

# ОЦІНКА ОПОРУ КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ВИГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 В ПРОЦЕСІ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛИШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

О.В. Махненко, С.М. Кандала

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: [makhnenko@paton.kiev.ua](mailto:makhnenko@paton.kiev.ua), [st\\_kan@ukr.net](mailto:st_kan@ukr.net)

У статті обґрунтовано необхідність врахування залишкових технологічних напружень (ЗТН) у матеріалі вигородки внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) енергоблоків АЕС типу ВВЕР-1000 внаслідок технологічних процесів зварювання та післязварювальної термообробки при продовженні ресурсу безпечної експлуатації в надпроектний період. Визначено вплив ЗТН на напружено-деформований стан вигородки, а також на опір крихкому руйнуванню (ОКР) матеріалу в процесі експлуатації. Показано, що за рахунок урахування ЗТН спостерігається суттєвий перерозподіл осьових та окружних напружень у вигородці, а саме зони високих розтягуючих напружень, які за нормальних умов експлуатації (НУЕ) із зовнішньої поверхні вигородки переходять у її внутрішній об'єм, а площа цих зон збільшується. Такий перерозподіл напружень суттєво впливає на рівень значень коефіцієнта інтенсивності напружень на контурі тріщиноподібних дефектів. Найбільш небезпечні ділянки з точки зору крихкої міцності утворюються у внутрішньому об'ємі вигородки, а за рахунок розширення зони напружень розтягу розміри підповерхневої еліптичної тріщини, яка постулюється, можуть бути збільшені, що сприяє підвищенню консервативності оцінки ОКР. Також урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при оцінці ОКР вигородки за НУЕ для поверхневих напівеліптичних тріщин, розташованих на зовнішній поверхні вигородки, де в процесі виготовлення утворюються залишкові напруження стискування. Отримані результати дозволяють точніше визначати зони вигородки, схильні до крихкого руйнування матеріалу за НУЕ, що важливо для вдосконалення підходів визначення ресурсу ВКП реактора типу ВВЕР-1000. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 9.

*Ключові слова:* ВВЕР-1000, внутрішньокорпусні пристрої, вигородка, залишкові технологічні напруження, опір крихкому руйнуванню, постульовані тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень, нормальні умови експлуатації

**Вступ.** Внутрішньокорпусні пристрої (ВКП) ядерних реакторів типу ВВЕР-1000 є дуже важливими конструкційними елементами, які впливають на ресурс усієї енергетичної установки. Одним із ключових підходів у роботах щодо продовження ресурсу безпечної експлуатації АЕС є прогнозна оцінка структурної цілісності конструкцій за допомогою математичного моделювання фізичних процесів, характерних для умов експлуатації енергоблоків при радіаційному опроміненні конструкційного матеріалу. Результати існуючих досліджень [1, 2] обґрунтовують забезпечення умов опору крихкому руйнуванню вигородки ВКП за нормальних умов експлуатації (НУЕ) та аварійних ситуацій (АС), але в цих роботах не розглянуто вплив залишкових технологічних напружень на структурну цілісність елементів ВКП протягом довгострокової експлуатації.

Методами математичного моделювання було визначено [3], що при виготовленні ВКП енергоблоку ВВЕР-1000, а саме в процесі швидкого охолодження на повітрі під час післязварювальної термообробки за режимом аустенізації ( $T = 1100$  °С), виникають високі залишкові технологічні напру-

ження (ЗТН). У цій роботі проведено розрахунковий аналіз ступеню впливу визначених ЗТН на напружено-деформований стан (НДС) та опір крихкому руйнуванню (ОКР) вигородки ВКП у процесі довгострокової експлуатації до 60-и років з різним рівнем накопиченої пошкоджуючої дози.

Внутрішня поверхня товстостінної циліндричної обичайки вигородки має грановану форму, яка обмежує активну зону реактора (рис. 1, а). Конструкція має дзеркально-циклічну симетрію, що дає змогу розбити її при моделюванні на дванадцять аналогічних 30-градусних секторів (рис. 1, б). Переріз вигородки неоднорідний і характеризується наявністю 84-х охолоджувальних каналів, а товщина варіюється в межах від 67 мм до 242 мм. Матеріал – аустенітна сталь 08X18H10T.

**Вхідні дані.** Для визначення ступеня впливу ЗТН на зміну НДС і ОКР конструкції вигородки в процесі довготривалої експлуатації використовувалися наступні вхідні дані (рис. 2): розподіли ЗТН [3]; два різних за рівнем розподіли накопиченої пошкоджуючої дози; розподіл тепловиділень внаслідок  $\gamma$ -розігріву. Використані розподіли пошкоджуючої дози і тепловиділень взяті як характерні дані з практики виконання відповідних розрахунків.

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Кандала С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-2036-0498>

© О.В. Махненко, С.М. Кандала, 2022

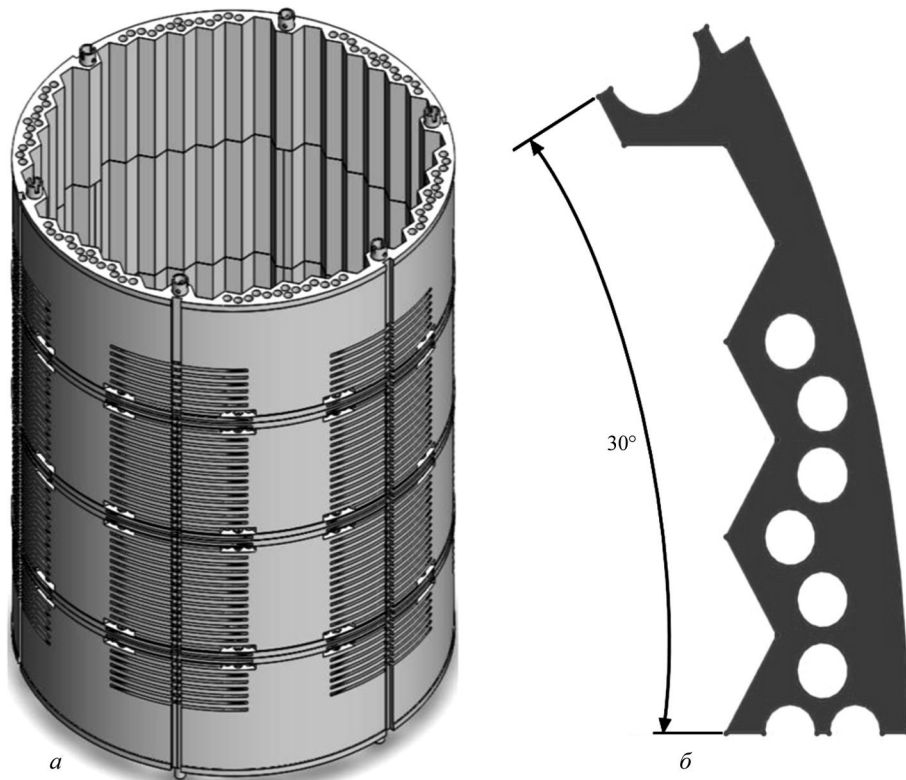


Рис. 1. Загальний вигляд вигордки (а) та її поперечний переріз (30-градусний сектор) (б)

