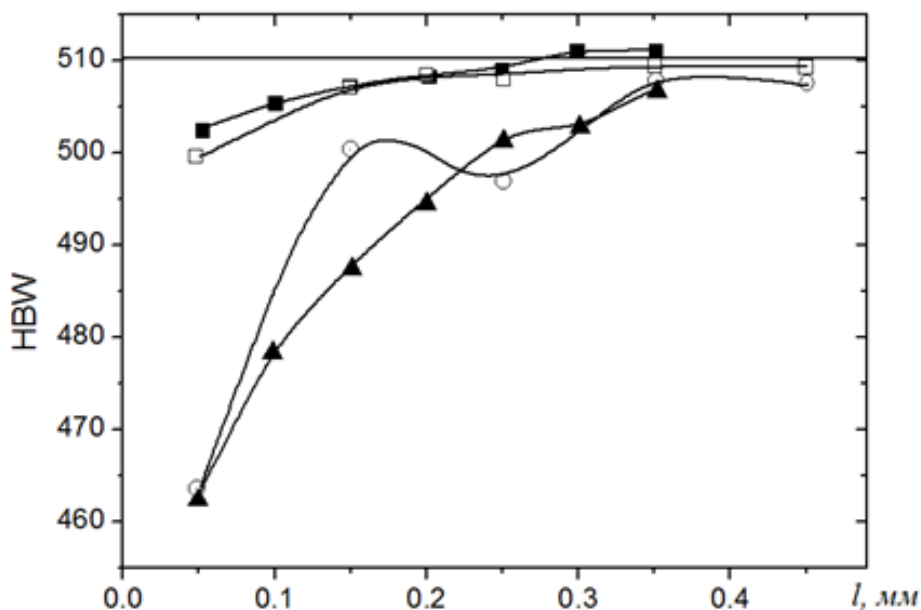


Рис. 4.1 – Зміна значень твердості HBW при пошаровому знятті металу L з двох зовнішніх поверхонь зразка із сталі Arмох 500Т (○, □ – поверхня А; ●, ■ – поверхня Б) при вимірюванні твердоміром ТШ-2 з навантаженням 3000 кгс і кулькою з карбіду вольфраму діаметром 10 мм (□, ■) згідно ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 [20] і портативним приладом Computest SC (○, ▲) (довідкові результати).

Чорною лінією на рисунку показано величину твердості згідно сертифікату. Із рис. 4.1 видно, що після видалення поверхневого шару металу товщиною 350 мкм твердість сталі відображає реальну картину матеріалу, про що свідчить збіг результатів вимірювань твердості за допомогою твердоміру ТШ-2 та заявлених виробником. Максимальні відхилення середньої величини твердості двох поверхонь з величиною твердості зазначеною в сертифікаті EN 10204-3.1 [25] для досліджуваної сталі склало $510 \pm 1 \text{ HBW}$. В табл. 4.1 представлені результати вимірювань твердості поверхонь металу із видаленим поверхневим шаром.

На підприємстві ТОВ «Техімпекс» проведено контроль якості металу листового прокату із сталі Arмох 500Т за показниками твердості за Брінеллем. Встановлено, що дані результатів вимірювання твердості за Брінеллем, визначені відповідно СОУ 56-36-2021 [57], співпадають в межах

допустимої похибки з даними Сертифікату EN 10204-3.1 [25], за умови видалення поверхневого шару металу.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань твердості за Брінеллем поверхонь зразка із сталі Armoх 500Т із видаленим поверхневим шаром

№ Випробування	Твердість за Брінеллем <i>HBW</i>	
	Поверхня А	Поверхня Б
1	509	512
2	511	510
3	512	511
4	507	508
5	508	513
Середнє значення	509	511

4.1.2 Проведення вхідного контролю (атестації) металопрокату на підприємствах оборонного призначення

За домовленістю з підприємством ПрАТ «НВО «Практика» проведено міжлабораторні дослідження твердості листової сталі Miilux PRKT.UA різних товщин згідно з стандартом СОУ 56-36-2021 [57].

Вимірювання твердості за методом Брінелля проводили відповідно до стандарту [20] з врахуванням його вимог. Досліджували зразки розмірами 150×150 мм і товщиною 3,0; 4,2; 5,0; 6,5 і 8,0 мм із сталі Miilux PRKT.UA, що були надані для досліджень ПрАТ «НВО «Практика».

Випробування листової сталі Miilux PRKT.UA проводилось шляхом пошарового видалення поверхневого шару та виконання вимірювань твердості по зовнішній стороні листового прокату. Спочатку з зовнішньої поверхні зразка знімалися приблизно 100 мкм (чистова обробка поверхні), що дозволило отримати вихідні значення твердості. Далі по черзі знімалося

по 50 мкм металу. На кожному етапі обробки поверхонь вимірювали твердість на стаціонарному твердомірі ТШ-2 з навантаженням 3000 кгс та кулькою з карбіду вольфраму діаметром 10 мм (по п'ять вимірювань) та з навантаженням 187,5 кгс та кулькою діаметром 2,5 мм, а також для порівняння – портативним твердоміром Computest SC [53] (п'ятнадцять вимірювань). Процедури відносно пошарового зняття шарів металу повторювали до тих пір, поки твердість не починала набувати одного значення на двох останніх етапах. На рис. 4.2 показано розподіл твердості при пошаровому знятті металу для товщини 8,0 мм (для решти товщин характер розподілу має аналогічний характер).

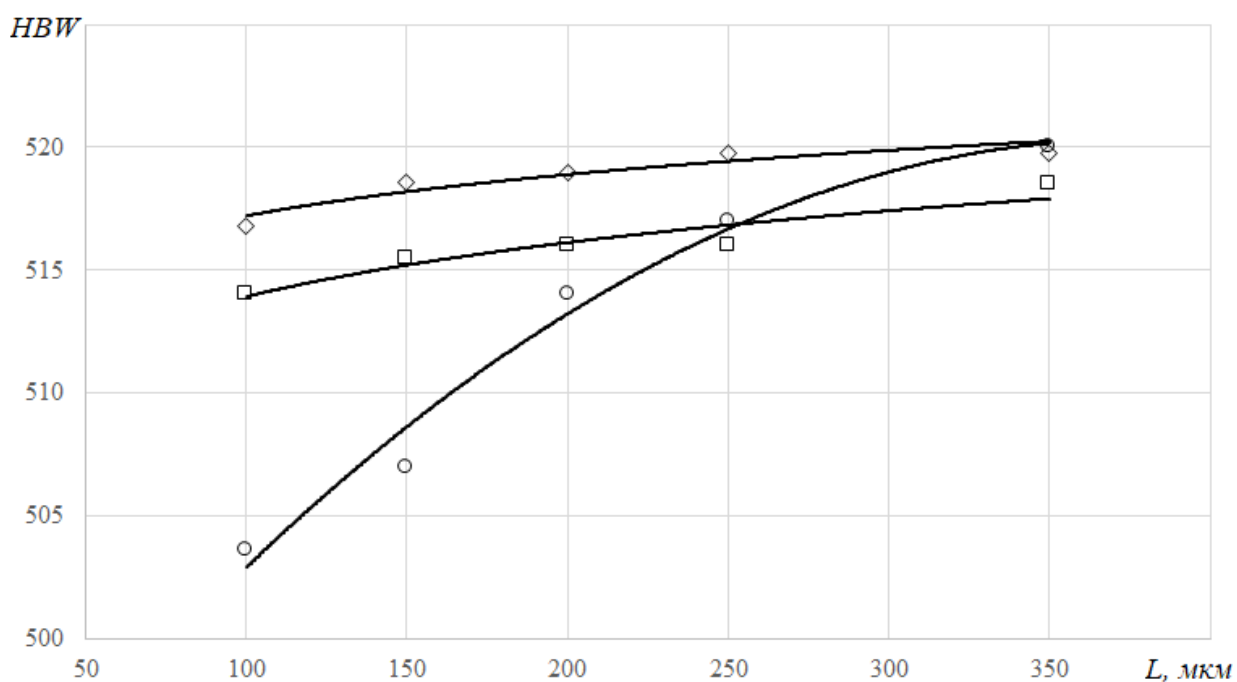


Рис. 4.2 – Зміна значень твердості *HBW* при пошаровому знятті металу *L* з двох зовнішніх поверхонь зразка з сталі Miilux PRKT за вимірювання твердоміром ТШ-2 з навантаженням 3000 кгс і діаметром кульки 10 мм (□) та навантаженням 187,5 кгс і кулькою діаметром 2,5 мм (◇) згідно ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 [131] та портативним приладом Ernst Computest SC (○).

З рис. 4.2 видно, що поверхневий шар досліджених листових легованих сталей в стані поставки знижує реальні значення твердості і при видаленні знеуглецьованого шару забезпечується можливість вимірювання твердості основного металу, про що свідчить незмінність значень твердості на рисунках при подальшому знятті шарів металу. Глибина такого шару для досліджуваної сталі становить 250 мкм

В табл. 4.2 і 4.3 наведено результати вимірювань твердості за методом Брінелля зовнішніх поверхонь зразків із сталі Miilux PRKT.UA із видаленим поверхневим шаром.

Таким чином, дані результатів вимірювання твердості за Брінеллем в межах допустимої похибки співпадають з даними отриманими спеціалістами заводської лабораторії ПрАТ «НВО «Практика».

Таблиця 4.2 – Результати вимірювань твердості за методом Брінелля на твердомірі ТШ-2 поверхонь зразків із сталі Miilux PRKT.UA з видаленим поверхневим шаром (навантаження на кульку з карбіду вольфраму діаметром 10 мм склало 3000 кгс) спеціалістами Інституту

№ випро- бування	Товщина зразка, мм				
	3,0	4,2	5,0	6,5	8,0
	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)
	Твердість за Брінеллем <i>HBW</i>				
1	505	516	510	516	519
2	511	518	508	522	520
3	500	509	509	518	521
4	501	508	512	516	518
5	503	510	507	518	521
Середнє значення	504,0	512,2	509,2	518,0	519,8

Таблиця 4.3 – Результати вимірювань твердості за методом Брінелля на твердомірі ТШ-2М поверхонь зразків із сталі Мііlux PRKT.UA з видаленим поверхневим шаром (навантаження на кульку з карбіду вольфраму діаметром 10 мм склало 3000 кгс) спеціалістами заводської лабораторії ПрАТ «НВО «Практика»

№ випро- бування	Товщина зразка, мм				
	3,0	4,2	5,0	6,5	8,0
	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)	(-0,35 мм)
	Твердість за Брінеллем <i>HBW</i>				
1	514	510	507	518	514
2	495	514	499	534	514
3	507	514	510	518	518
4	503	510	507	518	522
5	495	514	510	514	514
Середнє значення	503,0	512,4	506,6	520,4	516,4

На рис. 4.3 представлені результати твердості по товщині бічної поверхні зразка (8,0 мм) із сталі Агмох 500Т, що отримані портативним приладом Ernst Computest SC [53]. Наведено характерний розподіл чисел твердості *HB* 30 по бічній поверхні зразка листа (для решти товщин зразків характер розподілу має аналогічний характер).

За результатами дослідження твердості торців листів було виявлено крайові ефекти зниження значень твердості відносно центральної частини бічної поверхні листів до кромки, що свідчить про деяку неоднорідність структури досліджуваних листових матеріалів по товщині. Невизначеність перехідної зони від центральної частини бічної поверхні листів до верхніх і нижніх кромки листа та технічна обмеженість можливості виконувати вимірювання твердості в безпосередній близькості до кромки бічної поверхні листа значно ускладнили кількісне визначення її величини.

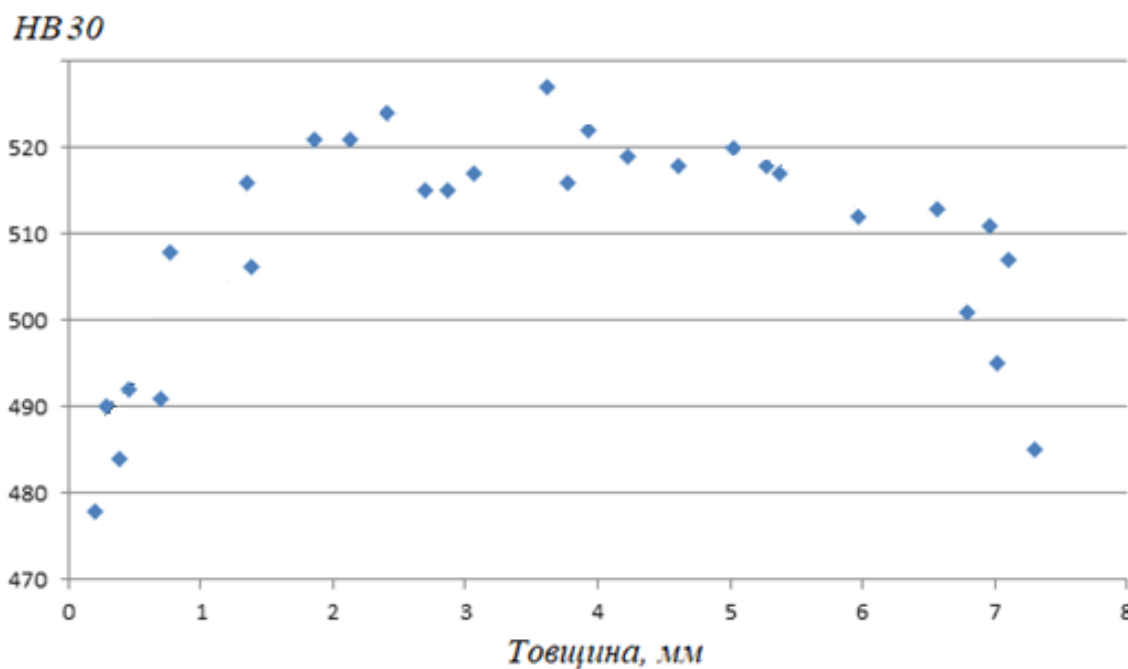


Рис. 4.3 – Розподіл твердості сталі Armoх 500Т по товщині листа.

Таким чином, проведено міжлабораторні випробування листової сталі Мiіlux PRKT.UA відповідно до стандарту [57]. Дані результатів вимірювання твердості за методом Брінелля отримані спеціалістами Інституту співпадають з даними отриманими спеціалістами заводської лабораторії ПрАТ «НВО «Практика» в межах допустимої похибки. Отримано протоколи результатів міжлабораторних досліджень на підприємстві ПрАТ «НВО «Практика».

На прикладі листових високоміцних легованих сталей Armoх 500Т і Мiіlux PRKT.UA проведено апробацію стандарту СОУ 56-36-2021 [57]. Для досліджуваних сталей встановлено товщину знеуглецьованого шару, отримано характер розподілу твердості по товщині зразків.

