

ЗАСТОСУВАННЯ РЕФЕРЕНСНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ RT_0 ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ІНДЕКСУ ДЛЯ ОЦІНКИ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000

В. М. Ревка, Л. І. Чирко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Для забезпечення надійної роботи корпусів реакторів (КР) ВВЕР протягом всього терміну експлуатації і уникнення неконтрольованого руйнування КР при аварійних ситуаціях ключовою умовою є необхідний рівень в'язкості руйнування конструкційних матеріалів. Відповідно до нормативних вимог СОУ НАЕК 177 [1] в'язкість руйнування (тріщиностійкість) оцінюють опосередковано, використовуючи критичну температуру крихкості T_K для індексації температурної залежності коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} у розрахунках на крихку міцність. Такий підхід, який заснований на емпіричних кореляціях, призводить до ситуації, коли для оцінки в'язкості руйнування застосовують надлишковий консерватизм, що може не виправдано обмежувати термін експлуатації КР.

На сьогоднішній день перспективним напрямком для оцінки в'язкості руйнування вважається використання методу Майстер кривої та референсної температури T_0 , яка на відміну від T_K прямо пов'язана з вимірними параметрами тріщиностійкості. Попередні дослідження металу КР ВВЕР-1000 у вихідному стані показали, що референсна температура T_0 суттєво нижча за температуру T_K [2] і цей результат дає потенційну можливість обґрунтувати довгострокову експлуатацію КР (60 років і більше).

Метою роботи є обґрунтування процедури переходу до прямого методу оцінки в'язкості руйнування з використанням температурного індексу RT_0 (концепція Майстер кривої) замість критичної температури крихкості T_K для уникнення надлишкового консерватизму у розрахунках на опір крихкому руйнуванню.

У даній роботі зроблено переоцінку перехідної температури крихкості для металу КР ВВЕР-1000 у вихідному стані із застосуванням методології Майстер кривої. Для аналізу було використано результати випробувань реконструйованих зразків-свідків на в'язкість руйнування для основного металу і металу зварного шва (ЗШ). Для оцінки температури RT_0 було враховано невизначеність референсної температури T_0 з вірогідністю 95 %, пов'язану із розміром вибірки і похибкою експерименту, а також додатковий температурний зсув $10\text{ }^\circ\text{C}$ для компенсації втрати рівня стиснення деформації (constraint loss effect) для зразків Шарпі з тріщиною. Значення RT_0 визначається за такою формулою [3]:

$$RT_0 = T_{0(\text{margin})} + 13\text{ }^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де $T_{0(\text{margin})}$ – референсна температура з урахуванням вказаних вище поправок. Зсув на $13\text{ }^\circ\text{C}$ добавлено, щоб RT_0 була функціональним еквівалентом T_K для індексації нормативної кривої тріщиностійкості.

Порівняння перехідних температур для матеріалів КР у вихідному стані показало, що для основного металу різниця між температурами T_{K0} (тобто, T_K для вихідного стану) та RT_0 у середньому становить $37\text{ }^\circ\text{C}$. У всіх випадках RT_0 є нижчою за T_{K0} (рис. 1). Цей результат свідчить, що нормативний підхід суттєво недооцінює в'язкість руйнування основного металу і ця недооцінка помітно варіює в залежності від матеріалу КР. Очевидно, що у разі використання RT_0 (замість T_{K0}) як температурного індексу для нормативної кривої тріщиностійкості консерватизм розрахунків на опір крихкому руйнуванню може помітно зменшитися.

Для металу ЗШ температура T_{K0} також недооцінює в'язкість руйнування у більшості випадків (рис. 2). У середньому температура RT_0 нижча за T_{K0} на $26\text{ }^\circ\text{C}$. Відхиленням від цієї закономірності є дані для КР блоків № 1 і № 2 Запорізької АЕС (ЗАЕС-1 і ЗАЕС-2), для яких температура RT_0 є більш консервативною з точки зору оцінки в'язкості руйнування у порівнянні з T_{K0} . Важливо враховувати цей результат при обґрунтуванні терміну безпечної експлуатації зазначених КР.

Найбільш цінними отримані результати є для КР, зварні шви яких мають одночасно високий вміст нікелю та марганцю, що призводить до прискореного окрихчування у порівнянні з нормативними оцінками. У цьому випадку застосування RT_0 дає потенційну можливість обґрунтувати довгострокову експлуатацію КР за рахунок збільшення запасу в'язкості руйнування у розрахунках на крихку міцність. Крім того, практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований підхід передбачає збереження існуючої форми нормативної кривої тріщиностійкості СОУ НАЕК 177 та чинної процедури врахування радіаційного окрихчування через зсув ΔT_K . Основна зміна стосується лише переоцінки в'язкості руйнування матеріалу у вихідному (до опромінення) стані.

