

УДК 539.53:620.178.15

Каток О.А.

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

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ СТАЛІ 15X2НМФА МЕТОДОМ ІНДЕНТУВАННЯ

Katok O.

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

(katok_O@ukr.net)

DETERMINATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF STEEL 15Kh2NMA BY THE INDENTATION METHOD

Обґрунтовано можливість застосування методу інструментованого індентування в ядерній енергетиці на зразках із сталі 15X2НМФА. Для визначення характеристик міцності сталі використано розроблені в Інституті методики та відповідне для їх реалізації обладнання.

Показано, що відхилення результатів визначення значень характеристик міцності при індентуванні, із застосуванням розроблених методик та створеного обладнання, від даних оцінених при випробуваннях на розтяг, не перевищує 5 %.

Ключові слова: метод індентування, діаграма індентування, границя міцності, границя плинності.

Вступ

На сьогодні актуальними в науковому та практичному планах є задачі, пов'язані із розробкою і впровадженням неруйнівних методів контролю поточного стану конструкційних матеріалів відповідальних елементів різних галузей господарства з метою визначення їх залишкового ресурсу. Особливо, це актуально в ядерній енергетиці, де ресурс працюючого обладнання наближається до проектного строку служби.

З цією метою продовжуються роботи з розвитку неруйнівних методів контролю поточного стану конструкційних матеріалів та підвищення їх ефективності. Останнім часом в світовій практиці все більше використовують випробування матеріалів індентуванням кульки із твердого сплаву з записом діаграм в координатах навантаження F – глибина вдавлювання індентора h , що відомі як методи інструментованого індентування (instrumented indentation methods), і дозволяють отримувати більш повну інформацію щодо характеристик механічних властивостей металів.

Дослідження, що виконувалися в рамках цієї роботи, направлені на експериментальне обґрунтування застосування методу інструментованого індентування в ядерній енергетиці для оцінки поточного стану конструкційних матеріалів працюючих відповідальних елементів з метою визначення їх залишкового ресурсу.

Матеріал, обладнання, методи випробувань

Для обґрунтування застосування методу інструментованого індентування в ядерній енергетиці було проведено експериментальні дослідження на зразках із високоміцної високолегованої конструкційної сталі марки 15X2НМФА в різних станах поставки, твердість яких складала 215 і 345 одиниць за шкалою Брінелля. Вибір цієї сталі обумовлено її використанням при виготовленні деталей і вузлів устаткування атомних електростанцій (корпусів, кришок та інших вузлів реакторних установок).

Для визначення неруйнівним методом характеристик механічних властивостей сталі 15X2НМФА використано розроблені в Інституті методики та відповідне для їх реалізації обладнання [1 – 4]. Згідно цих методик характеристики міцності вуглецевих сталей вираховують за кореляційними залежностями між даними випробувань зразків на розтяг та параметрами діаграми статичного чи циклічного індентування, побудованої у координатах « $F - h$ ». На рис. 1 для прикладу, приведені схематизовані діаграми.

Для реалізації процесу безперервного контактного деформування матеріалу твердосплавною кулькою діаметром 2,5 мм у вигляді діаграми в координатах « $F - h$ » використано розроблену в Інституті універсальну випробувальну машину UTM-20НТ (рис. 2).

Експериментальне обладнання відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 14577 [7] і призначене для проведення випробувань в діапазоні величин навантажень від 2 Н до 10^4 Н.

Для управління процесом індентування на випробувальному обладнанні, вимірювання, нагромадження і збереження параметрів вимірювання в цифровому вигляді і у вигляді діаграм індентування використано спеціально розроблене програмне забезпечення HardTest. Програмне забезпечення дає змогу оператору

управляти роботою обладнання в режимах м'якого і жорсткого, статичного і циклічного навантаження, з і без витримки в часі в широкому діапазоні швидкостей деформації.