4.2 Контроль технічного стану зварних з'єднань мостової сталі з урахуванням анізотропії механічних характеристик

В Інституті проведено великий комплекс випробувань, направлений на розробку і вдосконалення непрямих методів визначення механічних

характеристик конструкційних матеріалів за результатами випробувань на ідентування і вимірювання твердості [69, 71, 72, 113, 126, 138]. Слід зазначити, що дані кореляційні залежності в основному застосовуються лише для конструкційних матеріалів. Разом з тим потреби виробництва постійно ставлять нові завдання перед дослідниками щодо розвитку методик оцінки механічних характеристик за результатами вимірювання твердості не лише для основного металу, але й для його зварних з'єднань.

Дана робота розвиває методологічні підходи контролю характеристик міцності зварних з'єднань, зокрема основного металу, металу зварного з'єднання і зони термічного впливу конструкційних металів відповідального обладнання неруйнівними методами контролю.

Дослідження локальних механічних властивостей зварних з'єднань мостової сталі 09Г2С проведено з метою вдосконалення методів оцінювання технічного стану відповідальних конструктивних елементів. Робота виконувалася у співпраці з Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України. У межах дослідження результати традиційних механічних випробувань було доповнено методом інструментованого ідентування, що дало змогу детально проаналізувати зміну характеристик міцності й твердості в зоні термічного впливу (ЗТВ) та безпосередньо у зварному шві.

Методологічна перевага інструментованого ідентування полягає у можливості визначення локальних механічних властивостей окремих ділянок матеріалу, тоді як стандартні випробування на розтяг характеризують інтегральні властивості зразка, що, як правило, лімітуються його найбільш ослабленою зоною.

Вимірювання твердості здійснювали за методом Брінелля на стаціонарному твердомірі ТШ-2 та на лабораторній установці UTM-20НТ [72] відповідно до СОУ 56-37-2021. Ідентування проводили кулькою з карбиду вольфраму діаметром 2,5 мм у макродіпазоні навантажень. Розрахунок характеристик міцності виконували за параметром локального

опору пластичній деформації згідно з СОУ 56-38-2021 за методикою, наведеною в підрозділі 2.3.

На рис. 4.4 наведено розподіл твердості за Брінеллем у стикових зварних з'єднаннях сталі 09Г2С, виміряної твердоміром ТШ-2 ($\square$, $\diamond$) та методом інструментованого індентування ($\bullet$).

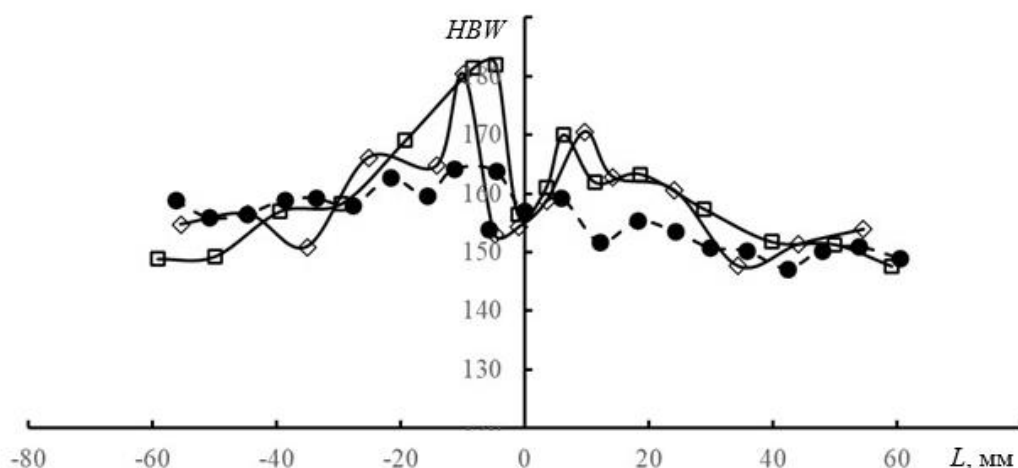


Рис. 4.4 – Розподіл твердості за Брінеллем у стикових зварних з'єднаннях сталі 09Г2С, виміряної твердоміром ТШ-2 ($\square$, $\diamond$) та методом інструментованого індентування ($\bullet$). Нуль — середина зварного шва.

Встановлено, що розподіл твердості в поперечному перерізі з'єднання має виражений змінний характер: від мінімальних значень в основному металі показники зростають через зону термічного впливу до максимальних у центрі зварного шва, після чого спостерігається їх симетричне зниження. Збільшення твердості металу шва відносно основного металу становить близько 19 %, тоді як у біляшовній зоні — до 11 %. Ширина ЗТВ складає приблизно 30 мм у кожен бік від середини шва. При цьому твердість, визначена на бічній поверхні зразків, добре узгоджується зі значеннями, отриманими на поверхні листового прокату, що свідчить про відсутність суттєвого впливу поверхневого фактора на результати вимірювань.

Розраховані за результатами індентування значення границі міцності зварного з'єднання знаходяться в межах 540–616 МПа, що перевищує відповідні показники основного металу (514–542 МПа). Для верифікації розрахункових даних на рис. 4.5 наведено результати випробувань на розтяг мікророзразків (Δ , $\circ$, $\square$), вирізаних із різних структурних зон зварного з'єднання. Отримано добру збіжність експериментальних та розрахункових значень: відхилення не перевищує 10 %.

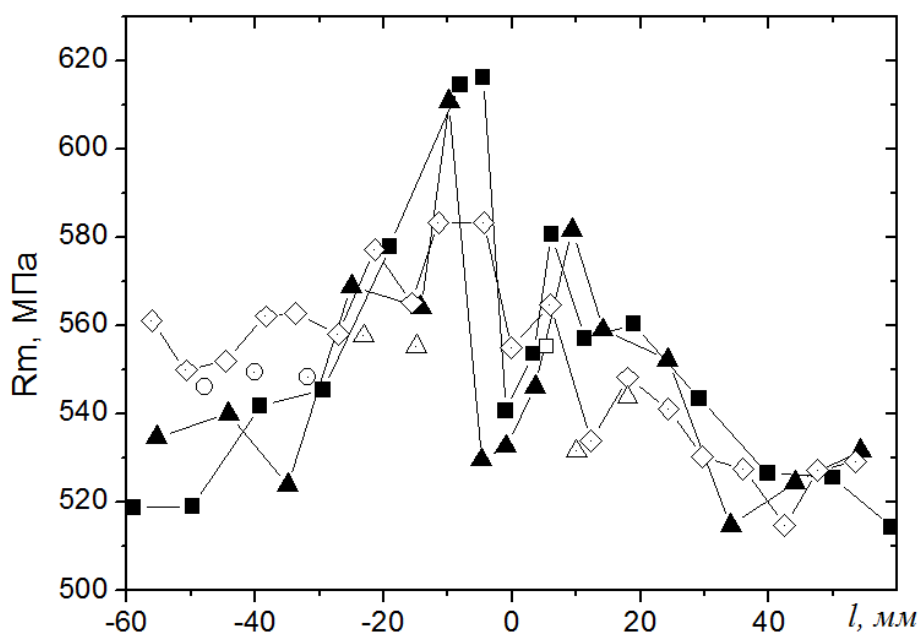


Рис. 4.5 – Розподіл величин границі міцності вздовж стикового зварного з'єднання з сталі 09Г2С, що розраховані за результатами вимірювання твердості за Брінеллем з використанням стандарту [20] ($\blacktriangle$, $\blacksquare$) і за результатами випробувань на розтяг, що були вирізані з різних зон стикового зварного з'єднання (Δ , $\circ$, $\square$). Нуль – середина зварного шва.

Важливим підтвердженням достовірності методики є те, що мінімальні значення механічних характеристик, визначені методом інструментованого індентування, локалізуються в тих самих зонах, де під час випробувань на розтяг відбувається руйнування макророзразків. Експериментально встановлено, що руйнування всіх повномасштабних зразків відбувалося в

основному металі, що свідчить про підвищену міцність металу шва та ЗТВ і, відповідно, про високу якість виконання зварного з'єднання.

Аналіз результатів також показав, що розподіл локальних механічних властивостей формується під впливом як термічного циклу зварювання, так і анізотропії властивостей прокатної сталі. Це обумовлює доцільність урахування орієнтації матеріалу та структурної неоднорідності під час оцінювання технічного стану зварних з'єднань мостових конструкцій.

Таким чином, проведений контроль з урахуванням анізотропії механічних характеристик підтвердив ефективність методу інструментованого ідентування для діагностики зварних з'єднань мостових сталей. Комплексне підтвердження результатів ідентування даними випробувань мікро- та макрозразків на розтяг дозволяє рекомендувати запропоновану методику для експрес-оцінювання якості зварювання і моніторингу локальної деградації металу під час експлуатації мостових конструкцій.

4.3 Оцінка деградації механічних характеристик металу живильного трубопроводу АЕС з урахуванням експлуатаційних впливів і структурної неоднорідності

Застосування одного виду випробувань для визначення механічних характеристик без попереднього детального аналізу і розуміння впливу різних факторів на їх значення несе в собі ризик внесення значних похибок в отримані результати. До таких факторів можна віднести умови виробництва та експлуатації, анізотропію матеріалу та інші. Щоб уникнути зазначених вище ризиків використовується комплексний підхід до визначення поточного стану фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів в умовах експлуатації [149]. Це підвищує точність та обґрунтованість отриманих даних.

Для реалізації системного підходу оцінки поточного стану фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів відповідального обладнання в якості модельного матеріалу вибрано трубопровідну сталь 20 як у стані поставки, так і після напрацювання в умовах експлуатації. Темплети для виготовлення зразків вирізали з труби Ду 426 мм трубопроводу живильної води парогенератора під час виконання реконструктивних робіт після напрацювання 100000 циклів і з такої ж труби у стані поставки.

Випробування проводили на обладнанні Інституту. Для випробування на розтяг стандартних зразків і мікрозразків застосовувалась сервогідравлічна установка BISS-202V. Випробування методом інструментованого ідентування [105] проводили на лабораторній установці UTM-20НТ [72]. Твердість за Брінеллем [20] вимірювали портативним твердоміром Computest SC, стаціонарним твердоміром ТШ-2 і установкою UTM-20НТ.

Металографічні дослідження проводили на оптичному інвертованому мікроскопі «AXIOVERT 40MAT» з програмним забезпеченням ZEN core v3.1 з фіксацією мікроструктур цифровою фотокамерою AXIOCAM 305 при збільшеннях в діапазоні 50...500×

За допомогою методу *LM*-твердості [39] визначали гомогенність структури, як один з параметрів оцінки стану структури матеріалу. Метод базується на вимірюванні параметрів розсіювання значень твердості при масових випробуваннях [37, 47].

Спочатку випробовували на одновісний розтяг стандартні зразки відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019 [24]. Заготовки для зразків вирізались в двох ортогональних напрямках: вздовж труби та в тангенціальному напрямку таким чином, щоб робоча частина зразка припадала на середину товщини стінки труби (рис. 4.6). Зразки виготовлялись п'ятикратними з діаметром робочої частини 5 мм (рис. 4.7). Визначалися границі міцності і плинності та відносне видовження.

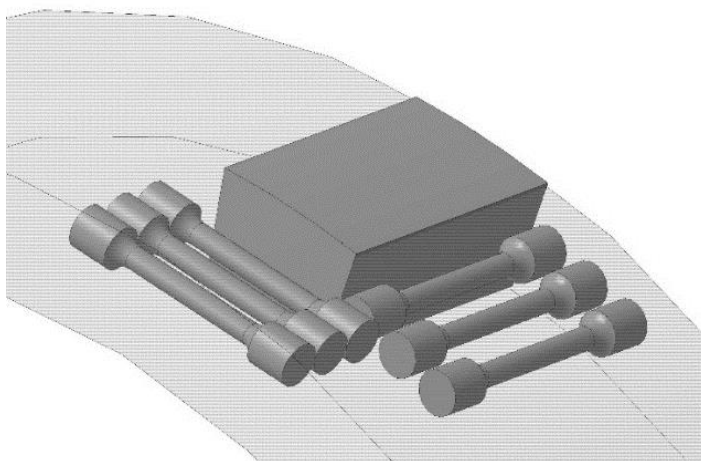


Рис. 4.6 – Схема вирізання заготовок стандартних зразків для випробувань на одновісний розтяг.

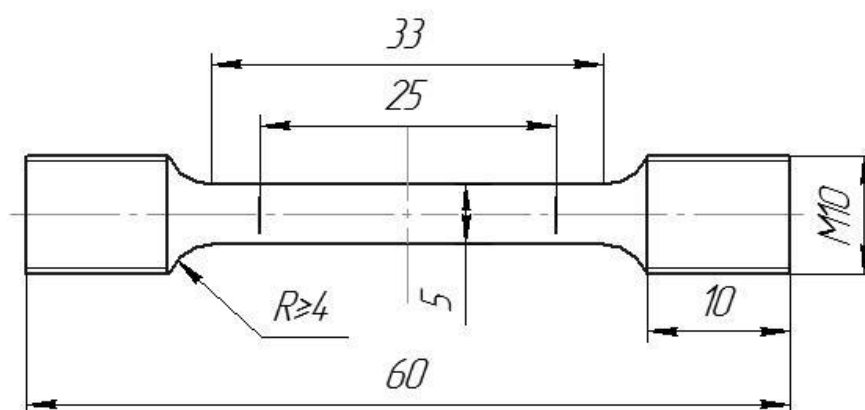


Рис. 4.7 – Стандартний зразок для випробувань на одновісний розтяг.

Діаграми деформування стандартних зразків і визначені механічні характеристики приведені на рис. 4.8 і в табл. 4.4.

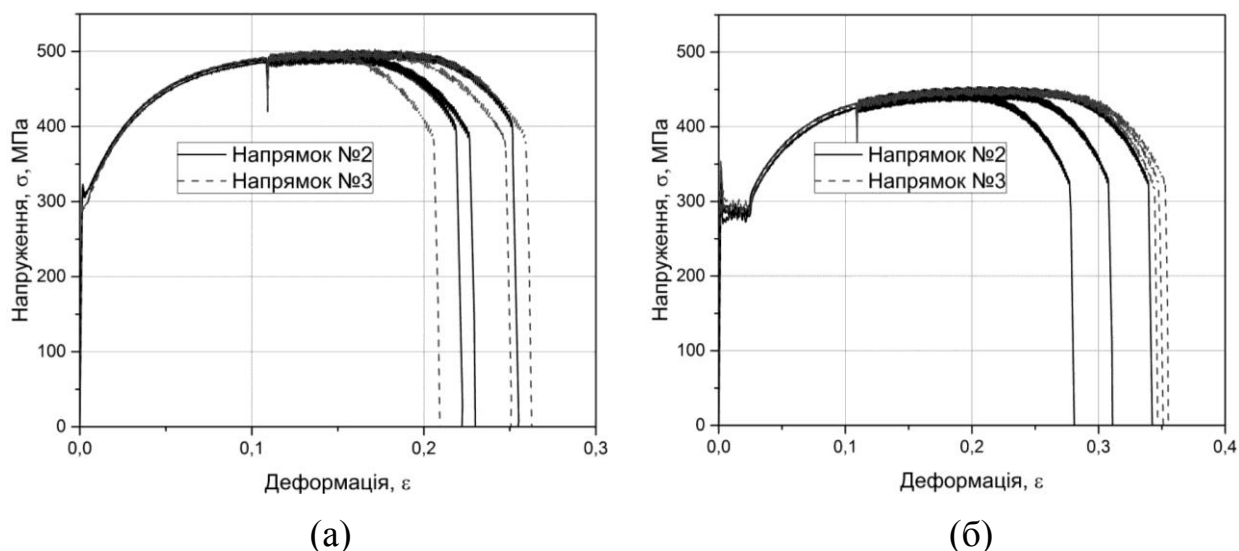


Рис. 4.8 – Діаграми деформування стандартних зразків на одновісний розтяг із сталі 20 з напрацюванням (а) та в стані поставки (б).

