

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ ВВЕР-1000 ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

О.В. Махненко<sup>1</sup>, С.М. Кандала<sup>1</sup>, Н.Р. Басистюк<sup>1</sup>, М.В. Черкашин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>ТОВ «УКРЦНІПМАШ», 03124, м. Київ, вул. Василенка, 7-А. E-mail: [ukrcniitmash@ukr.net](mailto:ukrcniitmash@ukr.net)

Визначення залишкового ресурсу та продовження терміну безпечної експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв енергоблоків ВВЕР-1000 на понадпроектний період до 60 років є важливою науково-технічною задачею атомної енергетики України. У процесі тривалої експлуатації елементи внутрішньокорпусних пристроїв – вигородка та шахта внутрішньокорпусна – піддаються інтенсивному впливу ушкоджуючої радіаційної дози, що викликає процеси радіаційного окрихнення, розпухання і повзучості в матеріалі (аустенітна сталь 08X18H10T). Врахування технологічних залишкових напружень після зварювання і наступної термообробки необхідно при розрахунковому обґрунтуванні ресурсу безпечної експлуатації елементів внутрішньокорпусних пристроїв. В роботі за допомогою математичного моделювання отримані розподіли залишкових напружень в об'ємі вигородки і шахти внутрішньокорпусної після електрошлакового зварювання й поля їх перерозподілу після технологічного процесу післязварювальної термообробки по режиму аустенізації. Визначено, що залишкові зварювальні напруження в процесі аустенізації в значній мірі релаксують, однак, у вигородці, яка має складну геометрію зі змінною товщиною стінки і охолоджуючими каналами, за рахунок виникнення в процесі аустенізації при охолодженні істотного градієнта температур утворюються високі залишкові напруження, які необхідно враховувати при визначенні ресурсу внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000. Бібліогр. 8, рис. 8

*Ключові слова:* ВВЕР-1000, внутрішньокорпусні пристрої, вигородка, шахта внутрішньокорпусна, електрошлакове зварювання, термообробка, аустенізація, залишкові напруження

Згідно проектно-конструкторської документації елементи внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) енергоблоку ВВЕР-1000 – вигородка та шахта внутрішньокорпусна (ШВК) – є зварними конструкціями з аустенітної сталі 08X18H10T. Відомо, що ці конструкційні елементи найбільш схильні до нейтронного опромінення в процесі тривалої експлуатації енергоблоку. Всі поздовжні зварні з'єднання зазначених елементів ВКП виконані за технологією електрошлакового зварювання (ЕШЗ), а кільцеві зварні з'єднання ШВК – автоматичного дугового зварювання під флюсом.

Згідно з вимогами нормативної документації [1] при виготовленні всі виконані ЕШЗ з'єднання деталей із сталей аустенітного класу після зварювання слід піддавати термічній обробці за режимом аустенізації, встановленим для основного металу. При загальній термічній обробці зварні вироби поміщають в піч повністю. Згідно з [2] процес аустенізації – це термообробка сталі (процес, аналогічний загартовуванню вуглецевих сталей), що складається з нагріву її до температури 1050...1100 °С, короткочасного витримування при цій температурі і подальшого швидкого охолодження. В процесі нагрівання карбідів хрому і вуглецю повністю розчиняються в аустеніті, а швидке охолодження перешкоджає повторному виділенню карбідів, однак в конструкціях зі складною геометрією, таких як вигородка (змін-

на товщина, охолоджуючі канали і т. д.), може призводити до виникнення в перетині досить високого градієнта температур за рахунок нерівномірного охолодження і відповідно до утворення високих залишкових напружень.

При розрахунковому обґрунтуванні продовження ресурсу ВКП ВВЕР-1000 на понадпроектний період (до 60 років експлуатації і більше) необхідно враховувати технологічні залишкові напруження при виготовленні конструкцій. На теперішній час стосовно елементів ВКП питання технологічних залишкових напружень вивчені недостатньо [3].

За допомогою математичного моделювання теплових процесів і в'язкопружнопластичного деформування матеріалу проведено чисельне дослідження утворення, релаксації і перерозподілу залишкових напружень в процесі зварювання і подальшої термічної обробки (аустенізації) вигородки і ШВК енергоблоку ВВЕР-1000.

