

ПОШУКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗСУВУ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ МАТЕРІАЛІВ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ТИПУ ВВЕР-1000

В. М. Ревка, О. В. Тригубенко, Ю. В. Чайковський, Л. І. Чирко

Інститут ядерних досліджень НАН України

Abstract. This paper presents a comparison of the transition temperature shifts due to irradiation based on the fracture toughness (ΔT_0) and Charpy impact test data (ΔT_F) for VVER-1000 RPV weld metal. The ductile to brittle transition temperature shift ΔT_F was determined by three different methods: (1) according to recommendations of PNAE G-7-002-86, (2) using the fixed index impact toughness level of 35 J/cm^2 and (3) using the index impact toughness level which depends on Charpy upper shelf energy. The analysis has shown that in all cases the Charpy impact test data underestimate the shift of a fracture toughness curve. The adjustment of 10°C for the ΔT_F shift is proposed to be consistent with the ΔT_0 value.

Вступ. Серед експлуатаційного обладнання АЕС з реакторами типу ВВЕР особливе місце належить корпусу реактора (КР), оскільки його заміна у випадку суттєвої деградації властивостей металу КР, є економічно недоцільною процедурою. Під час експлуатації корпус реактора постійно перебуває під значним тиском, зазнає впливу нейтронного опромінення і підвищеної температури. Всі ці фактори призводять до погіршення фізико-механічних властивостей корпусної сталі і вимагають постійного контролю за її станом.

Основним критерієм, який використовується для оцінки ступеню деградації і зниження в'язкості руйнування металу КР, є критична температура крихкості (КТК), що не повинна перевищувати максимально допустиме значення.

Найпоширенішим стандартизованим прямим методом визначення в'язкості руйнування феритних сталей є методика Майстер кривої (МК). Метод передбачає, зокрема, випробування зразків Шарпі з тріщиною втоми на триточковий вигин при різних температурах та знаходження референсної температури T_0 . Далі, порівнюючи T_0 для опромінених та неопромінених матеріалів, визначають зсув температури T_0 внаслідок опромінення, який кількісно характеризує ступінь деградації матеріалу.

В Україні методика Майстер Кривої ще не прийнята в якості нормативного підходу і тому основним методом визначення ступеню радіаційного окрихчування металу КР залишається випробування стандартних зразків Шарпі на ударну в'язкість. Тим не менше, штатна Програма зразків-свідків [1] для АЕС України передбачає опромінення в активній зоні реактора зразків для обох типів випробувань. Це дає можливість оцінити зсув КТК двома різними способами і порівняти обидва підходи, враховуючи відмінності умов, за яких проводяться випробування зразків, а також особливості визначення КТК при випробуваннях на ударний вигин. Вказані типи випробувань відрізняються трьома основними факторами: швидкістю навантаження зразків, типом концентратора та долею крихкої складової у зламі зразка при критеріальному рівні. Випробування на триточковий вигин є статичним випробуванням, яке передбачає використання зразків з гострою тріщиною та випробування при температурах, які відповідають крихкому стану металу. Випробування на ударний вигин належить до динамічних методів дослідження матеріалів, за якого випробовується зразок з концентратором у вигляді механічного надрізу, а критеріальний рівень для визначення КТК є змінним і лежить в діапазоні температур крихко-в'язкого переходу металу.

Тому у даній роботі виконано порівняння зсувів КТК, визначених за методикою МК та при випробуваннях на ударний вигин, змінюючи при цьому підходи до визначення критеріального рівня для кривої Шарпі. Інтерес до такого порівняння полягає ще й в тому, що для багатьох комплектів зразків-свідків (ЗС) було накопичено значний флюенс нейтронів і коректне визначення ступеню окрихчування металу при високому рівні радіаційного пошкодження є особливо важливим завданням.

Запропоновані підходи до визначення критеріального рівня

В роботі використано три способи визначення критеріального рівня кривої Шарпі для оцінки температури крихко-в'язкого переходу і її зсуву внаслідок опромінення. Першим є метод ПНАЕ Г-7-002-86 [2], що прийнятий як базовий при аналізі результатів випробувань зразків-свідків на ударний вигин. Відповідно до нормативного підходу ПНАЕ Г-7-002-86 критеріальний рівень при випробуваннях на ударний вигин визначається в залежності від границі текучості матеріалу і змінюється ступінчато з різницею в 10 Дж/см² (табл. 1). Такий підхід до визначення критеріального рівня є неоднозначним, оскільки мала зміна R_{p0,2} може вести до суттєвого зміщення перехідної температури.

