

**О. В. Тригубенко***Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ***КОРЕЛЯЦІЯ ПОПЕРЕЧНОГО РОЗШИРЕННЯ ТА УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ  
МАТЕРІАЛІВ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000**

За даними випробувань на ударний вигин опромінених нейтронами до різних значень флюенсу зразків-свідків металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 було визначено ударну в'язкість матеріалу та поперечне розширення зразків. Аналіз цих характеристик виявив їхню лінійну кореляцію, причому було показано, що опромінення металу практично не впливає на кут нахилу апроксимуючої прямої. Шляхом виокремлення даних для зразків, випробуваних при температурах, що відповідають верхньому шельфу кривої ударної в'язкості, було продемонстровано, що одночасно зменшується поперечне розширення й ударна в'язкість при накопиченні металом флюенсу нейтронів.

*Ключові слова:* корпус реактора, зразки-свідки, ударна в'язкість, поперечне розширення, флюенс нейтронів.

**Вступ**

Упродовж усього періоду експлуатації реакторної установки для матеріалів корпусу реактора (КР) має бути забезпечено надійний контроль за змінами механічних властивостей під дією експлуатаційних факторів. Для цього використовують методи руйнівного та неруйнівного контролю згідно з вимогами нормативних документів. Одним із методів руйнівного контролю є випробування на ударний вигин зразків Шарпі в рамках Програми зразків-свідків. Даний тип випробування дає змогу отримати температурні залежності енергії удару та поперечного розширення (залишкова деформація, виміряна при кімнатній температурі на половинках зруйнованих зразків Шарпі на грані, протилежній механічному надрізу), які використовуються для оцінки критичної температури крихкості матеріалу КР. Наприклад, у нормах ASME (американське товариство механіків та інженерів) для оцінки перехідної температури крихкості  $RT_{NDT}$  використовують критеріальні рівні енергії удару 68 Дж та поперечного розширення 0,89 мм [1].

Для того щоб точно виміряти поперечне розширення, необхідно мати в наявності спеціальний датчик, а також відповідні навички у вимірюванні та інтерпретації даних; інакше можна отримати помилкові результати вимірювань. Проте визначення енергії удару за допомогою каліброваного маятникового копра значно менше схильне до таких помилок. Зважаючи на це, деякі відомі з літератури дослідження були проведені, щоб установити зв'язок між енергією удару ( $C_V$ ) та поперечним розширенням ( $LE$  – lateral expansion) і використовувати для інженерних цілей кореляційні залежності для оцінки  $LE$ , знаючи лише відповідну енергію удару. Наприклад, у роботі [2] було проаналізовано результати

випробувань на ударний вигин по Шарпі для кількох типів сталей, включаючи сталь A533B для КР типу PWR. Аналіз показав, що для різних сталей у неопроміненому стані існує кореляція між поперечним розширенням зразка та енергією, затраченою на його руйнування, проте для кожної сталі форма залежності відрізняється.

Іншою характеристикою, яка визначається при випробуваннях на ударний вигин, є верхній шельф (USE) кривої ударної в'язкості, тобто максимальний рівень енергії, яка затрачається на руйнування зразка у в'язкому стані. Величина USE характеризує опір матеріалу в'язкому руйнуванню і тому, наряду із зсувом критичної температури крихкості, являється показником ступеня деградації властивостей корпусної сталі під опроміненням.

Метою даної роботи було віднаходження зв'язку поперечного розширення та ударної в'язкості (KCV) матеріалів КР ВВЕР-1000 в неопроміненому та опроміненому станах. Окрім того, було розглянуто вплив нейтронного опромінення на поперечне розширення зразків основного металу (ОМ) та металу зварного шва (ЗШ), випробуваних при температурах верхнього шельфу кривої Шарпі.

**Експериментальний метод**

Основним зразком при випробуванні на ударний вигин за ГОСТ 9454-78 [3] та ISO 148-1 [4] є зразок типу Шарпі квадратного перерізу  $10 \times 10$  мм і довжиною 55 мм та нанесеним V-подібним надрізом посередині зразка. Зразок установлюється на опори маятникового копра строго по центру. Удар наносять з боку, протилежному надрізу, у площині, перпендикулярній поздовжній осі зразка. Величина роботи деформації і руйнування визначається різницею потен-

ціальної енергії маятника в початковий і кінцевий моменти випробування.