Таблиця 4.4 – Механічні характеристики випробувань на розтяг трубної сталі 20 у двох напрямках, з напрацюванням і в стані поставки

Матеріал	Напрямок	Характеристики		
		Границя міцності, σ_b , МПа	Границя плинності, $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %
З напрацюванням	Вздовж труби	492,2	310,8	23,5
	Тангенціальний	495,3	291,2	24,0
У стані поставки	Вздовж труби	443,7	283,2	31,0
	Тангенціальний	447,0	291,7	35,0

З табл. 4.4 видно, що механічні характеристики на розтяг мають близькі значення у обох напрямках і можна зробити припущення, що матеріал обох труб є однорідним.

Далі було проведено вимірювання твердості за Брінеллем стаціонарним твердоміром ТШ-2 і лабораторною установкою UTM-20НТ на зовнішній та внутрішній поверхнях труб. Зразки для вимірювання твердості вирізали за

схемою, що показана на рис. 4.9. Шорсткість поверхні робочої частини R_z складала 0,25 мкм.

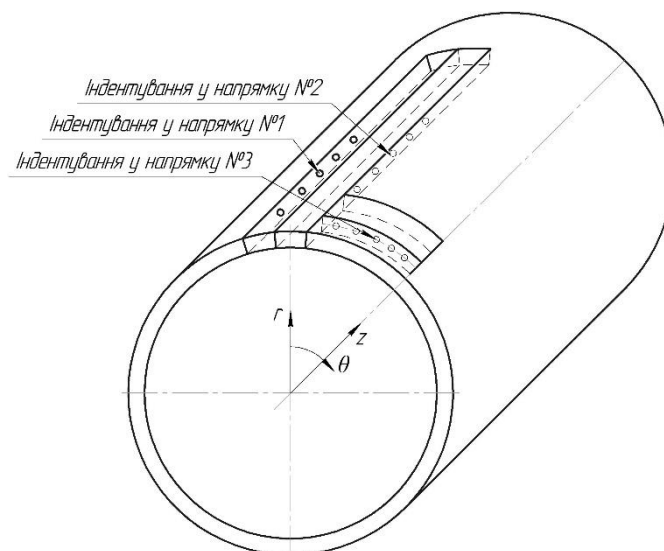


Рис. 4.9 – Схема вирізання заготовок зразків для випробувань на твердість за Брінеллем із темплетів труб із сталі 20.

Результати вимірювання твердості за Брінеллем стандартним методом [20, 57] і інструментованим індентуванням [61] на зовнішній та внутрішній поверхнях труб з сталі 20 у двох станах представлені в табл. 4.5 і 4.6.

Таблиця 4.5 – Значення твердості HBW сталі 20 після напрацювання, що отримані стандартним методом [20] і методом інструментованого індентування [105]

№ відбитку	Зовнішня поверхня труби		Внутрішня поверхня труби	
	ТШ-2 [20]	UTM-20НТ [105]	ТШ-2 [20]	UTM-20НТ [105]
1	176,9	173,2	166,4	175,8
2	166,7	168,6	164,0	183,5
3	181,1	160,0	166,4	169,2
4	172,0	155,7	163,4	185,1
5	160,0	166,3	166,1	168,1
Середнє	171,3	164,8	165,2	176,3

Таблиця 4.6 – Значення твердості *HBW* сталі 20 у стані поставки, що отримані стандартним методом [20] і методом інструментованого ідентування [105]

№ відбитку	Зовнішня поверхня труби		Внутрішня поверхня труби	
	ТШ-2 [20]	УТМ-20НТ [105]	ТШ-2 [20]	УТМ-20НТ [105]
1	131,5	127,5	125,2	126,6
2	129,2	126,7	126,6	128,3
3	126,7	127,5	130,3	130,5
4	131,4	127,8	126,8	130,6
5	129,8	128,6	130,9	127,1
Середнє	129,7	127,6	128,0	128,6

З представлених даних видно, що більший розкид значень твердості в сталі з напрацюванням (від 160 до 181,1 одиниць по зовнішній поверхні труби за вимірювання твердоміром ТШ-2) порівняно зі сталлю у стані поставки (від 126,7 до 131,5 одиниць по зовнішній поверхні труби за вимірювання твердоміром ТШ-2) незалежно від методу визначення.

Використовуючи отримані значення твердості, визначали гомогенність структури матеріалу труб, яку покладено в основу методу *LM*-твердості [39, 60], що базується на вимірюванні параметрів розсіювання значень твердості [37, 47].

Показники розсіювання характеристик твердості обраховували на зовнішній та внутрішній поверхнях труб (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Показники розсіювання *m* характеристик твердості сталі 20 у різних станах

Область труби	Коефіцієнт гомогенності <i>m</i> сталі 20	
	з напрацюванням	у стані поставки
Зовнішня поверхня	19,2	37,6
Внутрішня поверхня	38,3	35,0

Дані випробувань вказують на те, що структура сталі 20 з напрацюванням менш однорідна ніж сталі 20 у стані поставки.

Використовуючи значення твердості за Брінеллем визначених на зовнішній та внутрішній поверхнях труб, було розраховано границі міцності, границі плинності і відносні видовження. Для цього застосовано кореляційні залежності [63, 59]. Отримані значення та їх відхилення від даних одновісного розтягу наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Механічні характеристики трубної сталі 20 у різних станах, що визначені за методиками [59], та їхнє відхилення від характеристик на одновісний розтяг.

Стан матеріалу	Поверхня труби	[63]	Відхилення, %	[59]	Відхилення, %
Границя міцності σ_b , МПа					
З напрацюванням	зовнішня	584,6	18,0	545,3	10,2
	внутрішня	566,5	14,4	584,7	18,0
У стані поставки	зовнішня	462,9	3,6	421,6	-5,7
	внутрішня	457,8	2,4		
Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа					
З напрацюванням	зовнішня	407,5	39,9	-	-
	внутрішня	386,8	32,8	-	-
У стані поставки	зовнішня	278,9	-4,4	-	-
	внутрішня	275,1	-5,7	-	-
Відносне видовження δ , %					
З напрацюванням	зовнішня	19,1	-20,6	-	-
	внутрішня	19,7	-17,8	-	-
У стані поставки	зовнішня	24,9	-28,8	-	-
	внутрішня	25,2	-28,0	-	-

Як видно з представлених даних відхилення границі міцності, границі плинності та відносного видовження для сталі 20 з напрацюванням

перевищують допустимі межі їх визначення, що зазначені у документах [63, 68], тоді як для сталі 20 у стані поставки не виходять за допустимі межі.

Причини значного відхилення можуть бути різні – це і похибки вимірювання твердості, недосконалі кореляційні залежності, неточності при виготовленні та випробуванні зразків на розтяг чи інші. В проведених дослідженнях цього старалися уникнути. Найбільш імовірною причиною таких розбіжностей є неоднорідність властивостей матеріалу в різних напрямках і об'ємах, оскільки зразки на одновісний розтяг вирізались з центральної частини стінки труби у двох напрямках: вздовж труби і в тангенціальному, а вимірювання твердості і індентування виконували на зовнішній та внутрішній поверхнях вздовж труби (див. рис. 4.9).

Для підтвердження або спростування цієї причини було проведено додаткові дослідження. Вимірювали твердість за Брінеллем по товщині стінок труби. Для цього були виготовлені прямокутні зразки. Твердість вимірювали портативним твердоміром Computest SC, стаціонарним твердоміром ТШ-2 і на установці УТМ-20НТ від внутрішньої до зовнішньої поверхні зразка як з торцевої сторони, так і на його бічній поверхні. Торцева поверхня зразка відповідала торцевій поверхні труби.

Індентування проводилось по лінії, яка знаходилась під кутом до радіального напрямку труби, що дало можливість виконати вимоги нормативних документів щодо відстані між відбитками та забезпечити їх достатню кількість.

На рис. 4.10 і 4.11 представлені результати вимірювання твердості за Брінеллем різними твердомірами по товщині стінки труб в обох станах від внутрішньої до зовнішньої поверхонь відповідно на бічній і торцевій поверхнях зразка.

Як видно з рисунків, твердість по товщині труби із сталі 20 у стані поставки знаходиться приблизно на одному рівні зі своїми значеннями для кожного твердоміра. Для сталі 20 з напрацюванням в центральній частині стінки труби її значення складають близько 150 *HBW* і зростають при

наближенні до внутрішньої або зовнішньої поверхні сягаючи 170–180 HBW відповідно. Описаний характер зміни твердості по товщині труби притаманний для двох описаних напрямків вимірювання.

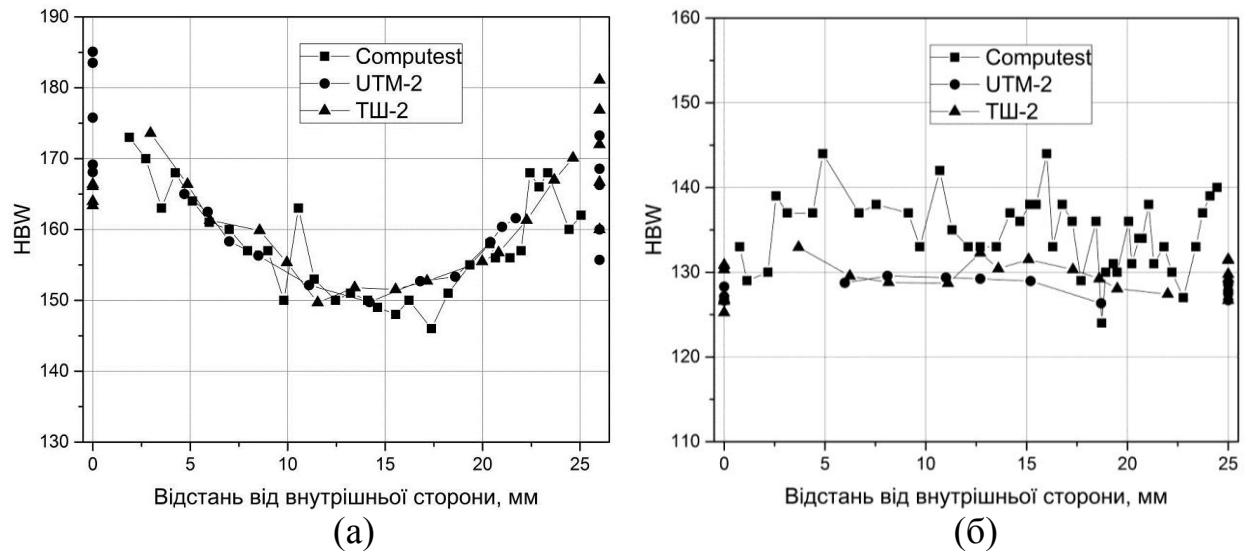


Рис. 4.10 – Значення твердості за Брінеллем від внутрішньої до зовнішньої поверхні стінки труби із сталі 20 з напрацюванням (а) та в стані поставки (б) на бічній поверхні зразка.

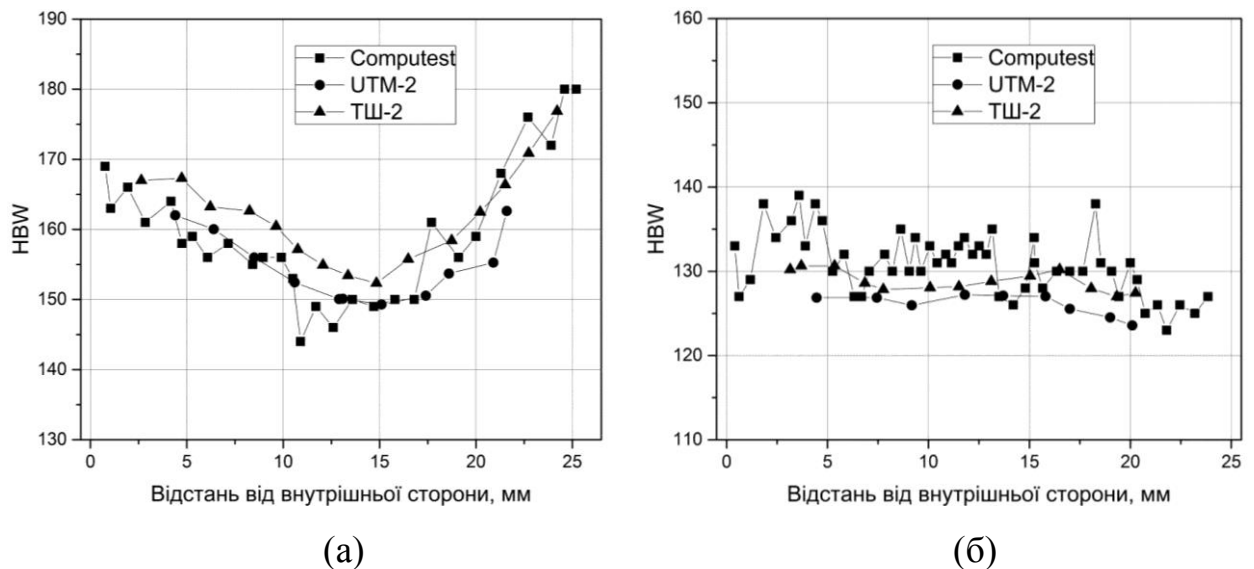


Рис. 4.11 – Значення твердості за Брінеллем від внутрішньої до зовнішньої поверхонь стінки труби із сталі 20 з напрацюванням (а) та в стані поставки (б) на торцевій поверхні зразка.

Такий характер може спостерігатися не тільки в розподілі твердості по товщині труби, а й інших характеристик.

Тому щоб визначити локальні механічні характеристики за розтягу по товщині було виготовлено і випробувано мікроразки на розтяг зі сталі 20 як з напрацюванням, так і в стані поставки.

Заготовки для мікроразків товщиною 1 мм (рис. 4.12) вирізались вздовж поздовжньої осі труби, як показано на рис. 4.13.

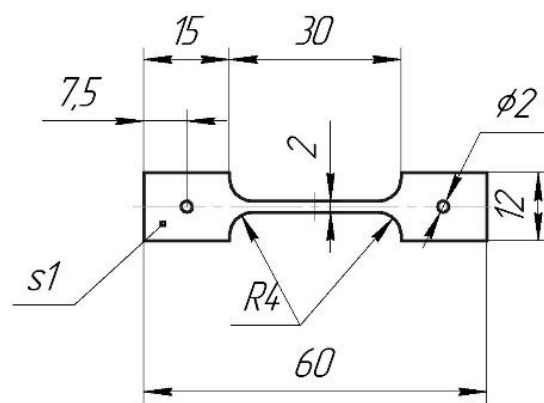


Рис. 4.12 – Креслення мікроразка зі сталі 20 для випробувань на одновісний розтяг.

