

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](mailto:chyrko@kinr.kiev.ua)

## АНАЛІЗ РАДІАЦІЙНОГО ОКРИХЧУВАННЯ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ У ДІАПАЗОНІ НАДПРОЕКТНИХ ФЛЮЕНСІВ НЕЙТРОНІВ

Зроблено порівняння експериментальних значень зсуву критичної температури крихкості  $\Delta T_F$  та референсної температури  $\Delta T_0$  металу зварних швів корпусів реакторів ВВЕР-1000 з підвищеним вмістом марганцю і нікелю. Значення  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$  визначено за результатами випробувань стандартних зразків Шарпі на ударний вигин і з тріщиною на в'язкість руйнування відповідно. Зразки були опромінені в промислових реакторах у рамках програми зразків-свідків до флюенсів швидких ( $E \geq 0,5$  МеВ) нейтронів, що відповідають терміну довгострокової експлуатації АЕС. Результати дослідження показали, що зсуви  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$  узгоджуються між собою. Крім того, було виявлено, що в діапазоні надпроектних флюенсів проектна модель окрихчування має тенденцію недооцінювати зсув критичної температури крихкості.

*Ключові слова:* корпус реактора ВВЕР-1000, зсув критичної температури крихкості, зсув референсної температури, радіаційне окрихчування.

### 1. Вступ

Корпус ВВЕР є основним бар'єром безпеки реакторної установки, тому він не підлягає заміні у зв'язку з технічною та економічною недоцільністю. Таким чином, стан металу корпусу реактора (КР), а це ферито-перлітна сталь марки 15X2НМФА-А, фактично визначає ресурс всього енергетичного блока АЕС. З часом, у результаті радіаційного окрихчування (зниження в'язкості руйнування) металу КР в районі активної зони (опорна, нижня і верхня обичайки, зварні шви № 3 і № 4) унаслідок нейтронного опромінення, механічних напружень, термічного старіння та інших чинників різниця між гранично допустимою критичною температурою крихкості  $T_K^a$  і фактичною  $T_K$  зменшується, збільшуючи вірогідність крихкого руйнування КР. Для забезпечення безпечної експлуатації КР необхідно, щоб за будь-яких режимів роботи реакторної установки температура  $T_K$  була нижчою, ніж  $T_K^a$ .

На сьогоднішній день для оцінки критичної температури крихкості  $T_K$  опромінених матеріалів КР застосовується модель окрихчування ПНАЕ Г-7-002-86 [1]. Враховуючи, що ця модель була розроблена більше, ніж 50 років назад, важливо бути впевненим у тому, що вона адекватно описує експериментальні дані щодо окрихчування у великому діапазоні флюенсів, включаючи надпроектні значення.

З метою перевірки проектної моделі при надпроектних флюенсах нейтронів проведено аналіз величин зсувів температури в'язко-крихкого

переходу  $\Delta T_F$  та референсної температури  $\Delta T_0$ , отриманих під час випробувань на ударний вигин і в'язкість руйнування зразків-свідків металу зварних швів КР ВВЕР-1000, що накопичили достатньо високі флюенси. Проектний термін безпечної експлуатації КР ВВЕР-1000 40 років, протягом якого елементи КР навпроти активної зони, такі як зварні шви № 3 і № 4 та опорна, верхня і нижня обичайки, накопичують флюенс  $\approx 60 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>. Завдяки використанню заходів з пом'якшення впливу нейтронного опромінення, особливо схеми завантаження активної зони з пониженим витоком нейтронів, величина накопиченого за 40 років флюенса зменшилась до  $\approx 40 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>. Таким чином, понадпроектними флюенсами є флюенси, що перевищують це значення.

### 2. Досліджений матеріал

Для аналізу використано результати випробувань зразків-свідків металу зварних швів КР шести енергоблоків АЕС України. Хімічний склад щодо основних легуючих елементів і шкідливих домішок характеризується таким чином:

високий вміст нікелю ( $1,55 \div 1,88$  % мас.);  
середній ( $0,65 \div 0,74$  % мас.) і високий ( $0,86 \div 0,97$  % мас.) вміст марганцю;  
низький вміст міді ( $\leq 0,08$  мас.) та фосфору ( $\leq 0,009$  % мас.).

Вміст легуючих елементів і шкідливих домішок наведено в табл. 1. Для порівняння наведено вимоги нормативної документації [2]. Вміст усіх елементів знаходиться в межах нормативу.

