

# ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ У ВУЗЛІ З'ЄДНАННЯ КОЛЕКТОРА З ПАТРУБКОМ ДУ1200 ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000 В РЕЗУЛЬТАТІ ЛОКАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

О.В. Махненко, О.Ф. Мужиченко, І.І. Прудкий, Н.Р. Басистюк

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [makhnenko@paton.kiev.ua](mailto:makhnenko@paton.kiev.ua)

При обґрунтуванні продовження терміну безпечної експлуатації енергоблоків АЕС ВВЕР-1000 вузол приварювання колектора до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000 є об'єктом підвищеної уваги з-за його схильності до утворення дефектів несущільності. З метою отримання уточненої інформації стосовно навантаженості цього вузла проведено математичне моделювання методом скінченних елементів кінетики формування залишкових напружень і пластичних деформацій в результаті локальної післязварювальної термообробки за режимом високого відпуску. Складна геометрія вузла та локальне розташування нагрівачів викликають під час термообробки значну нерівномірність нагріву, що може призводити до негативних наслідків, а саме, утворення високих залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах вузла з'єднання. Доведено, що осесиметрична 2D скінченно-елементна модель вузла з найменшою довжиною патрубка Ду1200 забезпечує достатню консервативність результатів у порівнянні з загальною 3D моделлю. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 11.

*Ключові слова:* парогенератор ПГВ-1000, зварне з'єднання № 111, локальна термообробка, залишкові напруження, пластичні деформації, математичне моделювання, повзучість

**Вступ.** За останні двадцять років при експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000 на АЕС України в зварному вузлі з'єднання колектора з патрубком Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000, який входить до складу першого та другого контурів охолодження реактора, було багаторазово виявлено дефекти несущільності матеріалу [1, 2]. Для обґрунтування можливості експлуатації парогенераторів з такими дефектами в зоні зварного з'єднання № 111, принаймні до наступного планового-попереджувального ремонту, можуть бути застосовані сучасні підходи механіки руйнування конструкційних матеріалів з дефектами тріщиноподібної форми для прогнозування їхньої поведінки при різних режимах навантаження [2–6]. Для проведення таких розрахунків дуже важливо мати інформацію про навантаженість вузла приварювання колектора до патрубка Ду-1200 [7–10], у тому числі про залишкові напруження, пов'язані з технологією виготовлення або ремонту [11–13].

Експериментальне визначення залишкових напружень у товстостінних конструкціях діючого обладнання можливо або на зовнішніх поверхнях за допомогою стандартизованого методу тензометрії [14] чи лазерної спекл-інтерферометрії (ES-PI-ND метод) [15] при свердлінні отвору, або вимагає більш поглиблених досліджень модельного зразка в лабораторних умовах, наприклад методом нейтронної дифракції [16]. Доцільно також проводити скінченно-елементне моделювання розподілу залишкових напружень в об'ємі зварного вузла

[13, 17], яке повинне узгоджуватись з результатами експериментальних вимірювань.

Враховуючи актуальність проблеми пошкодження вузла зварного з'єднання № 111 для АЕС України, необхідним є визначення достовірного розподілу залишкових технологічних напружень у зазначеному вузлі з метою подальшого розрахункового обґрунтування його працездатності з виявленими в процесі експлуатації дефектами несущільності.

**Конструкція, матеріали та технологія виготовлення вузла зварного з'єднання № 111.**

На рис. 1 наведено схему вузла приварювання колектора до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000. Патрубок Ду1200 парогенератора та колектор виготовляють зі сталі перлітного класу 10ГН2МФА. Зварне з'єднання виконують ручним або автоматичним зварюванням. Корінь зварного шва виконують вручну аргонодуговим зварюванням з присаджувальним дротом Св08Г2С. Висота кореневого проходу 6...8 мм. Заповнення основної частини шва виконують ручним зварюванням електродами ЦУ-7 або УОНИ-13/55 діаметром 4 або 5 мм, а при автоматичному зварюванні використовується дріт Св08ГСМТ і Св10ГН1МА діаметром 2 мм і флюс ФЦ-16 або АН-17.