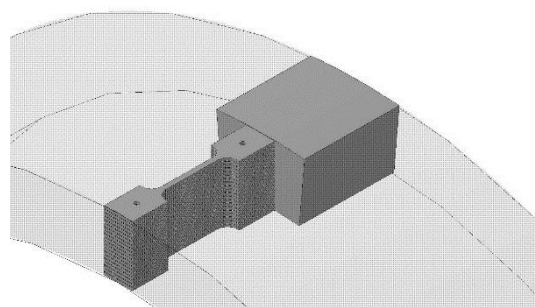


Рис. 4.13 – Схема вирізання заготовок мікроразків з труби для випробувань на одновісний розтяг.

На рис. 4.14 відображено візуальне співставлення розмірів і розташування вирізаних стандартних зразків і мікрозразків, відбитків вимірювання твердості за Брінеллем твердомірами Computest SC, ТШ-2 та UTM-20НТ по товщині труби.

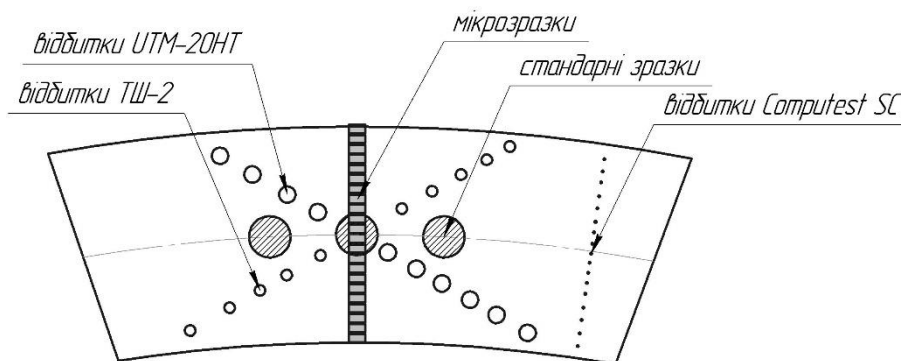


Рис. 4.14 – Схема розташування по товщині труби відбитків вимірювання твердості за Брінеллем різними твердомірами (Computest SC, ТШ-2 і UTM-20НТ) на темплеті труби з сталі 20 по відношенню до вирізаних стандартних зразків і мікрозразків.

На представлених нижче рисунках за результатами випробувань стандартних зразків і мікрозразків на розтяг, на твердість за Брінеллем, інструментованим індентуванням наведені значення границь міцності (рис. 4.15 і 4.16), плинності (рис. 4.17 і 4.18) та відносного видовження (рис. 4.19 і 4.20) визначених по товщині стінки обох труб в різних станах від внутрішньої до зовнішньої поверхонь як з торцевої сторони, так і на бічній поверхні відповідно. Значення механічних характеристик, отриманих за нормативними документами [63, 68], визначено з випробувань на твердість за Брінеллем, що отримані стаціонарним твердоміром і інструментованим індентуванням,

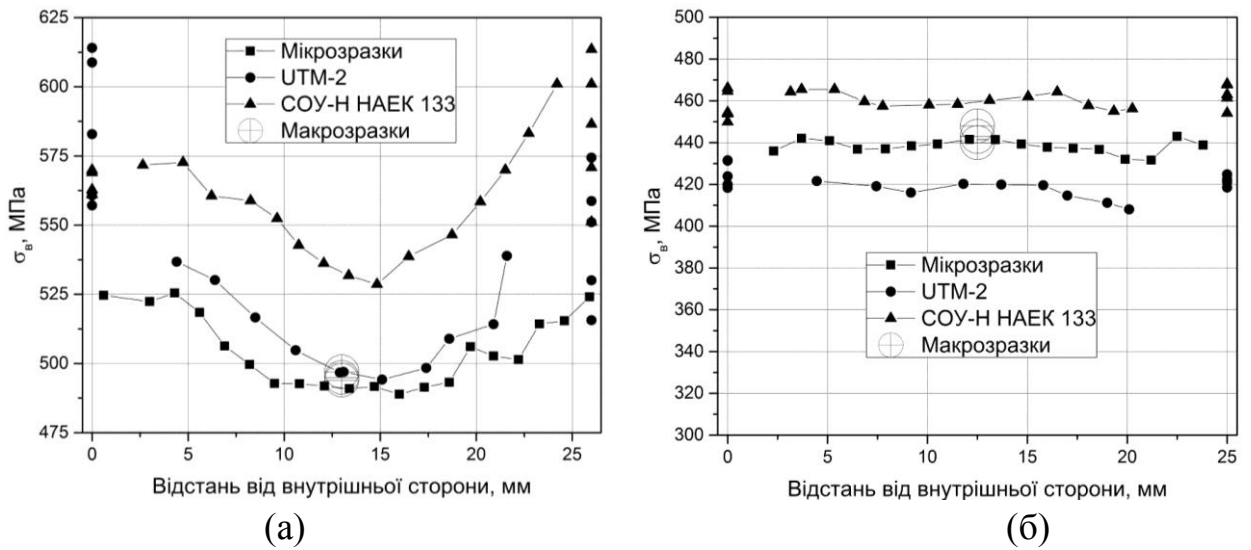


Рис. 4.15 – Розподіл границі міцності по товщині стінки труби із сталі 20 на торцевій поверхні зразка з напрацюванням (а) та в стані поставки (б).

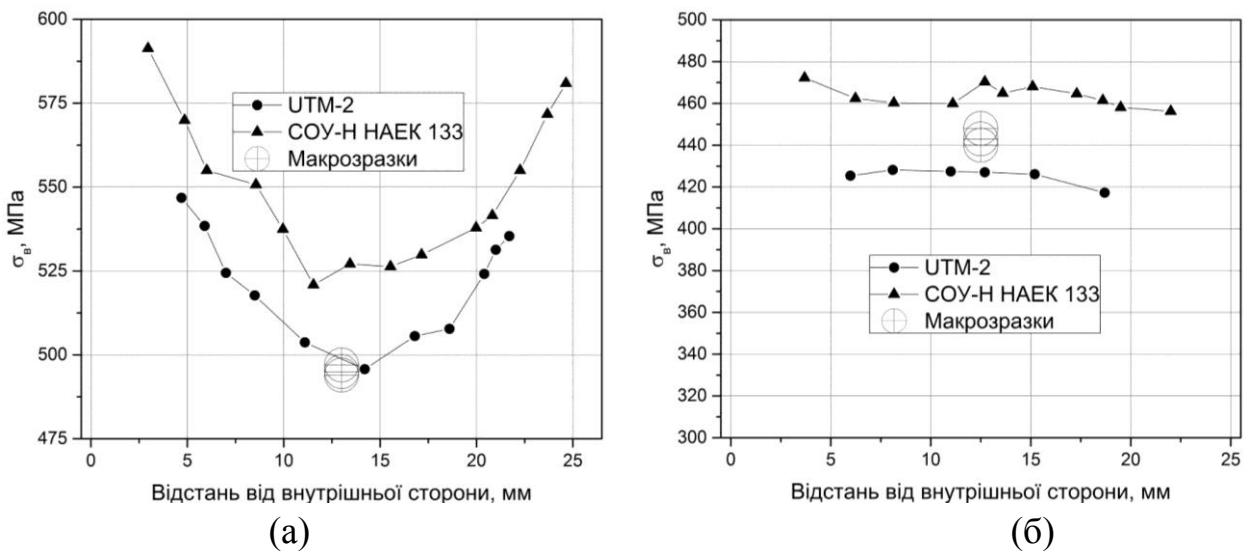
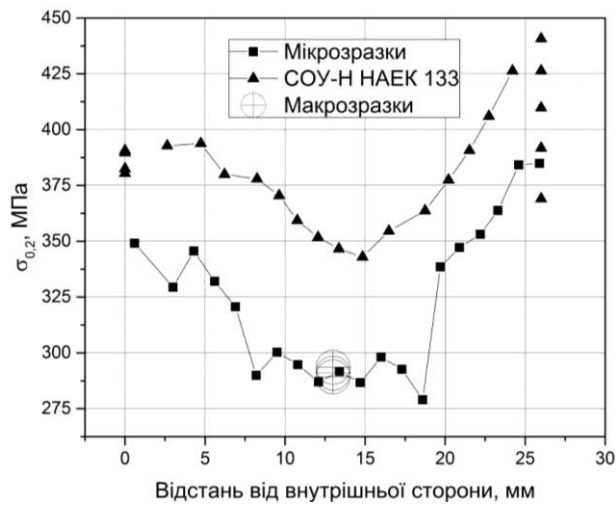
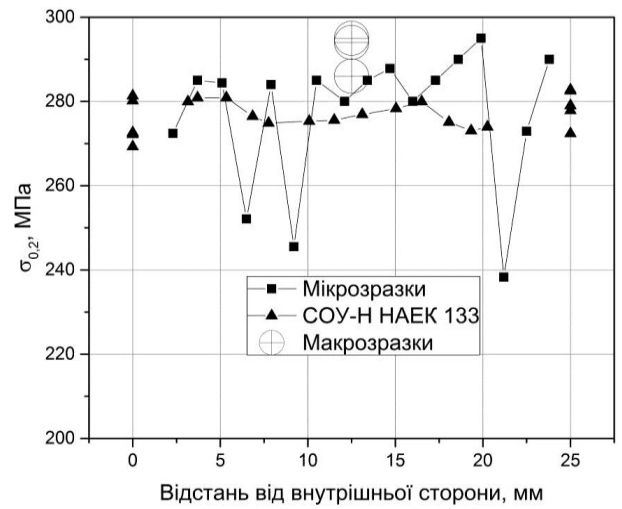


Рис. 4.16 – Розподіл границі міцності по товщині стінки труби із сталі 20 на бічній поверхні зразка з напрацюванням (а) та в стані поставки (б).

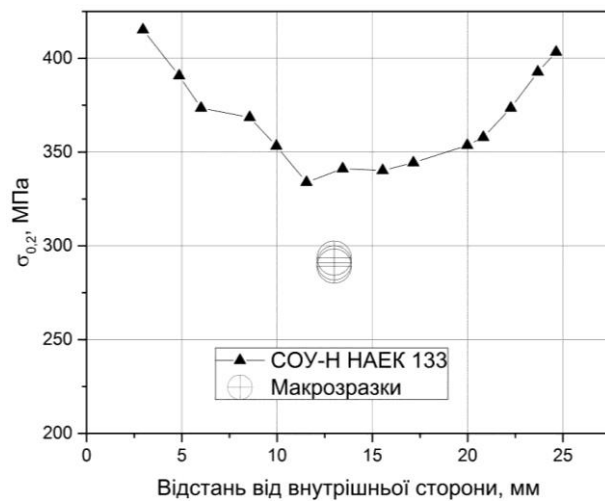


(а)

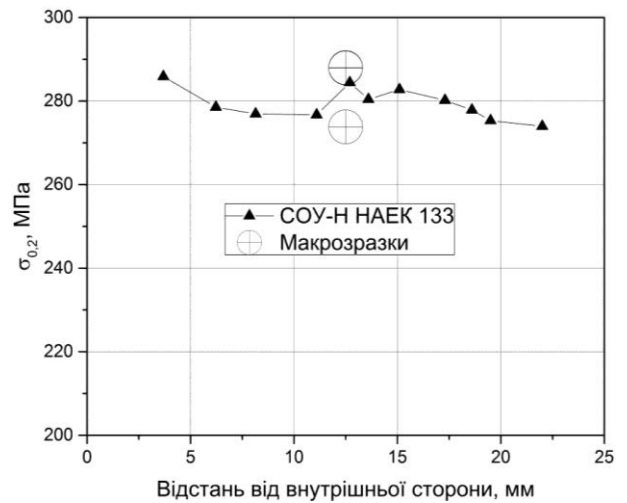


(б)

Рис. 4.17 – Розподіл границі плинності по товщині стінки труби із сталі 20 на торцевій поверхні зразка з напрацюванням (а) та в стані поставки (б).

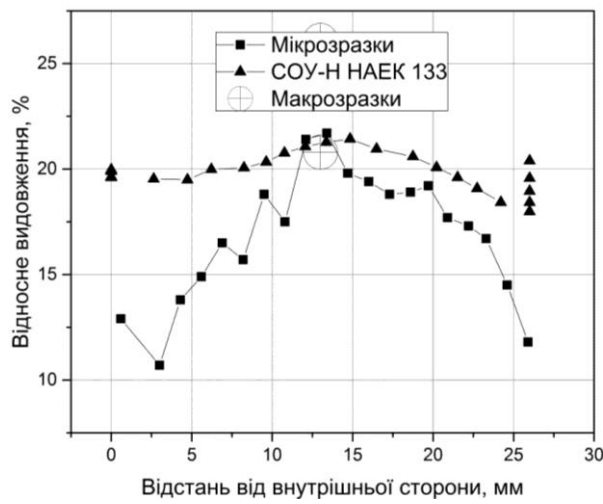


(а)

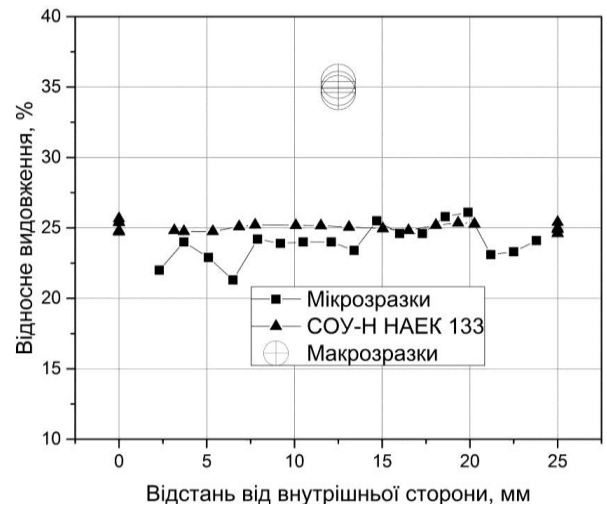


(б)

Рис. 4.18 – Розподіл границі плинності по товщині стінки труби із сталі 20 на бічній поверхні зразка з напрацюванням (а) та в стані поставки (б).

