

УДК 539.53:620.178.15

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МОДУЛЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРУЖНОСТІ МЕТАЛУ ВУЗЛА ПАРОГЕНЕРАТОРА ЗІ ЗВАРНИМ ШВОМ №111 І ЙОГО НАВКОЛОШОВНОЇ ЗОНИ

О. А. КАТОК

*Відділ чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, УКРАЇНА
email: Katok_O@ukr.net*

АНОТАЦІЯ Представлено розподіл модуля поздовжньої пружності металу зварного шву теплостійкої сталі 10ГН2МФА по геометрії вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР1000, отриманих методом інструментованого індентування. Для оцінки модуля пружності металу зварного шву використано методику, приведену в міжнародному стандарті ISO 14577 і відповідне для її реалізації обладнання, яке розроблене в Інституті. Отримані результати можуть бути використані для проведення досліджень особливостей деформування вузла парогенератора зі зварним з'єднанням №111 з врахуванням реального розподілу характеристик металу з метою прогнозування роботоздатності всього вузла.

Ключові слова: Неруйнівний контроль, метод інструментованого індентування, зварне з'єднання, діаграма індентування, модуль поздовжньої пружності.

АННОТАЦИЯ Представлено распределение модуля продольной упругости металла сварного шва теплостойкой стали 10ГН2МФА по геометрии узла сварного соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора АЭС с ВВЭР 1000, оцененного методом инструментированного индентирования. Для оценки модуля упругости металла сварного шва использовали методику, приведенную в международном стандарте ISO 14577 и соответствующее для ее реализации оборудование, разработанное в Институте. Полученные результаты могут быть использованы для проведения исследований особенностей деформирования узла парогенератора со сварным соединением №111 с учетом реального распределения характеристик металла с целью прогнозирования работоспособности всего узла.

Ключевые слова: Неразрушающий контроль, метод инструментированного индентирования, сварное соединение, диаграмма индентирования, модуль продольной упругости

INVESTIGATION INTO THE DISTRIBUTION OF THE LONGITUDINAL MODULUS OF ELASTICITY IN THE METAL OF WELDED JOINT NO. 111 AND ITS HEAT-AFFECTED ZONE IN A STEAM GENERATOR

О. А. КАТОК

Department of Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The investigation of the metal of the hot collector-to-nozzle welded joint in a steam generator at NPP with WWER-1000 is performed by the instrumented indentation test after the service life. This weldment is composed of a segment of circumferential weld No. 111 and the base metal of pressure vessel structural steel 10GN2MFA. To assess the elastic modulus of the welded joint metal, the procedure described in the International Standard ISO 14577 and the proper equipment developed at the Institute that is required for its implementation were used.

The distribution of the longitudinal modulus of elasticity in the welded joint metal of heat-resistant steel 10GN2MFA was obtained for the first time from the geometry of the weldment using the indentation curves. It is shown that the modulus of elasticity changes slightly in the thickness of the heat affected zone in the upper part of the steam generator nozzle (within 1%) for a mean value of 196880 MPa. A spread in the values of the elasticity modulus equal to 11 % is observed on the intersecting surfaces and the surfaces formed by the layer-by-layer removing in the area of the welded joint in the direction from the bottom of the collector pocket to the steam generator nozzle. The results obtained by the instrumented indentation test are supported by the tensile testing results. A departure of values of the modulus of elasticity determined using the results obtained by the instrumented indentation tests from those obtained in tensile tests does not exceed 6 %. The obtained results can be used to conduct the investigations of the features of deformation in hot collector-to-nozzle welded joint No. 111 with consideration of the actual distribution in the characteristics of the metal for the purposes of predicting the serviceability of the entire weldment.

Keywords: Nondestructive testing, instrumented indentation test, welded joint, indentation curve, longitudinal modulus of elasticity.

Вступ

Надійна експлуатація, а також продовження ресурсу обладнання АЕС значною мірою залежить від

коректності і точності величин механічних характеристик матеріалів, що отримані в результаті механічних випробувань, для визначення його деградації в процесі експлуатації. Тому актуальним є

отримання нових даних про деформування і руйнування матеріалів корпусів реакторів та іншого відповідального обладнання АЕС з урахуванням реальних умов їх експлуатації, визначення їх пошкоджуваності в процесі експлуатації.

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 [1 – 5].