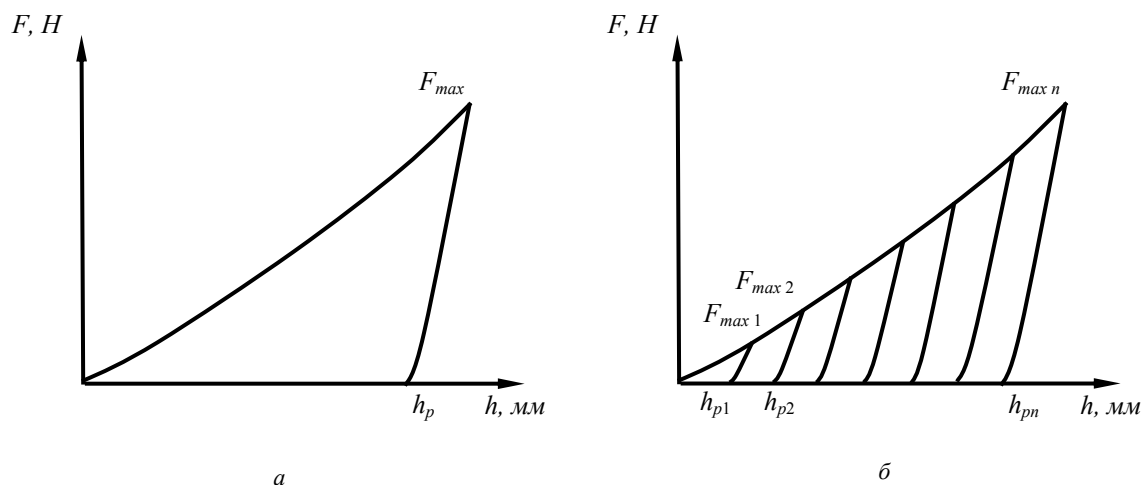


Рис. 1. Схематизовані діаграми статичного (а) і циклічного індування (б): F – навантаження на індентор, Н; h – глибина індування, мм; h_{pi} – залишкові глибини відтиску після i -того циклу навантаження



Рис. 2. Універсальна випробувальна машина для індування металів кулькою із твердого сплаву: 1 – колони, 2 і 3 – верхня і нижня траверси; 4 – пристій навантаження; 5 – шток, що передає навантаження; 6 – координатний столик; 7 – блок управління; 8 і 9 – датчики вимірювання навантаження і глибини вдавлювання індентора; 10 – АЦП перетворювач; 11 – датчик вимірювання положення штока навантаження; 12 – персональний комп'ютер

В сучасних випробувальних машинах, що призначені для випробувань методом інструментованого індування, є важливим вимірювання глибини індування. Суттєвий вплив на реєстрацію переміщення індентора відносно поверхні випробування зразка має пружне деформування вузла індування установки. Для мінімізації цього недоліку використовують жорсткі силові рами, що приводять до збільшення маси приладу; застосовують спеціальні схеми навантаження, а також поправочні коефіцієнти, що можуть призвести до збільшення похибки через неправильне їх визначення. В розробленому обладнанні запропоновано і випробувано оригінальну конструкцію вузла вимірювання глибини вдавлювання індентора, яка підтверджена патентом [8]. Використання цієї конструкції дозволило зменшити вплив пружної деформації вузла індування на вимірювання переміщення індентора відносно поверхні зразка. Підвищити якість реєстрації діаграм вдалося також за рахунок вдосконалення процедури визначення моменту дотику індентором поверхні зразка й вибору швидкості підводу індентора. При доробці процедури використано умову нижньої границі макродіапазону індування, що обумовлено стандартом ISO 14577 та визначено, що швидкість переміщення

індентора при цьому повинна бути не більше 0,12 мм/хв. Для зменшення часу випробування використано ступеневе автоматичне зменшення швидкості підводу індентора до поверхні зразка.

На рис.3 приведено діаграми циклічного індентування сталі 15X2НМФА в різних станах поставки.