**Технологічні параметри ЕШЗ.** Схеми розташування поздовжніх зварних з'єднань вигородки і ШВК, виконаних за допомогою електрошлакової технології, представлені на рис. 1. Ширина зварних з'єднань становить приблизно 30 мм, технологічні параметри ЕШЗ, прийняті в розрахунок, представлені нижче [3]. Потужність, що витрачається при зварюванні, становить приблизно 9 кВт, а параметри режиму ЕШЗ забезпечують достатню

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

Черкашин М.В. <https://orcid.org/0000-0003-0672-5443>

© О.В. Махненко, С.М. Кандала, Н.Р. Басистюк, М.В. Черкашин, 2021

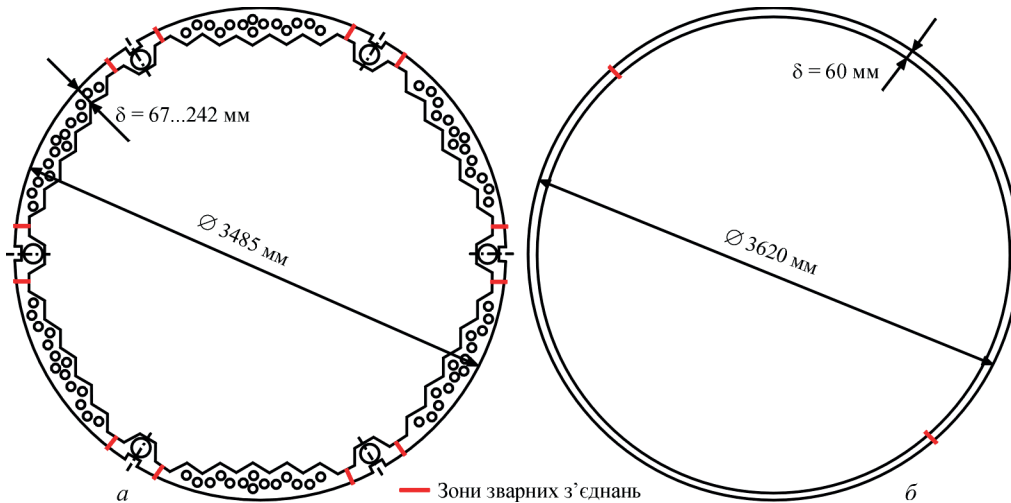


Рис. 1. Схеми розташування поздовжніх зварних з'єднань в перерізі вигородки (а) і ШВК (б)

потужність для нагрівання (~ 60 %) і розплавлення металу шва (~ 40 %).

**Технологічні параметри ЕШЗ**

Зварювальний струм, А.....	600
Напруга, В.....	46
Швидкість подачі електрода, м/год.....	230
Швидкість зварювання, мм/с.....	0,42
Глибина рідкометалевої ванни, мм.....	40
Температура рідкометалевої ванни, °С.....	2000
Товщина мундштука, мм.....	10
Діаметр проволочи, мм.....	3
Кількість робочих (що дублюються) електродних проволоков, шт. ....	2/2
Флюс.....	48-ОФ-6
Марка електродної проволочи.....	Св-04Х19НН11М3
Тепловий ККД процесу, %.....	85

**Опис математичної моделі визначення НДС при зварюванні.** Завдання визначення НДС елементів ВКП вирішувалося за допомогою скінченно-елементного моделювання. З огляду на великогабаритні розміри конструкційних елементів вигородки і ШВК, а також наявність циклічної симетрії в їх конструкціях, розроблені скінченно-

но-елементні моделі являють собою 30-градусні сектора, що складаються з плоских чотирикутних елементів з розміром граней, що не перевищує 5 мм (рис. 2).

При моделюванні температурних полів при ЕШЗ застосовувалося рівняння нестационарної теплопровідності, яке включає врахування об'ємного зварювального джерела нагріву  $W(x,y,z,t)$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(x,y,z,t) = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу;  $c$  – питома теплоємність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $T$  – температура матеріалу.

Температурна задача вирішувалася при допущенні швидко рухомого джерела нагріву, що дозволило використовувати двовірну скінченно-елементну модель в поперечному перерізі вигородки і шахти внутрішньокорпусної.

Граничні умови на поверхнях елементів ВКП з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавалися у вигляді:

$$q = -h(T_{out} - T), \quad (2)$$

де  $T_{out}$  – температура довколишнього середовища;  $q$  – тепловий потік;  $h$  – коефіцієнт теплопередачі з поверхні при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем.

Початкові умови при  $t = 0$ :

$$W(x,y,z,0) = 0, T = 20 \text{ }^\circ\text{C}, T_{out} = 20 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3)$$

З урахуванням гіпотези «плоскої деформації» рішення задачі по визначенню розподілів просторових компонент напружень і деформацій отримано за допомогою двовірних моделей поперечного перерізу вигородки і шахти внутрішньокорпусної в пружнопластичній постановці, тобто тензор деформацій може бути представлений у вигляді суми тензорів [4]:

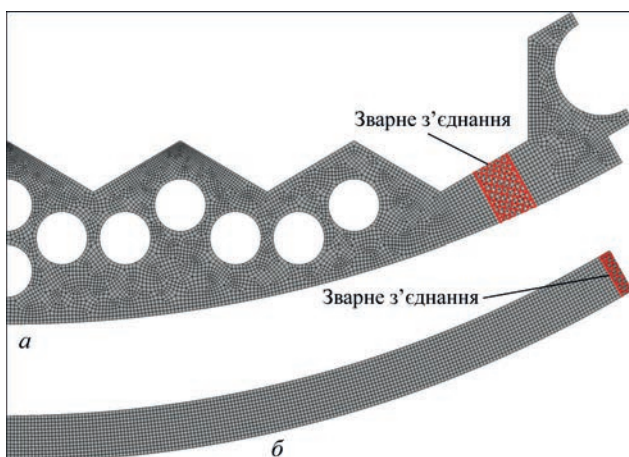


Рис. 2. Скінченно-елементні моделі вигородки (а) і шахти внутрішньокорпусної (б) в 2D постановці

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (i,j) = x,y,z, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_{ij}^e$  – тензор пружних деформацій;  $\varepsilon_{ij}^p$  – тензор пластичних деформацій.