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України проведено комплекс досліджень, направлених на розвиток неруйнівних методів контролю поточного стану конструкційних матеріалів за методом інструментованого індентування та розробку обладнання для проведення таких випробувань в лабораторних та промислових умовах з використанням різноманітних режимів статичного та циклічного навантаження в макродіпазоні навантажень від 2 до 10000 Н [6-8].

Із використанням удосконалених методик і створеного експериментального обладнання для випробувань металів методом інструментованого індентування отримано нові дані для ряду конструкційних сталей щодо їх міцності у вихідному стані та після експлуатаційного напрацювання [8-10]. В роботі [10] методом інструментованого індентування вперше було визначено розподіл характеристик міцності теплостійкої сталі 10ГН2МФА по геометрії вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС.

Мета роботи

В даній роботі приведені результати досліджень розподілу модуля поздовжньої пружності металу вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000, після експлуатаційного напрацювання, виконаних методом інструментованого індентування. Отримані результати доповнюють результати отримані в роботі [10] і можуть бути використані при проведенні досліджень особливостей деформування вузла парогенератора ПГВ-1000М зі зварним з'єднанням №111 з врахуванням реального розподілу характеристик металу з метою прогнозування роботоздатності всього вузла.

Матеріал, обладнання, методи випробувань

Випробовували фрагмент вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора [10], що складається із відрізка

кільцевого зварного шва №111 і основного металу – корпусна конструкційна сталь 10ГН2МФА. Темплет вирізали із парогенератора, знятого із експлуатації після напрацювання 12 тис. год. Схему парогенератора з місцем вирізки темплету показано на рис. 1.

Для визначення модуля поздовжньої пружності металу вузла зварного з'єднання було використано методику приведену в міжнародному стандарті ISO 14577 [1]. Вибір і обґрунтування методики описано в роботі [11].

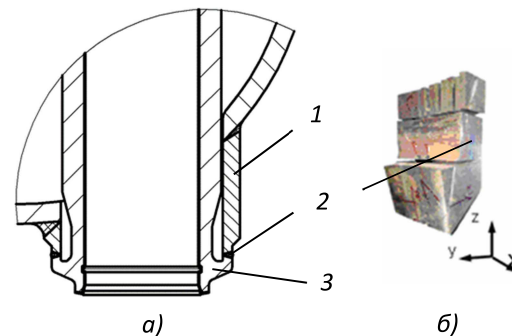


Рис. 1 – Схема вузла зварного з'єднання (а) «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000: 1 – патрубок парогенератора Ду 1200; 2 – зварне з'єднання №111; 3 – колектор і вигляд темплету для випробувань (б).

Згідно із цією методикою модуль пружності визначається за рівнянням:

$$E = \frac{1 - \mu^2}{2 \cdot C \cdot \sqrt{A_p} \cdot \frac{1 - \mu_1^2}{\sqrt{\pi}} - E_1} \quad (1)$$

де C – коефіцієнт податливості, A_p – площа проекції невідновленої лунки, яка дорівнює:

$$A_p = \pi \cdot h_c \cdot (D - h_c) \quad (2)$$

де D – діаметр індентора; h_c – глибина вдавлювання, протягом якої відбувається контакт між індентором і матеріалом після повного навантаження до F_{max} .

Реєстрацію кривої індентування проводили у відповідності до вимог міжнародного стандарту [1] кулькою діаметром 2,5 мм на установці UTM – 20 НТ (рис. 2) [6]. Швидкість переміщення індентора складала 0,05 мм/хв. В установці передбачено можливість без переустановлення об'єкту випробувань виконати послідовність індентувань, що дозволяє оцінити зміну властивостей металу продовж лінії, наприклад, упоперек зварного шва.



Рис. 2 – Універсальна випробувальна машина UTM – 20 НТ для інденування металів кулькою із твердого сплаву

Випробовування проводили по довжині поверхні перерізу вузла зварного з'єднання (в окружному напрямку) і по висоті зовнішньої поверхні цього ж вузла (в радіальному напрямку), а також з пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 3 і 40 мм. Вибір розмірів товщини знятого шару пов'язаний з місцем розташування ліній інденування на поверхні перерізу. Зовнішній вигляд темплету після випробувань методом інденування приведено на рис. 3, де точками показано місця вдавлювання інденатора.