Для зразків типу Шарпі величину поперечного розширення зразка при руйнуванні можна знайти кількісно, порівнявши його значення до та після удару молотом копра. Під час руйнування формується залишкова пластична деформація на грані, протилежній надрізу, яку й можна виміряти.

Випробування зразків проводилися на обладнанні, яке знаходиться в лабораторії «гарячих» камер Інституту ядерних досліджень НАН України. Для ударних випробувань використовувався маятниковий копер КМД-30 з максимальною потенціальною енергією 300 Дж. Зразки були випробувані в діапазоні температур, що включають перехідну область та нижній і верхній шельфи кривої Шарпі. Ударна в'язкість на верхньому шельфі визначається як середнє значення для зразків з повністю в'язким зломом. Значення в'язкої складової у зламі визначається відповідно до рекомендацій стандарту ГОСТ 4543-71 [5] або Е 23-05 [6].

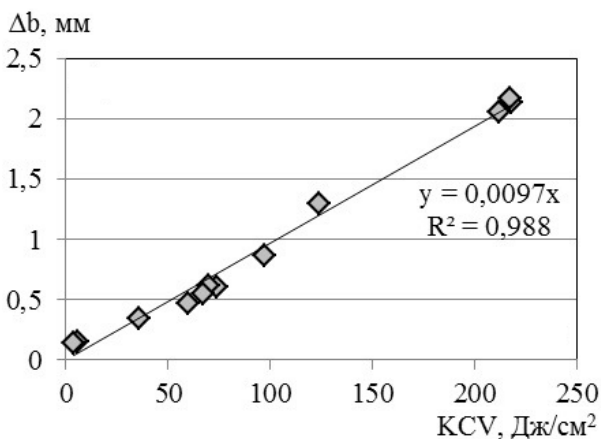
### Матеріали та умови опромінення

Для даного дослідження було взято зразки, виготовлені з ОМ КР ВВЕР-1000 (сталь 15Х2НМФА-А), а також зразки металу ЗШ. Максимальна тривалість опромінення зразків становить 24 паливних кампанії; при цьому накопичений флюенс  $\epsilon \sim 87 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> для ОМ та  $\sim 65 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> для металу ЗШ. Температура опромінення зразків становить  $\sim 300$  °С. Для порівняння результатів випробувань опромі-

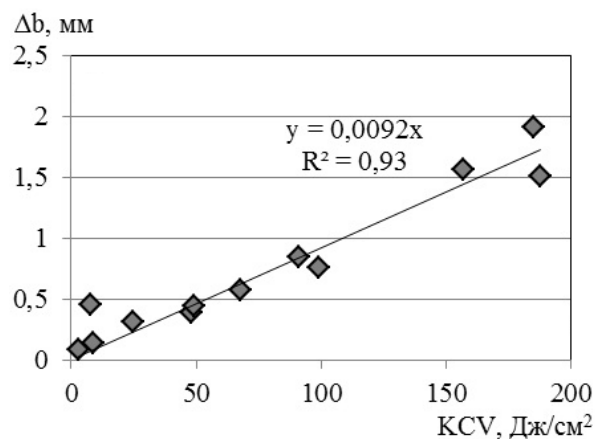
нених зразків-свідків (ЗС), було досліджено неопромінені зразки, а також зразки, що зазнали впливу лише термічного старіння при температурі  $\sim 320$  °С.

### Результати дослідження

Після проведення випробувань на ударну в'язкість, визначення енергії руйнування металу та проведення вимірювань поперечного розширення ( $\Delta b$ ) половинок випробуваних зразків дані КСВ і  $\Delta b$  було нанесено на графік для виявлення кореляції між двома характеристиками. На рис. 1 та 2 представлено кореляційні залежності для ОМ та металу ЗШ, зразки яких було опромінено в реакторі блока № 2 Запорізької АЕС (ЗАЕС) до різних значень флюенсу. Як видно з рисунків, між величинами КСВ і  $\Delta b$  спостерігається пряmolінійна кореляція з коефіцієнтом достовірності апроксимації, близьким до одиниці. За цим можна говорити про певний зв'язок енергії, яка затрачається на руйнування металу, тобто розрив міжатомних зв'язків, та енергії, яка йде на залишкову деформацію, від кількості цієї деформації. Аналіз показав, що співвідношення поперечного розширення зразка та питомої енергії руйнування характеризується лінійною залежністю з коефіцієнтом пропорційності, близьким до 0,01. Таким чином, маючи вид кореляційної залежності  $\Delta b$  від КСВ, можна оцінити поперечне розширення зразка, маючи дані енергії руйнування. Цей підхід може бути використаний у випадку, коли немає можливості прямо виміряти поперечне розширення зразка.