Компоненти тензорів напружень  $\sigma_{ij}$  та пружних деформацій  $\varepsilon_{ij}^e$  пов’язані один з одним законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K\sigma + \varphi), \quad (5)$$

де  $\delta_{ij}$  – одиничний тензор ( $\delta_{ij} = 0$ , якщо  $i \neq j$ ,  $\delta_{ij} = 1$ , якщо  $i = j$ ),  $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ ,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  –

модуль зсуву;  $K = \frac{1-2\nu}{E}$  – модуль об’ємного стиснення;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\varphi$  – функція вільних відносних подовжень, викликаних зміною температури:

$$\varphi = \alpha(T - T_0), \quad (6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

Пластичні деформації пов’язані з напруженим станом рівняннями теорії пластичної неізотермічної течії, асоційованої з умовою текучості Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) \quad (i,j = x,y,z), \quad (7)$$

де  $d\varepsilon_{ij}^p$  – приріст тензора  $\varepsilon_{ij}^p$  в даний момент часу  $t$ , обумовлений історією деформування, напруженнями  $\sigma_{ij}$  та температурою  $T$ ;  $d\lambda$  – скалярна функція, яка визначається умовами течії в наступному вигляді:

$$d\lambda = 0, \text{ якщо } f = \sigma_i^2 - \sigma_T^2(T) < 0 \text{ або } f = 0, \text{ при } df < 0; \\ d\lambda > 0, \text{ якщо } f = 0 \text{ та } df > 0; \quad (8)$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2) \right]^{1/2},$$

$\sigma_T(T)$  – межа плинності матеріалу при температурі  $T$ .

Рівняння (7) показує, що для отримання результатів щодо компонент залишкових напружень  $\sigma_{ij}$  і деформацій  $\varepsilon_{ij}$  необхідно розглядати процес розвитку пружнопластичних деформацій за часом, починаючи з деякого початкового стану. Для цього традиційно використовують метод послідовного простежування, коли для моменту  $t$  рішення шукається, якщо відомо повне рішення для моменту  $(t - \Delta t)$ , де  $\Delta t$  – крок простеження розвитку пружнопластичних деформацій, в межах якого можна приблизно вважати, що розвиток відбувається за досить простою траєкторією навантаження. У цьому випадку зв’язок між кінцевими приростами тензора деформацій  $\Delta\varepsilon_{ij}$  і тензором

напружень  $\sigma_{ij}$  відповідно до [4] можна записати у вигляді:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \delta_{ij} (K\sigma) - b_{ij}, \quad (9)$$

де  $\psi$  – функція стану матеріалу в точці  $(x, y, z)$  в момент  $t$ .

$$\psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } f < 0, \\ \psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } f = 0, \quad (10)$$

стан  $f > 0$  є неприпустимим,

$b_{ij}$  – тензорна функція додаткових деформацій, яка визначається збільшенням  $\Delta\varphi$  і відомими результатами попереднього етапу простеження:

$$b_{ij} = \left[ \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K\sigma) \right]_{t-\Delta t} + \delta_{ij} \Delta\varphi \quad (i,j = x,y,z). \quad (11)$$

Умови течії у вигляді (7) включають значну фізичну нелінійність в функції стану матеріалу  $\psi$ . Для реалізації такого типу фізичної нелінійності зазвичай використовують ітераційні процеси. В результаті на кожній ітерації фізично нелінійна задача переходить в лінійну задачу типу задачі теорії пружності з перемінним модулем зсуву, який дорівнює  $\frac{1}{2\psi}$ , і додатковими деформаціями  $b_{ij}$ .

Для реалізації такої лінеаризованої задачі застосовують чисельні методи.

**Результати моделювання залишкових напружень при ЕШЗ.** На основі розроблених скінченно-елементних математичних моделей, з урахуванням наведених технологічних параметрів ЕШЗ і геометричних характеристик елементів ВКП були отримані розрахункові розподіли температур і напружень в різні моменти часу від початку зварювання і до залишкового стану. На рис. 3 показані розподіли максимальних температур в процесі виконання поздовжніх зварних з’єднань вигородки і ШВК в процесі