Таблиця 1 – Нормативні значення енергії руйнування для визначення температури в'язко-крихкого переходу за результатами випробувань зразків Шарпі [2].

Границя текучості при 20°C, МПа	Енергія руйнування	
	Е, Дж	KCV, Дж/см ²
До 304 вкл.	23	29
Від 304 до 402 вкл.	31	39
Від 402 до 549 вкл.	39	49
Від 549 до 687 вкл.	47	59

Іншим способом було обрано фіксований рівень у 28 Дж або для зразків типу Шарпі 35 Дж/см². Такий критеріальний рівень часто використовується дослідниками при визначенні КТК та її зсуву для матеріалів КР [3, 4]. Вибір рівня 28 Дж пояснюється необхідністю більш коректно характеризувати в'язкість матеріалу з точки зору спротиву крихкому руйнуванню, тим самим зменшуючи відмінності між динамічним та статистичним методами.

Третій спосіб передбачає поступову зміну критеріального рівня енергії руйнування в залежності від пониження верхнього шельфу (USE) кривої Шарпі. Дослідження показали [5], що під час опромінення корпусної сталі відбувається не лише зміщення кривої Шарпі в область підвищених температур, а й падіння USE кривої Шарпі, що вказує на поступове зниження опору металу в'язкому руйнуванню. Це зниження можна компенсувати більш високим значенням критеріального рівня енергії руйнування. Для визначення нового значення критеріального рівня (KCV_{ind}) слід його величину для неопроміненого стану, яка у більшості випадків для металу зварних швів становить 49 Дж/см², помножити на відношення значення верхнього шельфу до опромінення (USE^{unirr}) до значення USE після опромінення (USE^{irr}), тобто

$$KCV_{ind} = 49 \cdot \frac{USE^{unirr}}{USE^{irr}} \quad (1)$$

Таким чином, пропорційне накопиченому флюенсу пониження верхнього шельфу буде поступово піднімати критеріальний рівень, що дозволить частково врахувати особливості окрихчування кожного корпусу.

Досліджувані матеріали та обладнання

Випробування неопроміненних та опроміненних зразків проводилося на експериментальному обладнанні лабораторії «гарячих» камер Інституту ядерних досліджень НАН України. Випробування на триточковий вигин проводилося згідно стандарту ГОСТ 25.506-85 на серво-електричній системі Instron 8862. Для даного типу випробувань використовувалися зразки Шарпі розміром 10×10×55 мм з попередньо вирощеною втомною тріщиною. Випробування стандартних зразків Шарпі на ударний вигин проводилися згідно з ГОСТ 9454-78 на маятниковому копрі КМД-30.

Дане дослідження було проведено для металу зварних швів КР ВВЕР-1000. Для оцінки радіаційного окрихчування металу КР були використані реконструйовані зразки-свідки в

опромінену стані для блоків № 1, 3 та 4 Запорізької АЕС. Діапазон накопиченого флюенсу швидких нейтронів становить $(18 \div 76) \cdot 10^{22}$ нейтр./м². Зразки опромінювалися в енергетичних реакторах при температурі $\sim 300^\circ\text{C}$.

Результати досліджень

Для першого порівняння було взято результати випробувань зразків на ударний вигин, критеріальний рівень для яких брався за методом ПНАЕ Г-7-002-86, а також при 35 Дж/см^2 . Зсуви КТК, отримані шляхом обрахунку вказаними способами (ΔT_F), були співставлені з зсувами температури T_0 (ΔT_0), отриманих при статичному випробуванні на в'язкість руйнування для тих же комплектів ЗС. Результати співставлення показані на рисунку 1а.

Як видно з рисунка, взаємовідношення зсувів КТК мають відмінну від прямої 1:1 кореляцію. Майже у всіх випадках зсув ΔT_0 більший у порівнянні з результатами випробувань на ударний вигин. Проте очевидно, що метод ПНАЕ є більш прийнятним з точки зору оцінки зсуву кривої в'язкості руйнування внаслідок опромінення, тобто зміни КТК, у порівнянні з використанням фіксованого рівня 35 Дж/см^2 .