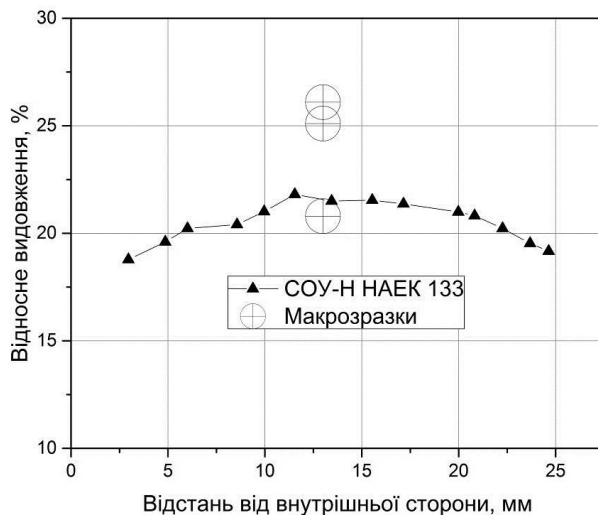


(а)

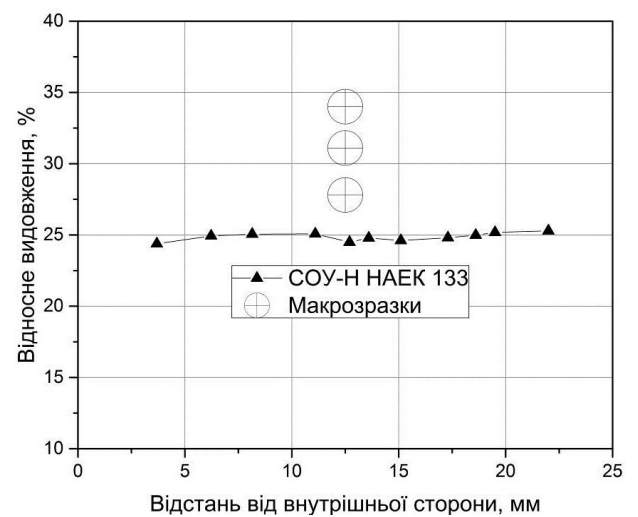


(б)

Рис. 4.19 – Розподіл відносного видовження по товщині стінки труби із сталі 20 з напрацюванням (а) та в стані поставки (б) на торцевій поверхні зразка.



(а)



(б)

Рис. 4.20 – Розподіл відносного видовження по товщині стінки труби із сталі 20 з напрацюванням (а) та в стані поставки (б) на бічній поверхні зразка.

Як видно з рис. 4.15–4.20, значення механічних характеристик сталі 20 з напрацюванням змінюються по товщині стінки труби. Границі міцності і плинності біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь мають вищі значення у порівнянні з центральною частиною на 10–30%, тоді як відносне звуження – навпаки ближче до зовнішньої та внутрішньої поверхонь мають нижчі значення у порівнянні з центральною частиною на 10–40% в залежності від методу визначення. Можна зробити висновок, що ближче до поверхонь пластичність зменшується, а міцність збільшується. Слід зазначити, що значення механічних характеристик на розтяг по товщині як з торцевої поверхні, так і бічної поверхні зразка, біля внутрішньої і зовнішньої поверхонь близькі до значень, які отримані на цих поверхнях методом інструментованого індентування. А значення механічних характеристик, що розраховані за нормативними документами [59, 63] за твердістю по Брінеллю чи інструментованим індентуванням, у порівнянні з даними випробувань мікророзривів на розтяг, знаходяться в межах допустимої похибки, що регламентована цими документами.

На відміну від сталі з напрацюванням значення механічних характеристик по товщині стінки труби сталі 20 у стані поставки майже не змінюються. Границі міцності та плинності, а також відносне видовження біля до зовнішньої та внутрішньої поверхонь незначно відрізняються у порівнянні з центральною частиною, тобто матеріал практично однорідний. Це підтверджують раніше отримані дані на цих поверхнях при індентуванні незалежно від методу дослідження. Значення механічних характеристик, що визначено за твердістю по Брінеллю чи інструментованим індентуванням за нормативними документами [59, 63], у порівнянні з даними випробувань мікророзривів на розтяг знаходяться в межах допустимої похибки цих документів.

Окремо слід відзначити, що відхилення значень механічних характеристик які отримано з випробувань на розтяг мікророзривів, у порівнянні з механічними характеристиками стандартних зразків в

центральної частині стінки труби зі сталі 20 в обох станах лежать в межах декількох відсотків.

Додатково було визначено показники розсіювання характеристик твердості сталі 20 у різних станах поставки в різних зонах та напрямках досліджуваних зразків як показано на рис. 4.21 [49, 60]. Значення показників розсіювання характеристик твердості сталі 20 представлено в табл. 4.9.

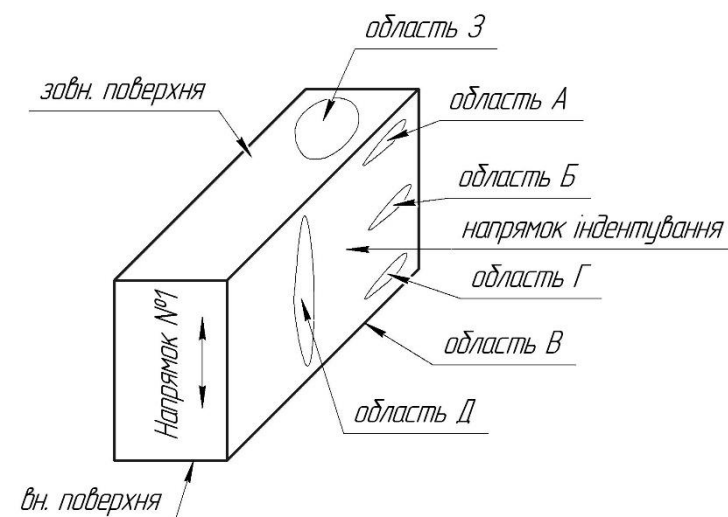


Рис. 4.21 – Зони та напрямки індуентування на зразках при визначенні показників розсіювання характеристик твердості за Брінеллем.

Таблиця 4.9 – Показники розсіювання характеристик твердості сталі 20 у різних станах поставки, різних зонах і напрямках індуентування.

Область індуентування	З напрацюванням		У стані поставки	
	Бічна поверхня	Торцева поверхня	Бічна поверхня	Торцева поверхня
З	19,2		37,6	
А	50,3	47,8	30,9	46,8
Б	69,7	64,1	48,3	53,5
Г	61,1	69,0	29,1	52,3
Д	23,9	18,5	35,3	42,1
В	38,3		35,0	

Значення показників розсіювання характеристик твердості сталі 20 з напрацюванням (табл. 4.9) також вказують на те що матеріал по товщині (область Д) та на зовнішній (область З) і внутрішній (область В) поверхнях – не однорідний, тоді як при індентуванні вздовж певних шарів (області А, Б та Г) мають значно вищу однорідність. Такі результати свідчать про те, що розподіл механічних властивостей по товщині труби має системний шаруватий характер, а не є якимось локальним явищем.

Показники розсіювання характеристик твердості сталі 20 у стані поставки мають відносно співставні значення незалежно від області та напрямку індентування, тобто, матеріал в основному однорідний.

На підтвердження шаруватого характеру розподілу механічних властивостей по товщині труби із сталі 20 з напрацюванням було проведено металографічні дослідження.

Мікрошліф для металографічних досліджень виготовляли на установці “Alpha&Beta” (виробник ТМ BUEHLER) за стандартною методикою (не допускаючи нагартування та перегріву) з подальшим виявленням макро- та мікроструктури методом хімічного травлення в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті.

При дослідженні фрагментів труби зі сталі 20 з напрацюванням виявлено, що на зовнішній (ЗПТ) і внутрішній (ВПТ) поверхнях труби присутня окалина. Але, якщо ЗПТ вкрита тонким шаром окалини на тлі якої спостерігаються сліди корозійних пошкоджень (рис. 4.22), то утворення на ВПТ відзначається багатошаровістю з характерними слідами розтріскування в поздовжньому (осьовому) напрямку труби (рис. 4.23), що свідчить як про різні умови формування названих поверхневих шарів на ЗПТ і ВПТ, так і про різний напружений стан.

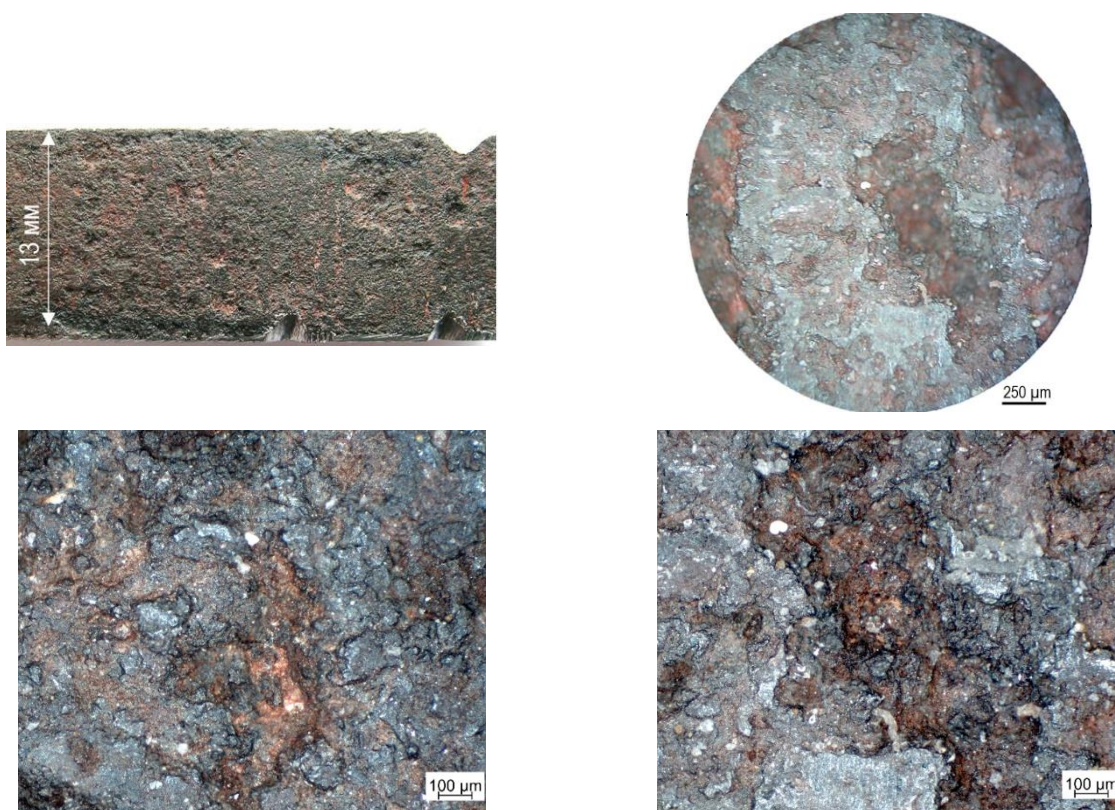


Рис. 4.22 – Характерний стан (морфологія) зовнішньої поверхні труби зі сталі 20 з напрацюванням при різних збільшеннях.

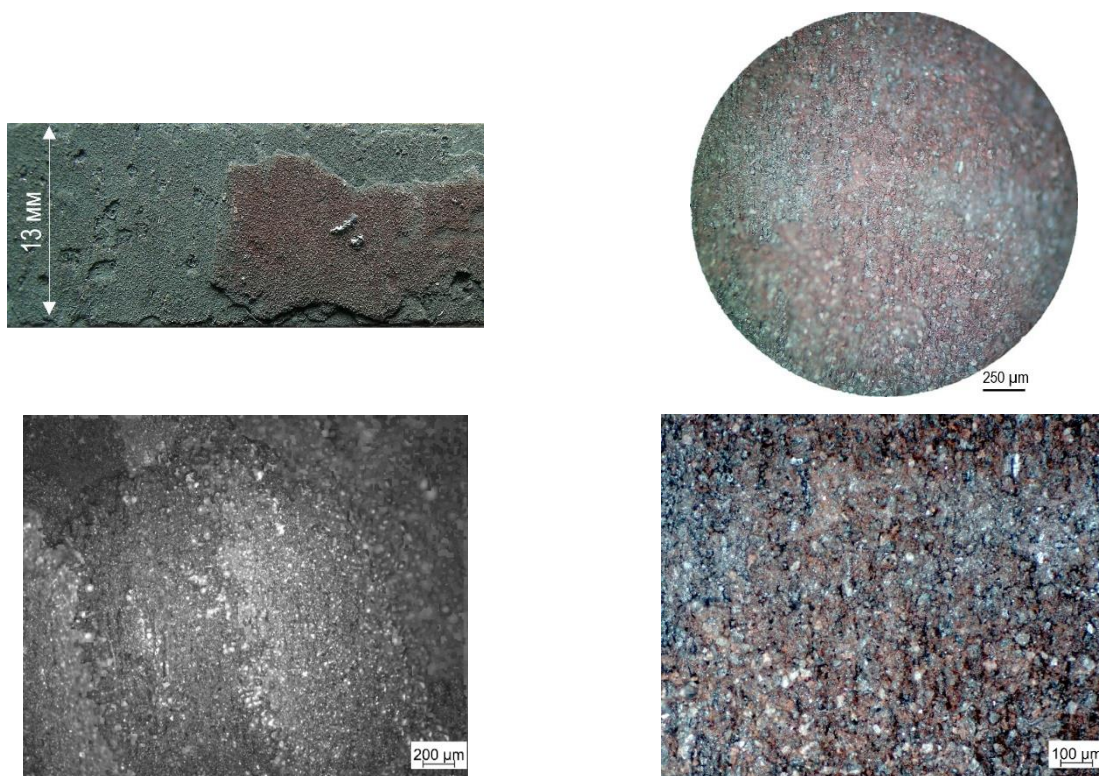
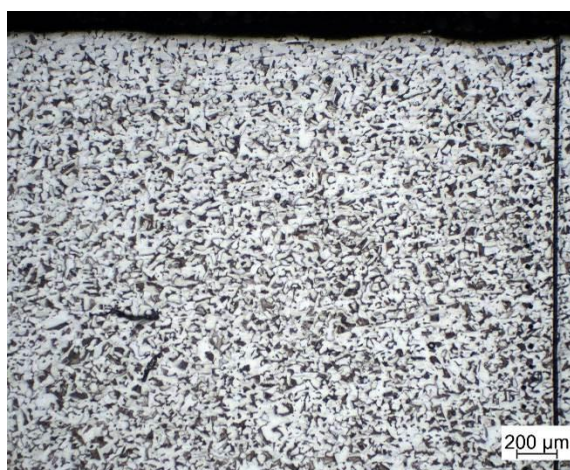


Рис. 4.23 – Характерний стан (морфологія) внутрішньої поверхні труби зі сталі 20 з напрацюванням при різних збільшеннях.