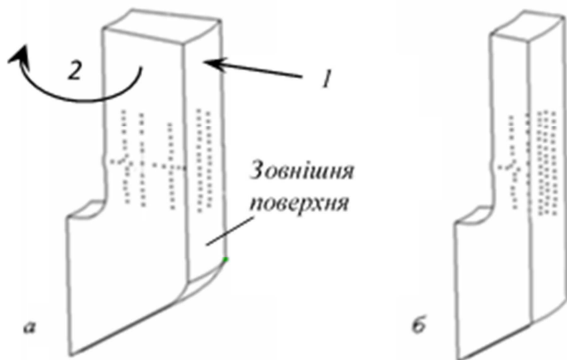


Рис. 3 – Схема місць інденування темплету по висоті вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора до (а) і після (б) зняття зовнішньої поверхні товщиною 40 мм: радіальний (1) і окружний (2) напрямки;

Результати досліджень та їх обговорення

За даними випробувань методом інструментованого інденування із використанням

методики [1] визначали модуль поздовжньої пружності металу вузла зварного з'єднання. Розподіл модуля пружності по довжині поверхні перерізу вузла зварного з'єднання колектору із патрубком парогенератора показано на рис. 4. На рис. 5 побудовано розподіл модуля пружності по довжині поверхонь утворених пошаровим зняттям зовнішньої поверхні досліджуваного вузла.

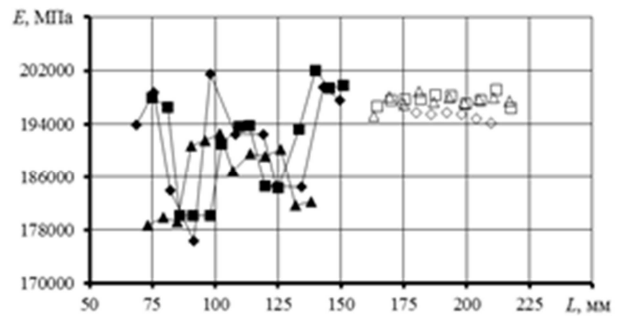


Рис. 4 – Зміна модуля поздовжньої пружності E теплостійкої сталі 10ГН2МФА по довжині поверхні перерізу вузла зварного з'єднання L «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000 після експлуатаційного напруження. \blacktriangle , \blacklozenge , \blacksquare – метал зварного шва №111; \diamond , \triangle , \square – патрубок парогенератора Ду 1200; \blacktriangle , \blacklozenge , \blacksquare – відстань від зовнішньої поверхні зварного з'єднання, становить 14, 40 і 50 мм відповідно.

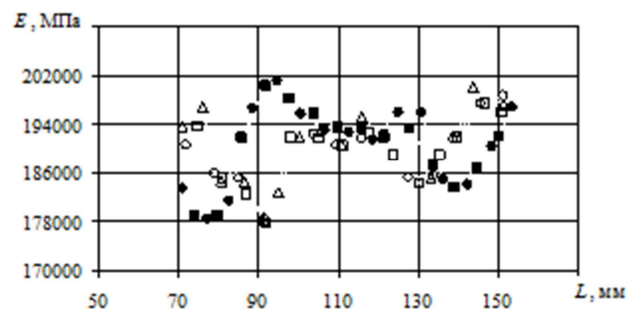


Рис. 5 – Зміни модуля пружності E по довжині поверхні утвореної пошаровим зняттям зовнішньої поверхні вузла зварного з'єднання L «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000 товщиною 3 (■, ●) і 40 мм (○, △, □): інденування на відстані від поверхні перерізу: ■ – 18 мм; ● – 26 мм; ○ – 14 мм; △ – 25 мм і □ – 31 мм.

Як показали дослідження, модуль пружності по товщині зони термічного впливу верхньої частини патрубку парогенератора змінюється несуттєво (в межах 1 %) при середній величині 196880 МПа. На поверхні перетину і поверхнях створених пошаровим зняттям в районі зварювального з'єднання, в напрямку від дна «карману» колектору до патрубка

парогенератора, спостерігається розкид величини модуля пружності рівний 11 %. Даний розкид можна пояснити наявністю різних за структурою ділянок у зварювальному шві: метал зони термічного впливу нижньої і верхньої частин патрубку; ділянка перегріву металу зони термічного впливу нижньої частини патрубку; прошарки, що прилягають до зони термічного впливу (верхня і нижня); центральний шар металу шва; ділянка перегріву металу зони термічного впливу верхньої частини патрубку [10].