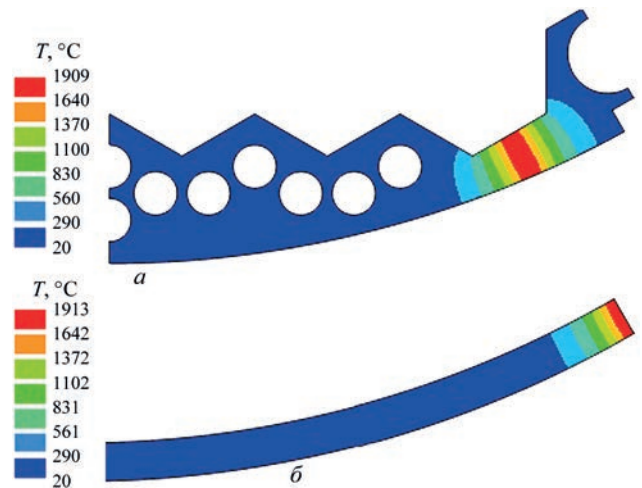


Рис. 3. Розрахункові розподіли максимальних температур в процесі виконання поздовжніх зварних з’єднань вигородки (а) і ШВК (б)



зварювання. Навіть з урахуванням особливостей, характерних для ЕШЗ елементів великої товщини за один прохід, нагрів носить локальний характер з високим градієнтом температури в оточуючому напрямку.

Отримані результати математичного моделювання напруженого стану показали, що локальний високотемпературний нагрів при ЕШЗ і подальше охолодження призводить до утворення в розглянутих елементах ВКП високих залишкових напружень до 230 МПа в осьовому напрямку в зоні зварного шва (рис. 4, *д, е*), тобто до межі плинності матеріалу, а в радіальному (рис. 4, *а, б*) і оточуючому (рис. 4, *в, з*) напрямках внаслідок рівномірності зварювального нагріву по товщині при ЕШЗ до більш низького рівня залишкових напружень до 50 МПа. З огляду на досить велику зону високих розтягуючих залишкових напружень після зварювання як в вигорідці, так і в ШВК, доцільним є проведення післязварювальної термообробки за режимом аустенізації з метою зниження рівня залишкових зварювальних напружень і розчинення карбідів хрому і вуглецю, які утворюються в зоні термічного впливу при зварюванні.

**Моделювання термообробки.** Зварні з'єднання відповідальних конструкцій піддаються післязварювальній термообробці. Згідно з вимогами нормативної документації [1] зварні з'єднання конструкційних елементів обладнання АЕС з ау-

стенітної сталі після ЕШЗ піддаються термообробці по режиму аустенізації (гартуванню).

Згідно з [5] аустенізацію (загартування) виробів необхідно проводити по режиму: нагрів до 1050...1100 °С, деталі з товщиною матеріалу до 10 мм охолоджувати на повітрі, понад 10 мм – у воді. Зварні вироби складної конфігурації, щоб уникнути деформацій слід охолоджувати на повітрі. Час витримування при нагріванні при загартуванні для виробів з товщиною стінки до 10 мм – 30 хв, понад 10 мм – 20 хв + 1 хв на 1 мм максимальної товщини. Товщина вигорідки і ШВК в зоні зварного з'єднання становить 67 та 60 мм відповідно. Таким чином, охолодження елементів ВКП в процесі аустенізації мало відбуватися на повітрі, а час витримки – складати приблизно 87 хв для вигорідки і 80 хв для ШВК.

При проведенні математичного моделювання процесу післязварювальної термообробки елементів ВКП особливістю розробленої моделі визначення нестационарного температурного поля був конвекційний теплообмін на поверхнях за рахунок поступового нагрівання навколишнього середовища (повітря) в печі, і подальшого досить швидкого охолодження на повітрі. Нестационарні граничні умови відповідали рівномірному підвищенню температури навколишнього середовища в процесі нагрівання і швидкого зниження температури до 20 °С при охолодженні.