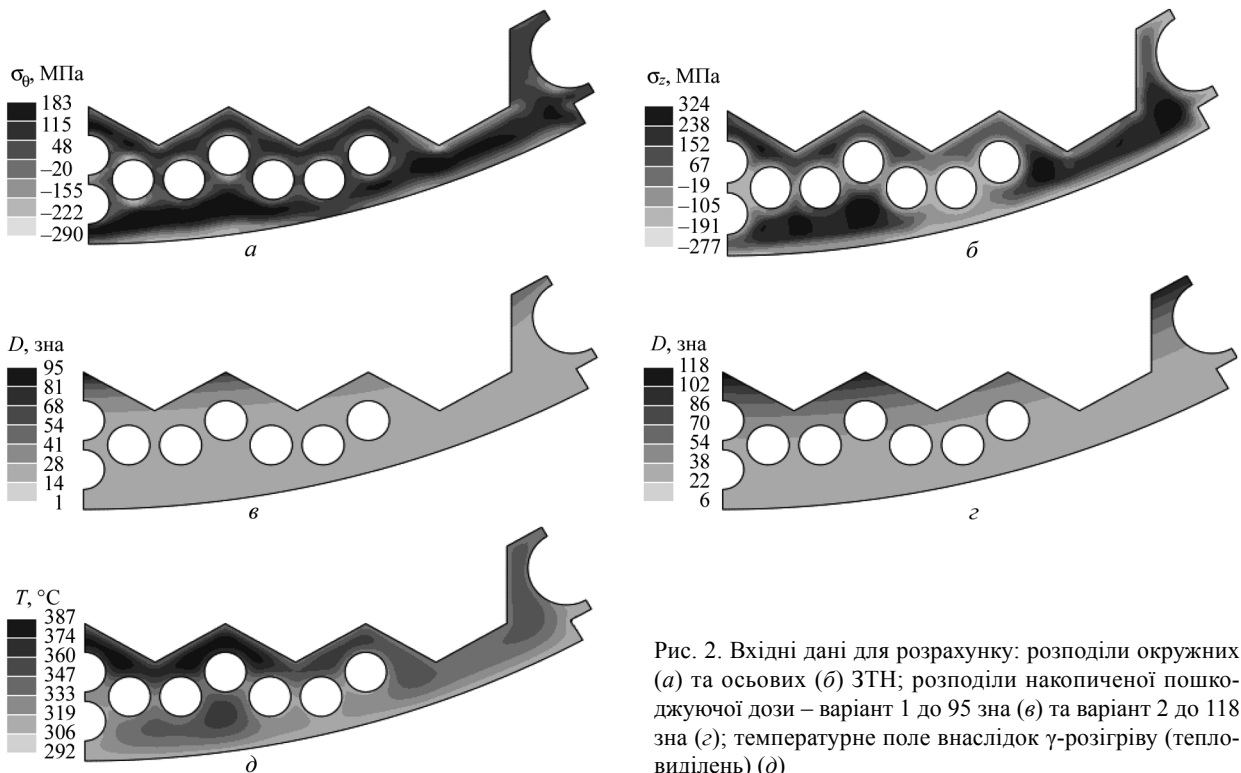


Рис. 2. Вхідні дані для розрахунку: розподіли окружних (а) та осевих (б) ЗТН; розподіли накопиченої пошкоджуючої дози – варіант 1 до 95 зна (в) та варіант 2 до 118 зна (г); температурне поле внаслідок  $\gamma$ -розігріву (тепловиділень) (д)

**Моделі радіаційного розпухання та повзучості.** Процес довготривалої експлуатації вигордки ВКП в умовах нейтронного опромінення супроводжується радіаційним розпуханням, яке може бути описане апробованою в ДП НАЕК «Енергоатом» моделлю [4–6]:

$$S = C_D \cdot D^n \cdot f_1(T) \cdot f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) \cdot f_3(\alpha), \quad S > 0, \quad (1)$$

$$f_1(T) = \exp(-r \cdot (T - T_{\max})^2),$$

$$f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) = 1 + P \cdot (0,85 \cdot \sigma_m + 0,15 \cdot \sigma_{eq}),$$

$$f_3(\alpha) = \exp(-\eta \cdot \alpha),$$

$$C_D = 1,035 \cdot 10^{-4} \text{зна}^{-n}, \quad n = 1,88,$$

$$r = 1,825 \cdot 10^{-4}, \quad ^\circ\text{C}^{-2}, \quad T_{\max} = 470 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$P = 8 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}, \quad \eta = 8,75,$$

де  $S$  – розпухання, %;  $D$  – пошкоджуюча доза, зна;  $T$  – температура опромінення, °C;  $\sigma_m$  – середні напруження, МПа;  $\sigma_{eq}$  – еквівалентні напруження, МПа;  $\alpha$  – параметр Оджкіста.

Також модель враховує деформації радіаційної повзучості, які для сталі 08X18H10T описуються за законом [6]:

$$\frac{d\varepsilon^{cr}}{dt} = \left( B_0 \frac{dD}{dt} + \omega \frac{dS}{dt} \right) \sigma_{eq} \quad (2)$$

де  $\varepsilon^{cr}$  – деформація радіаційної повзучості,  $B_0 = 1 \cdot 10^{-6} (\text{МПа} \cdot \text{зна})^{-1}$ ,  $\omega = 2,95 \cdot 10^{-3} (\text{МПа}^{-1})$ .

**Визначення розподілів напружень протягом експлуатації.** НДС вигородки з урахуванням процесів радіаційних розпухання і повзучості матеріалу може бути визначений в результаті рішення крайової задачі механіки суцільного середови-

ща методом скінчених елементів в пружно-в'язко-пластичній постановці [5, 7]:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{cr},$$

де  $\varepsilon$  – сумарні деформації;  $\varepsilon^e$ ,  $\varepsilon^p$ ,  $\varepsilon^{cr}$  – відповідно пружні, пластичні і деформації повзучості.

Рішенням відповідної 2D задачі з початковими і крайовими умовами у вигляді розподілів ЗТН, пошкоджуючої дози і тепловиділень внаслідок  $\gamma$ -розігріву (рис. 2), а також умов теплообміну з теплоносієм на поверхнях вигородки [5, 7] шляхом послідовного простеження за часом з кроком  $\Delta t = 0,2$  року були отримані розподіли напружень в поперечному перерізі вигородки в процесі довгострокової експлуатації з урахуванням та без урахування ЗТН. На рис. 3, 4 показано осьові та окружні напруження в робочому режимі вигородки на 60-у році експлуатації для двох розглянутих варіантів рівня накопиченої пошкоджуючої дози – 95 зна і 118 зна відповідно.