Наступним кроком було порівняння зсувів КТК, отриманих за нормативним методом ПНАЕ та запропонованим авторами дослідження методом зміни критеріального рівня залежно від зміни величини USE. Результати такого порівняння показані на рисунку 1б. Отримані дані свідчать, що метод визначення критеріального рівня за формулою (1) суттєво не відрізняється від підходу ПНАЕ з точки зору оцінки величини ΔT_F . Окрім того, слід відмітити, що хоча ці точки лежать нижче прямої 1:1, вони розташовані паралельно їй, що вказує на можливість введення сталої поправки (δ) для коригування зсуву ΔT_F по відношенню до ΔT_0 .

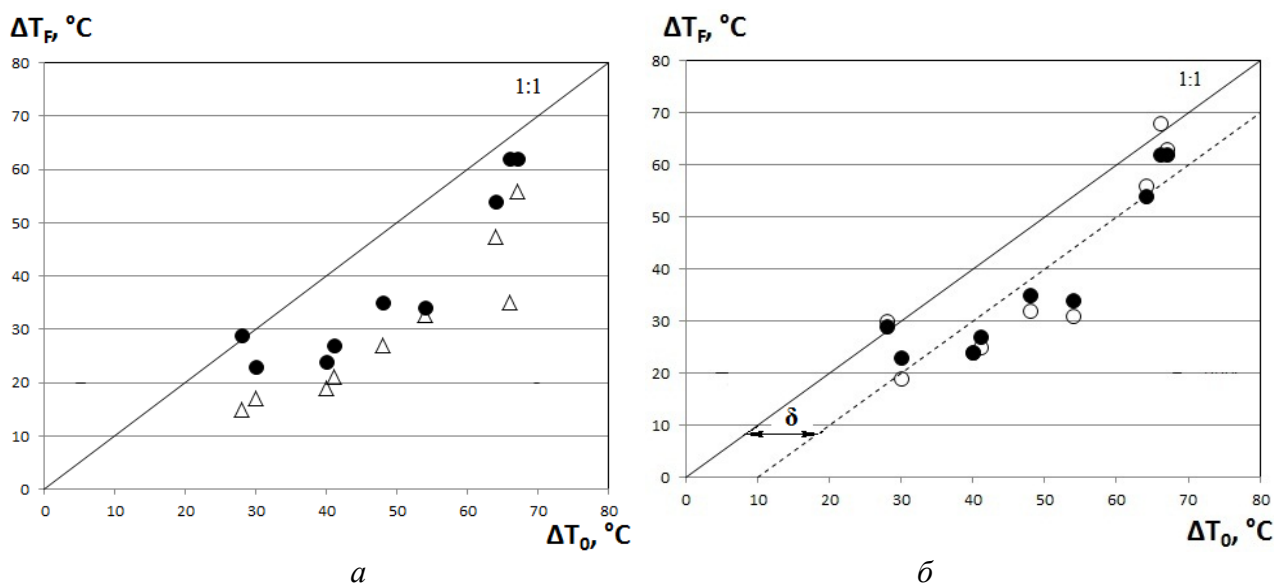


Рисунок 1. Кореляція зсувів ΔT_0 та ΔT_F . Зсув температури ΔT_F визначений різними методами (●) – метод ПНАЕ (а, б); (Δ) – фіксований критеріальний рівень 35 Дж/см^2 (а); (○) – змінний критеріальний рівень (KCV_{ind}) в залежності від USE (б).

Аналіз всіх підходів дозволяє отримати оптимальний спосіб отримання зсуву КТК і, відповідно, коректної оцінки зниження характеристик в'язкості руйнування металу. За основу можна взяти метод ПНАЕ Г-7-002-86, оскільки показано, що в цьому випадку спостерігається найкраща відповідність між результатами випробувань на ударний вигин та в'язкість руйнування. Далі відхилення знайденого значеннями ΔT_F від ΔT_0 компенсувати поправкою у 10°C , визначеною емпірично у даному дослідженні. Результати врахування поправки показані на рисунку 2, що демонструє узгодженість величин ΔT_F^{kop} і ΔT_0 з коефіцієнтом кореляції, близьким до одиниці ($R = 0,91$).