© Л. І. Чирко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський,  
М. Г. Голяк, О. В. Тригубенко, О. В. Шкапяк, 2020

Таблиця 1. Вміст легуючих елементів та шкідливих домішок у досліджених матеріалах (% мас.)

Метал КР	Mn	Ni	Si	Cu	P
МШ-1	0,97	1,88	0,26	0,02	0,006
МШ-2	0,93	1,74	0,26	0,05	0,007
МШ-3	0,74	1,72	0,30	0,06	0,005
МШ-4	0,65	1,70	0,33	0,06	0,009
МШ-5	0,86	1,60	0,27	0,08	0,009
МШ-6	0,67	1,55	0,32	0,03	0,008
ПНАЭ Г-7-010-89	0,65 – 1,10	1,2 – 1,90	0,15 – 0,45	≤0,08	≤ 0,012

Примітка. МШ – метал шва.

Основну інформацію про окрихчування металу зварних швів наведено в табл. 2. Максимальний флюенс швидких ( $E \geq 0,5$  MeV) нейтронів

для опромінених матеріалів  $82,9 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>. Максимальний зсув критичної температури крихкості 113 °С.

Таблиця 2. Інформація про окрихчування досліджених металів

Метал КР	Максимальний флюенс, $10^{22}$ нейтрон/м <sup>2</sup>	Максимальний зсув $\Delta T_F$ , °С	Коефіцієнт $A_F$ , °С
МШ-1	42,4	88	25,0
МШ-2	56,9	79	20,5
МШ-3	69,7	72	17,5
МШ-4	82,9	66	15,1
МШ-5	76,9	113	26,6
МШ-6	75,5	62	14,7

### 3. Методика аналізу даних

Експериментальні залежності зсуву перехідної температури крихкості  $\Delta T_F$  від флюенса нейтронів було статистично оброблено і визначено коефіцієнти радіаційного окрихчування  $A_F$  шляхом наближення даних степеневою функцією [1]

$$\Delta T_F = A_F \cdot F^n, \quad (1)$$

де  $F$  – флюенс швидких ( $E > 0,5$  MeV) нейтронів,  $10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>;  $n$  – показник степеня, що в проектній моделі дорівнює 1/3. Зсув  $\Delta T_F$  визначається як різниця між температурами переходу для матеріалу в опромінену та вихідному станах.

Коефіцієнт радіаційного окрихчування  $A_F$  в табл. 2 розраховано для максимального значення  $\Delta T_F$  згідно з рівнянням (1). Середнє значення  $A_F$  для кожного металу розраховується як параметр наближення експериментальних значень зсувів  $\Delta T_F$  залежно від накопиченого флюенса нейтронів за регресією (1).

### 4. Експериментальні результати

Дані табл. 2 свідчать про те, що експериментально визначений коефіцієнт радіаційного окрихчування  $A_F$  для деяких зварних швів більший за проектне значення 20 °С. Причина високої чутливості до опромінення, швидше за все, пов'язана з підвищеним вмістом марганцю за

концентрації нікелю, більшої за 1,5 % мас.

На рис. 1 наведено проектну криву окрихчування з нормативним коефіцієнтом  $A_F = 20$  °С та експериментальні значення  $\Delta T_F$  для металу швів з підвищеним (темні точки) і середнім (світлі точки) вмістом марганцю.

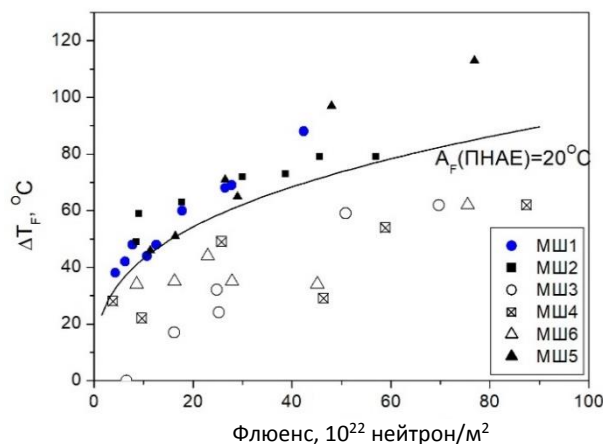


Рис. 1 Порівняння експериментальних значень  $\Delta T_F$  з проектною залежністю з нормативним коефіцієнтом окрихчування  $A_F = 20$  °С.

