

АНАЛІЗ ПОВТОРНОГО ПІСЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ВІДПАЛУ ОКРИХЧУВАННЯ КОРПУСУ РЕАКТОРА РАЕС-1

В.М. Ревка¹, О.В. Тригубенко^{1,2}, Л.І. Чирко¹

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, ²ВП «Науково-технічний центр»
ДП «НАЕК «Енергоатом»

Abstract. The paper presents the results of Charpy impact tests of re-irradiated after recovery annealing surveillance-specimens of Rivne NPP unit 1 RPV. Ductile to brittle transition temperature is determined for weld metal with different phosphorus content. The shortcomings of current regulatory approach have been considered for weld metal with low upper shelf energy that may result in artificial overestimation of transition temperature and unnecessary restrictions of RPV lifetime.

Вступ. Для сталей, з яких виготовлені корпуси реакторів (КР) типу ВВЕР, під дією нейтронного опромінення та підвищеної температури характерна деградація механічних властивостей, що проявляється в окрихчуванні матеріалу та підвищенні характеристик міцності. Окрім параметрів середовища, в якому знаходиться корпус, на швидкість деградації металу впливає хімічний склад сталі і, в першу чергу, вміст шкідливих домішок, таких як мідь та фосфор. Підвищений вміст фосфору і міді в металі зварного шва (ЗШ) № 4 було виявлено у багатьох КР ВВЕР-440, в тому числі і в металі КР енергоблоку № 1 Рівненської АЕС (РАЕС-1), у зв'язку з чим для цих корпусів спостерігається прискорене радіаційне окрихчування ЗШ № 4. Внаслідок підвищеної чутливості до опромінення та розташування напроти активної зони реактора шов № 4 є конструктивним елементом, який обмежує термін служби КР.

Одним із ефективних заходів, що пом'якшує вплив радіаційного пошкодження металу КР є термічний відпал, метою якого є відновлення механічних властивостей металу та температури крихко-в'язкого переходу (КВП). Шляхом нагрівання металу до температури, що дозволяє розчинити матричні радіаційні дефекти та нанокластери атомів міді, фосфору та інших елементів, відбувається часткове відновлення кристалічної решітки сталі та відповідно її властивостей.

Для КР блоку РАЕС-1 проведення відновлювального відпалу ЗШ № 4 було однієї з основних вимог для продовження терміну служби на понад проектний період. Комплекс заходів з відновлювального відпалу КР РАЕС-1 проведено за штатним режимом для корпусів ВВЕР-440 у 2010 році. Для подальшого контролю за станом та управління ресурсом КР РАЕС-1 у період після відновлювального відпалу розроблено нову програму зразків-свідків (ЗС).

Програма матеріалознавчого супроводу експлуатації КР РАЕС-1 за зразками-свідками на понад проектний період. Необхідність проведення відпалу КР РАЕС-1 обґрунтовано за результатами поглибленого дослідження хімічного складу металу шва, що було виконано з використанням зразків-свідків штатної програми енергоблоку. У зв'язку з виявленим градієнтом за вмістом фосфору у зварному шві у новій програмі ЗС враховано різну концентрацію фосфору в металі.

Дослідження впливу міді і фосфору на окрихчування при повторному після відпалу опроміненні показали, що вміст фосфору суттєво впливає на радіаційне окрихчування як при первинному, так і повторному опроміненні [1]. Тому зразки металу ЗШ було розділено на дві групи: з низьким ($C_P = 0,031-0,033\%$ ваг.) та високим ($C_P = 0,035-0,037\%$ ваг.) вмістом фосфору. Крім того до нової програми ЗС додатково включено матеріали зварних швів, виготовлених за штатною технологією корпусів реакторів ВВЕР-440, з вмістом фосфору у діапазоні від 0,029 до 0,051% ваг., що дозволяє отримати консервативну оцінку радіаційного окрихчування внаслідок повторного після відпалу опромінення.

Матеріали та умови опромінення. У роботі представлено результати досліджень на ударний вигин зразків-свідків матеріалу зварних швів, які було повторно опромінено

після відновлювального відпалу у реакторі енергоблоку РАЕС-1. Відпал зразків проведено відповідно до штатного режиму для матеріалів КР ВВЕР-440 (температура 475°C, тривалість 150 годин).

Групи зразків було опромінено до флюенсу швидких ($E > 0,5$ MeV) нейтронів $(59,3 \div 60,9) \cdot 10^{22}$ нейтр/м². Вміст хімічних елементів у металі ЗШ представлено у таблиці 1.

