

# НОВИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ МЕТАЛУ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

В.М. Ревка<sup>1</sup>, Г.П. Гринченко<sup>2</sup>, Л.І. Чирко<sup>1</sup>, О.В. Тригубенко<sup>1,2</sup>, М.Г. Голяк<sup>1</sup>

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

**Abstract.** This paper analyzes the shortcomings of existing regulatory approaches used in Ukraine in determining the rate of radiation embrittlement of RPV metal. It was shown that the application of these approaches can lead to the incorrect estimation of the critical temperature of brittleness. Based on the experience of surveillance specimens testing and the analysis of experimental data it was offered a modern method for determining the critical brittleness temperature of the RPV metal.

**Вступ.** Для кожного корпусу реактора (КР) ВВЕР-1000 здійснюється матеріалознавчий супровід його безпечної експлуатації. В рамках цього супроводу періодично проводять дослідження зразків-свідків (ЗС), що регламентовано нормативними документами, які діють в атомній енергетиці України. За результатами випробувань визначають зміни механічних властивостей металу КР. До них, в першу чергу, відносять критичну температуру крихкості (КТК) та її зсув внаслідок впливу експлуатаційних факторів.

Визначення КТК матеріалів з необхідним рівнем консерватизму є ключовим моментом для оцінки терміну безпечної експлуатації корпусів реакторів і повинно регламентуватися відповідними нормативними документами. На даний час в Україні використовують нормативні підходи, які містять застарілі положення щодо визначення ступеню радіаційного окрихчування та КТК, що може призводити до невиправданого обмеження терміну експлуатації КР.

Враховуючи набутий досвід та результати всебічного аналізу експериментальних даних ЗС, з'явилось підґрунтя для розробки удосконаленої методики визначення окрихчування металу корпусів реакторів ВВЕР-1000, що відображає сучасні нормативні вимоги до оцінки критичної температури крихкості опромінених матеріалів з необхідним рівнем консерватизму.

**Існуючий підхід до консервативної оцінки КТК.** Відповідно до діючих в Україні норм ПНАЭ Г-7-002-86 [1] ступінь радіаційного окрихчування матеріалів КР оцінюють шляхом апроксимації наявних достовірних даних ЗС. Мірою окрихчування є зсув критичної температури крихкості внаслідок опромінення при температурі експлуатації  $\Delta T_F$ . Для апроксимації експериментальної залежності  $\Delta T_F$  від флюенсу нейтронів використовується степенева функція (нормативна модель окрихчування), що задається рівнянням:

$$\Delta T_F = A_F \cdot F^{1/3}, \quad (1)$$

де  $A_F$  – параметр середньої лінії регресії;  $F$  – флюенс швидких нейтронів з енергією  $E \geq 0,5$  MeV в одиницях  $10^{22}$  м<sup>-2</sup>. Використовуючи регресійний аналіз (метод найменших квадратів), визначають величину  $A_F$ .

Для консервативної оцінки критичної температури крихкості  $T_K$  використовують довірчу границю для параметра середньої лінії регресії з імовірністю 95 % ( $A_F^{95\%}$ ). Значення  $T_K$  оцінюють за допомогою наступного рівняння:

$$T_K = T_{K0} + \Delta T_F, \quad (2)$$

де  $T_{K0}$  – вихідна критична температури крихкості,  $\Delta T_F$  – зсув КТК внаслідок опромінення при температурі теплоносія з довірчою ймовірністю 95 %.

У рівнянні (2) зсув  $\Delta T_F$  обчислюють через величину  $A_F^{95\%}$ , використовуючи наступне співвідношення:

$$\Delta T_F = A_F^{95\%} \cdot F^{1/3}. \quad (3)$$

Величину  $A_F^{95\%}$  оцінюють шляхом статистичної обробки експериментальної залежності  $\Delta T_F$  від флюенсу нейтронів, використовуючи формулу:

$$A_F^{95\%} = A_F + M, \quad (4)$$

де  $M$  – довірчий інтервал для середньої лінії регресії із ймовірністю 95 % (рівень надійності  $\alpha = 0,05$ ). Фактично  $M$  визначає верхню довірчу межу для середньої лінії регресії із ймовірністю 95 %.