а



б

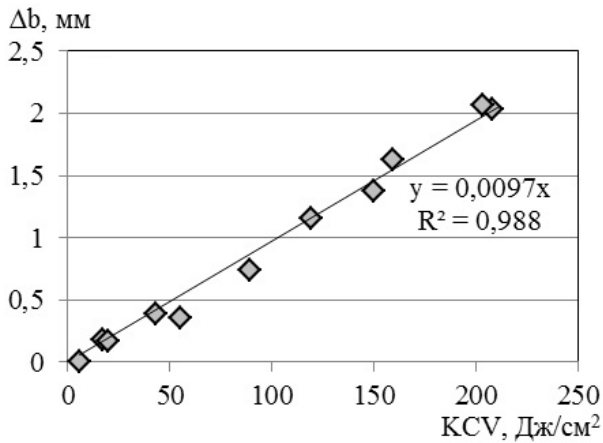
Рис. 1. Кореляція поперечного розширення та ударної в'язкості для зразків ОМ КР блока № 2 ЗАЕС, опромінених до флюенсу  $F \sim 22,2 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> (а) та  $\sim 58,9 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> (б).

Також доцільним видається співставлення результатів випробувань неопромінених та опромінених зразків. Результати такого співставлення показано на рис. 3. На цьому рисунку нанесено результати випробувань зразків контрольного

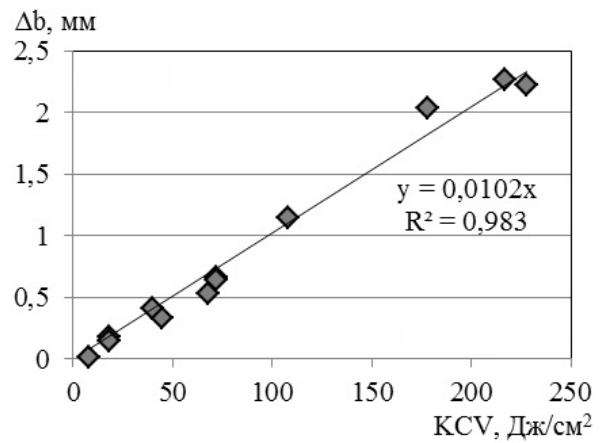
комплекту разом з експериментальними даними для опроміненого комплекту ЗЛ блока № 2 ЗАЕС для ОМ (див. рис. 3, а) та металу ЗШ (див. рис. 3, б). Виявилось, що експериментальні точки з малим розкидом формують лінійну прямопро-

порційну залежність  $\Delta b$  від KCV з коефіцієнтом пропорційності  $k$ , близьким до 0,01, як для неопромінених, так і опромінених зразків; тобто

кут нахилу прямої залишається майже незмінним навіть при накопиченні значного флюенсу.

