

Л. І. Чирко\*, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський,  
М. Г. Голяк, О. В. Тригубенко, О. В. Шкапяк

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: chyrko@kinr.kiev.ua

## ДО ПИТАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА РАДІАЦІЙНОГО ОКРИХЧУВАННЯ

Проведено статистичний аналіз експериментальних результатів радіаційно стимульованих зсувів критичних температур крихкості  $\Delta T_F$  та референсних температур  $\Delta T_0$ , отриманих відповідно при випробуваннях на ударний вигин та в'язкість руйнування зразків-свідків металу корпусів реакторів, на предмет можливості їхнього сумісного використання для більш точного знаходження коефіцієнта радіаційного окрихчування. Показано, що кореляція між цими параметрами зберігається до накопичення понадпроектних флюенсів швидких нейтронів.

*Ключові слова:* зсув критичних температур, референсна температура, коефіцієнт радіаційного окрихчування, тест Чоу.

### 1. Вступ

Необхідною умовою безпечної експлуатації реакторної установки ВВЕР-1000 є збереження температурного запасу в'язкості матеріалів корпусу реактора (КР). КР ВВЕР-1000 виготовляється з ферито-перлітної конструкційної сталі марки 15X2НМФА-А. В'язкість руйнування характеризує опір матеріалу поширенню тріщини у відповідь на діючі механічні напруження. Найбільший коефіцієнт окрихчування спостерігається в матеріалах КР, розташованих навпроти активної зони реактора.

На практиці згідно з вимогами нормативного документа ПНАЕ Г-7-002 [1] ступінь радіаційного окрихчування визначають за зсувом критичної температури крихко-в'язкого переходу  $\Delta T_F$ , який знаходять за результатами випробувань на ударний вигин зразків-свідків (ЗС) типу Шарпі. ЗС виготовляються з припусків обичайок КР та зварних швів із цих припусків, зварених тими ж зварювальниками за тією самою технологією і з використанням зварних матеріалів тих самих партій, що й даний КР. Комплекти ЗС завантажуються в КР до вводу його в експлуатацію й опромінюються протягом експлуатації над активною зоною так, що густина потоку швидких ( $E \geq 0,5$  MeV) нейтронів, який опромінює верхній ярус ЗС, близька до густини, що падає на стінку КР на рівні активної зони. Нижній ярус ЗС опромінюється густиною швидких нейтронів приблизно в 2,5 раза більшою й тому стан металу цих ЗС дають прогнозні дані стосовно радіаційного окрихчування металу стінки КР навпроти активної зони. Комплекти ЗС по черзі періодично вивантажуються й результати випробувань ЗС

дають змогу відслідковувати стан металу конструкційних елементів КР.

Застосування технології реконструкції нижніх половинок нижнього ярусу третього комплекту ЗС дає змогу прогнозувати стан металу КР при експлуатації в понадпроектний період, коли накопичений флюенс швидких нейтронів перевищує проектну величину  $60 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>. Оскільки для отримання презентативних результатів випробувань на ударний вигин необхідна група з не менше 12 ЗС типу Шарпі, опромінених однорідно (з відхиленням у межах  $\pm 15$  %), кількість прогнозних даних обмежена.

### 2. Мета роботи

У новому нормативному документі "VERLIFE" ("NULIFE") [2], який наразі узгоджується МАГАТЕ, з метою оцінки величини радіаційного окрихчування корпусних матеріалів рекомендуються до сумісного використання таких інтегральних характеристик як зсуви референсної температури  $\Delta T_0$ , яку отримують за результатами випробувань на триточковий вигин ЗС типу Шарпі з тріщиною, і  $\Delta T_F$ . Такий підхід збільшує статистику визначення коефіцієнта радіаційного окрихчування  $A_F$  і дає можливість з більшою вірогідністю прогнозувати стан металу при експлуатації в понадпроектний період. Для того щоб скористатися рекомендованим аналізом, необхідно впевнитись чи зберігається кореляція між  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$  при великих флюенсах, що накопичуються стінкою КР навпроти активної зони.

З цією метою в роботі для металу всіх українських КР ВВЕР-1000 проведено аналіз отрима-

них експериментальних результатів випробувань на ударний та триточковий вигини ЗС (типу Шарпі та типу COD відповідно), які опромінені як до понадпроектних флюенсів нейтронів (більших за  $60 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>), так і для менших флюенсів.

### 3. Методика аналізу

Для кожного типу металу (основний метал обичайки і метал зварного шва) кожного КР порівнювались дозові залежності зсувів референсних температур  $\Delta T_0(F)$  та критичних температур крихкості  $\Delta T_F(F)$ . Необхідно підкреслити, що зсуви референсних температур використовувались тільки для зразків COD, які були реконструйовані і мали втомні тріщини, вирощені відповідно до вимог стандарту ASTM E 1921 [3].