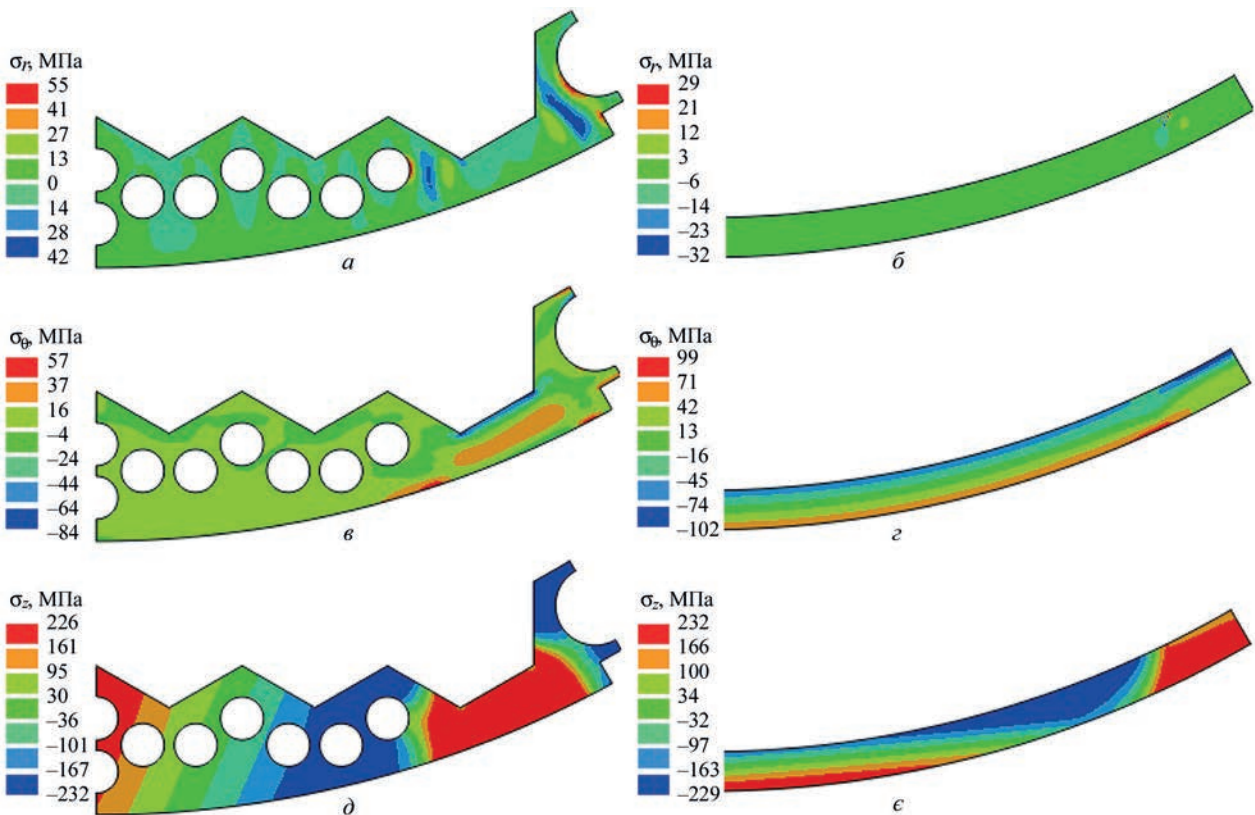


Рис. 4. Залишкові напруження після зварювання кілець вигорідки і ШВК в радіальному (*а, б*), оточуючому (*в, з*) і осьовому (*д, е*) напрямках

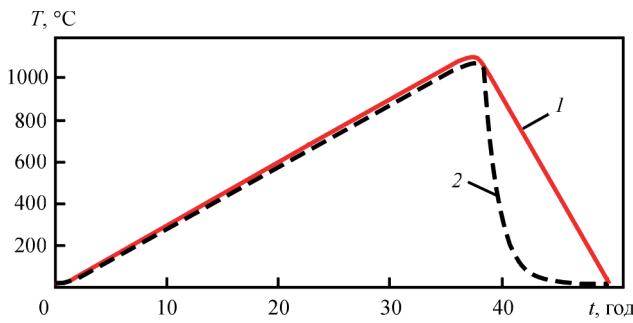


Рис. 5. Графік зміни температури матеріалу елементів ВКП в процесі термообробки по режиму аустенізації: 1 – режим аустенізації; 2 – розрахункова температура

Графік режиму термообробки, а саме, зміни температури навколишнього середовища в процесі аустенізації елементів ВКП в печі при нагріванні зі швидкістю 30 °С/год, витримці протягом 87 хв і охолодженні з підвищеною швидкістю на повітрі представлений на рис. 5.

Початкові і граничні умови крайової задачі визначення температурних розподілів в вигородці і ШВК при термообробці:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0 \quad T_{\text{out}}(0) = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T(0) = 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ q = -h(T_{\text{out}}(t) - T), \quad T_{\text{out}}(t) = 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год} \\ T_{\text{out}}^{\text{max}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь елементів ВКП при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем в печі і на повітрі приймався рівним значенню  $h = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$  в умовах природної конвекції і постійним у всьому діапазоні температури нагріву і охолодження. Променистий теплообмін в розробленій моделі окремо не моделювався, його вклад враховувався в деякому підвищенні значення коефіцієнту тепловіддачі.

Тривалий процес нагріву зварних конструкційних елементів до температури аустенізації викликає процеси високотемпературної повзучості в матеріалі, що призводить до релаксації залишкових напружень в зоні зварних з'єднань.

У розробленій моделі задача визначення НДС при термообробці вирішувалася у в'язкопружно-пластичній постановці [4]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{cr} \quad (i, j = x, y, z),$$

де швидкість деформацій повзучості визначалася за допомогою закону Бейлі-Нортон [6]

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = A \cdot \sigma_{eq}^n \quad (12)$$

Для аустенітної сталі 08X18H10T при температурі 700 °С (973K) при визначенні швидкості деформацій температурної повзучості можуть бути прийняті наступні коефіцієнти:  $A = 6,948 \cdot 10^{-14}$ ,  $n = 6,22$  [7]. Через відсутність даних по повзучості матеріалу елементів ВКП при більш високих температурах в розробленій моделі визначення їх НДС при термообробці були прийняті зазначені коефіцієнти для всього високотемпературного діапазону нагрівання понад температури 700 °С. Це підвищує консервативність результатів розрахунку, оскільки при більш високих температурах процеси повзучості протікають більш інтенсивно.