Табл. 1. Вміст хімічних елементів у досліджених матеріалах

Матеріал	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	P	S
Група 1	0,05	1,21	0,45	0,13	1,31	0,44	0,18	0,14	0,029	0,017
Група 2	0,07	1,27	0,52	0,15	1,56	0,47	0,20	0,21	0,031- 0,033	0,021
Група 3	0,03	1,02	0,52	0,24	1,32	0,49	0,17	0,24	0,041	0,015
Група 4	0,04	1,04	0,51	0,22	1,41	0,50	0,20	0,18	0,051	0,015

Методика випробувань та обробки даних. Випробування на ударний вигин стандартних зразків Шарпі (10×10×55 мм) проведено відповідно до вимог ДСТУ EN 10045-1:2006. Для випробувань використовувався маятниковий копер КМД-30 з дистанційним управлінням, встановлений в захисній камері «гарячої» лабораторії.

З використанням температурних залежностей ударної в'язкості відповідно до вимог нормативного документу ПНАЕ Г 7-002-86 [2] визначено температури крихко-в'язкого переходу.

Для оцінки перехідної температури результати випробувань зразків Шарпі наносяться на графік “ударна в'язкість – температура випробувань” та виконується апроксимація експериментальних даних функцією гіперболічного тангенсу наступного виду:

$$KCV = \left(\frac{USE}{2}\right) \cdot \left(1 + \tanh\left(\frac{T-T_0}{C}\right)\right), \quad (1)$$

де KCV – ударна в'язкість (питома робота руйнування); USE – величина ударної в'язкості на верхньому шельфі температурної залежності KCV ; T – температура випробувань; T_0 – температура, що відповідає значенню ударної в'язкості $USE/2$; C – параметр, що характеризує нахил температурної залежності KCV .

Будуючи середню лінію регресії, визначають температуру КВП (T_{KR}), що відповідає вибраному критеріальному рівню KCV , який залежить від границі текучості матеріалу.

Варто відзначити, що, на відміну від багатьох міжнародних документів [3, 4], ПНАЕ Г 7-002-86 не регламентує мінімальне значення USE у процедурі визначення перехідної температури крихкості.

Результати досліджень та аналіз даних. На рис. 1а представлено температурну залежність ударної в'язкості для групи 1 зразків з середнім вмістом фосфору 0,029 % - одна із найнижчих концентрацій фосфору серед досліджених груп зразків. Для визначення температури КВП (T_{KR}) використовується критеріальний рівень $KCV_I = 59$ Дж/см². Зразки групи 2 (рис. 1б) підібрано із середнім вмістом фосфору 0,031 %. Як видно з рисунку, вищий вміст фосфору спричинює підвищене окрихчування матеріалу, що проявляється у більшому значенні перехідної температури. Для визначення температури КВП групи 2 застосовано критерій $KCV_{II} = 88,5$ Дж/см², а $T_{KR} = T_{II} - 30$.

Очевидно, що для інших матеріалів з вищим вмістом фосфору для визначення температури T_{KR} також буде застосовуватися критерій KCV_{II} . Рисунки 2а, 2б становлять особливий інтерес, оскільки вміст фосфору у металі шва є максимальним серед матеріалів, що входять до нової програми ЗС КР РАЕС-1.