З метою релаксації залишкових напружень, пов'язаних або зі зварюванням під час виготовлення, або з ремонтом виявлених під час експлуатації окремих дефектів зварного з'єднання № 111 (рис. 1), виконується технологічна операція локальної термообробки за режимом високого

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Мужиченко О.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-4870-3659>

© О.В. Махненко, О.Ф. Мужиченко, І.І. Прудкий, Н.Р. Басистюк, 2025

відпуску ( $T_{max} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за допомогою кільцевих нагрівачів.

**Метою** роботи є аналіз впливу на залишковий напружений стан локального нагріву досить складного за геометрією зварного вузла приєднання колектора до патрубку парогенератора, який містить внутрішній карман між колектором і патрубком та який не є осесиметричним, тобто має різну довжину патрубка за окружною координатою. Локальна післязварювальна термообробка такого вузла може призводити після часткової релаксації залишкових зварювальних напружень до утворення нових високих залишкових напружень. Тому в даній роботі з метою поглибленого аналізу проблеми розглянуто утворення залишкових напружень тільки після локальної термообробки, без урахування напружень, що виникають після багатопрхідного зварювання. Методом математичного моделювання в загальній тривимірній постановці з урахуванням неосесиметричності вузла

зварного з'єднання № 111, а також у двовимірній осесиметричній постановці, проведено розрахункове визначення розподілу залишкових напружень у результаті тільки локальної термообробки.

Розглянуто два варіанти післязварювальної локальної термообробки, а саме, в процесі виготовлення та ремонту під час експлуатації. Ці варіанти відрізняються кількістю зон локального нагріву. Під час виготовлення парогенератора в заводських умовах вузол зварного з'єднання № 111 має доступ для нагріву з внутрішньої сторони колектора (рис. 2, а). Під час ремонту зварного з'єднання № 111 на АЕС, коли колектор парогенератора з'єднаний з трубопроводом Ду850 першого контура, можливість нагріву з внутрішньої сторони колектора відсутня (рис. 2, б), що може суттєво впливати на розподіл температур під час післязварювальної локальної термообробки.

У зоні розміщення нагрівальних елементів (рис. 2) температура поверхні змінюється в часі (від початку роботи нагрівачів) відповідно до графіка на рис. 3. Решта поверхні вузла, що нагрівається, має конвекційний теплообмін з навколишнім середовищем з відповідними коефіцієнтами теплообміну для спеціально вкритої теплоізолюючими матеріалами зовнішньої поверхні вузла, а також для внутрішньої поверхні кармана, де конвекційний теплообмін є обмеженим.

**Існуючі дані про розподіл залишкових напружень.** Результати чисельного моделювання залишкових напружень у зварному з'єднанні № 111 наведено на рис. 4 [11]. Видно, що при заданих ділянках нагріву та режимах заводської термообробки, а також фізико-механічних властивостях матеріалу (сталь 10ГН2МФА), локальний нагрів вузла викликає місцеве температурне розширення нагрітої ділянки та розвиток на внутрішній поверхні кармана з боку патрубка пластичних деформацій стиснення в осьовому та тангенціальному напрямках. В областях непружного стиснення при подальшому охолодженні виникають залишкові

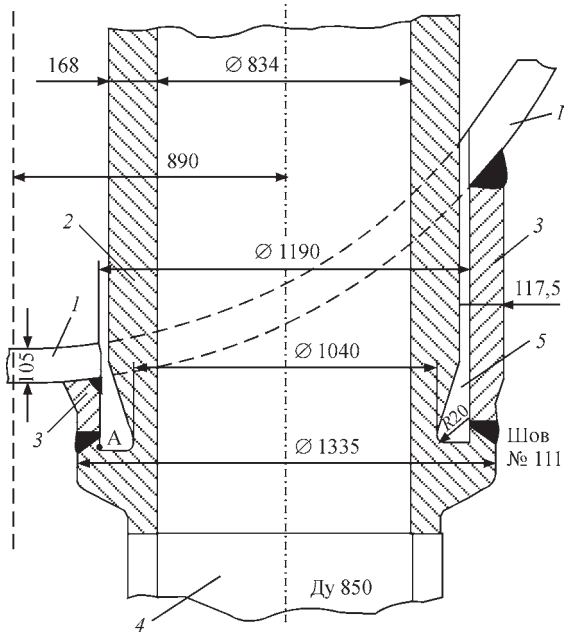


Рис. 1. Схема розташування зварного з'єднання № 111: 1 – корпус парогенератора; 2 – колектор; 3 – патрубок Ду1200; 4 – трубопровід Ду850; 5 – карман; А – дефект несущієності