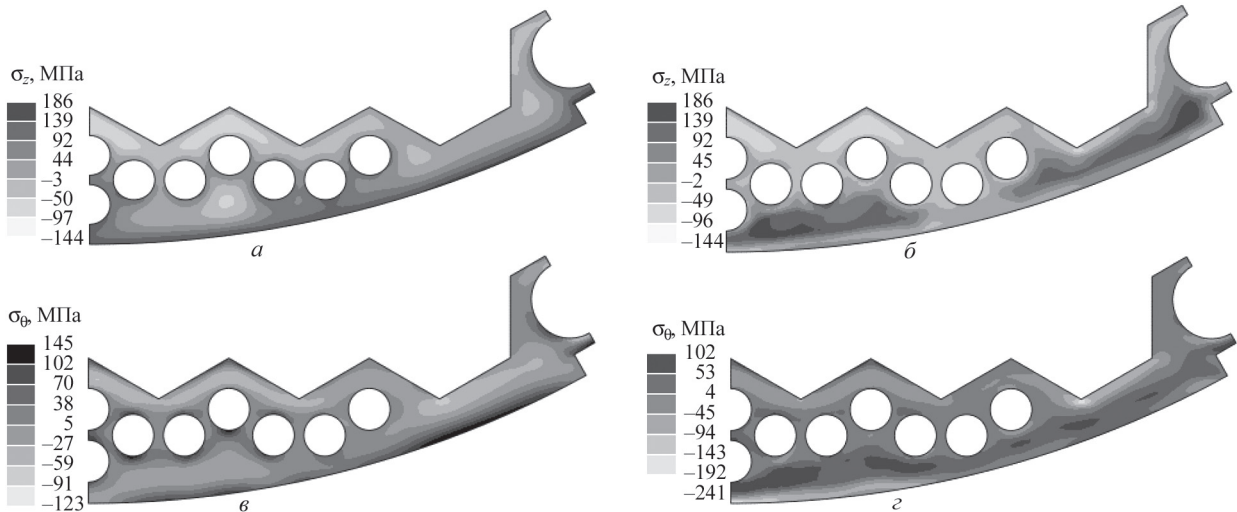


Рис. 3. Розподіли напружень у вигородці на 60-му році експлуатації з максимальною накопиченою дозою 95 зна:  $a$  – осьова компонента без урахування ЗТН;  $b$  – осьова компонента з урахуванням ЗТН;  $v$  – окружна компонента без урахування ЗТН;  $z$  – окружна компонента з урахуванням ЗТН

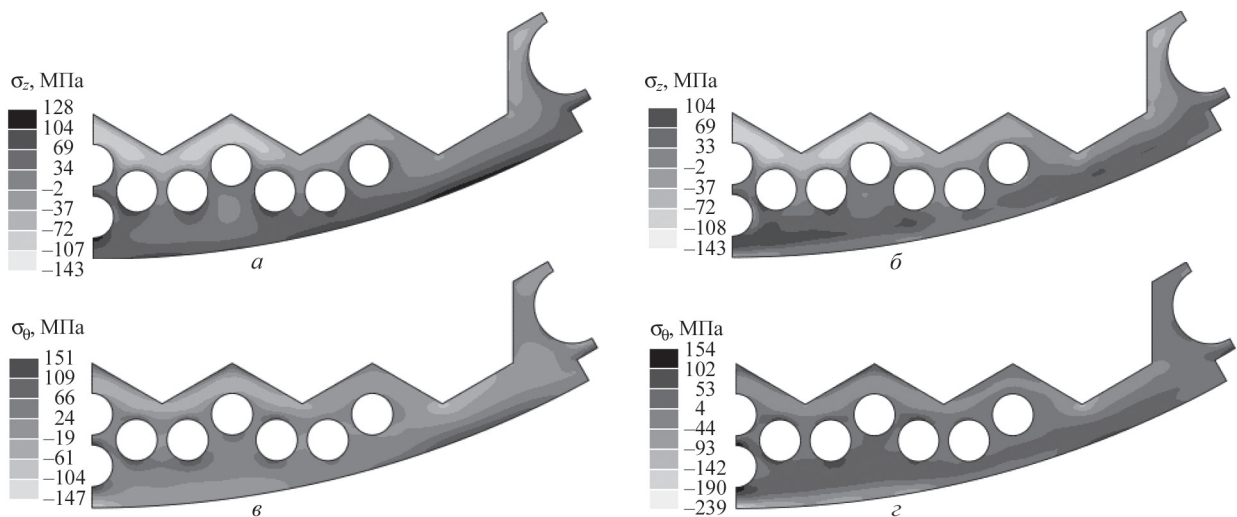


Рис. 4. Розподіли напружень у вигородці на 60-му році експлуатації з максимальною накопиченою дозою 118 зна:  $a$  – осьова компонента без урахування ЗТН;  $b$  – осьова компонента з урахуванням ЗТН;  $v$  – окружна компонента без урахування ЗТН;  $z$  – окружна компонента з урахуванням ЗТН

На рис. 3, 4 спостерігається помітна відмінність розподілів напружень в осьовому і окружному напрямках залежно від урахування ЗТН. З урахуванням ЗТН зони високих розтягуючих напружень із зовнішньої стінки вигородки переходять у внутрішній об'єм, а їх площа збільшується. Також варто відзначити вплив рівня пошкоджуючої накопиченої дози на рівень напружень у процесі експлуатації вигородки.

Як видно з даних на рис. 3, 4, ЗТН мало впливають на розподіл напружень на внутрішній поверхні вигородки в області охолоджувальних каналів. Тому для аналізу було вибрано 5 характерних перерізів ближче до зовнішньої поверхні, де вплив ЗТН на НДС вигородки найбільш суттєвий. Схему їхнього розташування показано на рис. 5.

На рис. 6, 7 представлено розрахункові розподіли осьових та окружних напружень у перерізах № 1 і № 5 відповідно на 60-у році експлуатації в залежності від накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН.

Врахування ЗТН може сприяти зниженню рівня напружень в осьовому напрямку в процесі експлуатації (рис. 6, а), а ближче до зовнішньої поверхні вигородки в перерізі №1 напруження навіть переходять у стискаючі.