Треба відзначити, що поперечний переріз вигородки відрізняється від перетину шахти внутрішньокорпусної своєю неоднорідністю по товщині, тому що внутрішня поверхня вигородки повторює границю активної зони реактора, а наявність охолоджуючих каналів сприяє охолодженню матеріалу вигородки в процесі її експлуатації. Така геометрична неоднорідність впливає на нерівномірне

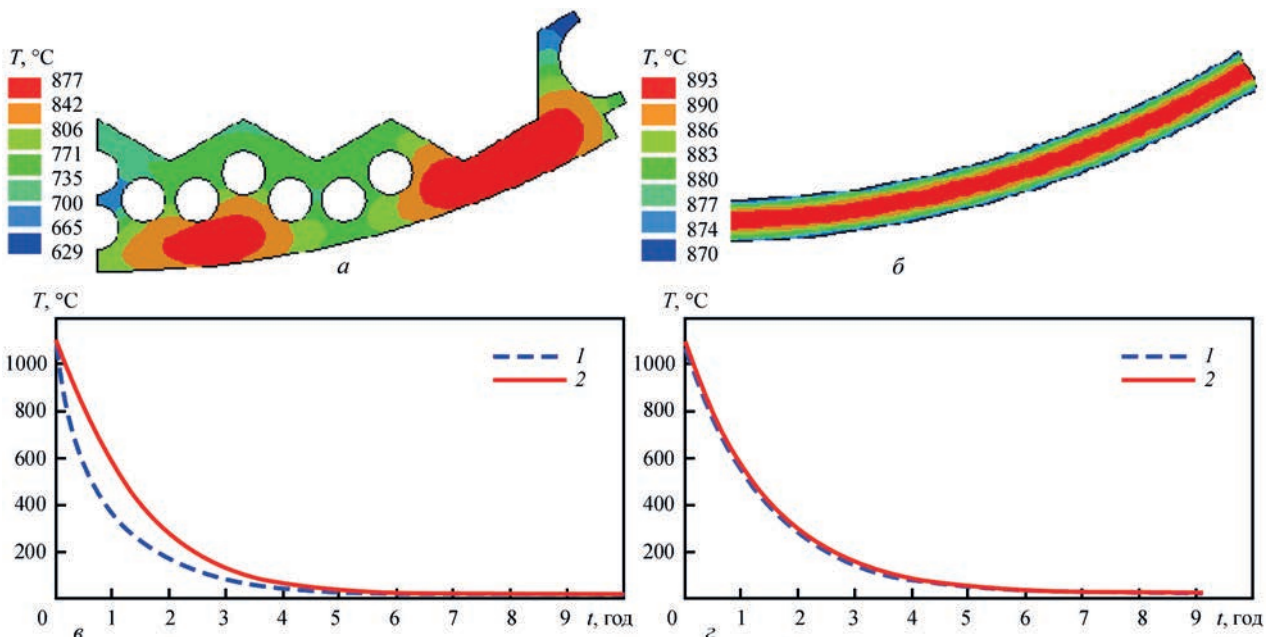


Рис. 6. Температурне поле в певний момент часу і зміна температури в процесі охолодження при аустенізації: а, в – вигородки; б, г – ШВК (1 – на поверхні; 2 – внутрішній об'єм)

оохолодження конструкції в результаті інтенсивного теплообміну з поверхонь в процесі охолодження на повітрі при термообробці, що призводить до утворення градієнта температур до 250 °С (рис. 6, а, в) на границях вигородки і в її внутрішньому об'ємі і, як наслідок, до утворення залишкових напружень після процесу аустенізації (рис. 7, а, в, д). Для шахти внутрішньокорпусної через постійну товщини стінки характерний постійний градієнт температури в радіальному напрямку і відсутність градієнта в окружному напрямку, різниця температур на поверхнях і внутрішньому об'ємі в процесі охолодження на повітрі при термообробці не перевищує 25 °С, що не призводить до утворення високих залишкових напружень (рис. 7, б, з, є).

У вигородці найбільш високі залишкові напруження, як стискаючі (до -230 МПа), так і розтягуючі (до 120 МПа) спостерігаються в осьовому напрямку (рис. 7, д), також в окружному напрямку розтягуючі залишкові напруження досягають 55 МПа. Такий високий рівень залишкових напружень слід обов'язково враховувати в процесі визначення ресурсу елементів ВКП при проведенні розрахункового обґрунтування продовження терміну експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000.