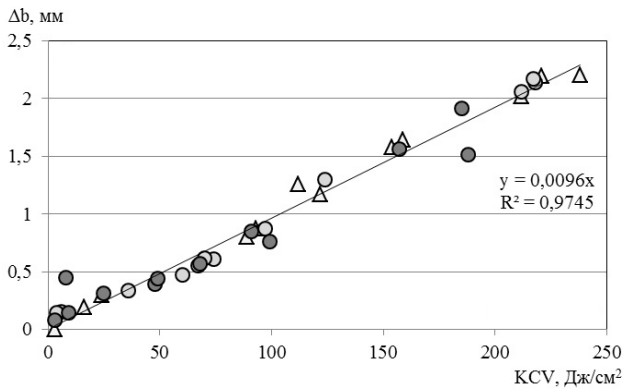


*a*

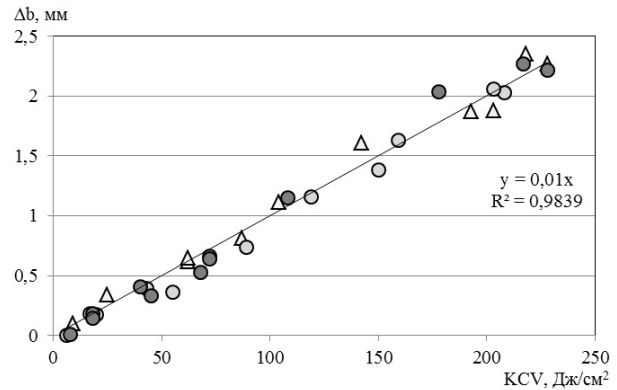


*б*

Рис. 2. Кореляція поперечного розширення та ударної в'язкості для зразків металу ЗШ КР блока № 2 ЗАЕС, опромінених до флюенсу  $F \sim 17,4 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> (*a*) та  $\sim 42,7 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> (*б*).

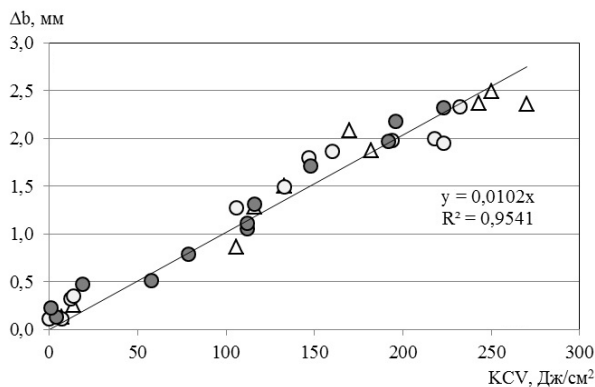


*a*

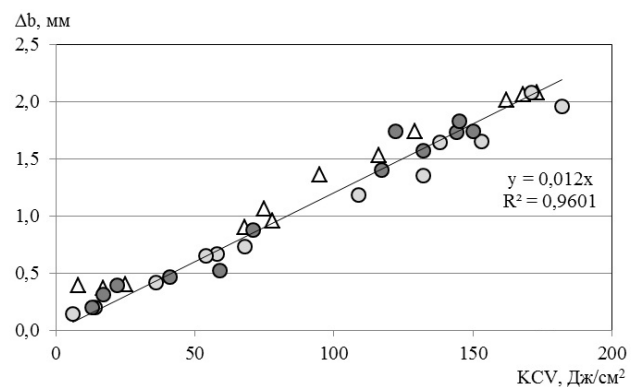


*б*

Рис. 3. Кореляція поперечного розширення та ударної в'язкості неопромінених та опромінених зразків ОМ (*a*) та металу ЗШ (*б*) КР блока № 2 ЗАЕС ( $\Delta$  – неопромінені зразки;  $\circ$  – зразки, опромінені до  $F \sim 22,2 \times 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> та  $\sim 17,4 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> для ОМ та ЗШ відповідно;  $\bullet$  – ЗС, опромінені до  $F \sim 58,9 \times 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> та  $\sim 42,7 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> для ОМ та ЗШ відповідно).



*a*



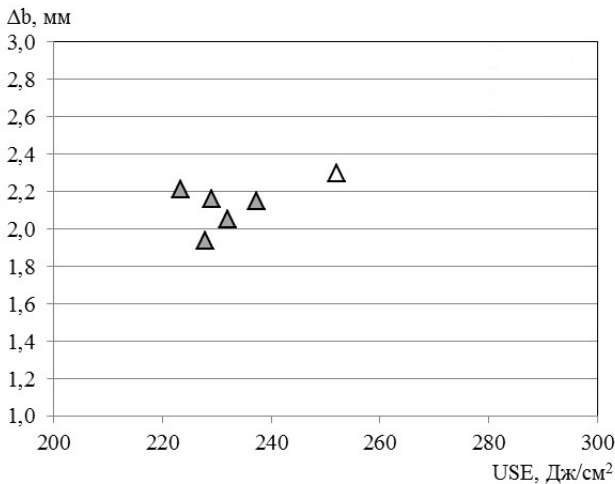
*б*

Рис. 4. Кореляція поперечного розширення та ударної в'язкості неопромінених та опромінених зразків ОМ (*a*) та металу ЗШ (*б*) КР блока № 3 ЗАЕС ( $\Delta$  – неопромінені зразки;  $\circ$  – зразки, опромінені до  $F \sim 27,6 \times 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> та  $\sim 22,2 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> для ОМ та ЗШ відповідно;  $\bullet$  – ЗС, опромінені до  $F \sim 68,7 \times 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> та  $\sim 55,8 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> для ОМ та ЗШ відповідно).