З даних на рис. 7, які відносяться до перерізу № 5, видно, що врахування ЗТН незалежно

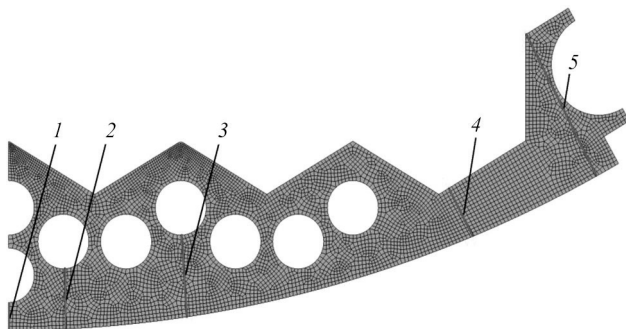


Рис. 5. Схема розташування характерних перерізів для оцінки впливу ЗТН на НДС вигородки у процесі довгострокової експлуатації

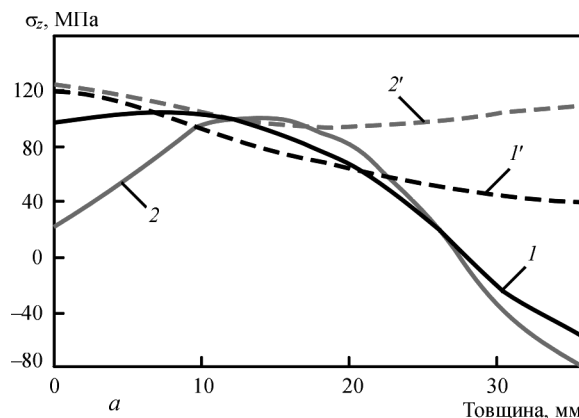


Рис. 6. Розподіл осьових  $\sigma_z$  (а) та окружних  $\sigma_\theta$  (б) напружень у перерізі №1 в залежності від накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН: 1' – при  $D_{\max} = 118$  зна, 2' – при  $D_{\max} = 95$  зна без урахування ЗТН; 1 – при  $D_{\max} = 118$  зна, 2 – при  $D_{\max} = 95$  зна з урахуванням ЗТН

від рівня накопиченої пошкоджуючої дози істотно впливає на розподіл напружень, а саме, утворюються зони високих напружень розтягу (до 180 МПа) в осьовому напрямку (рис. 7, а).

Варто зазначити, що окружні напруження (рис. 6, б і рис. 7, б) у порівнянні з осьовими відносно низькі в розглянутих перерізах (до 50 МПа) і в більшості випадків урахування ЗТН не викликає суттєвого впливу на їх розподіл.

Також визначено, що в перерізах №№ 2–4 осьові напруження у разі врахування ЗТН істотно вищі у внутрішньому об'ємі вигородки, тоді як на внутрішній та зовнішніх поверхнях стають нижчими порівняно з розрахунковим випадком, де ЗТН не враховувалися.

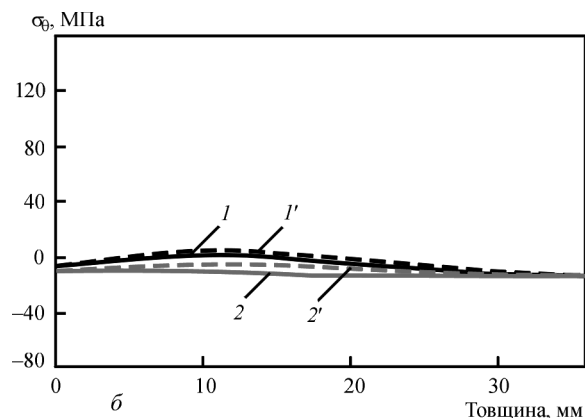
**Методика розрахунку ОКР.** Відповідно до існуючих вимог [4] при розрахунковому обґрунтуванні безпечної експлуатації ВКП одним з необхідних розрахунків на міцність є розрахунок ОКР, який виконується відповідно до вимог діючої в Україні нормативної документації [8], а також необхідно враховувати рекомендації зарубіжних документів [6, 9]. Опір крихкому руйнуванню ВКП забезпечується, якщо за всіх умов експлуатації виконується умова:

$$K_1 \leq [K_1], \quad (3)$$

де  $K_1$  – розрахункове значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) на контурі постульованої тріщини;  $[K_1]$  – допустиме значення КІН, яке визначається для умов нормальної експлуатації (НУЕ) ( $i = 1$ ) з коефіцієнтом безпеки  $n_k = K_{1c}/[K_1] = 2$ ,  $K_{1c}$  – критичне значення КІН матеріалу.

У якості постульованої тріщини розглядаються як еліптична підповерхнева тріщина з великою піввіссю  $c$  та меншою піввіссю  $a$  (рис. 8, а), так і напівеліптична поверхнева тріщина (рис. 8, б). Відповідно до ПНАЕ [8] співвідношення півосей  $a/c = 2/3$ , а відповідно до [4]  $a/c = 1/3$ , максимальна постульована глибина  $2a$  дефекту не може перевищувати чверть товщини основного матеріалу.

Варто зазначити, що елементи ВКП працюють в умовах інтенсивного нейтронного опромінення.



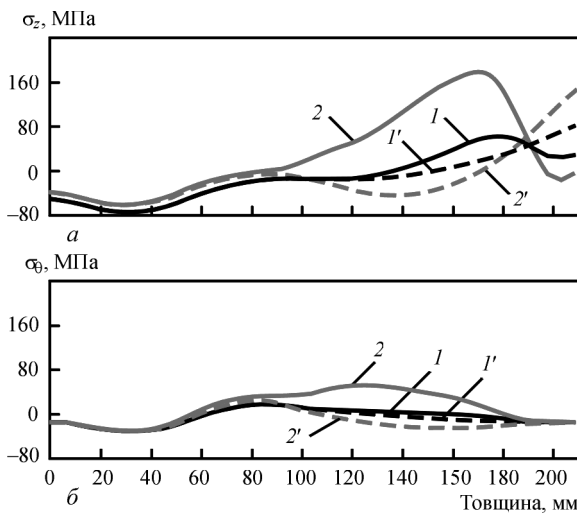


Рис. 7. Розподіл осьових  $\sigma_z$  (а) та окружних  $\sigma_\theta$  (б) напружень у перерізі № 5 в залежності від накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН: 1' – при  $D_{\max} = 118$  зна, 2' – при  $D_{\max} = 95$  зна без урахування ЗТН; 1 – при  $D_{\max} = 118$  зна, 2 – при  $D_{\max} = 95$  зна з урахуванням ЗТН

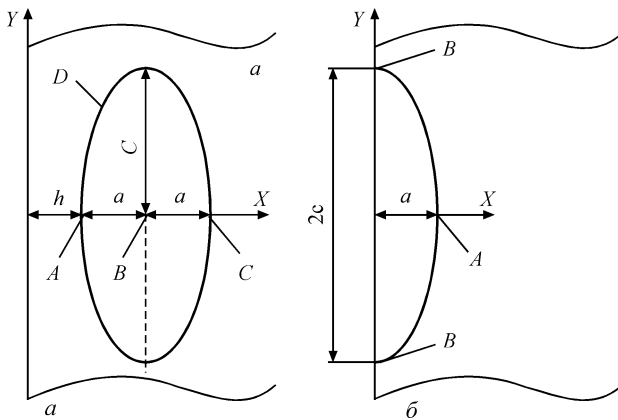


Рис. 8. Постульовані еліптична (а) та напівеліптична (б) тріщини

Це в процесі експлуатації призводить до деградації механічних властивостей основного металу. Тому критичні значення КІН у різних точках (об'ємах) основного металу залежатимуть як від рівня пошкоджуючої накопиченої дози, так і від температури опромінення, і можуть бути описані наступним законом [4]:

$$J_c(D, T, T_{irr}) = 2,5 \cdot 10^{-4} \sigma_y(D, T, T_{irr}) \times \left[ 1 - A_{J(e)} \sqrt{1 - \exp(-0,2D)} \right], \quad (4)$$

де  $\sigma_y$  – межа плинності матеріалу, МПа;  $D$  – накопичена пошкоджуюча доза, зна;  $A_{J(e)} = 0,93$ .