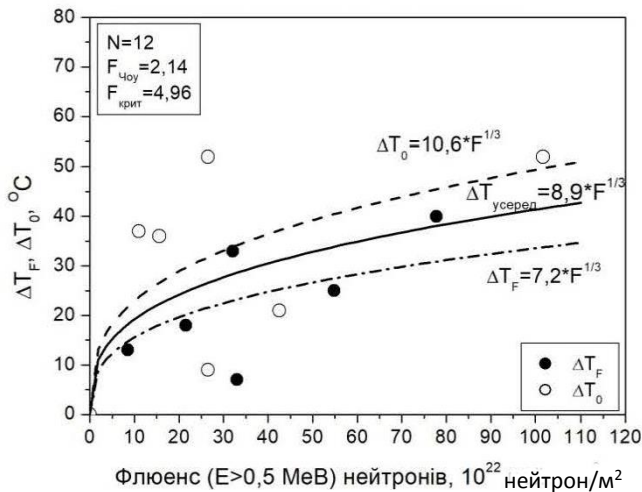


Рис. 1. Дозові залежності  $\Delta T_F(F)$  і  $\Delta T_0(F)$  для основного металу КР ЮУАЕС-3.

За допомогою тесту Чоу [4] визначали однорідність вибірок  $\Delta T_0$  і  $\Delta T_F$  за рівня значущості  $\alpha = 0,05$ . Для обґрунтування цього мають бути враховані статистичні характеристики, приймаючи, що для кожної вибірки отримано  $N_1$  і  $N_2$  значень, а всього для обох вибірок маємо  $N = N_1 + N_2$  значень.

Сума квадратів залишків  $ESS_R$  по всій вибірці з  $N$  значень розраховується за формулою

$$ESS_R = \sum_i^N (E_i - \widehat{E}_1)^2 \quad (2)$$

де  $E_i = \Delta T_i$  – експериментально знайдене значення зсуву перехідної температури при  $i$ -му значенні флюенсу;  $\widehat{E}_1$  – значення зсуву, розраховане для того самого значення флюенсу за усередненою залежністю  $\Delta T(F)_{усеред}$ .

Аналогічно розраховуються суми квадратів  $ESS_1$  та  $ESS_2$  для кожної залежності за вибірками з  $N_1$  і  $N_2$  значень.

З метою порівняння на графік наносили експериментальні точки й будували залежності  $\Delta T_F(F)$  і  $\Delta T_0(F)$ , а також усереднену залежність  $\Delta T(F)_{усеред}$ , використовуючи всі дані. Побудова всіх залежностей здійснювалась за формулою

$$\Delta T = A_F \left( \frac{F_n}{F_0} \right)^n, \quad (1)$$

де  $F_n$  – флюенс швидких нейтронів ( $E > 0,5$  MeV);  $F_0 = 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>;  $n$  – показник ступеня, що дорівнює 1/3 [1]. Для прикладу на рис. 1 і 2 наведено дозові залежності зсувів перехідних температур для основного металу і металу шва відповідно.

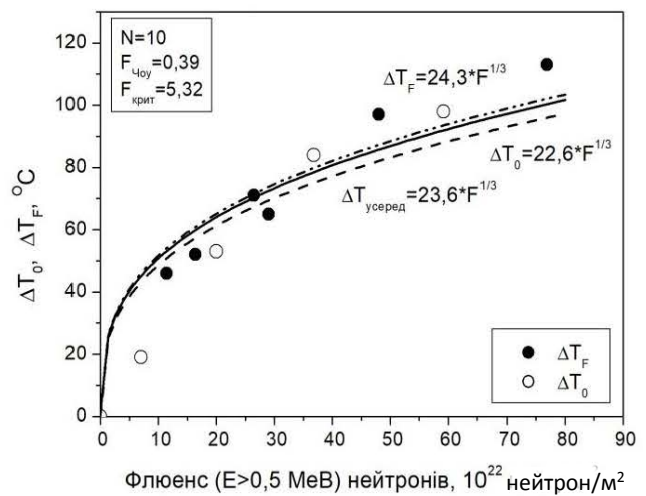


Рис. 2. Дозові залежності  $\Delta T_F(F)$  і  $\Delta T_0(F)$  для металу шва КР ЗАЕС-3.

Далі знаходиться сума квадратів залишків по вибірках 1 і 2 за формулою

$$ESS_{UR} = ESS_1 + ESS_2. \quad (3)$$

Значення  $F$ -статистики розраховується за формулою

$$F = \frac{(ESS_R - ESS_{UR})/k}{ESS_{UR}/(N - 2k)}, \quad (4)$$

де  $k$  – кількість параметрів у регресії, що досліджується.

Критичне значення  $F$ -статистики розраховується для кожного металу з параметрами ( $k$ ,  $N - 2k$ ). Для аналізу використовується залежність (1), де  $k = 1$ .

Якщо виконується нерівність

$$F_{Чоу} < F_{крит}, \quad (5)$$

то вибірки  $N_1 + N_2$  можна об'єднати в одну на рівні значущості  $\alpha = 0,05$ .

#### 4. Результати аналізу

У таблиці наведено результати розрахунків F-статистики. Для основного металу блока ЗАЕС-1 відсутні дані, оскільки радіаційне

окрихчування цього металу надзвичайно мале, так що величини  $\Delta T_0$  в дослідженому районі флюенсів дорівнюють 0.