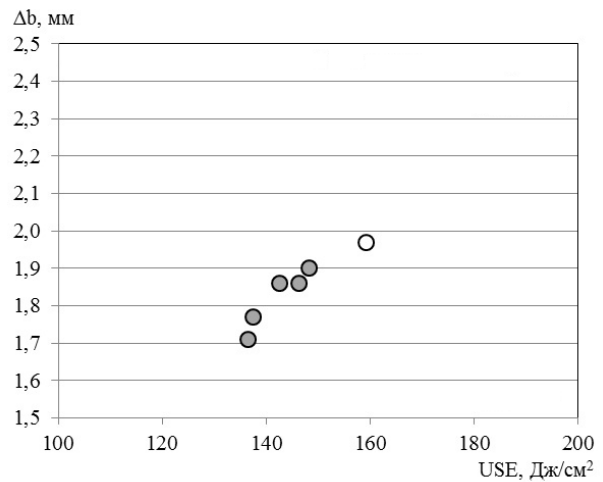
Це ж наглядно підтверджують експериментальні дані для корпусів інших блоків, наприклад ЗАЕС-3 (рис. 4).

Проте слід відзначити, що хоча кут нахилу залежності  $\Delta b$  від KCV не змінюється, проте вплив опромінення на дану кореляцію спостерігається, оскільки відбувається одночасне зниження обох характеристик. Аналіз даних поперечного розширення зразків, випробуваних на верхньому шельфі, залежно від ударної в'язкості металу дає

зможу наглядно зобразити цю тенденцію. На рис. 5 показано, що нейтронне опромінення призводить до зменшення енергії в'язкого руйнування та поперечного розширення зразків, тобто при збільшенні дози опромінення енергії на руйнування зразка затрачається все менше, навіть для металу в повністю в'язкому стані. Паралельно з цим матеріал стає важче деформувати і, відповідно, залишкова деформація після руйнування зразка буде меншою.



а



б

Рис. 5. Співвідношення поперечного розширення та ударної в'язкості зразків, випробуваних на верхньому шельфі, для ОМ (а) та металу 3Ш (б) КР блока № 4 ЗАЕС (Δ, ○ – контрольні комплекти зразків; ▲, ● – опромінені комплекти).

Таким чином, у результаті дослідження виявлено кореляцію ударної в'язкості та поперечного розширення зразків металу КР, а також пропорційне зниження величин  $\Delta b$  та KCV внаслідок дії нейтронного опромінення. Слід зауважити, що радіаційно-стимульоване зменшення поперечного розширення опромінених зразків Шарпі непрямо характеризує радіаційне зміцнення металу КР.

### Висновки

Проведення серії експериментів на ударний вигин металу КР декількох блоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000 дало змогу отримати та проаналізувати дані ударної в'язкості матеріалу цих корпусів, визначити кількість пластичної деформації зразків після руйнування та долю в'язкої складової у зламі. Зразки було випробувано в діапазоні температур, що включають перехідну область та верхній і нижній шельфи кривої Шарпі.

Одним із результатів аналізу даних є виявлення лінійної кореляції величини поперечного розширення зразків та питомої енергії, що затрачається на руйнування зразка при випробуваннях на ударний вигин. Результатом даної роботи є не лише демонстрація цієї залежності, а й виявлен-

ня того факту, що кут нахилу апроксимуючої прямої для залежності  $\Delta b$  від KCV майже не змінюється для груп опромінених зразків по відношенню до менш опромінених груп, а також контрольних (неопромінених) комплектів зразків того ж типу металу. Цей висновок актуальний як для ОМ, так і для металу 3Ш корпусів реакторів.