Для визначення критичних значень КІН за допомогою значень J-інтеграла використовувалася формула переходу [1]:

$$J = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (5)$$

Розрахунок значень КІН для постульованих тріщин проводився за трьома різними методиками – згідно з ПНАЕ [8], VERLIFE [6] та РД ЕО [9].

**Метод згідно з ПНАЕ.** Відповідно до вимог ПНАЕ [8] КІН для циліндричних елементів, що навантажуються внутрішнім тиском та температурним впливом, допускається визначати за формулою:

$$K_I = \eta (\sigma_p M_p + \sigma_4 M_4) \sqrt{\left( \pi \frac{a}{10^3} \right)} / Q \quad (6)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації напружень;  $\sigma_p$  – складова напружень розтягування, МПа;  $\sigma_4$  – складова згинальних напружень, МПа;  $M_p = 1 + 0,12(1 - a/c)$ ,  $M_q = 1 - 0,64a/h$ ;  $a$  – глибина тріщини, мм;  $c$  – напівдовжина тріщини, мм;  $h$  – довжина зони, у межах якої складова згинальних напружень зберігає позитивне значення, мм;

$$Q = \left[ 1 + 4,6(a/2c)^{1,65} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Складову розтягувальних напружень (кільцевих або осьових) визначають за формулою:

$$\sigma_{jp} = \frac{1}{s} \int_s \sigma_j dx, \quad (8)$$

де  $j$  – координата  $\theta$  або  $Z$ ;  $\sigma_j$  – функція зміни напружень по товщині стінки;  $s$  – товщина стінки в розрахунковому перерізі.

Значення складової згинальних напружень визначають за формулою:

$$\sigma_{jq} = \sigma_{jn} - \sigma_{jp}, \quad (9)$$

де  $\sigma_{jn}$  – значення функції зміни напружень за товщиною стінки в точці  $n$ .

Варто зазначити, що у документі ПНАЕ [8] не зазначено, для якого типу тріщиноподібних дефектів (підповерхневих, еліптичних або поверхневих напівеліптичних) використовується методика визначення КІН.

**Метод згідно з VERLIFE.** Відповідно до рекомендацій VERLIFE [6] коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$  визначається із співвідношення:

$$K_I = \sigma_K Y \sqrt{a}, \quad (10)$$

де  $\sigma_K$  – напруження, приведені до рівномірного, МПа;  $Y$  – коефіцієнт форми тріщини;  $a$  – мала піввісь тріщини.

Коефіцієнт форми тріщини  $Y$  визначається залежно від типу тріщини та розташування точки на її контурі. Для підповерхневої еліптичної тріщини характерні такі вирази:

$$Y_A = \frac{1,79 - 0,66 \cdot a/c}{[1 - \beta^{1,8}(1 - 0,4(a/c) - \gamma^2)]^{0,54}}$$

$$Y_C = \frac{1,79 - 0,66 \cdot a/c}{[1 - \beta^{1,8}(1 - 0,4(a/c) - 0,8\gamma^{0,4})]^{0,54}} \quad (11)$$

де  $\beta = \frac{a}{b+a}$ ;  $\gamma = 0,5 - \frac{b+a}{s}$ ;  $s$  – товщина основного металу, мм.

Для поверхневої напівеліптичної тріщини коефіцієнти форми визначаються відповідно до наступних виразів:

$$Y_A = \frac{2 - 0,82 \cdot a/c}{\left\{ 1 - \left[ 0,89 - 0,57(a/c)^{1/2} \right]^3 (a/s)^{1,5} \right\}^{3,25}}$$

$$Y_B = \left[ 1,1 + 0,35 (a/s)^2 \right] (a/c)^{1/2} \cdot Y_A \quad (12)$$

Для підповерхневої еліптичної тріщини напруження, наведені до рівномірного, визначалися з наступних співвідношень, які описують їх розподіл за параболічним законом:

$$\sigma_{KB} = \frac{\sigma_B + \sigma_C}{2} + \frac{a}{c} \cdot \frac{4\sigma_B - 3\sigma_C - \sigma_A}{30}$$

$$\sigma_{KB} = \frac{\sigma_B + \sigma_C}{2} + \frac{a}{c} \cdot \frac{4\sigma_B - 3\sigma_C - \sigma_A}{30} \quad (13)$$

При постулюванні поверхневої напівеліптичної тріщини в перерізі 4 напруження по товщині стінки розподіляються за лінійною залежністю:

$$\sigma_{KB} = 0,18 \sigma_A + 0,82 \sigma_B \quad (14)$$

Варто зазначити, що в методиці VERLIFE визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для підповерхневої еліптичної тріщини відсутні методи завдання складного закону розподілу напружень, а в результаті опису довільного розподілу напружень за параболічним законом значення  $K_I$  можуть бути отримані з істотними похибками.

**Метод згідно з РД ЕО.** Метод визначення КІН згідно з РД ЕО 1.1.2.05.0330-2012 [9], схожий на методику VERLIFE [6], однак пропонує вирази для розрахунку КІН при більш складному законі розподілу напружень. Так, коефіцієнти форми тріщини визначаються за наступними залежностями:

$$Y = \left[ 1 - \left( \frac{a}{h+a} \right)^{1,8} \left( 1 - 0,4 \frac{a}{c} - \gamma \right) \right]^{-0,54} \times$$

$$\times \left[ \frac{\pi}{1 + 1,464(a/c)^{1,65}} \right]^{0,5}, \quad (15)$$

при  $a \leq c; a \leq 9h; h+a \leq s/2$ ;

$$\gamma_A = \left( 0,5 - \frac{h+a}{s} \right)^2, \quad \gamma_C = 0,8 \left( 0,5 - \frac{h+a}{s} \right)^{0,4}. \quad (16)$$

Для розподілу напружень, заданих у довільній формі (у вигляді апроксимуючої функції), обчислюється координата  $x_j = h + a_j/10$ , де  $j = 0, 1, 2, \dots, 20$ . У кожній точці  $x_j$  визначаються напруження  $\sigma_j = \sigma_K(x_j)$ . Значення приведених до рівномірного напружень  $\sigma_K(A)$  та  $\sigma_K(C)$  обчислюються за формулами:

$$\sigma_K(A) = \sum_{j=0}^{20} \left( A_j + \frac{a}{c} B_j \right) \sigma_j, \quad (17)$$

$$\sigma_K(C) = \sum_{j=0}^{20} \left( A_{20-j} + \frac{a}{c} B_{20-j} \right) \sigma_j,$$

де  $A_j$  і  $B_j$  — табличні значення.