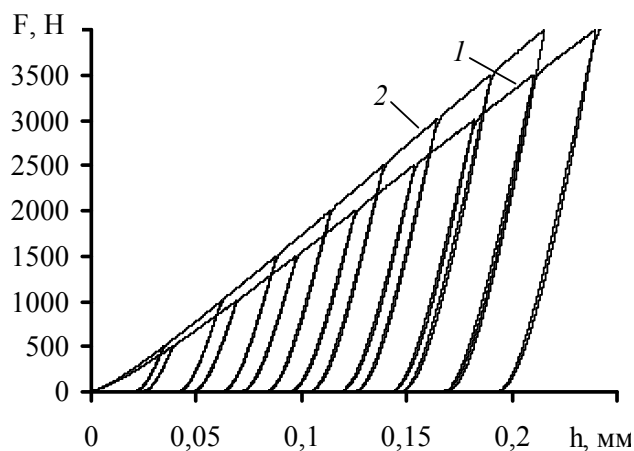


Рис. 3. Діаграми циклічного індентування сталі 15X2НМФА в різних станах поставки, твердість яких складала 215 (1) і 345 (2) одиниць за шкалою Брінелля

Для визначення границі міцності методом інструментованого індентування використовували кореляційну залежність у вигляді:

$$\sigma_{e \text{ indent}} = k_{1\sigma} \alpha + k_{2\sigma}, \quad (1)$$

де α – тангенс кута нахилу діаграми індентування в координатах « $F_{max} - h_p$ »; $k_{1\sigma}$ і $k_{2\sigma}$ — кореляційні коефіцієнти, що встановлюються експериментально.

Для кульки індентора діаметром 2,5 мм значення параметрів $k_{1\sigma}$ і $k_{2\sigma}$ рівні відповідно 0,0257 і 179,25.

Умовну границю плинності при індентуванні $\sigma_{0,2 \text{ indent}}$ визначали за вдосконаленою методикою Хаггага [7, 9]. Для сталі 15X2НМФА було отримано кореляційну залежність між оцінюваною за даними випробувань зразків на розтяг умовною границею плинності металу і параметром пластичності A , який вираховано за діаграмою індентування в координатах «напруження у відбитку $\frac{F}{d^2}$ – деформація $\frac{d}{D}$ »:

$$\sigma_{0,2 \text{ indent}} = a_{\sigma_{0,2}} \cdot A + b_{\sigma_{0,2}}, \quad (2)$$

де $a_{\sigma_{0,2}}$ і $b_{\sigma_{0,2}}$ — кореляційні коефіцієнти, для сталі 15X2НМФА рівні 0,2 і 0 відповідно.

Початкова і кінцева границі апроксимації при визначенні коефіцієнта A рівні 100 і 4000 Н відповідно.

Результати випробувань та їх обговорення.

Значення границі плинності, отримані шляхом осереднення результатів 15 випробувань методом інструментованого індентування та шляхом випробувань зразків на розтяг відповідно ГОСТ 1497-84 приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння значень границі плинності сталі 15X2НМФА, визначених різними методами

Сталь марки 15X2НМФА в різних станах поставки із твердістю за шкалою Брінеллю, HB	Значення границі плинності, МПа		Похибка Δ , %
	Випробування на розтяг ГОСТ 1497-84	Метод індентування	
215	610,8	596,9	2,3
345	1006,5	1053,3	4,6

Із даних, наведених в таблиці 1, слідує, що розкид значень границі плинності, які визначені за результатами випробувань на розтяг і шляхом індентування сталі 15X2НМФА із твердістю 215 одиниць за шкалою Брінелля, складає 2,3 %, із твердістю 345 одиниць за шкалою Брінелля — 4,6%.

За результатами індентування із застосуванням вдосконаленої методики Хаггага оцінено значення границі міцності сталі 15X2НМФА, середнє значення яких приведено в табл. 2 і зіставлене зі середніми значеннями границі міцності визначеними з випробувань на розтяг. Розкид значень границі міцності оціненої шляхом індентування, від результатів випробувань на розтяг не перевищує 4 %.

Таблиця 2

Порівняння значень границі міцності сталі 15Х2НМФА, визначених різними методами

Сталь марки 15Х2НМФА в різних станах поставки із твердістю за шкалою Брінеллю, НВ	Значення границі міцності, МПа		Похибка Δ , %
	Випробування на розтяг ГОСТ 1497-84	Метод індентування	
215	701,2	728,2	3,9
345	1210,1	1166,3	3,6

Слід зазначити, що похибка результатів визначення характеристик міцності методом індентування, за допомогою методик розроблених в Інституті, вдвічі менша за похибку передбачену відповідним документом [4].