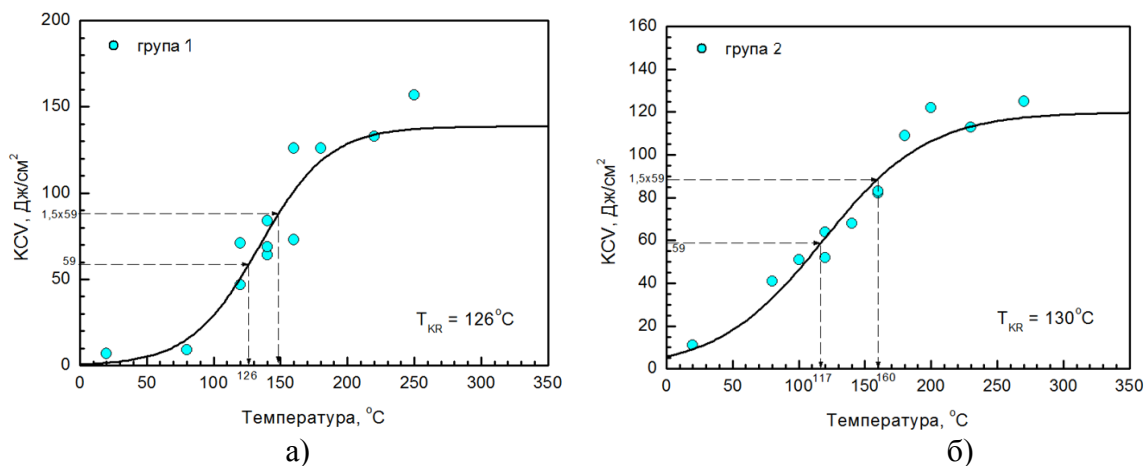


Рис. 1. Температурні залежності ударної в'язкості металу ЗШ КР ВВЕР-440 з вмістом фосфору 0,029 (а) та 0,031 (б)

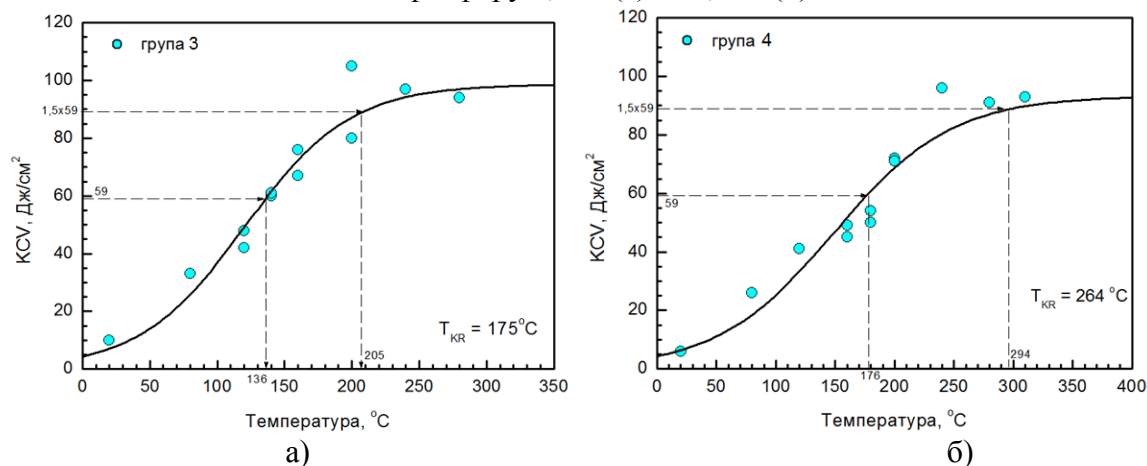


Рис. 2. Температурні залежності ударної в'язкості металу ЗШ КР ВВЕР-440 з вмістом фосфору 0,041 (а) та 0,051 (б)

Результати визначення зсуву температури крихко-в'язкого переходу внаслідок повторного після відновлювального відпалу опромінення (ΔT_{KR}) наведено у табл. 2. Також у таблиці наведено значення критичних температур крихкості опромінених матеріалів безпосередньо після відновлювального відпалу (T_{KB}) і величини невідновлених зсувів критичної температури крихкості ($\Delta T_{зал}$).

Табл. 2. Зсув критичної температури крихкості матеріалів КР блоку РАЕС-1

Матеріал	P, %	Флюенс, $\times 10^{22}$ нейтр./м ²	$\Delta T_{зал}$, °C	T_{KB} , °C	T_{KR} , °C	ΔT_{KR}^{**} , °C	USE, Дж/см ²
Група 2	0,031	59,9	50	55	130	75	120
Група 1	0,029	59,3	20*	-	126	-	139
Група 4	0,051	60,9	24	45	272	227	93
Група 3	0,041	60,0	36	28	177	149	99

* Значення $\Delta T_{зал}$ прийнято у відповідності з [5]; ** $\Delta T_{KR} = T_{KR} - T_{KB}$

В даному дослідженні величина USE визначалася за середнім значенням енергії удару для трьох зразків, випробуваних при температурах верхнього шельфу. Аналіз даних показав, що величина USE є нижчою для швів з вищим вмістом фосфору. За даними рис. 1-2 і табл. 2 помітно також, що для матеріалів групи 3 і групи 4 величина USE досить близька до значення критеріального рівня ($KCV)_ц$. У цьому випадку визначення температури КВП відбувається не на перехідній ділянці кривої Шарпі, а фактично в області верхнього шельфу, де кут нахилу дотичної до кривої наближається до нуля, тобто крива прямує до горизонтальної асимптоти. Ця особливість призводить

до штучного завищення температури КВП. Більше того, для матеріалів з енергією верхнього шельфу менше 89 Дж/см^2 , визначення перехідної температури крихкості згідно ПНАЕ Г 7-002-86 взагалі втрачає сенс.