З трьох розглянутих вище методів визначення КІН точнішим є останній, описаний в РД ЕО 1.1.2.05.0330-2012 [9], так як враховує глибину залягання тріщини, а напруження можна описувати законом довільної форми (у вигляді апроксимуючої функції). Методику, описану у VERLIFE [6], доцільно використовувати для експрес-оцінок на опір крихкому руйнуванню, а також для тріщин, які постулюються в зонах з лінійним та параболічним розподілом напружень.

**Результати розрахункової оцінки ОКР.** Як зазначалося раніше, було розглянуто два варіанти рівня накопиченої пошкоджуючої дози. Отже, для кожного з варіантів механічні властивості матеріалу вигородки та відповідні критичні значення КІН будуть різні. На рис. 9 показано розподіли межі плинності матеріалу вигородки на 60-у році експлуатації, а також критичних значень КІН для різних вхідних даних.

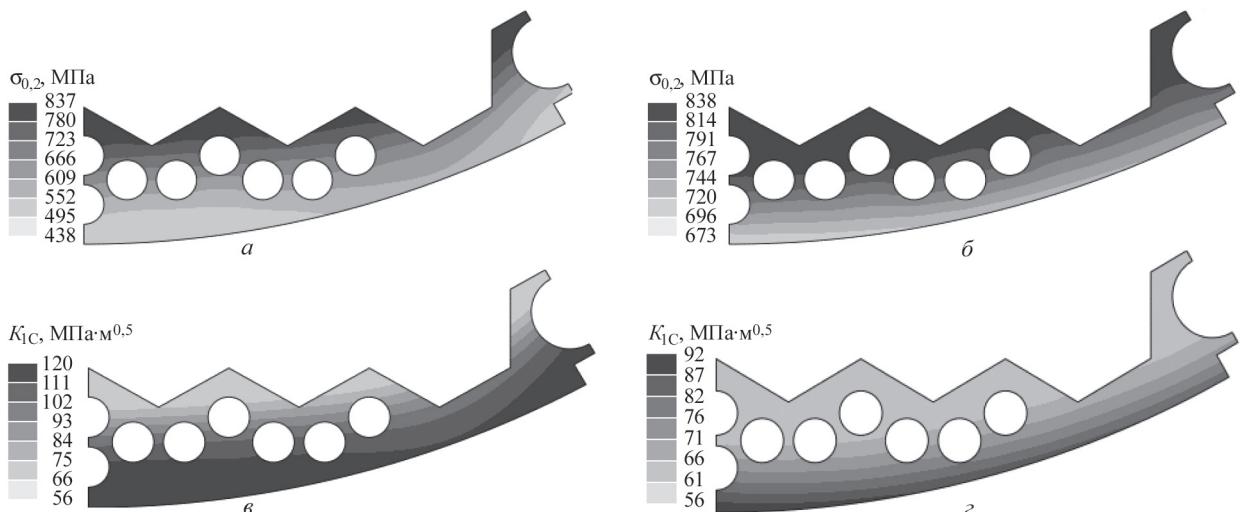


Рис. 9. Розподіли межі плинності  $\sigma_{0,2}$  матеріалу вигородки при накопиченій пошкоджуючій дозі 95 зна (а) і 118 зна (б) та критичного значення  $K_{1c}$  при 95 зна (в) і 118 зна (г)

Як видно з рис. 9, рівень межі плинності матеріалу залежно від накопиченої дози змінюється. Так, при максимальному значенні накопиченої пошкоджуючої дози 95 знає межа плинності знаходиться в діапазоні 438...837 МПа, а при 118 знає становить 673...838 МПа (рис. 9, а, б), що відповідно впливає і на критичне значення КІН (рис. 9, в, г).

У результаті математичного моделювання процесів зварювання, термообробки та подальшої експлуатації елементів ВКП протягом 60-и років було визначено, що максимальні напруження розтягу утворюються в осьовому напрямку. Таким чином, з точки зору консерватизму при визначенні КІН розглядалися підповерхневі еліптичні тріщини, які були розташовані в окружному напрямку. Схему розташування перерізів вигородки, в яких постулювалися дефекти, показано на рис. 5.

Для перерізу № 5 (рис. 5), який знаходиться в зоні найбільшого впливу ЗТН на НДС конструкції вигородки, результати порівняння значень КІН, отриманих згідно з трьома описаними вище методиками [8, 9] після 30-и і 60-и років експлуатації для двох варіантів рівня накопиченої пошкоджуючої дози і тріщин з різним  $a/c$ , представлено в табл. 1 без урахування ЗТН та в табл. 2 з урахуванням ЗТН.

Найбільш консервативними є значення КІН, отримані за допомогою методики РД ЕО [9], яку доцільно використовувати для аналізу ОКР із довільним розподілом напружень в зоні розташування тріщин. Методи, що описані в ПНАЕ [8] та VERLIFE [6], варто використовувати для оцінок КІН у найменш наван-

тажених ділянках з лінійним або параболічним законом розподілу напружень. Максимальні значення КІН у більшості випадків знаходяться в точці А контуру тріщин (рис. 8), що постулюються, а їх значення корелюють з результатами кожної методики.

Згідно з результатами визначення КІН у перерізі № 5 урахування ЗТН в одному перерізі може чинити як позитивний, так і негативний вплив. Наприклад, урахування ЗТН підвищує консервативність розрахунку КІН на 30-у році експлуатації в 2,2 рази (з 20,6 до 44,7 МПа·м<sup>0.5</sup>).

Також було розглянуто перерізи №№ 1–4 вигородки (рис. 5). Розрахунок КІН виконувався згідно з РД ЕО [9]. Порівняльний аналіз у перерізах проводився для постульованих дефектів у вигляді підповерхневих еліптичних тріщин у залежності від терміну експлуатації, накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН. Геометричні розміри тріщин (полуосі  $a$  і  $c$ ) вибиралися в залежності від розмірів зон розтягуючих напружень і могли змінюватися для одного і того ж перерізу в залежності від рівня пошкоджуючої накопиченої дози і врахування ЗТН. Глибина розташування дефектів  $h$  визначалася в залежності від її допустимих меж.