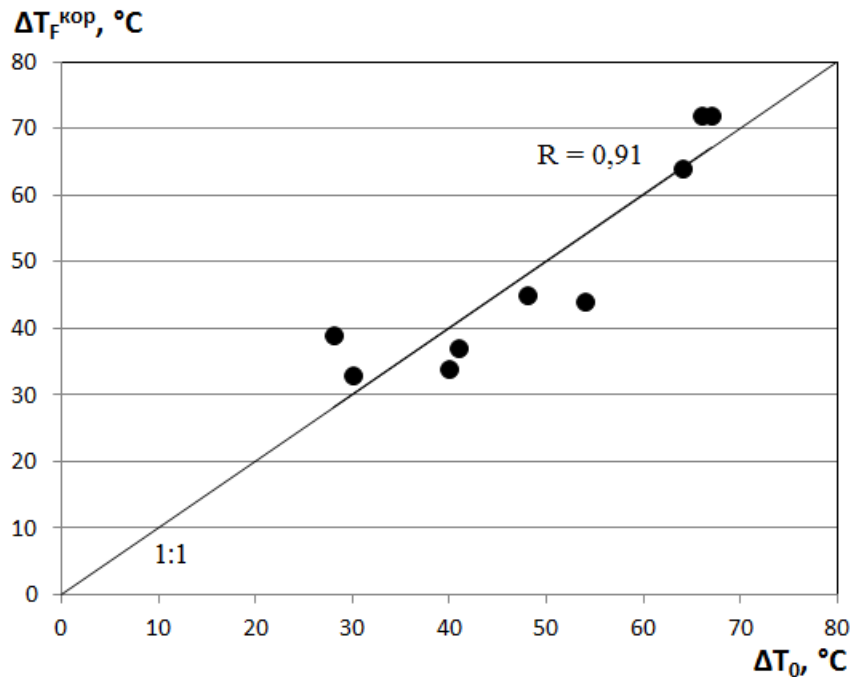


Рисунок 2. Кореляція зсувів ΔT_0 та коригованого значення зсуву $\Delta T_F^{\text{кор}}$ з урахуванням емпіричної поправки

Запропонований спосіб буде більш надійно характеризувати деградацію в'язких властивостей металу КР, визначену на основі випробувань ЗС на ударний вигин. Тим не менш, оскільки він базується на вибірці зразків лише для декількох корпусів, то його застосування може бути для металів цих корпусів. У подальшому з отриманням більшої кількості даних для інших блоків такий підхід при визначенні зсуву КТК можна узагальнити на корпуси всіх реакторів.

Висновок. У роботі було розглянуто кореляцію зсувів критичної температури крихкості, визначеною за підходом Майстер Кривої та методом випробування на ударний вигин для вибірки даних найбільш опромінених корпусів реакторів. Для останнього методу було проаналізовано різні способи визначення критеріального рівня на кривій Шарпі при знаходженні температури крихко-в'язкого переходу та її зсуву внаслідок опромінення. Оскільки ці способи не дозволяють отримати зсуви температури ΔT_F , що узгоджуються з ΔT_0 , то запропоновано оптимальний метод визначення ΔT_F , який враховує поправку у 10°C і більш надійно характеризує окрихчування металу корпусу реактора.

Список використаної літератури

1. Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям ПМ-Т.0.03.120-08. – ГП НАЭК "Энергоатом" – 2008 – 36 с.
2. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Введ. 01.07.87. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.
3. K. Wallin. A simple theoretical Charpy-V – K_{Ic} correlation for irradiation embrittlement // Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis, PVP. – (1989). – Vol. 170. – P. 93–100.
4. D. Ferreno, M. Scibetta, I. Gorrochategui, R. Lacalle, E. van Walle, F. Gutierrez-Solana. Validation and application of the Master Curve and reconstitution techniques to a Spanish nuclear vessel. // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – 76. – P. 2495-2511.
5. В. М. Ревка, О. В. Тригубенко. Вплив нейтронного опромінення на енергію верхнього шельфу кривої Шарпі для матеріалів корпусів реакторів ВВЕР // Тези доповідей XXI щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, 27 - 31 січня 2014. – Київ, – С. 145-146.