Що стосується ШВК, то в результаті після зварювальної термообробки по режиму аустенізації в процесі тривалого нагрівання до високих температур залишкові зварювальні напруження майже

повністю релаксують і на стадії швидкого охолодження з урахуванням низького градієнта температур по товщині (рис. 6, б, з) через рівномірну циліндричну форму з постійною товщиною стінки ШВК утворюються досить низькі залишкові напруження в межах (-17...5) МПа (рис. 7, б, з, є). При проведенні розрахункового визначення ресурсу елементів ВКП такий низький рівень залишкових напружень можна не враховувати.

Варто зазначити, що у літературі мало даних, що описують температурну залежність коефіцієнта тепловіддачі з поверхні деталей із нержавіючої сталі при нагріванні до високих температур. Згідно з [8] коефіцієнт тепловіддачі при охолодженні в спокійному повітрі для температури 1100 °С може досягати 150 Вт/м<sup>2</sup>·°С. В такому випадку під час охолодження елементів ВКП в процесі аустенізації можуть утворюватися високі залишкові пластичні деформації і напруження.

Проведена оцінка впливу значення середнього коефіцієнта тепловіддачі з поверхні, прийнятого в розрахунку, на рівень максимальних залишкових напружень після термообробки за режимом аустенізації вигородки і ШВК. Було проведено моделювання при значеннях середнього коефіцієнту тепловіддачі 10, 30 та 50 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). На рис. 8 представлена залежність рівня максимальних залишкових напружень в осьовому напрямку від коефіцієнта тепловіддачі, яка характеризується значним підвищенням при зростанні коефіцієнта

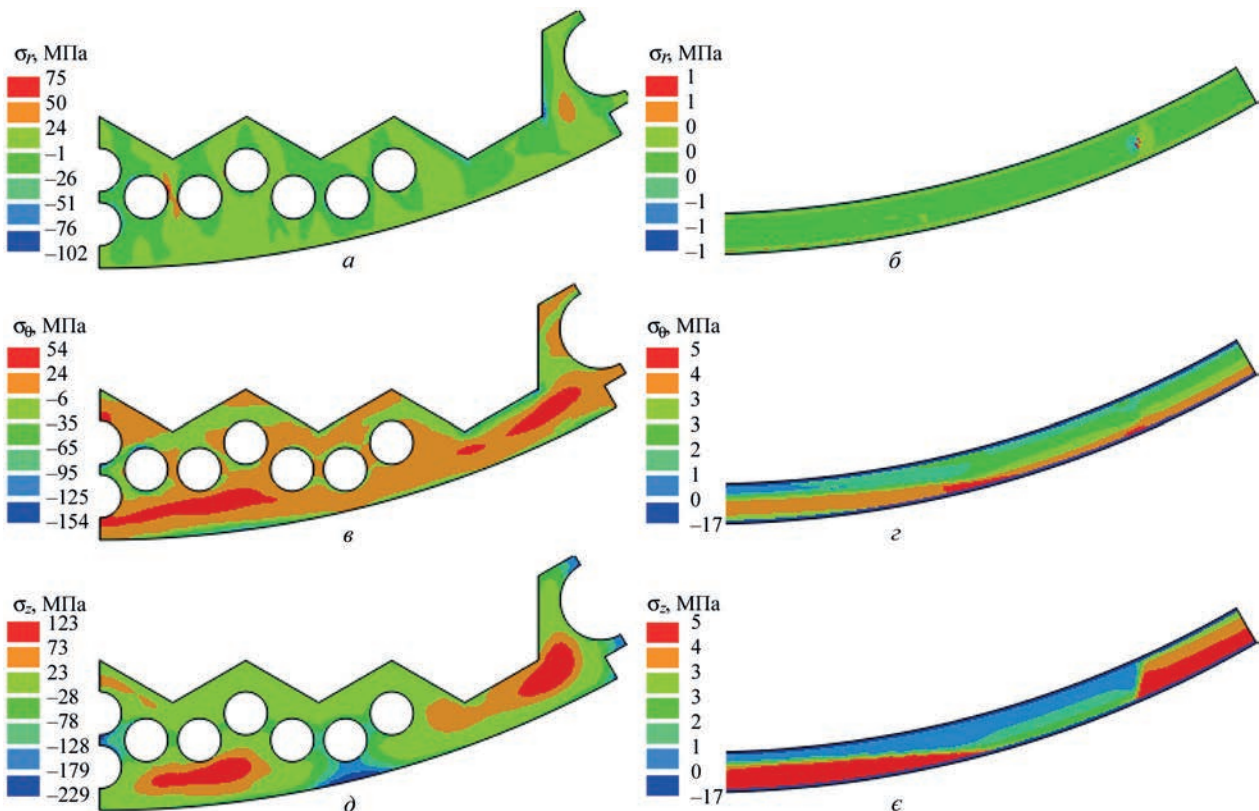


Рис. 7. Залишкові напруження після зварювання і аустенізації вигородки і ШВК в радіальному (а, б), окружному (в, з) і осьовому (д, е) напрямках