Значення F-статистики для досліджених матеріалів

Блок	N	$F_{\text{Чоу}}$	$F_{\text{крит}}$	N	$F_{\text{Чоу}}$	$F_{\text{крит}}$
	Основний метал			Метал шва		
ЮУАЕС-1	5	8,2	10,1	7	5,32	6,61
ЮУАЕС-2	12	4,4	4,96	12	0,64	4,96
ЮУАЕС-3	12	2,14	4,96	13	0,2	4,84
ЗАЕС-1	Немає даних			11	4,13	5,11
ЗАЕС-2	9	1,82	5,59	7	4,56	6,61
ЗАЕС-3	8	1,41	5,99	10	1,7	5,32
ЗАЕС-4	11	1,5	5,11	8	0,07	5,99
ЗАЕС-5	9	5	5,59	10	0,39	5,32
ЗАЕС-6	15	0,71	4,67	12	4,18	4,49
ХАЕС-1	11	3,62	5,12	14	0,399	4,75
ХАЕС-2	8	1,55	5,99	10	1,3	5,32
РАЕС-3	5	3,03	10,1	15	2,701	4,68
РАЕС-4	11	0,08	5,11	12	2,73	4,96

Для КР блоків ЗАЕС-2, 3, 4, 5 не проводилась реконструкція зразків типу COD неопроміненого основного металу. Згідно з вимогами стандарту ASTM E 1921 [3] при відсутності репрезентативних значень референсної температури  $T_0$  можна оцінити її, використовуючи температурну залежність енергії руйнуючого удару для неопромієних ЗС за критеріями  $T_{28 \text{ Дж}}$  та  $T_{41 \text{ Дж}}$  додаванням до отриманих величин  $-50$  та  $-56$  °C відповідно. Згідно з цими вимогами проведено оцінку температур  $T_0$  у вихідному стані вказаних металів, що дало змогу оцінити зсуви  $\Delta T_0$  і врешті оцінити коефіцієнт Чоу.

З таблиці видно, що для всіх металів виконується нерівність (5). Це обґрунтовує однорідність значень зсувів критичної температури крихкості і референсної температури. Таким чином, при визначенні коефіцієнта радіаційного окрихчування металу КР зсуви температур, отриманих у результаті випробувань на триточковий і на ударний вигини, об'єднуються, що підвищує точність визначення  $A_F$  за рахунок використання більшої кількості даних.

#### 5. Висновок

Методом статистичного аналізу проведено перевірку кореляції зсувів критичних температур крихкості і референсних температур ЗС основного металу та металу зварних швів КР АЕС України з метою обґрунтування можливості сумісного використання їх для більш надійного визначення коефіцієнта радіаційного окрихчування, що використовується для прогнозування стану цих металів при експлуатації в понадпроектному періоді.

Отримані результати F-статистики показали, що для всіх матеріалів конструкційних елементів напроти активної зони всіх КР виконується критеріальна нерівність: коефіцієнт Чоу менше, ніж його критичне значення  $F_{\text{Чоу}} < F_{\text{крит}}$ .

Таким чином, доведено однорідність вибірок  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$ , тобто їх можна розглядати як одну вибірку й використовувати сумісно для підвищення точності визначення коефіцієнта радіаційного окрихчування корпусних металів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (Москва: Энергоатомиздат, 1989) 524 с.
2. IAEA NULIFE (Nuclear Plant Life Prediction) Guidelines, 2012.
3. ASTM E 1921-13a Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range.
4. Г. Шеффе. Дисперсионный анализ (Москва: Наука, 1980) 512 с.

**L. I. Chyrko\*, V. M. Revka, Yu. V. Chaikovskiy,  
M. G. Goliak, O. V. Trygubenko, O. V. Shkapyak**

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

\*Corresponding author: chyrko@kinr.kiev.ua

**TO THE ISSUE OF ACCURACY OF DETERMINATION  
OF IRRADIATION EMBRITTLEMENT COEFFICIENT**

The paper presents the statistical analysis of experimental results of radiation-induced critical brittle temperature  $\Delta T_F$  shifts and reference temperatures  $\Delta T_0$  obtained respectively from the impact bend and fracture toughness tests of the reactor vessel metal surveillance specimens to define the possibility of their mutual application for the irradiation embrittlement coefficient to be determined more accurately. The correlation between these parameters is shown to remain up to the accumulation of over-design fast neutron fluence.

*Keywords:* critical brittle temperature shifts, reference temperature, irradiation embrittlement coefficient, Chow test.

REFERENCES

1. Rules and Regulations in Nuclear Power G-7-002-86. Standards for Strength Calculation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (Moskva: Energoatomizdat, 1989) 524 p. (Rus)
2. IAEA NULIFE (Nuclear Plant Life Prediction) Guidelines, 2012.
3. ASTM E 1921-13a Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range.
4. H. Scheffé. *Analysis of Variance* (Moskva: Nauka, 1980) 512 p. (Rus)

Надійшла/Received 20.08.2020