Аналіз даних з окрихчування металу зварних швів КР ВВЭР-1000 показав, що залежності зсуву  $T_K$  від флюенса нейтронів підрозділяються на два тренди окрихчування по відношенню до розрахункової кривої з нормативним коефіцієнтом  $A_F = 20$  °С. Один тренд пов'язаний із прогнозованим окрихчуванням зварних швів із середнім

вмістом марганцю (0,65 – 0,74 % мас.). Інший тренд характеризує радіаційне окрихчування зварних швів з більш високим вмістом марганцю (0,86 – 0,97 % мас.).

Для порівняння експериментальних даних з проектною залежністю на рис. 2 показано наближення за рівнянням (1) значень  $\Delta T_F$  для металів з підвищеним (а) і середнім (б) вмістом марганцю. Коефіцієнт радіаційного окрихчування 23 і 14 °C для МШ з підвищеним та середнім вмістом марганцю відповідно. Дані рис. 2, а свідчать,

що в діапазоні великих флюенсів (більше, ніж  $\sim 50 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>) спостерігається неузгодженість між проектною моделлю окрихчування та експериментальними значеннями  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$ .

На рис. 2, б показано результати наближення за допомогою моделі (1) експериментальних даних  $\Delta T_F$  для МШ із середнім вмістом марганцю. Як видно з рисунка, при великих флюенсах нейтронів експериментальні значення  $\Delta T_F$  і  $\Delta T_0$  лежать вище середньої лінії регресії.

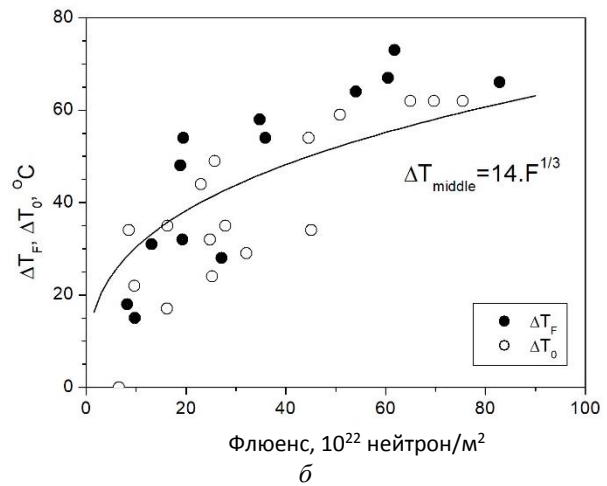
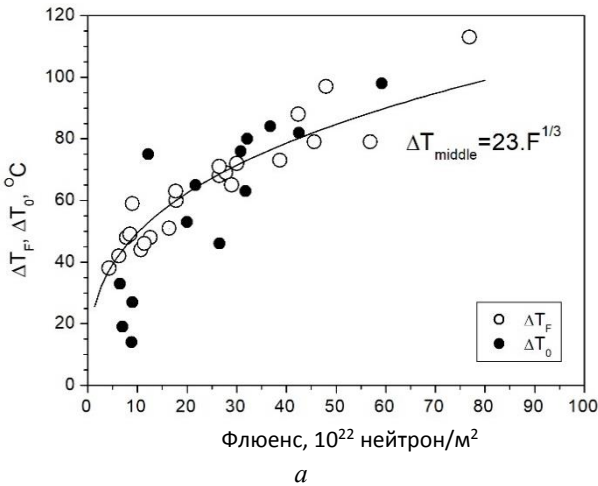


Рис. 2. Трендові криві для металу зварних швів з підвищеним (а) і середнім (б) вмістом марганцю.

На рис. 3 наведено наближення степеневую функцією (1) з показником  $n = 0,5$  експериментальних даних  $\Delta T_F$  для МШ з підвищеним і серед-

нім вмістом марганцю відповідно. Видно, що така модель краще характеризує експериментальні дані, ніж рівняння з  $n = 1/3$  (див. рис. 2).