Висновок

- Із використанням удосконалених методик і створеного експериментального обладнання для випробувань металів методом індентування проведені експериментальні дослідження високолегованої конструкційної сталі марки 15Х2НМФА в різних станах поставки.

- Показано, що відхилення результатів визначення значень характеристик міцності досліджуваної сталі при індентуванні від даних оцінених при випробуваннях на розтяг, не перевищує 5 %, що вдвічі менше за допустиме.

Таким чином, проведені дослідження доводять, що розроблені в Інституті методики на базі методу інструментованого індентування та відповідне для їх реалізації обладнання можуть успішно застосовуватись для контролю поточного стану та деградації механічних властивостей вуглецевих сталей відповідального обладнання ядерної енергетики згідно документу [3].

***Аннотація.** Обоснована возможность применения метода инструментированного индентирования в ядерной энергетике на образцах из стали марки 15Х2НМФА. Для определения характеристик механических свойств использовано разработанные в Институте методики и соответствующие для их реализации оборудование. Показано, что отклонение результатов определения значений характеристик прочности при индентировании с применением разработанных методик и созданного оборудования, от данных оцененных при испытаниях на растяжение, не превышает 5%.*

***Ключевые слова:** метод индентирования, диаграмма индентирования, предел прочности, предел текучести.*

***Abstract. Purpose.** Experimental justification for the use of the instrumented indentation method in nuclear power engineering to assess the current state of structural materials for the purpose of determining their remaining life.*

***Design/methodology/approach.** In addition to direct destructive methods for determining the strength characteristics, a great number of indirect methods of non-destructive testing are used in the industry. One of these methods is the instrumented indentation method that is based on the continuous recording of the local deformation process in the indenter material in the form of indentation diagrams in the force, F , vs. indenter penetration depth, h , (hereinafter, “the indentation depth”) coordinates. The advantage of the method, as compared to the hardness measurement methods, consists in the possibility of the direct recording of the process of continuous local deformation of the material by the indenter, in the simple and rapid testing due to the automation of the process itself and also in the absence of the effect of such human factor, as visual measurement of diagonal length of the indentation.*

***Findings.** Using the improved procedures and the developed experimental equipment for testing metals by the indentation method, the experimental investigations of high-alloy steel Grade 15Kh2NMFA in different as-supplied conditions have been performed. It has been shown that the spread of the results obtained to determine the strength characteristics of the steel under investigation from the data obtained in tensile testing does not exceed 5%. The obtained experimental data support the possibility of using the instrumented indentation method in nuclear power engineering as one of the non-destructive testing methods.*

***Originality/value.** The procedures and equipment for testing with the use of the instrumented indentation method can be used to assess the current state of structural materials in operating engineering products for the purpose of determining the remaining life.*

***Keywords:** instrumented indentation method, indentation curve, ultimate strength, tensile yield strength*

Бібліографічний список використаної літератури

1. Haggag F. V. 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. – 3. – № 1. – P. 91 – 108.
2. Бакиров М.Б., Мишулина О.А., Киселев И.А., Круглов И.А. Исследование возможности восстановления диаграмм деформирования с помощью нейросетевого подхода // Завод. лаб. – 2010. – Том 76. – № 7. – С. 42 – 48.
3. РД ЭО 0027-2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости // М. Концерн Росэнергоатом 2006. – 52 с.