У перерізі № 1 отримано нижчі значення КІН при врахуванні ЗТН, ніж у моделі без урахування ЗТН. Для порівняння розглянуто розрахунковий випадок на 30-му році експлуатації для варіанту більш високого рівня накопиченої пошкоджуючої дози, де співвідношення між малою і великою півосьями постульованої тріщини при-

**Таблиця 1. КІН для тріщин з різним  $a/c$  в перерізі №5 без урахування ЗТН**

a/c	Макс. накопич. доза, зна	$K_A$ , МПа·м <sup>0.5</sup>		$K_C$ , МПа·м <sup>0.5</sup>		$K_D$ , МПа·м <sup>0.5</sup>		K, МПа·м <sup>0.5</sup>
		РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	
30 років експлуатації								
1/3	47,5	25	24,7	6,5	7,7	16,5	16,2	25,7
	59	15,3	15,1	4,4	5,5	10,5	10,3	14,9
2/3	47,5	20,6	20,8	4,6	5,9	14,9	13,3	21,7
	59	19,8	19,6	4,6	6,1	15,4	12,9	16,0
60 років експлуатації								
1/3	95	24,1	23,8	6,6	8,0	16,1	15,5	24,5
	118	15,5	15,3	5,6	7,4	11,3	11,4	13,8
2/3	95	19,8	20,0	4,7	6,1	14,5	12,4	20,7
	118	19,9	19,7	5,9	8,5	16,5	14,1	14,7

**Таблиця 2. КІН для тріщин з різним  $a/c$  в перерізі №5 з урахуванням ЗТН**

a/c	Макс. накопич. доза, зна	$K_A$ , МПа·м <sup>0.5</sup>		$K_C$ , МПа·м <sup>0.5</sup>		$K_D$ , МПа·м <sup>0.5</sup>		K, МПа·м <sup>0.5</sup>
		РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	
30 років експлуатації								
1/3	47,5	39,5	38,8	25,1	34,7	30,9	36,7	37,2
	59	19,8	19,3	10,2	15,8	14,2	17,6	16,0
2/3	47,5	44,7	44,0	22,0	28,7	39,3	36,3	40,7
	59	16,7	16,4	7,8	13,2	13,7	14,8	11,7
60 років експлуатації								
1/3	95	34,6	33,9	21,3	29,7	26,7	31,6	32,4
	118	11,5	11,1	5,0	8,2	7,9	9,6	11,0
2/3	95	39,3	31,5	17,6	25,6	33,4	29,1	35,4
	118	14,7	14,1	5,5	9,8	11,7	11,9	11,7

ймається рівним  $a/c = 1/3$ , а їх розміри за рахунок великої зони напружень розтягу відповідають максимально допустимим згідно з ПНАЕ [8] значенням  $a = 9$  мм;  $c = 27$  мм при товщині основного металу  $S = 36$  мм, глибині залягання тріщини  $h = 3$  мм. На підставі всіх вищевказаних вхідних параметрів визначено, що без урахування ЗТН отримано максимальне значення  $K_I = 17,2$  МПа·м<sup>0,5</sup>, а з урахуванням ЗТН  $K_I = 12,6$  МПа·м<sup>0,5</sup>, тобто врахування ЗТН у даному випадку дозволяє знизити консервативність оцінки ОКР на 27 %. Однак найбільше зниження КІН (на 58 %) при врахуванні ЗТН було визначено в перерізі №4 з  $K_I = 41,4$  МПа·м<sup>0,5</sup> до  $17,5$  МПа·м<sup>0,5</sup>.

За результатами розрахунку також спостерігається зростання КІН зі збільшенням розміру постульованого дефекту. Для порівняння розглянуто розрахунковий випадок перерізу № 2 на 60-му році експлуатації з максимальною накопиченою дозою 118 зна та врахуванням ЗТН з різними співвідношеннями  $a/c = 1/3$  [4] та  $a/c = 2/3$  [8]. Їх розміри за рахунок великої зони розтягувальних напружень відповідають максимально допустимим, згідно з ПНАЕ [8], значенням  $a = 19,5$  мм;  $c = 58,5$  мм (при  $a/c = 1/3$ ) та  $c = 29,25$  мм (при  $a/c = 2/3$ ) при товщині основного металу в перерізі  $S = 78$  мм, глибині залягання тріщини  $h = 2$  мм. На підставі всіх вхідних параметрів визначено, що у розрахунковому випадку, де  $a/c = 1/3$   $K_I = 21,4$  МПа·м<sup>0,5</sup>, а при  $a/c = 2/3$   $K_I = 17,5$  МПа·м<sup>0,5</sup>, тобто врахування існуючих вимог [4] у даному випадку дозволяє підвищувати консервативність оцінки КІН у перерізі № 2 на 18 % порівняно з вимогами ПНАЕ [8]. Однак у разі, коли геометрія перерізу вигородки обмежується розміром великої півосі, збільшення площі постульованого дефекту проводиться за рахунок збільшення малої півосі  $a$ . На прикладі перерізу № 5 було визначено, що найбільш консервативна оцінка КІН виконується за вимогами співвідношення півосей  $a/c = 2/3$  згідно з ПНАЕ [8].

Результати розрахунку показали, що на рівень значення КІН впливає розмір постульованої тріщини, вибір якого визначається розмірами зони напружень розтягу, які в свою чергу можуть залежати від урахування ЗТН. Також вищий рівень опромінення (накопиченої дози) матеріалу вигородки знижує вплив ЗТН на напружений стан і, відповідно, на оцінку ОКР конструкції.

Крім підповерхневої еліптичної тріщини також було розглянуто поверхневу напівеліптичну тріщину. Так як при врахуванні ЗТН максимальний рівень напружень спостерігається не на поверхні вигородки, як у випадку без урахування ЗТН, а в її об'ємі, то і значення КІН для поверхневого дефекту будуть нижчими. Тому була розглянута тріщина тільки в одному перерізі з найбільшим значенням осьових напружень у зазначеній області. Згідно з даними на рис. 3 найвищі напруження в осьово-

му напрямку без урахування ЗТН знаходяться в зоні перерізу № 4 (рис. 5), а відповідно до отриманих даних найвищі значення КІН визначаються на 30-у році експлуатації для варіанту більш низького рівня накопиченої пошкоджуючої дози. За методикою згідно з документом VERLIFE [6] були визначені максимальні КІН для випадку без урахування ЗТН ( $K_I = 26,6$  МПа·м<sup>0,5</sup>), а з урахуванням ЗТН значення зменшується ( $K_I = 7,1$  МПа·м<sup>0,5</sup>). Таким чином, урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при визначенні КІН для дефекту на зовнішній поверхні вигородки.

До НУЕ крім стаціонарного режиму роботи також відносяться режими розігріву і охолодження під час виходу на робочий режим і останови реактора, а також режим гідровипробувань. Враховуючи низьку швидкість нагріву і охолодження при НУЕ негативного впливу цих процесів на ОКР вигородки не визначено. У холодному стані за рахунок відсутності температурного градієнту рівень напружень у вигородці суттєво знижується відносно розігрітого стану в робочому режимі. Підвищення тиску теплоносія на всі поверхні вигородки під час гідровипробувань викликає додаткове рівномірне стискання (на  $-8$  МПа) і, відповідно, зниження напружень розтягу в об'ємі вигородки у порівнянні з умовами навантаження в робочому режимі, що також сприяє виконанню умови забезпеченню ОКР.

Таким чином, за результатами розрахунків був визначений істотний вплив ЗТН на оцінку ОКР вигородки ВКП реактора ВВЕР-1000 за НУЕ. В умовах аварійної ситуації рівень  $J$ -інтеграла для поверхневих напівеліптичних тріщин може досягати близьких до критичних значень [1]. Однак у роботі не враховували ЗТН, що могло суттєво вплинути на результати оцінки ОКР. Тому наступною актуальною задачею є розрахункова оцінка ОКР вигородки реактора ВВЕР-1000 в умовах аварійної ситуації з урахуванням визначених ЗТН [1].