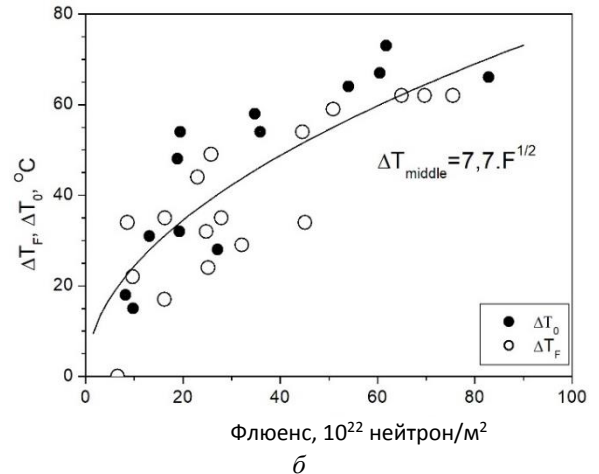
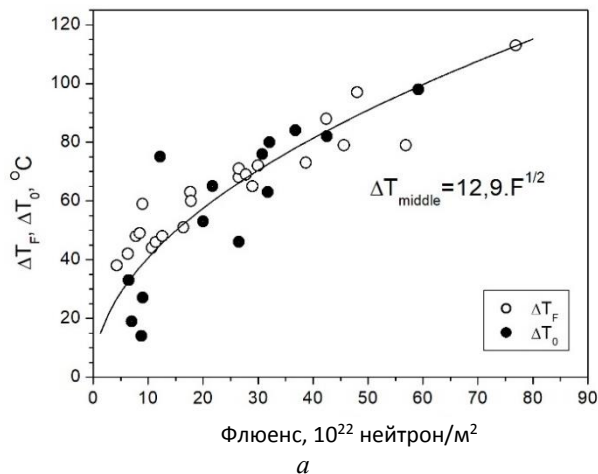


Рис. 3. Наближення експериментальних значень  $\Delta T_F$  рівнянням (1) з  $n = 0,5$  для МШ з підвищеним (а) і середнім (б) вмістом марганцю.

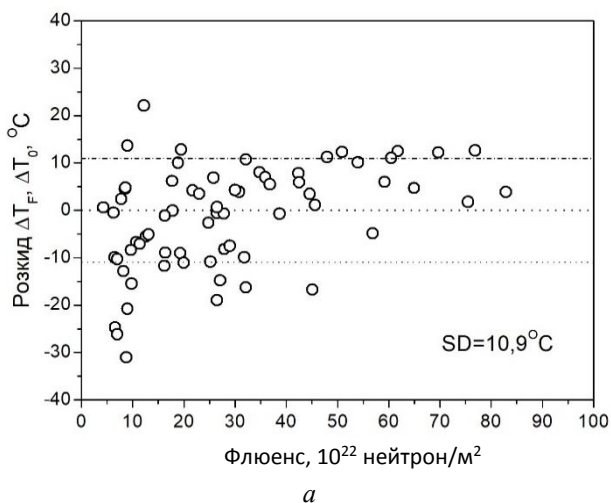
Таким чином, з проведеного аналізу випливає, що нормативна модель окрихчування із степеневим показником  $1/3$  може некоректно характеризувати зсув критичної температури крихкості в дослідженому діапазоні флюенсів. Проектна залежність добре описує тренд експериментальних даних у межах проектних флюенсів нейтронів, принаймні до  $(40 \div 50) \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>. Проте в

діапазоні великих флюенсів нейтронів ця залежність не узгоджується з експериментальними значеннями  $\Delta T_F$ . Можна припустити, що відхилення експериментальних даних від нормативної залежності може бути пов'язане зі зміною механізму радіаційного окрихчування. Таке явище спостерігалось для корпусних сталей західного типу й носить назву “late blooming effect” [3].

Очевидно, для підтвердження такого висновку необхідно мати більше даних щодо окрихчування металу шва, що відповідають терміну довгострокової експлуатації КР.

### 5. Розкид експериментальних даних

Аналіз розкиду експериментальних даних радіаційно стимульованого зсуву критичної температури крихкості та референсної темпера-



тури виконано для кожного зварного шва окремо. З цією метою знаходили залишки, тобто різницю між експериментальними значеннями  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$  і вирахували для того самого флюенса за рівнянням (1) з коефіцієнтом  $A_F$ , який є параметром регресії експериментальних значень даного металу з показниками степеня 1/3 або 1/2. На рис. 4 показано зведений розкид експериментальних даних (68 значень) відносно кожної розрахункової моделі окрихчування.