4. *Матюнин В. М.* Методы твердости в диагностике материалов. Состояние, проблемы и перспективы. // Завод. лаб. – 2004. – № 6. – С. 37 – 42.
5. *Лебедев А.О., Музыка М.Р., Швец В.П.* О резервах повышения достоверности методов определения твердости материалов // Проблемы прочности. – 2011. – № 3. – С.5–18.
6. *ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002.* Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
7. *Каток О. А., Харченко В. В., Дроздов А. В. и др.* Анализ методик определения механических свойств сталей по результатам непрерывного индентирования // Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС, 20–22 мая 2009 г.: Сб. докл. – Киев: Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, 2009. – С. 66 –67.
8. *Каток О. А., Харченко В. В., Дроздов А. В., Панасенко О. В.* Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2009. – Вып. 31. – С. 208 – 213.
9. *Харченко В. В., Каток О. А., Філатов В. Е.* Оцінка характеристик міцності сталей методом інструментованого індентування // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи їх діагностування і прогнозування. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2009. – С. 64 –69.
10. *Пат. № 57446 Україна, МПК (2011.01) G 01 N3/40.* Установка для реєстрації діаграми інструментованого індентування / В. В. Харченко, О. А. Каток, М. П. Рудницький, В. В. Кутняк, О. В. Дроздов, О. М. Неговський. – Заявл. 16.08.2010; Опубл. 25.02.11. Бюл. № 4.
11. *Харченко В. В., Рудницький Н. П., Каток О. А., Неговський 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. 28. – С. 140 – 147.
12. *Пат. № 56456 Україна, МПК (2011.01) G 01 N3/40.* Вузол індентування установки для реєстрації діаграми інструментованого індентування / В. В. Харченко, О. А. Каток, М. П. Рудницький, В. В. Кутняк, О. В. Дроздов. – Заявл. 16.08.2010; Опубл. 10.01.11. Бюл. № 1.

References

1. *Haggag F. V.* 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, no 1. pp. 91 – 108.
2. *Bakirov M.B., Mishulina O.A., Kiselev I.A., and Kruglov I.A.* Study of the Possibility of Reconstruction Strain Diagrams Using Neural Network Approach. Industrial laboratory. Diagnostics of materials, 2010, Vol. 76, no 7, pp. 42 – 48.
3. *RD EO 0027-2005.* Instruction on determining the mechanical properties of the NPP equipment metal by non-specimen methods from the hardness characteristics. Moscow, Concern Rosenergoatom, 2006.
4. *Matjuns V. M.* Methods of hardness measurements used in materials diagnostics. Condition, problems and perspectives. Industrial laboratory. Diagnostics of materials, 2004, Vol. 70, no 6, pp. 37 – 42.
5. *Lebedev A.A., Muzyka N.R., Shvets V. P.* On the Potential of Improving Reliability of Material Hardness Determination Methods. Strength of materials, 2011, no 3, pp. 5 – 19.
6. *ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002.* Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
7. *Katok O.A., Kharchenko V.V., Drozdov A.V., and Panasenko A.V.* Analysis of the procedures for determining mechanical properties of the steels from the continuous indentation results. Structural integrity and lifetime of NPP equipment, 20–22 may 2009. Abstracts of International Conference. Kyiv: G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009, pp. 66 –67.
8. *Katok O.A., Kharchenko V.V., Drozdov A.V., and Panasenko A.V.* Determination of the mechanical properties of steels by the instrumented indentation test method. Reliability and life of machines and structures, 2008, Vol. 31. pp. 208 – 213.
9. *Kharchenko V.V., Katok O.A., and Filatov V.E.* Assessment of the strength characteristics by the instrumented indentation method. In: In-Service Damage of Materials, Methods of its Diagnostics and Prediction, Ternopil, I. Puluj Ternopil State University, 2009, pp. 64-69.
10. *Patent No. 57446, Ukraine, MPK (2011.01) G 01 N3/40.* Device for recording instrumented indentation diagrams. V.V. Kharchenko, O.A. Katok, M.P. Rudnitskii, V.V. Kutnyak, O.V. Drozdov, and O.M. Negovskii. Appl. on 16.08.2010; Published on 25.02.11. Bull. No.4.
11. *Kharchenko V.V., Rudnitskii N.P., Katok O.A., Negovsky A.N., Drozdov A.V., and Kutnyak V.V.* An instrumented indentation machine for determination mechanical characteristics of structural materials. Reliability and life of machines and structures, 2007, Vol. 28, pp. 140 – 147.
12. *Patent No. 56456, Ukraine, MPK (2011.01) G 01 N3/40.* Subassembly of the device for recording instrumented indentation diagrams. V.V. Kharchenko, O.A. Katok, M.P. Rudnitsky, V.V. Kutnyak, and O.V. Drozdov. Appl. on 16.08.2010; Published on 10.01.11. Bull. No.1

Подана до редакції 09.10.2014