Значення  $M$  обчислюється методами математичної статистики з використанням стандартного відхилення  $\sigma$  і коефіцієнта Стьюдента  $t$  (для кількості вимірювань  $\leq 30$ ) за формулою:

$$M = t \cdot \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \quad (5)$$

де  $n$  – кількість експериментальних точок  $\Delta T_F$ , співвідношення  $\left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$  – похибка середнього значення  $A_F$ , що в  $\sqrt{n}$  разів менше стандартного відхилення. Коефіцієнт Стьюдента залежить від кількості вимірювань і його значення є досить великим при малій кількості вимірювань [2].

Таким чином, при такому підході коефіцієнт  $A_F^{95\%}$ , який характеризує довірчий інтервал для середньої лінії регресії, не є верхньою довірчою границею для даних і залежить від кількості експериментальних значень. Навіть при незмінному значенні стандартного відхилення, яке характеризує розкид даних щодо середньої лінії регресії, при збільшенні кількості експериментальних точок величина  $A_F^{95\%}$  буде зменшуватися, наближаючись до середнього значення  $A_F$ .

Більш того, при кількості випробувань  $n \leq 4$  (при різних значеннях флюенсу) довірчий інтервал  $M$  помітно зростає і перевищує стандартне відхилення в кілька разів, що у випадку істотного розкиду експериментальних значень  $\Delta T_F$  робить оцінку  $A_F^{95\%}$  практично безглуздою для інженерних підходів.

Також слід сказати, що з точки зору матеріалознавства середня лінія регресії для функції (1) є трендовою кривою окрихчування і в цьому випадку коефіцієнт радіаційного окрихчування  $A_F$  характеризує певну властивість матеріалу, тобто чутливість сталі до опромінення. Якщо для цих цілей використовувати коефіцієнт  $A_F^{95\%}$ , обчислений за вищенаведеною процедурою, ми отримуємо штучно завищену оцінку ступеню окрихчування матеріалу, і рівень завищення або недооцінки буде залежати від кількості експериментальних точок.

**Консервативна оцінка КТК за новим підходом.** У світовій практиці для отримання консервативного значення зсуву температури крихкості використовується додатковий температурний запас, який враховує розкид експериментальних даних, обумовлений неоднорідністю матеріалу, а також похибкою визначення флюенсу нейтронів. З цією метою нормативна інструкція МАГАТЕ [3], наприклад, рекомендує використовувати температурний запас, що дорівнює експериментально визначеному стандартному відхиленню  $\sigma$ . Схожий підхід регламентується методикою МАГАТЕ VERLIFE-2008 [4], в якій температурний запас враховується шляхом зміщення середньої лінії регресії вертикально вгору на величину  $\delta T_m$  ( $\delta T_m = 10$  °C для основного металу;  $\delta T_m = 16$  °C для металу зварного шва (ЗШ)).

Наступна версія нормативного документу МАГАТЕ VERLIFE [5] використовує досить консервативний підхід для визначення величини  $\delta T_m$  згідно з наступною умовою:

$$\delta T_m = \max\{1,64\sigma^{\text{exp}}; 1,64\delta T_m\}, \quad (6)$$

де  $\sigma^{\text{exp}}$  – стандартне відхилення для  $\Delta T_F$  відносно середньої лінії регресії;  $\delta T_m = 16^\circ\text{C}$  – врахування неоднорідності параметрів механічних властивостей по об'єму виробу.