## Висновки

1. Урахування ЗТН істотно впливає на розподіл напружень у вигородці реактора ВВЕР-1000 в робочому режимі за НУЕ, а саме, утворюються зони високих осьових напружень розтягу (до 180 МПа). При цьому осьові напруження є істотно вищими у внутрішньому об'ємі вигородки, тоді як на внутрішній та зовнішніх поверхнях стають нижчими порівняно з розрахунковим випадком, де ЗТН не враховувалися. Окружні напруження відносно низькі (до 50 МПа) і урахування ЗТН не викликає суттєвого впливу на їх розподіл.

2. При проведенні розрахункової оцінки ОКР вигородки за НУЕ в якості постульованого дефекту з точки зору максимального консерватизму розглядалися підповерхневі еліптичні тріщини, розташовані в окружному напрямку, під дією високих розтягуючих осьових напружень. Результати розрахунків



у різних перерізах вигородки показали, що з урахуванням ЗТН консервативність оцінки ОКР може підвищуватись, але значення КІН  $K_{Ic}$  для постульованих тріщин не перевищують критичного значення  $K_{Ic}$  з урахуванням коефіцієнта безпеки  $n_k = 2$ , тобто умова забезпечення ОКР виконується, а протягом довгострокової експлуатації значення коефіцієнту запасу ОКР  $\eta = K_1/[K_1]_1$  збільшується за рахунок релаксації напружень у процесі радіаційної повзучості.

3. Найнебезпечнішим з точки зору ОКР за НУЕ є переріз №5 вигородки (в зоні великого охолоджуючого каналу), де максимальні значення КІН для окружної підповерхневої еліптичної тріщини досягають на 30-му році експлуатації  $K_{Ic} = 45 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ , а на 60-му році –  $K_{Ic} = 39 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$  при допустимих значеннях КІН  $[K_1]_1 = 58 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$  і  $[K_1]_1 = 53 \text{ МПа}$  відповідно, тобто протягом експлуатації мінімальне значення коефіцієнту запасу ОКР збільшується до  $\eta = 1,36$ .

4. Вищий рівень накопиченої пошкоджуючої дози матеріалу вигородки в процесі експлуатації сприяє зниженню рівня максимальних напружень у вигородці за рахунок впливу радіаційної повзучості. Відповідно зменшується вплив ЗТН на напружений стан і оцінка ОКР конструкції стає менш консервативною.

5. Урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при оцінці ОКР вигородки за НУЕ для поверхневих напівеліптичних тріщин, розташованих на зовнішній поверхні вигородки, де в процесі виготовлення утворюються залишкові напруження стискання.

### Список літератури/ References

1. Pištora, V., Švrček, M., Ferko, P., Mirzov, I. (2018). Fracture Mechanical Assessment of VVER Reactor Internals. *Proceedings of the ASME*. 2018 10.1115/PVP2018-84589
2. Ориняк А.І. (2021) *Методи розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень з врахуванням геометричної*

*нелінійності та довільної форми тріщини*: дис. канд. техн. наук: 05.02.09, Київ.

3. Orianiak, A.I. (2021) *Methods of calculation of stress intensity coefficient taking into account geometrical nonlinearity and arbitrary shape of crack*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree, 05.02.09, Kyiv [in Ukrainian].
3. Makhnenko, O., Kandala, S., Basistyuk, N. (2021) Influence of the heat transfer coefficient on the level of residual stress after heat treatment of the VVER-1000 reactor baffle. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(2), 254–259. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>
4. ПМ-Т.0.03.333-15. *Типовая программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутренних корпусных устройств ВВЭР-1000*. ПМ-Т.0.03.333-15. *Standard program for assessing of technical condition and extension of service life of WWER-1000 internals*.
5. Махненко О.В., Кандаля С.М., Савицька О.М. (2021) Порівняльний аналіз моделей радіаційного розпухання для розрахункового визначення НДС вигородки ВВЕР-1000. *Проблеми міцності*, 5, 13–22.
5. Makhnenko, O.V., Kandala, S.M., Savytska, O.M. (2021) Comparative analysis of models of irradiation-induced swelling for calculated determination of SSS of WWER-1000 baffle. *Problemy Mitsnosti*, 5, 13–22 [in Ukrainian].
6. (2013) *Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER Nuclear Power Plants (VERLIFE)*. Vienna: Int. At. Energy Agency.
7. Chirkov, A.Yu., Kharchenko, V.V. (2020) Special features of computational assessment of the change in shape of WWER-1000 reactor core baffle in view of irradiation-induced swelling. *Strength Mater.*, 52, 339–352.
8. ПНАЭ Г-7-002-86 (1989) *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат.
8. ПНАЭ Г-7-002-86 (1989): *Norms for strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
9. (2012) *Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭПП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы*. РД ЕО 1.1.2.05.0330-2012. RD EO 1.1.2.05.0330-2012: *Guidelines for strength calculation of equipment and pipelines of RBMK, WWER and EPG reactor plants at the stage of service beyond the design life*.

## EVALUATION OF BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF WWER-1000 REACTOR ENCLOSURE DURING LONG-TERM SERVICE, TAKING INTO ACCOUNT THE RESIDUAL TECHNOLOGICAL STRESSES

O.V. Makhnenko, S.M. Kandala

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua, st\_kan@ukr.net

The need to take into account the residual technological stresses (RTS) in the material of the enclosure of reactor internals (RI) of NPP power units of WWER-1000 type, resulting from technological processes of welding and postweld heat treatment at extension of safe service period beyond the design life is substantiated. The influence of RTS on the stress-strain state of the enclosure, as well as brittle fracture resistance (BFR) of the material in service was determined. It is shown that an essential redistribution of axial and hoop stresses in the enclosure is observed due to allowing for RTS, namely of the zone of high tensile stresses, which under normal operation conditions (NOC) move into the internal volume of the enclosure from its outer surface, while the area of these zone becomes larger. Such a redistribution of stresses has an essential influence on the level of stress intensity coefficient on the contour of the cracklike defects. The most critical areas, in terms of brittle strength, form in the inner volume of the enclosure, whereas the dimensions of subsurface elliptical crack, which is postulated, can be increased due to widening of the tensile stress zone, thus promoting greater conservatism of BFR assessment. Moreover, taking RTS into account allows a significant lowering of conservatism at assessment of enclosure BFR under NOC for surface semielliptical cracks, located on the enclosure outer surface, where residual compressive stresses arise during manufacture. Obtained results allow more precise determination of enclosure zones, prone to brittle fracture of the material under NOC that is important for improvement of the approaches to determination of RI of WWER-1000 type reactor. Ref. 9, Tabl. 2, Fig. 9.

*Keywords: WWER-1000, reactor internals, enclosure, residual technological stresses, brittle fracture resistance, postulated cracks, stress intensity coefficient, normal operating conditions*

Надійшла до редакції 30.05.2022