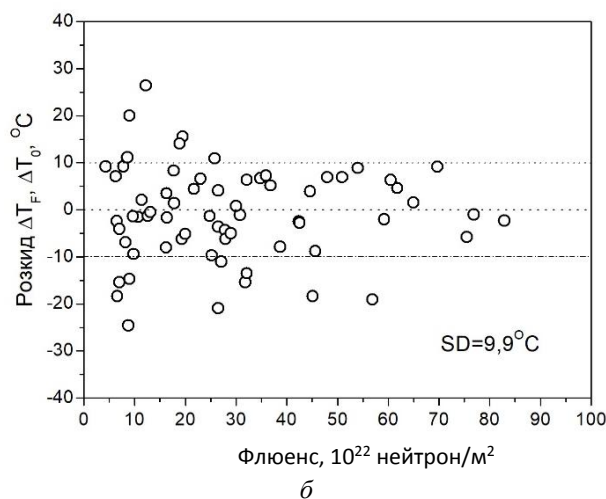


Рис. 4. Розкид експериментальних даних  $\Delta T_F$  та  $\Delta T_0$  відносно степеневі моделі окрихчування з показником степеня  $n = 1/3$  (а) і  $n = 1/2$  (б).

Як свідчать результати аналізу, у діапазоні флюенсів нейтронів, який перевищує  $40 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>, проектна модель окрихчування не узгоджується з експериментальними значеннями, як це було показано раніше (див. рис. 2).

Для нормативної моделі стандартне відхилення SD становить 10,9 °C, а для моделі окрихчування із степеневим показником 1/2  $SD = 9,9$  °C. Важливо зазначити, що нова модель набагато краще описує тенденцію до окрихчування при понадпроектних флюенсах, як це було показано на рис. 3.

### 6. Висновок

В області надпроектних флюенсів нейтронів спостерігається неузгодженість нормативної моделі окрихчування з експериментальними дани-

ми для металу зварних швів КР ВВЕР-1000, особливо з підвищенням вмістом нікелю і марганцю.

Показано, що модель  $\Delta T_F = A_F \cdot F^n$  з показником степеня 1/2 більш точно описує дозові залежності радіаційно-стимульованих зсувів температур крихко-в'язкого переходу, включаючи діапазон великих флюенсів, ніж проектна модель з показником степеня 1/3.

Для підтвердження цього висновку необхідний більш ґрунтовний з більшою статистикою аналіз експериментальних даних зсуву критичної температури крихкості. Такий аналіз буде проведений після виконання чергових випробувань зразків-свідків та отримання додаткових даних щодо радіаційного окрихчування металу зварних швів КР ВВЕР-1000, опромінених до великих флюенсів нейтронів.

### 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. ПНАЭ Г-7-10-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. Нормативный документ (Москва: НТЦ ЯРБ, 2000) 80 с.
3. G.R. Odette, T. Yamamoto, D. Klingensmith. On the effect of dose rate on irradiation hardening of RPV steels. *Philosophical Magazine* 85(4-7) (2005) 779.

**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

### **WELD METAL IRRADIATION EMBRITTLEMENT ANALYSIS IN THE RANGE OF OVER-DESIGN NEUTRON FLUENCES**

The comparison of experimental values of the critical brittle temperature  $\Delta T_F$  and reference temperature  $\Delta T_0$  of VVER-1000 reactor vessel weld metal with an elevated content of manganese and nickel is performed.  $\Delta T_F$  and  $\Delta T_0$  values are defined proceeding from the standard impact bend Charpy and Charpy cracked fracture toughness specimen tests, respectively. Specimens were irradiated in industrial reactors in the frame of surveillance specimen program up to the fast ( $E \geq 0.5$  MeV) neutron fluences corresponding to the NPP long term operation period. The research results showed the shifts  $\Delta T_F$  and  $\Delta T_0$  to agree with each other. Besides, it was discovered that in the range of over-design fluences the design embrittlement model has a tendency to underestimate the critical brittle temperature shift.

*Keywords:* VVER-1000 reactor vessel, critical brittle temperature shift, reference temperature shift, irradiation embrittlement.

#### 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. Rules and Regulations in Nuclear Power G-7-10-89. Equipment and pipelines for Nuclear Power Plants. Welded joints and surfacing. Control rules. Normative document (Moskva: Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2000) 80 p. (Rus)
3. G.R. Odette, T. Yamamoto, D. Klingensmith. On the effect of dose rate on irradiation hardening of RPV steels. *Philosophical Magazine* 85(4-7) (2005) 779.

Надійшла/Received 20.08.2020