На основі міжнародного досвіду та з урахуванням практичних знань, набутих під час обробки даних випробування ЗС металу КР ВВЕР-1000, у даній роботі при визначенні консервативного значення критичної температури крихкості  $T_K$  опромінених матеріалів пропонується використовувати наступну залежність:

$$T_K = T_{K0} + \Delta T_F + M, \quad (7)$$

де  $M$  – температурний запас, з довірчою ймовірністю 95 %, який враховує невизначеність оцінки  $\Delta T_F$ , пов'язаної з неоднорідністю матеріалу й умов опромінення. Температурний запас  $M$  кількісно рівний подвоєному стандартному відхиленню для узагальненої залежності  $\Delta T_F$  від флюенсу нейтронів для всіх КР АЕС України, тобто  $M = 2\sigma_\Delta$ .

В рамках підготовки нової методики до оцінки КТК матеріалів корпусів реакторів було проведено статистичний аналіз експериментальних залежностей зсуву  $\Delta T_F$  від флюенсу нейтронів для всіх блоків ВВЕР-1000, які експлуатуються в Україні, та визначено величину  $\sigma_\Delta$ . В аналіз було включено достовірні і представницькі дані для основного металу (29 експериментальних значень) і металу ЗШ (44 значення), отримані із застосуванням технології реконструкції.

За результатами аналізу було визначено, що  $\sigma_\Delta = 5^\circ\text{C}$ . Отже довірчий інтервал для одиничних вимірювань  $\Delta T_F$  з довірчою ймовірністю 95% становить  $2\sigma_\Delta = 10^\circ\text{C}$ . Таким чином для залежності (7) було визначено, що  $M = 10^\circ\text{C}$ .

Разом з тим, у випадку великого розкиду даних новою методикою передбачено необхідність добавки додаткового температурного запасу, щоб верхня довірча крива охоплювала всі експериментальні точки  $\Delta T_F$ .

#### Застосування нового підходу для оцінки зсуву критичної температури крихкості.

Новий підхід було застосовано для визначення консервативного значення зсуву температури крихкості металу одного з КР, що експлуатується в Україні. Крім того, результати обробки даних за новою методикою було порівняно з існуючим підходом для консервативної оцінки КТК.

На рис.1 та 2 представлено графіки залежності зсуву КТК від флюенсу швидких нейтронів для основного металу та металу ЗШ відповідно.

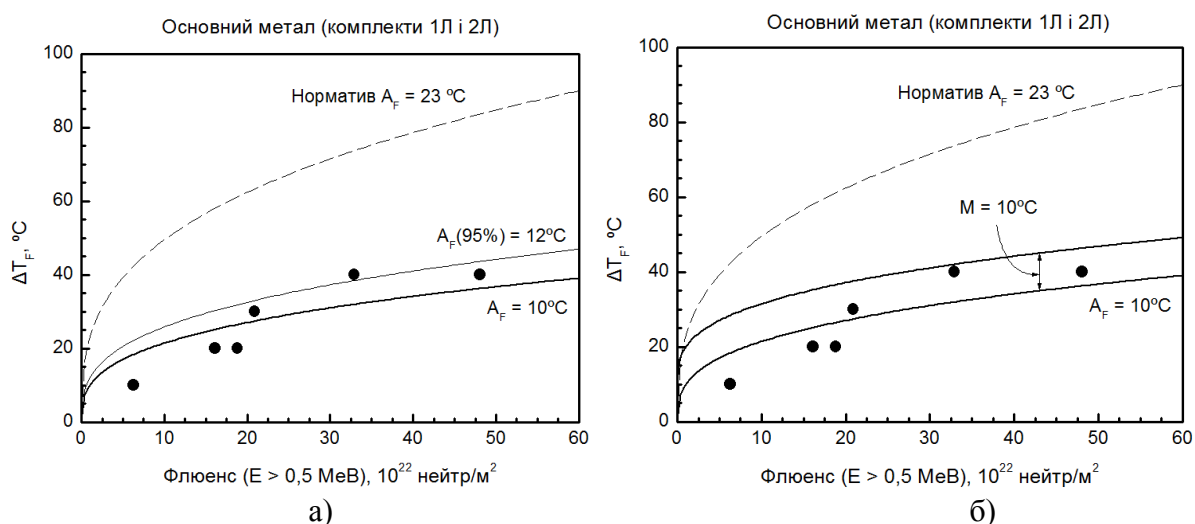


Рис.1. Залежності зсуву КТК від флюенсу швидких нейтронів для основного металу КР з консервативним визначенням  $\Delta T_F$  за діючим (а) та новим підходом (б)