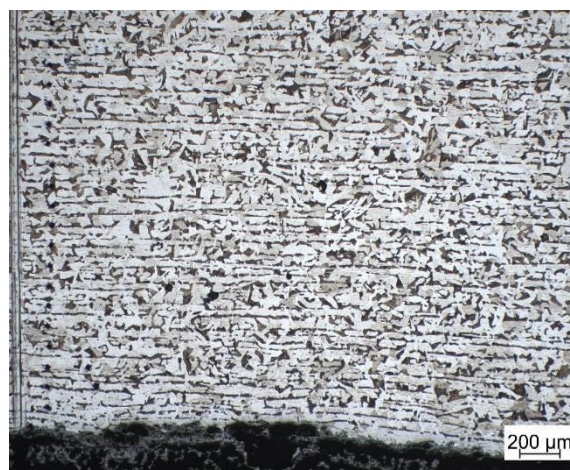
Металографічні дослідження показали, що вище осьової зони стінки труби ($\frac{1}{2} S$) мікроструктура ферито-перлітна (Ф+П) з хаотичним розподілом перлітних колоній різного розміру (рис. 4.24). Межі (границі) феритних зерен слабо виявляються при травленні на мікроструктуру. В структурі наявні як полігональні, так і неправильної форми зерна фериту з розміром в діапазоні 15...35 мкм. З віддаленням від ЗПТ зростає неоднорідність структури. З наближенням до осьової зони стінки труби дещо збільшується відсоток перліту зі збільшенням розмірів перлітних колоній. З наближенням до осьової зони можна спостерігати появу на бічній поверхні ланцюжків феритних зерен (елементів формування смугастості). Доля смугастої структури нижче осьової зони зростає і найбільш проявляється в біля ВПТ. Спостерігається ферито-перлітна смугастість зі зміною щільності смуг і зменшенням відсотку та розмірів перлітних колоній, хоча зустрічаються перлітні колонії, що не вписуються в перлітні смуги і розташовані хаотично. Крім вищенаведеного слід зазначити, що на відміну від структури металу між ЗПТ і $\frac{1}{2} S$ з незначною кількістю дрібнодисперсних неметалевих включень по тілу феритних зерен структура металу між ВПТ і $\frac{1}{2} S$ характеризується значним вмістом дрібнодисперсних неметалевих включень по тілу феритних зерен.

Результати металографічного аналізу труби зі сталі 20 з напрацюванням підтверджують неоднорідність структурного стану матеріалу труби, яка може бути обумовлена як технологією виготовлення, так і внаслідок експлуатації.

Отже, комплексний підхід з використання різних методик та обладнання для визначення поточного стану конструкційних матеріалів відповідального обладнання, дозволив значно підвищити обґрунтованість значень фізико-механічних характеристик, встановити характер та закономірності їх розподілу в конструктивному елементі і, тим самим, підвищити їх точність.



Біля ЗПТ



Біля ВПТ

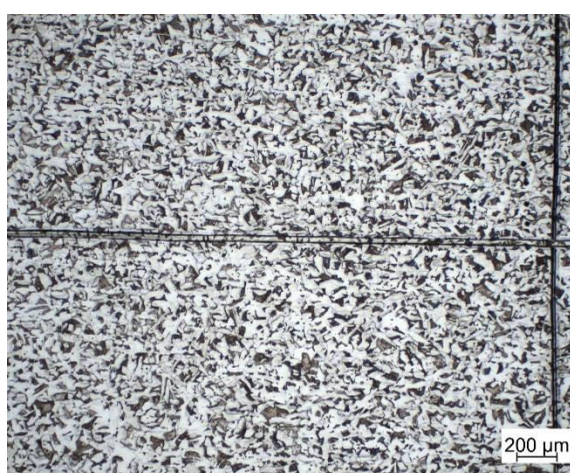
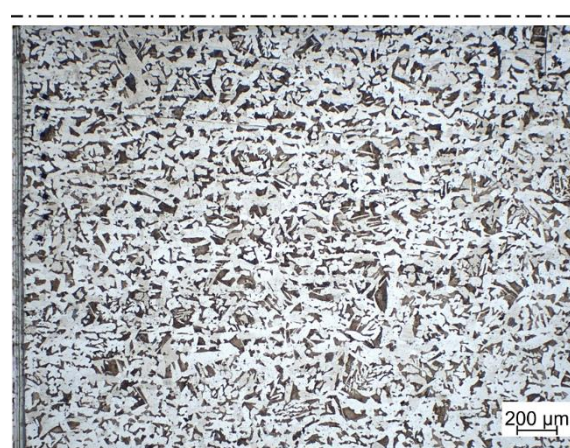
 $\frac{1}{4} S$  $\frac{3}{4} S$ Вище $\frac{1}{2} S$  $\frac{1}{2} S$

Рис. 4.24 – Фрагменти мікроструктури стінки труби зі сталі 20 з напрацюванням на ділянках, рівновіддалених від зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби відповідно.

Проведені дослідження показали необхідність зваженого підходу до отриманих значень механічних характеристик, особливо при оцінці стану матеріалів відповідального обладнання. Дані отримані при індентуванні лише зовнішньої поверхні труби зі сталі 20 з напрацюванням не відображали реальної картини розподілу механічних характеристик в різних напрямках, і могли призвести до занадто консервативних висновків, а при порівнянні з даними випробувань на одновісний розтяг стандартних зразків – виявити значні відхилення та спонукати до пошуку неіснуючих похибок. Так само і при розробці кореляційних залежностей між результатами випробувань на розтяг та іншими фізико-механічними величинами слід приділяти особливу увагу їх однорідності, особливо при відсутності достатньої інформації про технологію виготовлення чи історію експлуатації конструкції.

Підвищена міцність і занижена пластичність біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби з напрацюванням призводить до окрихчення поверхневого шару і подальшого його руйнування.

Висновки. Представлено комплексний підхід до оцінки поточного стану фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів відповідального обладнання за результатами випробувань на розтяг, індентування, вимірів твердості і показниками розсіювання. В якості модельного матеріалу вибрано трубопровідну сталь 20 в стані поставки і після напрацювання в умовах експлуатації.

Отримано механічні характеристики на розтяг стандартних зразків вирізаних з центральної частини стінки труби вздовж труби та в тангенціальному напрямку і такі ж механічні характеристики, які розраховано за значеннями твердості за Брінеллем та інструментованим індентуванням на зовнішній та внутрішній поверхнях труби за кореляційними залежностями [59, 63]. Порівняння механічних характеристик отриманих індентуванням з аналогічними на розтяг показали значні відхилення для сталі 20 з напрацюванням, що перевищують допустимі межі

їх визначення, тоді як для сталі 20 у стані поставки відхилення не виходили за допустимі межі. Це вказує на неоднорідність властивостей матеріалу в різних напрямках і об'ємах.

Проведено додаткові дослідження твердості за Брінеллем по товщині труби в напрямку від внутрішньої до зовнішньої поверхні зразка як з торцевої сторони, так і на бічній поверхні труби та випробування на одновісний розтяг мікророзривів вирізаних по товщині труби.

Встановлено, що механічні характеристики сталі 20 з напрацюванням змінюються по товщині стінки труби. Границі міцності та плинності біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь мають вищі значення у порівнянні з центральною частиною на 10–30%, тоді як відносне звуження – навпаки ближче до зовнішньої та внутрішньої поверхонь мають нижчі значення у порівнянні з центральною частиною на 10–40% в залежності від методу визначення. Значення механічних характеристик біля внутрішньої і зовнішньої поверхонь близькі до значень, які отримані на цих поверхнях методом інструментованого індентування. Значення механічних характеристик, що розраховані за нормативними документами [59, 63] за твердістю по Брінеллю чи інструментованим індентуванням, у порівнянні з даними випробувань мікророзривів на розтяг, знаходяться в межах допустимої похибки, що регламентована цими документами.

Підтверджено, що значення механічних характеристик по товщині стінки труби сталі 20 у стані поставки майже не змінюються, тобто матеріал практично однорідний. Значення механічних характеристик, що визначено за твердістю по Брінеллю і інструментованим індентуванням за нормативними документами [59, 63], у порівнянні з даними випробувань мікророзривів на розтяг знаходяться в межах допустимої похибки цих документів.

Відзначено, що відхилення значень механічних характеристик які отримано з випробувань на розтяг мікророзривів, у порівнянні з механічними характеристиками стандартних зразків з центральної частини стінки труби в обох станах лежать в межах декількох відсотків.

Підтверджено додатковими дослідженнями показників розсіювання характеристик твердості сталі 20 у різних станах поставки в різних зонах та напрямках, а також проведеними металографічними дослідженнями матеріалу по товщині стінки труби з напрацюванням те, що розподіл механічних властивостей має системний шаруватий характер, а не є якимось локальним явищем для сталі 20 з напрацюванням, тоді як для сталі 20 у стані поставки вказують на відносну однорідність.

Результати представлених досліджень вказують на необхідність системного підходу до визначення механічних характеристик неруйнівними методами зокрема вимірювання твердості індентуванням.

4.4 Висновки за розділом 4

1. Запропоновані методики та відповідні нормативні документи впроваджено в практику контролю механічних властивостей сталей спеціального призначення на підприємствах «Техімпекс» та ПрАТ «НВО «Практика». На прикладі листових високоміцних легованих сталей Armoх 500Т і Мiіlux PRKT.UA проведено апробацію стандарту СОУ 56-36-2021 [57]. Для досліджуваних сталей встановлено товщину знеуглецьованого шару, отримано характер розподілу твердості по товщині зразків. Застосування методу інструментованого індентування сприяє підвищенню об'єктивності оцінювання механічних характеристик, зменшенню ймовірності постачання неякісної продукції, що є критично важливим для виробництва бронетехніки.

2. Розроблену методику індентування зварних з'єднань сталей (зокрема марки 09Г2С) успішно реалізовано на практиці. Показано, що індентування дозволяє виявляти локальні зміни механічних властивостей у зоні термічного впливу. Встановлено підвищену міцність металу в зоні шва, що підтверджує високу якість зварного з'єднання та високу інформативність

методу. Водночас застосування методики для поточного контролю стикових з'єднань потребує подальших досліджень щодо обґрунтування умов її використання.

3. Розроблено комплексний підхід до оцінювання поточного стану фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів відповідального обладнання на основі результатів випробувань на розтяг, ідентування та аналізу показників розсіювання твердості. Модельним матеріалом обрано трубопровідну сталь 20 у стані поставки та після експлуатаційного напруження.

4. Випробування стандартних зразків на одновісний розтяг, вирізаних у двох ортогональних напрямках, підтвердили близькість механічних характеристик у обох напрямках, що свідчить про структурну однорідність матеріалу труб у двох станах. Водночас вимірювання твердості за Брінеллем на зовнішній і внутрішній поверхнях труб показали значно більший розкид значень твердості для сталі після напруження, незалежно від методу визначення. Результати, отримані методом *LM*-твердості, також вказують на зниження однорідності структури сталі після експлуатації.

5. Дослідження твердості та випробування мікрорізків по товщині стінки труби показали, що для сталі 20 у стані поставки характеристики твердості та міцності залишаються стабільними по всій товщині. Для сталі 20 з напруженням спостерігається зростання цих характеристик при наближенні до зовнішньої та внутрішньої поверхонь.

6. Дослідження методом *LM*-твердості і металографічні дослідження сталі 20 з напруженням по товщині стінки труби підтвердили, що розподіл механічних властивостей має системний шаруватий характер, і не є локальним явищем.

Таким чином, отримані результати досліджень трубного прокату Ду 426 мм зі сталі 20 у двох станах засвідчують необхідність комплексного та системного підходу до визначення механічних характеристик за результатами вимірювань твердості за Брінеллем або інструментованим

індентуванням. При цьому необхідно враховувати просторову неоднорідність матеріалу, узгодженість зон випробувань і відтворюваність результатів, щоб уникнути спотворення оцінок механічних характеристик, невірного визначення залишкового ресурсу та можливих відмов під час експлуатації відповідального обладнання.

ЗАГАЛЬНІ 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 достовірність результатів, зокрема вплив знеуглецьованого шару. На її основі розроблено стандарт СОУ 56-36-2021 і отримано патент

України № 151934 від 05.10.2022 р. на спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей із застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем. 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 Armoх 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антикайн П. А., Рябова Л. И., Аксенов А. В. К оценке работоспособности паропроводов из перлитных сталей после длительной эксплуатации. *Пробл. прочности*. 1971. № 7. С. 9–14.
2. Антикайн П. А., Эстрин Б. М., Должанский П. Р., Рябова Л. И. Свойства металла паропроводов из сталей 12ХМ и 15ХМ после эксплуатации в течение 90–160 тыс. ч. *Теплоэнергетика*. 1973. № 8. С. 23–27.
3. Баженов В. Г., Зефиоров С. В., Осетров С. Л. Экспериментально-расчетный метод построения истинных диаграмм деформирования при больших деформациях на основе испытаний на твердость. *Доклады академии наук*. 2006. Т. 407, № 2. С. 183 – 185.
4. Бакиров М. Б., Зайцев М. А., Фролов И. В. Математическое моделирование процесса вдавливания сферы в упругопластическое полупространство. *Завод. лаб.* 2001. № 7. С. 37–47.
5. Бакиров, М. Б., Мишулина, О. А., Кисилев, И. А., Круглов, И. А. Исследование возможности восстановления диаграмм деформирования с помощью нейросетевого подхода. *Завод. лаб.* 2010. Т. 76, № 7. С. 42–48.
6. Бакиров, М. Б., Потапов, В. В. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора. *Заводская лаборатория*. 2000. Т. 66, № 12. С. 35-44.
7. Бакиров М. Б. Потапов В. В., Фролов И. В. Разработка расчетно-экспериментальных методик получения механических характеристик на основе метода кинетического индентирования. *Мир измерений*. 2006. № 8. С. 5–11.
8. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. *Дефектоскопия*. 2000. № 10. С. 3–28.

9. Богачев И. Н., Вайнштейн А. А., Волков С. Д. *Введение в статистическое металловедение*. – Москва: Металлургия, 1972. – 216 с.
10. Борисенко В. А. Твердость и прочность тугоплавких материалов при высоких температурах. – К.: Наук. Думка, 1984. – 212 с.
11. Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
12. Вігак В. М. Оптимальне управління нестационарними температурними режимами. – К.: Наук. думка, 1979. – 360 с.
13. Гопкало О. П., Гопкало О. Є., Земцов М. П., Коваленко Є. В., Бодунов В. Є. Експресна оцінка якості виготовлення гусеничних траків за результатами вимірювання коерцитивної сили. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2022. № 4. С. 33–40.
<https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.05>
14. Гопкало О. П., Нехотящий В. О., Безлюдько Г. Я., Кураш Ю. П., Соломаха Р. М. Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2019. № 4. С. 12–24.
<https://doi.org/10.15407/tdnk2019.04.02>
15. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. [Введ. 01. 01. 1960]. – М.: Стандартиформ, 2007. 38 с.
16. ГОСТ 22761–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. [Введ. 01.01. 1979]. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 10 с.
17. Давиденков Н. Н. Некоторые проблемы механики материалов. Л.: Ленингр. газ.-журн. и кн. изд-во, 1943. – 152 с.
18. Дзіоба І. Р. Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2010. № 3. С. 67–72.

19. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. – Москва: Металлургия, 1972. – 216 с.

20. ДСТУ EN ISO 6506-1:2019. Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування. (ДСТУ EN ISO 6506-1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT). [Чинний від 01.11.2019]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 12 с.

21. ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 2. Перевірення та калібрування випробувальних машин (EN ISO 6506-2:2018, IDT; ISO 6506-2:2017, IDT). [Чинний від 01.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 11 с.