Різну орієнтацію точок максимумів і мінімумів на кривих розподілу модуля пружності можна пояснити трапецієподібною формою шва. При віддаленні від зовнішньої поверхні крива розподілу механічних характеристик більш розвернута.

Зіставлення значень модуля пружності металу поверхні перерізу (в окружному напрямку на відстані 40 мм від зовнішньої поверхні) і поверхні утвореної пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 40 мм (в радіальному напрямку) демонструє рис. 6. Незважаючи на те, що зварювальне з'єднання має різні за структурою ділянки, характер розподілу модуля Юнга в окружному і радіальному напрямках, на відстані 40 мм від зовнішньої поверхні, подібний. Аналогічний результати було отримано при зіставленні результатів випробувань на поверхні перерізу на відстані 3 мм і поверхні утвореної пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 3 мм.

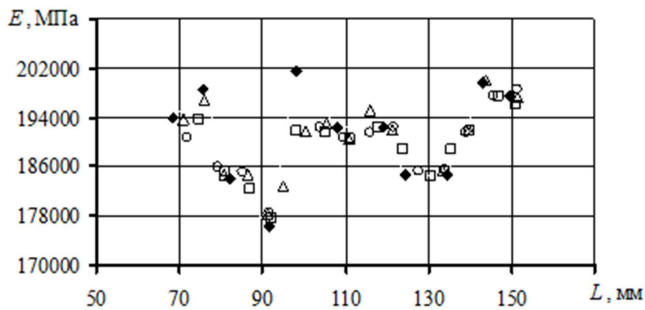


Рис. 6 – Порівняльні результати визначення методом інструментованого індентування модуля пружності на поверхні перерізу (◆) і поверхні утвореної з пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 40 мм (○, Δ, □) зварного шва №111: ◆ – індентування на відстані 40 мм від зовнішньої поверхні; індентування на відстані від поверхні перетину: ○ – 14 мм; Δ – 25 мм і □ – 31 мм.

Середнє значення модуля пружності зони термічного впливу верхньої частини патрубку парогенератора, визначені за діаграмами індентування за допомогою методики [1], і їх відхилення від результатів випробувань на розтяг приведені в таблиці. Видно, що розкид значень модуля пружності визначених за результатами випробувань методом інструментованого індентування, від таких, що

отримані при випробуванні на розтяг, не перевищує 6 %.

Таблиця – Значення модуля поздовжньої пружності сталі 10ГН2МФА, МПа, які отримані при випробуванні на одновісний розтяг і інструментоване індентування за допомогою методики [1]

Випробування на розтяг (ГОСТ 1497-84)	Випробування методом інструментованого індентування (ISO 14577)	Відхилення Δ, %
208600	196880	5,6

Висновки

Методом інструментованого індентування вперше визначено розподіл модуля поздовжньої пружності металу по геометрії вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000, після експлуатаційного напрацювання. Показано, що на досліджуваних поверхнях в напрямку від дна карману колектору до патрубка парогенератора розподіл модуля пружності носить складний немонотонний характер. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями модуля сягає 11 %.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що розподіл модуля пружності на поверхні перетину і поверхнях утворених пошаровим зняттям різної товщини зовнішньої поверхні вузла зварного з'єднання мають подібний характер.

Результати отримані методом інструментованого індентування підтверджені результатами випробувань на розтяг. Розкид значень модуля пружності визначених за результатами випробувань методом інструментованого індентування, від таких, що отримані при випробуванні на розтяг, не перевищує 6 %.

Список літератури

- 1 ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
2. **Бакиров, М. Б.** Исследование возможности восстановления диаграмм деформирования с помощью нейросетевого подхода / **М. Б. Бакиров, О. А. Мишулина, И. А. Киселев, И. А. Круглов** // *Завод. лаб.* – 2010. – Том 76. – № 7. – С. 42 - 48.
3. **Haggag, F. V.** Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and oil and Gas Pipelines / **F. V. Haggag** // *International Journal of Pure and Applied Physics.* – 2007. – vol. 3. – № 1. – P. 91-108.
4. **Oliver, W. C.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advanced in understanding and refinements to methodology / **W. C.**