При аналізі залежності поперечного розширення від ударної в'язкості ЗС окремо було розглянуто експериментальні дані, що відповідають верхньому шельфу кривої Шарпі, оскільки саме вони наочно показують вплив нейтронного опромінення на параметри  $\Delta b$  і KCV і демонструють зниження енергетичних затрат на руйнування металу при збільшенні флюенсу нейтронів.

На основі результатів випробувань зразків при температурах верхнього шельфу в роботі було показано, що накопичення дози нейтронного опромінення веде до одночасного зниження ударної в'язкості металу та поперечного розширення. Цей ефект можна пояснити відомим фактом, що радіаційні дефекти є ефективними стопорами для рухомих дислокацій та призводять до зміцнення матеріалу і, як наслідок, до зменшення його спротиву в'язкому руйнуванню [7].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NB 2300, Fracture toughness requirements for material, New York, NY (2001).*
2. *Sreenivasan P.R. Charpy energy-lateral expansion relations for a wide range of steels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. - 2006. - Vol. 83. - P. 498 - 504.*
3. *ГОСТ 9454-78 (СТ СЭВ 472-77, СТ СЭВ 473-77). Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 12 с.*
4. *ISO 148-1:2006. Metallic materials. Charpy pendulum impact test. Part 1: Test method. - 2006. - 26 p.*
5. *ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1973. - 40 с.*
6. *E 23-05. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. - ASTM. - 2005. - 27 p.*
7. *Радиационное повреждение стали корпусов водородных реакторов / Под ред. И. В. Горынина. - М.: Энергоиздат, 1981. - 192 с.*

**А. В. Тригубенко**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

**КОРРЕЛЯЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО РАСШИРЕНИЯ И УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000**

По данным испытаний на ударный изгиб облученных нейтронами до различных значений флюенса образцов-свидетелей металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 определено ударную вязкость материала и поперечное расширение образцов. Анализ этих характеристик выявил их линейную корреляцию, причем было показано, что облучение металла практически не влияет на угол наклона аппроксимирующей прямой. Путем выделения данных для образцов, испытанных при температурах, соответствующих верхнему шельфу кривой ударной вязкости, было продемонстрировано, что одновременно уменьшаются поперечное расширение и ударная вязкость при накоплении металлом флюенса нейтронов.

*Ключевые слова:* корпус реактора, образцы-свидетели, ударная вязкость, поперечное расширение, флюенс нейтронов.

**O. V. Trygubenko**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**LATERAL EXPANSION AND IMPACT TOUGHNESS CORRELATION OF VVER-1000 REACTOR  
PRESSURE VESSEL MATERIALS**

Impact toughness and lateral expansion of the irradiated surveillance specimens for VVER-1000 reactor pressure vessel have been defined using Charpy impact test. The analysis of experimental data has revealed a linear correlation of these characteristics. It was shown that a slope of the regression line is practically unchanged due to irradiation. Using the upper shelf energy test data it was also demonstrated the lateral expansion and impact toughness decrease simultaneously under the neutron irradiation.

*Keywords:* reactor pressure vessel, surveillance-specimens, impact toughness, lateral expansion, neutron fluence.

REFERENCES

1. *American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NB 2300, Fracture toughness requirements for material, New York, NY (2001).*
2. *Sreenivasan P.R. Charpy energy-lateral expansion relations for a wide range of steels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. - 2006. - Vol. 83. - P. 498 - 504.*
3. *State standard GOST 9454-78 (ST SEV 472-77, ST SEV 473-77). Metals. The method of testing the impact strength at low, ambient and elevated temperatures. - Moskva: Izd-vo standartov, 1982. - 12 p. (Rus)*
4. *ISO 148-1:2006. Metallic materials. Charpy pendulum impact test. Part 1: Test method. - 2006. - 26 p.*
5. *State standard GOST 4543-71. Rental of stainless steel. Technical conditions. - Moskva: Izd-vo standartov, 1973. - 40 p. (Rus)*
6. *E 23-05. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. - ASTM. - 2005. - 27 p.*
7. *Radiation damage of steel of water-water reactor vessels / Ed. by I. V. Gorynin. - Moskva: Energoizdat, 1981. - 192 p. (Rus)*

Надійшла 27.05.2014  
Received 27.05.2014