22. ДСТУ EN ISO 6506-3:2017 Матеріали металеві. Вимірювання твердості за шкалою Брінелля. Частина 3. Калібрування еталонних мір твердості (EN ISO 6506-3:2014, IDT; ISO 6506-3:2014, IDT). [Чинний від 01.10.2017]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2017. 12 с.

23. ДСТУ EN ISO 6507-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на твердість за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування (EN ISO 6507-1:2018, IDT; ISO 6507-1:2018, IDT). [Чинний від 31.12.2023]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2023. 12 с.

24. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 75 с.

25. ДСТУ EN 10204-2001 Вироби металеві. Види документів контролю (EN 10204:1991+A1:1995, IDT). [Чинний від 01.07.2003]. Вид. офіц. Київ: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики. 2003. 9 с.

26. ДСТУ ISO 18265:2010 Металеві матеріали. Переведення значень твердості (ISO 18265:2003, IDT). З поправкою. [Чинний від 01.07.2012]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 67 с.

27. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафтогазопроводів / В. В. Панасюк, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, З. В. Слободян. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій* / За заг. ред. О. Є. Андрейківа, Й. Й. Лучка, В. В. Божидарника. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 537–546.

28. Иванов А. П. Переход к показателям прочности стали на растяжение по результатам испытаний методом «среза резьбы». *Сб. науч. тр.* Алчевск: ДГМИ, 1999. Вып. 9. С. 186–190.

[http://dorogimosti.org.ua/files/ upload/Cn_21.pdf](http://dorogimosti.org.ua/files/upload/Cn_21.pdf)

29. И 1.2.02.019.1121 – 2016 Определение механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. Инструкция. – М.: Концерн Росэнергоатом, 2016. – 68 с.

30. Иванов О. П., Ляшенко Л. В. Діаграми руйнування різних металів методом «зрізу різьби». *Зб. наук. пр. ДонДТУ*. 2008. Вип. 26. С. 271–277.

31. 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

32. Каток О. А., Кравчук Р. В., Харченко В. В., Рудницький М. П. Установка для комплексного дослідження механічних характеристик конструкційних матеріалів обладнання АЕС. *Пробл. міцності*. 2019. № 2. С. 171–181. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00077-6>

33. Каток О. А., Харченко В. В., Дроздов О. В. та ін. Визначення механічних властивостей сталей методом безперервного індентування. *Надійність і довговічність машин і споруд*. 2008. Вип. 31. С. 208–213.

34. Каток О.А., Харченко В.В., Кравчук Р.В., Серeda 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>

35. Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б. Методы измерения твердости: Справочное издание. – Москва: Интермет инжиниринг, 2000. – 126 с.

36. Кошель О., Сапронова С., Буліч Д., Ткаченко В. Визначення залишкового ресурсу несучих металевих конструкцій вагонів хопер-дозаторів та думпкарів (самоскидів) на основі результатів технічного діагностування та типових випробувань. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. Вип. 35. С. 14–23.

37. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Ламашевский В. П. и др. Развитие повреждений в сером чугуна при статическом деформировании. *Пробл. прочности*. 2003. № 6. С. 39–46.

<https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/051c98e1-bdee-42d5-a64b-50400162535d/content>

38. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швець В. П. О резервах повышения достоверности методов определения твердости материалов. *Пробл. прочности*. 2011. № 3. С. 5–18.

39. Лебедев А. А., Музыка Н. Р. Технічна діагностика стану матеріалу методом *LM*-твердості. В кн.: “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона. 2006. С. 77–101.

40. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

41. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
42. Матюнин, В. М., Марченков А. Ю. Взаимосвязь деформаций и параметров упрочнения металла при растяжении и вдавливании в пластической области. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2016. Т. 82, № 9. С. 51–57.
43. Микляев П. Г., Фридман Я. Б. Анизотропия механических свойств металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 244 с.
44. Музыка Н. Р. Влияние анизотропии листовых материалов на точность измерения твердости по Виккерсу. *Пробл. прочности*. 2007. № 2. С. 143–153.
45. Музыка Н. Р., Маковецкий И. В., Швец В. П. Оценка влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке. *Пробл. прочности*. 2008. № 4. С. 102–107.
46. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С. [и др.] Результаты исследований механических свойств металла трубопроводов энергоблока № 2 ОП ЮУ АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации [Электронный ресурс]. *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – № 1. – С. 63 – 67.
https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2008_1/article_2008_1_63.pdf
47. Патент № 52107А, МКІ 7, G01N 3/00, G01N 3/40. Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання, „ІМ-метод твердості” / А. О. Лебедєв, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек / Опубл. 15.01.2003. Бюл. № 1.
48. Патент № 57444, МПК (2009.01) G01N 3/40. Україна. Мобільна установка для визначення характеристик міцності матеріалів методом інструментованого індентування РІТ-2 / В. В. Харченко, О. А. Каток, М. П. Рудницький та ін. / Опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4.
49. Патент на корисну модель 151934. МПК G01N 3/00. Україна Спосіб визначення рівня анізотропії товстолистових високоміцних сталей із

застосуванням методу визначення твердості за Брінеллем. / М. Р. Музика, В. П. Швець, О. А. Каток, В. В. Харченко, А. В. Середа / Опубл. 05.10.2022. Бюл. № 40.

50. Плотников В. П. Исследование зависимостей между характеристиками прочности и твердости аустенитных сталей: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 53.49.09 «Прочность и пластичность металлов и сплавов» – Моск. энерг. ин-т (МЭИ). 1973. – 20 с.

51. РД 302-07-20-93. Определение механических свойств стали методом вдавливания индентора. [Дата введения: 24.11.1993]. – М.: Издательство стандартов. 1993. – 24 с.

52. Ріпєй І. В., Онищак Я. Д. Оцінка роботоздатності парогонів зі сталі 12Х1МФ під час тривалої експлуатації. *Вісник Інженерної академії України*. 2008. № 3–4. С. 192–195.

53. Руководство по эксплуатации портативного твердомера Ernst Computest SC. – Ernst: Редакция 07.2002. – 34 с.

54. 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 І 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

55. Скальський В. Р., Рудавський Д. В., Дубицький О. С. Розрахунок залишкового ресурсу ресорного листа з наявною поверхневою тріщиною. *Пробл. прочности*. 2013. № 1. С. 33–42.

56. СОУ-56-28-2018 Матеріали металеві. Визначення характеристик механічних властивостей конструкційних матеріалів за показниками твердості за Брінеллем та методом інструментованого індентування. Метод

випробування. [Чинний від 01.01.2019]. – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. – Київ: ІПМіц НАН України. 2018. – 28 с.

57. СОУ 56-36-2021 Матеріали металеві. Високоміцні та броньовані листові сталі. Визначення твердості за методом Брінелля. [Чинний з 17.12.2021]. – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. – Київ: ІПМіц НАН України. 2021. – 19 с.

58. СОУ 56-37-2021 Матеріали металеві. Випробування на інструментоване індентування. Метод випробування за кімнатної температури. [Чинний з 17.12.2021]. – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. – Київ: ІПМіц НАН України. 2021. – 25 с.

59. СОУ 56-38-2021 Матеріали металеві. Визначення механічних характеристик за результатами вимірювання твердості та індентування. Методи розрахунку. [Чинний з 17.12.2021]. – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. – Київ: ІПМіц НАН України. 2021. – 13 с.

60. СОУ 56-39-2021. Визначення рівня поверхневих залишкових напружень методом *LM*-твердості. [Чинний з 17.12.2021]. – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. – Київ: ІПМіц НАН України. 2021. – 24 с.

61. СОУ 56-01-2025. Матеріали металеві. Вимірювання твердості методом Брінелля за результатами випробувань на індентування. Методи розрахунку. [Чинний з 01.07.2025]. – Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. – Київ: ІПМіц НАН України. 2025. – 9 с.

62. СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004. Нормативний документ. Настанова. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. [Чинний від 21.04.2005]. – К.: ОЕП “ГРІФРЕ”. 2005. – 76 с.

63. СОУ-Н НАЕК 133:2023. Інженерна, наукова та технічна підтримка. Методика визначення механічних властивостей металу за результатами випробувань на твердість. [Чинний від 03.10.2023]. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом». 2023. 42 с.

64. СОУ 40.3–0013044–20:2010. Нормативний документ. Настанова. Оцінювання технічного стану металу прямих ділянок головних парогонів ТЕС. Вплив зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану експлуатованого металу. Типова інструкція. [Чинний від 14.01.2010]. – Львів: ДП “ЛКБ” і ФМІ НАНУ. 2010. – 52 с.

65. Студент О. З., Кречковська Г. В. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15Х1М1Ф після її експлуатації на парогонях ТЕС. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2011. Т. 47, № 5. С. 19–26.

66. Студент О. З., Марков А. Д., Никифорчин Г. М. Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань парогонів ТЕС. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2006. № 4. С. 26–35.

67. СТ ЦКБА 091-2011. Стандарт ЦКБА. Арматура трубопроводная. Определение механических свойств стали на основе измерения твердости. [Дата введения: 01.01.2012]. С-Пб.: НПФ «ЦКБА». 2011 – 33 с.

68. Типова програма періодичного контролю механічних властивостей металу трубопроводів АЕС з реакторами ВВЕР-1000: ТПКМ-10-01. – [Чинна від 2001]. – Київ, 2001. – 69 с.

69. Харченко, В. В., Каток, О. А., Дроздов, О. В., Кутняк, В. В., Рудницький, М. П., Філатов, В. Е. Переносний прилад для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого ідентування. *Надійність і довговічність машин і споруд*. 2009. Вип. 32. С. 162–168. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/03bdc5ed-9496-423c-90fc-f3aa8d78cc1e/content>

70. Харченко В. В., Каток О. А., Филатов В. Е. и др. Оценка характеристик прочности конструкционных сталей методом инструментированного индентирования. *Прочность материалов и элементов конструкций*: международная научно-техническая конференция, 28–30 сент. 2010 г.: тезисы докладов / Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, – Киев. 2010. Том 2. С. 167.

71. Харченко В. В., Каток О. А., Панасенко О. В., Рудницький М. П., Бажуков А. В., Мельник П. Є. Дослідження механічних характеристик зварного з'єднання парогенератора методом інструментованого індентування / В кн.: “Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС” (Ресурс – 2012), Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 2-5 октября 2012 г.). – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. 2010. С. 234–235.

72. Харченко В. В., Рудницький Н. П., Каток О. А., Неговский А. Н., Дроздов А. В., Кутняк В. В. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования. *Надежность и долговечность машин и сооружений*. 2007. Вып. 27. С. 140–147.

73. 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

74. Шаміс Л. Б., Матченко Т. І., Первушова Л. Ф. Методика визначення залишкового ресурсу облицювання сховища відпрацьованого ядерного палива за результатами випробувань зразків. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2010. Вип. 14. С 69–77. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/59007>

75. Ярас В. І., Ловейкін С. О. Метод відриву зі сколюванням, право на достовірність. *Техніка будівництва*. 2011. Вип. 26. С. 44–48. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/5871>

76. Ahn, J. and Kwon, D. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect. *J. Mater. Res.* 16 . 2001 p. 3170 –3178. <https://doi.org/10.1557/JMR.2001.0437>

77. Arai, M. High-temperature creep property of high Cr ferritic heat-resisting steel identified by indentation test. *Journal of Pressure Vessel Technology. Transactions of the ASME*. 2017. Vol. 139, Issue 2. 021403: 7 pages. <https://doi.org/10.1115/1.4033943>
78. ASTM A956-02. Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. 2002. 11 pages.
79. ASTM E 3-01 Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2001. 12 pages.
80. ASTM E 384-22 Test Method for Microindentation Hardness of Materials. 2022. 40 pages.
81. ASTM E 2546-15. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing. 2015. 24 pages.
82. Beghin, M., Bertin, L., Fontanari, V. & Monelli B. D. Analysis of the Elastic-plastic Properties of Metallic Materials by Instrumented Spherical Indentation Testing. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. P. 1679–1684. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.280>
83. Byun, T. S., Hong, J. H., Haggag, F. M., Farrell, K., & Lee, E. H. Measurement of through-the-thickness variations of mechanical properties in SA508 Gr.3 pressure vessel steels using ball indentation test technique. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1997. Vol. 74, Issue 3. P. 231–238. [https://doi.org/10.1016/s0308-0161\(97\)00114-2](https://doi.org/10.1016/s0308-0161(97)00114-2)
84. Byun, T. S., Kim, S. H., Lee, B. S., Kim, I. S., & Hong, J. H. Estimation of fracture toughness transition curves of RPV steels from ball indentation and tensile test data. *Journal of Nuclear Materials*. 2000. Vol. 277, Issues 2-3. P 263–273. [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(99\)00197-x](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(99)00197-x)
85. Cahoon J. R., Broughton W. H., Kutzak A. R. The determination of yield strength from hardness measurements. *Metallurgical Transactions*. 1971. Vol. 2, No. 7. P. 1979– 1983. <https://doi.org/10.1007/BF02913433>
86. Cai Z., Yang Z., et al. Characterization of Anisotropy in Additively Manufactured Materials Through Instrumented Indentation Testing. *Chinese*

Journal of Mechanical Engineering. 2025. Vol. 38. Art. 13.
<https://doi.org/10.1186/s10033-024-01174-7>

87. Das, G., Ghosh, S., & Sahay, S. K. Use of ball indentation technique to determine the change of tensile properties of SS316L steel due to cold rolling. *Materials Letters*. 2005. Vol. 59, Issue 18. P. 2246–2251.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.01.074>

88. DIN 50150-1976. Testing of Steel and Cast Steel; Conversion Table for Vickers Hardness, Brinell Hardness, Rockwell Hardness and Tensile Strength. Чинний від 01.12.1976. 5 р.

89. Francis, H. A. Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1976. Vol. 98, Issue 3. P. 272–281. <https://doi.org/10.1115/1.3443378>

90. George, R. A., Dinda, S., & Kasper, A. S. Estimating Yield Strength from Hardness Data. *Metal Progress*. 1976. Vol. 109, Issue 5. P. 30–32.
<http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALSOU DAG E7674503337>

91. Ghosh, S., Tarafder, M., Sivaprasad, S., & Tarafder, S. Experimental and numerical study of ball indentation for evaluation of mechanical properties and fracture toughness of structural steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2010. Vol. 63, Issues 2-3. P. 617–622.
<https://doi.org/10.1007/s12666-010-0092-z>.

92. Haggag, F. M. Indentation Microprobe for Structural Integrity Evaluation (U.S. Patent No. 4852397). U.S. Patent and Tradement Office. 1989.