- Oliver, G. M. Pharr** // *Journal of Materials Research*. – 2004. – vol. 19. – № 1. – P. 3-20.
5. **Lee, H.** A numerical approach to special indentation techniques for material property evaluation / **H. Lee, J. H. Lee, G. M. Pharr** // *J.Mech. Phys. Solids*. – 2005. – № 54. – P. 2037-2069.
 6. **Харченко, В. В.** Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования / **В. В. Харченко, Н. П. Рудницкий, О. А. Каток, А. Н. Неговский, А. В. Дроздов, В. В. Кутняк** // *Надежность и долговечность машин и сооружений*. – 2007. – Вып. 28. – С. 140 - 147.
 7. **Харченко, В. В.** Переносний прилад для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого ідентування / **В. В. Харченко, О. А. Каток, О. В. Дроздов** та і ін. // *Надійність і довговічність машин і споруд*. – 2009. – Вып. 32. – С. 162 - 168.
 8. **Каток, О. А.** Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования / **О. А. Каток, В. В. Харченко, А. В. Дроздов, О. В. Панасенко** // *Надежность и долговечность машин и сооружений*. – 2009. – Вып. 31. – С. 208 - 213.
 9. **Каток, О. А.** К определению механических характеристик сталей по результатам испытаний на твердость / **О. А. Каток, Н. П. Рудницкий, В. П. Швец, В. В. Харченко, А. В. Бажуков, П. Е. Мельник** // *Проблемы прочности*. – 2014. – № 6. – С 66 - 70.
 10. **Харченко, В. В.** Исследование прочностных характеристик сварного шва парогенератора после эксплуатационной наработки методом индентирования / **В. В. Харченко, О. А. Каток, А. В. Панасенко, Н. П. Рудницкий, А. В. Бажуков, П. Е. Мельник** // *Проблемы прочности*. – 2013. – № 3. – С 58 - 65.
 11. **Каток О.А., Макаев А.Г., Панасенко О.В., Харченко В.В.** Визначення модуля пружності сталей методом інструментованого ідентування / **О. А. Каток, А. Г. Макаев, О. В. Панасенко, В. В. Харченко** // *Надійність і довговічність машин і споруд*. – 2012. – Вып. 35. – С. 209 - 213.
 2. **Bakirov, M. B., Mishulina, O. A., Kiselev, I. A., Kruglov, I. A.** Study of the Possibility of Reconstruction Strain Diagrams Using Neural Network Approach. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2010, 7(76), 42 - 48.
 3. **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, 1(3), 91 - 108.
 4. **Oliver, W. C., Pharr, G. M.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advanced in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, 1(19), 3 - 20.
 5. **Lee, H., Lee, J. H., Pharr, G. M.** A numerical approach to special indentation techniques for material property evaluation. *J.Mech. Phys. Solids*, 2005, 54, 2037-2069.
 6. **Kharchenko, V. V., Rudnitskii, N. P., Katok, O. A., Negovsky, A. N., Drozdov, A. V., Kutnyak, V. V.** An instrumented indentation machine for determination mechanical characteristics of structural materials. *Reliability and life of machines and structures*, 2007, 28, 140 - 147.
 7. **Kharchenko, V. V., Katok, O. A., Drozdov, A. V.** An instrumented indentation portable device for determining strength characteristics of metals. *Reliability and life of machines and structures*, 2009, 32, 162 - 168.
 8. **Katok, O. A., Kharchenko, V. V., Drozdov, A. V., Panasenko, A. V.** Determination of the mechanical properties of steels by the instrumented indentation test method. *Reliability and life of machines and structures*, 2008, 31, 208 - 213.
 9. **Katok, O. A., Rudnitskii, N. P., Kharchenko, V. V., Bazhukov, A. V., Melnik, P. E.** On the Determination of the Mechanical Characteristics of Steels from Hardness Test Results. *Strength of materials*, 2014, 6(46), 773 - 776.
 10. **Kharchenko, V. V., Katok, O. A., Panasenko, A. V., Rudnitskii, N. P., Bazhukov, A. V., Melnik, P. E.** Study of Steam Generator Weld Strength Characteristics after Operating Period by the Instrumental Indentation Method. *Strength of materials*, 2013, 3(45), 295 - 300.
 11. **Katok, O. A., Makaev, A. G., Panasenko, A. V., Kharchenko, V. V.** Determination of elastic modulus for steels by instrumented indentation test. *Reliability and life of machines and structures*, 2012, 35, 209 - 213.

Bibliography (transliterated)

- 1 ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.

Надійшла (received) 08.10.2015