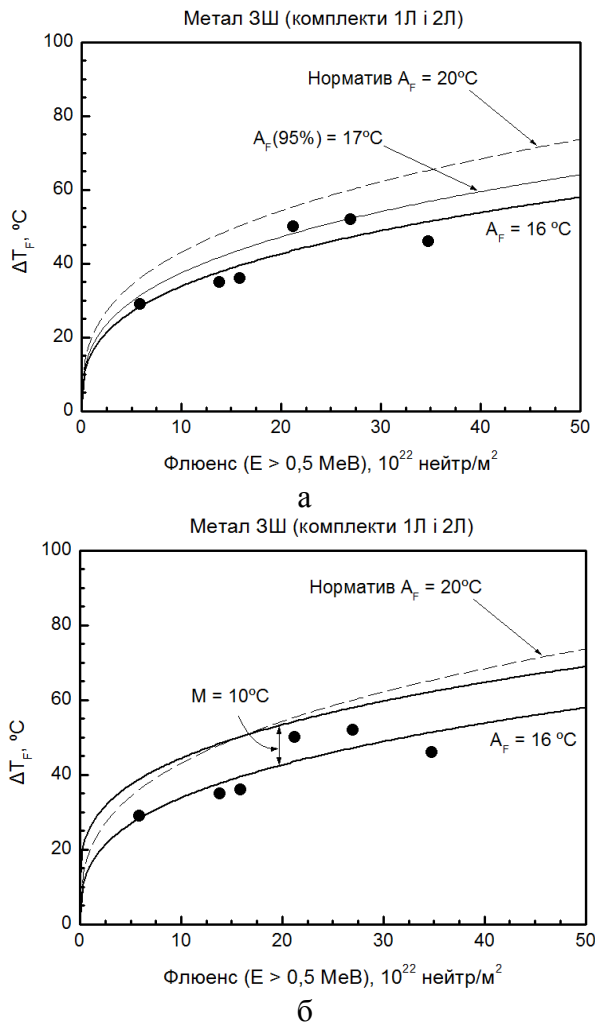


Рис.2. Залежності зсуву КТК від флюенсу швидких нейтронів для металу ЗШ КР з консервативним визначенням  $\Delta T_F$  за діючим (а) та новим підходом (б)

З рисунків видно, що 95 % довірча границя, яка визначена згідно діючого нормативного підходу, не є консервативною для експериментальних значень  $\Delta T_F$ , що не відповідає вимогам щодо оцінки зсуву критичної температури крихкості та є неприйнятним для практичного застосування. У цей же час використання нового підходу дає консервативну оцінку зсуву КТК, оскільки коректно характеризує розкид даних та є верхньою границею для всіх значень  $\Delta T_F$ .

Таким чином, попередній аналіз для вибраного корпусу реактора дає підстави вважати, що нова методика може бути успішно використана в нормативній практиці для консервативної оцінки радіаційного зсуву критичної температури крихкості металу КР.

#### Література

1. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Введ. 01.07.87. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.
2. Л.А. Славутский. Основы регистрации данных и планирования эксперимента. – Учебное пособие: Из-во ЧГУ, Чебоксары, – 2006. – 200 с.
3. Руководство по анализу термического удара для АЭС с реакторами типа ВВЭР // IAEA-EBP-WWER-08. МАГАТЭ, Вена, 2005. – 73 с.
4. VERLIFE -2008 – Unified Procedure for Life time Assessment of Components and Piping in WWER NPPs. – version 2008 – 275 p.
5. Guidelines For Integrity and Life time Assessment of Components and Piping in WWER Nuclear Power Plants (VERLIFE-2013) – Version 2013. – 315 p.