93. Haggag, F. M. In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System. In W. Corwin, F. Haggag, & W. Server (Eds.), *STP1204-EB Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension*. 1993. P. 27–44.
<https://doi.org/10.1520/STP12719S>

94. Haggag, F. M. Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and Oil and Gas Pipelines. *International Journal of Pure and Applied Physics*. 2007. Vol. 3, Issue 1. P. 91–108.

https://www.ripublication.com/ijpapv3/ijpapv3n1_11.pdf

95. Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., & Swain, R. L. Use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials. In A. Braun, N. Ashbaugh, & F. Smith (Eds.), *STP1092-EB Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing*. 1990. P. 188–208. <https://doi.org/10.1520/STP25039S>

96. Haggag, F. M., Wang, J. A., Sokolov, M. A., Murty, K. L. Use of portable/in situ stress-strain microprobe system to measure stress-strain behavior and damage in metallic materials and structures. In G. Lucas & D. Stubbs (Eds.), *STP1318-EB Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures*. 1997. P. 85–98. <https://doi.org/10.1520/STP11894S>

97. Hamada, A. S., Haggag, F. M., & Porter, D. A. Non-destructive determination of the yield strength and flow properties of high-manganese twinning-induced plasticity steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 558. P. 766–770. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.066>

98. Han R., Hu M., Pei Q., Gong D., Song Y. The influence of chemical element on properties of deformed steel bar. *Open Journal of Statistics*. 2016. Vol. 6. P. 1174–1180. <http://dx.doi.org/10.4236/ojs.2016.66095>

99. Haušild, P., Materna, A., Siegl, J., Kytka, M., & Kopřiva, R. Characterization of local stress-strain behavior in WWER 440 weld and base metal by instrumented indentation technique. *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 606. P. 7–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.606.7>

100. Hausild, P., Siegl, J., Materna, A., Kytka, M., & Kopriva, R. Characterization of Reactor Pressure Vessel Steel by ABI Testing. *Procedia Materials Science*. 2016. Vol. 12. P. 7–11.

<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2016.03.002>

101. He Y., Ma Y., et al. Characterization of Metal Plastic Mechanical Parameters Based on Optimization Algorithm and Indentation Morphology. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024. Vol. 56 № 7. P. 2051–2062. <https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-468>
102. Huber, N., & Tsakmakis, C. Experimental and theoretical investigation of the effect of kinematic hardening on spherical indentation. *Mechanics of Materials*. 1998. Vol. 27, Issue 4. P. 241–248. [https://doi.org/10.1016/s0167-6636\(98\)00005-2](https://doi.org/10.1016/s0167-6636(98)00005-2)
103. Ignatovich S. R., Zakiev I. M. and Borisov D. I. Assessment of the structural-deformation inhomogeneity of a thin surface layer of materials by the method of scratching. *Strength of Materials*. 2008. Vol. 40, No. 5. P. 334–342. <https://doi.org/10.1007/s11223-008-9019-x>
104. Ignatovich S. R., Zakiev I. M., Borisov D. I. and Zakiev V. I. Material surface layer damage estimation for cyclic loading conditions using the nanoindenting and nanoscratching techniques. *Strength of Materials*. 2006. Vol. 38, No.4. P. 428–434. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0061-2>
105. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method. [Чинний від 2015-07]. Geneva: ISO, 2015. 41 p.
106. ISO 14577-2:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 2: Verification and calibration of testing machines. Geneva: ISO, 2015. 25 p.
107. ISO 14577-3:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 3: Calibration of reference blocks. Geneva: ISO, 2015. 8 p.
108. ISO 14577-4:2016. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings. Geneva: ISO, 2016. 19 p.

109. ISO/TR 29381:2008. Metallic materials – Measurement of mechanical properties by an instrumental indentation test – Indentation tensile properties. Geneva: ISO, 2008. 40 p.

110. Jang, J.-I., Kim, K.-H., Kwon, D. and Park, S.-K. Applications and advanced indentation technique to pre-qualification and periodic monitoring of strength performance of industrial structures. *Key Engineering Materials*. 2004. Vol. 270-273. P. 1694-1699.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.1694>

111. Jiang, P., Zhang, T., Feng, Y., Yang, R., & Liang, N. Determination of plastic properties by instrumented spherical indentation: Expanding cavity model and similarity solution approach. *Journal of Materials Research*. 2009. Vol. 24. P. 1045–1053. <https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0108>

112. Kang B. S. -J., Yao Z., Barbero E. J. Post-Yielding Stress-Strain Determination Using Spherical Indentation. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2006. Vol.13. P. 129–138.

<https://doi.org/10.1080/15376490500448607>

113. Katok O. A., Kravchuk R. V., Kharchenko V. V., and Rudnyts'kyi M. P. A setup for complex investigation of mechanical characteristics of structural materials for NPP equipment. *Strength Mater*. 2019. Vol. 51, No. 2. P. 317–325.

<https://doi.org/10.1007/s11223-019-00077-6>

114. 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>

115. 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>

116. 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>

117. 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>

118. Katok, O. A., Rudnitskii, N. P., Kharchenko, V. V. et al. On the Determination of the Mechanical Characteristics of Steels from Hardness Test Results. *Strength Mater*. 2014. 46, 773–776. <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9610-2>

119. 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>

120. Kharchenko V.V., Katok O.A., Kravchuk R.V., Sereda A.V., Shvets V.P. Analysis of the methods for determination of strength characteristics of NPP main equipment metal from the results of hardness and indentation measurements. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.003>

121. Kharchenko, V.V., Katok, O.A., Panasenko, A.V. et al. Investigation on Strength Characteristics of Steam Generator Welded Joint After Operational Life Using Instrumented Indentation Test Method. *Strength Mater*. 2013. Vol. 45. P. 295–300. <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9458-x>

122. 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>

123. Kharchenko V., Kondryakov E., Katok O., Kravchuk R. Numerical simulation of deformation and fracture processes during static and dynamic perforation of thin plates from high-strength materials. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 110–117.

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.015>.

124. Kim, S. H., Lee B. W., Choi, Y. and Kwon, D. Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials - A FEM study. *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 415. P. 59-65.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.217>

125. Kopriva, R., Petelova, P., Eliasova, I., Kytka, M., & Culek, M. Comparison of irradiated 15Kh2MFA material mechanical properties using conventional testing methods and innovative approach of small punch testing (SPT) and automated ball indentation (ABIT). 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. P.179.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/179/1/012040>

126. Kravchuk, R. V. Katok, O. A. Kharchenko, V. V., et al. Determination of the mechanical characteristics of the metal of the equipment of nuclear power stations from hardness measurement and indentation data, *Strength Mater*. 2019. Vol. 51, No. 3. P 381–387. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00084-7>

127. Lee Hyungyil, Jin Haeng Lee and George M. Pharr. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*. 2005. V. 53. P. 2037 – 2069. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.04.007>

128. Lee, J. H., Kim, T., & Lee, H. A study on robust indentation techniques to evaluate elastic-plastic properties of metals. *International Journal of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47, Issue 5. P. 647–664.

<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.11.003>

129. Lee, J.-S., Jang, J., Lee, B.-W., Choi, Y., Lee, S. G., & Kwon, D. An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile

materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics. *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54, Issue 4. P. 1101–1109.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.033>

130. Louda, P., Sharko, A., Stepanchikov, D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 9. Art. 2090. <https://doi.org/10.3390/ma14092090>

131. Lu, W., Ling, X., & Yang, S. A modified reference area method to estimate creep behaviour of service-exposed Cr5Mo based on spherical indentation creep test. *Vacuum*, 2019. Vol. 169, 108923.

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108923>

132. Luo L., Khraishi T., Shen Y.-L. Indentation and Hardness of Materials: An Inherently Multiscale-Dependent Problem. *Metals*. 2025. Vol. 15 № 3. Art. 265. <https://doi.org/10.3390/met15030265>

133. Maruschak, P. O., Okipnyi, I. B., Poberezhnyi, L. Ya., & Maruschak, E. V. Study of heat-resistant steel strain hardening by indentation. *Metallurgist*. 2013. Vol. 56 (11–12), P. 946–951.

<https://doi.org/10.1007/s11015-013-9680-6>

134. Mathew, M. D., Murty, K. L., Rao, K. B. S., & Mannan, S. L. Ball indentation studies on the effect of aging on mechanical behavior of alloy 625. *Materials Science and Engineering*. 1999. Vol. 264 (1-2). P. 159–166.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01098-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01098-3)

135. Mencík, J. Determination of mechanical properties by instrumented indentation. *Meccanica*. 2006. Vol. 42, Issue 1. P. 19–29.

<https://doi.org/10.1007/s11012-006-9018-6>

136. Meyer, E. Untersuchungen über Härteprüfung und Härte. Berlin: Julius Springer. 1909. 106 p.

137. Murty, K. L., Mathew, M. D., Wang, Y., Shah, V. N., & Haggag, F. M. Nondestructive determination of tensile properties and fracture toughness of cold

worked A36 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1998. Vol. 75, Issue 11. P 831–840. [https://doi.org/10.1016/s0308-0161\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/s0308-0161(98)00093-3).

138. Nagaraju, S., GaneshKumar, J., Vasantharaja, P., Vasudevan, M., & Laha, K. Evaluation of strength property variations across 9Cr-1Mo steel weld joints using automated ball indentation (ABI) technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 695. P. 199–210.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.021>

139. Nayebe, A., Bartier, O., Mauvoisin, G., [et all]. New method to determine the mechanical properties of he treated steels. *International journal of Mechanical science*. 2001. 43. P. 2679–2697.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00048-0)

140. Nayebe, A., El Abdi, R., Bartier, O. [et all]. New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique. *Mechanics of materials*. 2002. 34. P. 243–254.
[https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(02\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00113-8)

141. New 3D-Indentation Test System for Observing the Distribution of Internal Mechanical Properties in Materials. *Precision Engineering*. 2024. Vol. 91. P. 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.09.005>

142. Nogning Kamta, P., Mejias, A., Roudet, F., Louis, G., Touzin, M., & Chicot, D. Indentation creep analysis of T22 and T91 chromium based steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 652. P. 315–324.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.098>

143. Oliver, W. C., & Pharr, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992. Vol. 7. Issue 6. P. 1564–1583.
<https://doi.org/10.1557/jmr.1992.1564>

144. Oliver W., & Pharr G. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*. 2004. Vol. 19. Issue 1. P. 3–20.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>

145. Organek P., Gosowski B., Redeck M. Relationship between Brinell hardness and the strength of structural steels. *Structures*. Volume 59, January 2024, 105701. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105701>
146. Panasyuk V. V. Strength and Fracture of Solids with Cracks. – Lviv: NASU, Karpenko Physico-Mechanical Institute. 2002. P. 468.
147. Pavlina E.J., Van Tyne C.J. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. *J. Mater. Eng. Perform.* 2008. Vol. 17, № 6. P. 888–893. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9225-5>
148. Pham, T.-H., Phan, Q.-M., & Kim, S.-E. Identification of the plastic properties of structural steel using spherical indentation. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 711. P. 44–61.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.097>
149. Renčík, J. Determination of mechanical properties by instrumented indentation. *Meccanica*. 2007. Vol. 42. P. 19–29. <https://doi.org/10.1007/s11012-006-9018-6>
150. 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>
151. Tabor, D. A simple theory of static and dynamic hardness. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948. Vol. 192. Issue 1029. P. 247 – 274. <http://doi.org/10.1098/rspa.1948.0008>
152. Tabor D. Indentation hardness and materials properties, in *SolidSolid Interactions*, edited by M.J. Adams, S.K. Biswas, and B.J. Briscoe (Imperial College Press, London, UK. 1996, P. 6–15.
153. Tabor, D. The hardness and strength of metals. *J. Inst. Metals*. 79. P. 1–18.
154. Walley S. M. Historical origins of indentation hardness testing [Електронний ресурс]. 2012. *Materials Science and Technology*. – Режим доступу:

https://www.academia.edu/83646552/Historical_origins_of_indentation_hardness_testing.

155. Wang Feng-Jiang, Xin Ma, Yi-Yu Qian. Rate-dependent indentation behavior of solder alloys. *Journal of Materials science*. 2005. 40. P. 1923–1928.

156. Yang, X.-S., Zhai, H.-R., Ruan, H.-H., Shi, S.-Q., & Zhang, T.-Y. Multi-temperature indentation creep tests on nanotwinned copper. *International Journal of Plasticity*. 2018. Vol. 104. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.01.016>

157. Yu, F., Jar, P.-Y. B., Hendry, M. T., Jar, C., & Nishanth, K. Fracture toughness estimation for high-strength rail steels using indentation test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. Vol. 204. P. 469–481. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.10.030>

158. Zhang Shuxun, Feng Zhaoping, Wang Hao, Cui Meng, Wang Ning. Relationship between Hardness and Strength of Steel Used for Construction Steel Structure // *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*. 2021. Vol. 57, № 6. P. 27–33. <https://doi.org/10.11973/lhgy-wl202106006>

159. Zuo, L.; Zeng, C.; Hu, X.; Du, S.; Zhao, Y.; Fei, F. Evaluation of Corrosion Residual Life Prediction Methods for Metal Pipelines. *Materials*. 2022. 15 (16), 5624. <https://doi.org/10.3390/ma15165624>



АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«НАЦІОНАЛЬНА АТОМНА
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА
КОМПАНІЯ «ЕНЕРГОАТОМ»

Філія «Відокремлений підрозділ
«НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР»

вул. Гоголівська, 22-24, м. Київ,
01054, Україна

телефон/факс: +38 (044) 206-97-21
e-mail: vp.ntc@direkcy.atom.gov.ua

Б41-201/16.1-Всх
21.01.2016

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи

Філія ВП «Науково-технічний центр» АТ «НАЕК «Енергоатом» підтверджує актуальність і доцільність використання основних науково-практичних результатів дисертаційної роботи Середи Альони Вікторівни «Удосконалення методик визначення характеристик твердості та міцності конструкційних сталей за результатами індентування» під час технічної діагностики та оцінювання залишкового ресурсу обладнання.

Робота вирішує актуальну науково-технічну задачу підвищення достовірності та об'єктивності неруйнівного контролю механічних характеристик конструкційних сталей, що має критичне значення для безпечної експлуатації АЕС.

Підтверджено доцільність:

- удосконалених та стандартизованих методик інструментованого індентування для неруйнівного ~~показової~~ оцінки механічних характеристик міцності металу елементів конструкцій відповідного обладнання АЕС в умовах експлуатації;
- модернізації експериментального обладнання для неруйнівних випробувань металів методом інструментованого індентування, що забезпечило розширення переліку контрольованого обладнання та підвищення продуктивності випробувань;
- нової методики визначення твердості за Брінеллем методом інструментованого індентування в діапазоні 110...630 HBW, що узгоджується з вимогами національних стандартів.

На основі експериментальних досліджень підтверджено наявність просторової неоднорідності механічних властивостей металу трубопроводів АЕС після тривалої експлуатації, що проявляється у зміні границь міцності, плинності та пластичних характеристик по товщині стінки. Отримані результати обґрунтовують доцільність застосування інструментованого індентування як ефективного засобу неруйнівного контролю деградації металу та можуть бути використані як методична основа для вдосконалення СОУ-Н НАЕК 133 та інших стандартів технічної діагностики металу, сприяючи коректному визначенню залишкового ресурсу критично важливого обладнання АЕС.

Директор

Олег ЗЕЛЕНИЙ

М. Голяк
206-97-73 (72-83)
m.golyak@direkcy.atom.gov.ua

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 ІМ-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.