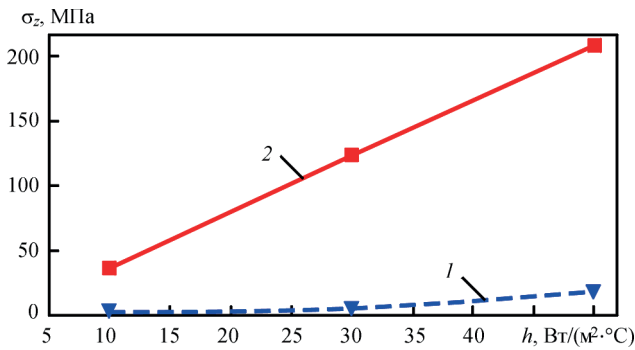


Рис. 8. Рівень залишкових осьових напружень залежно від значення коефіцієнта тепловіддачі: 1 – ШВК; 2 – вигорodka

тепловіддачі. Для проведення більш точної оцінки впливу процесу аустенізації на залишкові напруження в елементах ВКП необхідно мати уточнені дані коефіцієнтів тепловіддачі для нержавіючої сталі, їх врахування може істотно вплинути на визначення залишкового ресурсу ВКП ВВЕР-1000.

**Висновки**

1. При розрахунковому обґрунтуванні продовження ресурсу ВКП ВВЕР-1000 на понад-проектний період (до 60 років експлуатації і більше) необхідно враховувати технологічні залишкові напруження. За допомогою математичного моделювання теплових процесів і в'язкопружнопластичного деформування матеріалу проведено чисельне дослідження утворення, релаксації і перерозподілу залишкових напружень в процесі зварювання і подальшої термічної обробки конструкційних елементів вигорodka і ШВК енергоблоку ВВЕР-1000.

2. Результати математичного моделювання показали, що післязварювальна термічна обробка елементів ВКП (вигорodka і ШВК) по режиму аустенізації ( $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ) дозволяє істотно релаксувати залишкові зварювальні напруження, однак висока геометрична неоднорідність вигорodka впливає на нерівномірність охолодження в об'ємі конструкції при інтенсивному теплообміні на повітрі, що призводить до появи градієнта температур і, як наслідок, утворення високих залишкових напружень, що слід враховувати при визначенні ресурсу ВКП ВВЕР-1000.

**Список літератури/References**

- (1989) PNAE G-7-009-89. *Equipment and pipelines of nuclear power installations. Welding and overlaying, general provisions*. Moscow, ENERGOATOMIZDAT.
- (1985) Rakhmievich Z.Z., Radzin I.M., Faramazov S.A. *Reference book of mechanic of chemical and petrochemical production*. Moscow.
- (2016) Makhnenko O.V., Mirzov I.V., and Porokhonko V.B. Modeling of residual stresses, radiation swelling and stressed state of in-service WWER-1000 reactor baffle. *The Paton Welding J.*, 4, 32–38. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.04.03>
- (1976) Makhnenko V.I. *Computational methods of investigation of welded stress and strain kinetics*. Kiev, Naukova Dumka.
- (2004) STP 26.260.484-2004 *Heat treatment of corrosion-resistant steels and iron-nickel-based alloys in chemical engineering*. OJSC «NIKHIMMASH».
- (1966) Rabotnov Yu.N. *Creep of structural elements*. Moscow, GIFML.
- (2006) Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Buchatskii, A.A. Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, 38(5), 449–457.
- (1953) Nemchinskiy A.L. *Thermal calculations of heat treatment*. Leningrad, Sudpromgiz.

**MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN WWER-1000 ELEMENTS AFTER HEAT TREATMENT**

O.V. Makhnenko<sup>1</sup>, S.M. Kandala<sup>1</sup>, N.R. Basistyuk<sup>1</sup>, M.V. Cherkashin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>«Ukrtsniitmash» Company, 7a Vasylenska Str., 03124, Kyiv, Ukraine. E-mail: ukrcniitmash@ukr.net

Determination of residual life and extension of safe operating life of WWER-1000 internals for a term of up to 60 years beyond the design period is an important scientific and engineering objective for nuclear power industry of Ukraine. During long-term operation the internal elements: reflection shield and cavity are exposed to intensive impact of damaging radiation dose that causes the processes of radiation embrittlement, swelling and creep in the material (austenitic steel 08Kh18N10T). Technological residual stresses after welding and subsequent heat treatment should be taken into account at calculation-based substantiation of the safe operating life of reactor internal elements. In the work mathematical modeling was used to derive residual stress distributions in the volume of the reflection shield and internal cavity after electroslag welding and their redistribution fields after post-weld heat treatment by autenitizing mode. It is determined that the residual welding stresses are largely relaxed during austenitizing. In the reflection shield, however, which is of complex geometry with a variable wall thickness and cooling channels, high residual stresses develop, due to occurrence of a significant temperature gradient at cooling during austenitizing. These stresses should be taken into account at determination of the residual life of WWER-1000 internals. Ref. 8, Fig. 8.

*Keywords: WWER-1000, reactor internals, reflection shield, internal cavity, electroslag welding, heat treatment, austenitizing, residual stresses*

Надійшла до редакції  
01.03.2021