У випадку повторно опроміненого матеріалу для оцінки подальшої безпечної експлуатації КР дані щодо зміни температури T_{KR} з ростом флюенсу нейтронів мають бути співставлені з кривими окрихчування, отриманими при первинному опроміненні. При цьому порівняння виконується відповідно до одного із стандартних підходів: консервативний зсув кривої, модель бічного (горизонтального) зсуву і модель вертикального зсуву [6].

На рисунку 3 представлено експериментальні залежності зсуву температури КВП від флюенса нейтронів у порівнянні з стандартними моделями зсуву, що використовуються при оцінці повторного після відпалу окрихчування матеріалу [5].

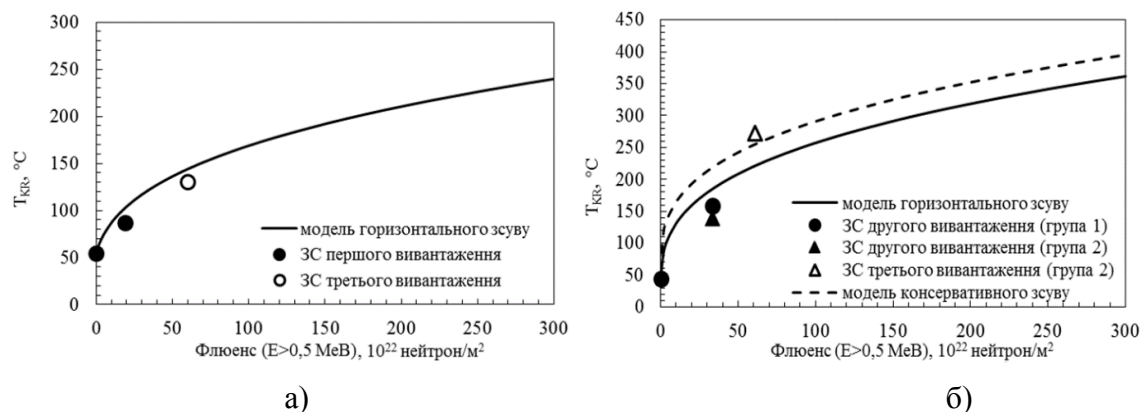


Рис. 3. Залежність критичної температури крихкості від флюенсу швидких нейтронів для групи 2 (а) і групи 4 (б) при повторному після відпалу опроміненні

Дані рис. 3 показують, що ступінь радіаційного окрихчування металу ЗШ КР РАЕС-1 у випадку коректної оцінки величини T_{KR} не перевищує швидкість радіаційного окрихчування, оціненої за моделлю горизонтального зсуву (рис. 3а). Однак можна помітити, що некоректне визначення T_{KR} для матеріалу групи 4 призводить до переоцінки величини зсуву температури КВП: отримані значення перевищують моделі горизонтального і консервативного зсуву (рис. 3б). Такий результат не може розглядатися як достовірний та не свідчить про прискорене окрихчування матеріалу, оскільки він більшою мірою обумовлений методологічними особливостями нормативного підходу ПНАЕ Г-7-002-86 при розрахунку температури КВП для матеріалів з низьким рівнем верхнього шельфу.

Таким чином, для матеріалів КР з дуже низькою енергією верхнього шельфу нормативний підхід ПНАЕ Г-7-002-86 до оцінки перехідної температури крихкості є неприйнятним і потребує оновлення з урахуванням міжнародного досвіду.

Література

1. A. Kryukov "State of the art VVER-RPV radiation embrittlement and mitigation", Proceeding of the IAEA meeting, Russia, Vladimir, 1997.
2. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Введ. 01.07.87. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 524с.
3. Nuclear Regulatory Commission, Title 10 of the Code Federal Regulations, Part 50, Appendix G, Fracture Toughness Requirements, Office of the Federal, National Archives and Records Administration, US Government Printing Office, Washington, DC– 1995.
4. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs – VERLIFE, European Commission, Final Report, Contract N° FIKS-CT-2001-20198, September 2003 – 2008.
5. МКТ 02-98 «Методика определения КТХ КР при его эксплуатации после отжига», Москва 1998 г.
6. J. Kohopaa, R. Ahlstrand. Re-embrittlement behaviour of VVER-440 reactor pressure vessel weld material after annealing // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2000. – Vol. 77. – P. 575-584.