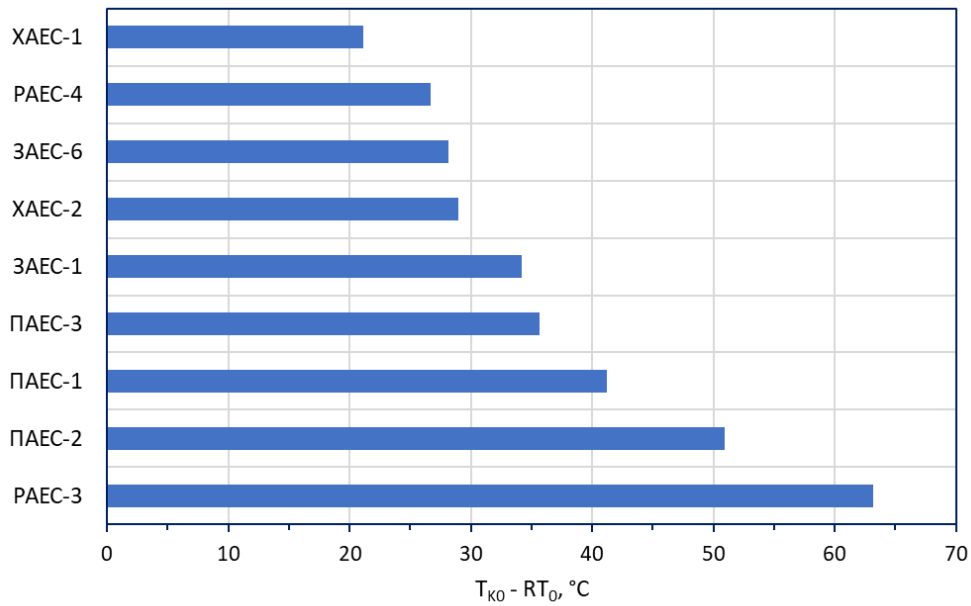


Рис. 1 Різниця між температурами T_{K0} та RT_0 для основного металу КР ВВЕР-1000

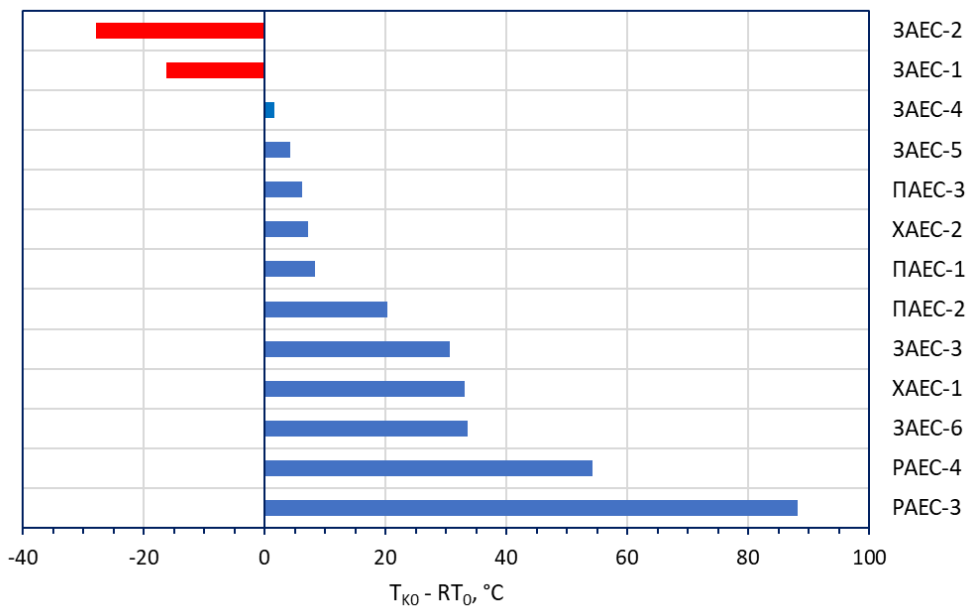


Рис. 2 Різниця між температурами T_{K0} та RT_0 для металу зварного шва КР ВВЕР-1000

1. СОУ НАЕК 177:2019. Инженерная, научная и техническая поддержка. Методика оценки хрупкой прочности корпусов реакторов ВВЭР. ГП НАЭК "Энергоатом", – Киев, 2019. – 49 с.
2. Э. У. Гриник, В. Н. Ревка, Л. И. Чирко, Ю. В. Чайковский Оценка вязкости разрушения корпусных материалов реактора ВВЭР-1000 // Матеріали міжнарод. конф. "Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики НРАЕ-Київ 2006", 29 травня – 3 червня 2006 р., Київ, Україна. – 2006. – С. 659 – 665.
3. В. М. Ревка, Л. І. Чирко Ядерна фізика та енергетика. - 2024. - № 1 (25). - С. 58 – 65