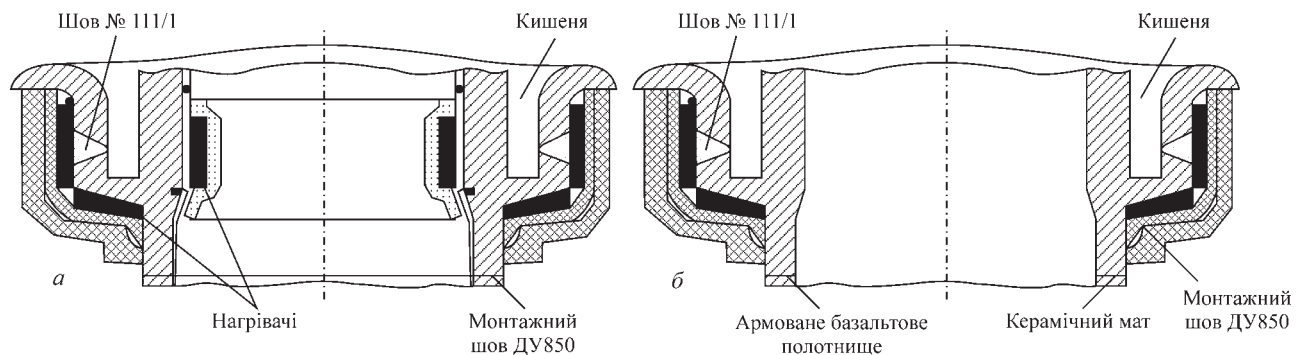


Рис. 2. Схема встановлення нагрівачів і теплоізолюючих матеріалів на вузол зварного з'єднання № 111 при проведенні локальної післязварювальної термообробки: а – під час виготовлення парогенератора в заводських умовах; б – під час ремонту зварного з'єднання на АЕС

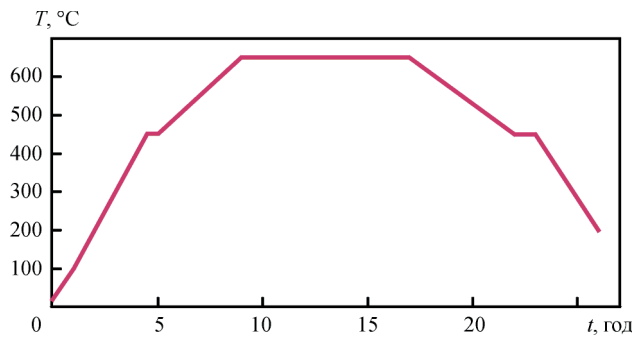


Рис. 3. Графік зміни температури термообробки за режимом високого відпуску

напруження розтягу. Розподіл осьової компоненти напружень на поверхні кармана з боку патруб-ка має характерний максимум в області гальтельного переходу на відстані близько 17 мм від дна кармана (рис. 4, а). Крім осьової компоненти, по товщині патрубка ближче до внутрішньої поверхні формуються високі окружні залишкові напруження розтягу (рис. 4, б). Підвищені напруження, що формуються внаслідок термообробки, з урахуванням їхньої концентрації в області дефектів, можуть бути причиною зародження тріщин.

**Розробка математичної моделі визначення залишкових напружень після локальної термообробки вузла зварного з'єднання № 111.** Для розрахунку залишкових напружень було побудовано загальну 3D скінченно-елементну модель вузла приварювання колектора до патрубка Ду1200 з урахуванням змінної довжини патрубка за окружною координатою ( $H \approx 240 \dots 920$  мм) (рис. 5), а також спрощену осесиметричну 2D модель (рис. 6) з довжиною патрубка, яка дорівнює мінімальному значенню в реальній конструкції.

Кільцеві джерела нагріву (нагрівачі), що забезпечують локальну термообробку зварного вузла, моделювались відповідним тепловим потоком через поверхню нагріву за заданою програмою, як зазначено для режиму високого відпуску (рис. 3).

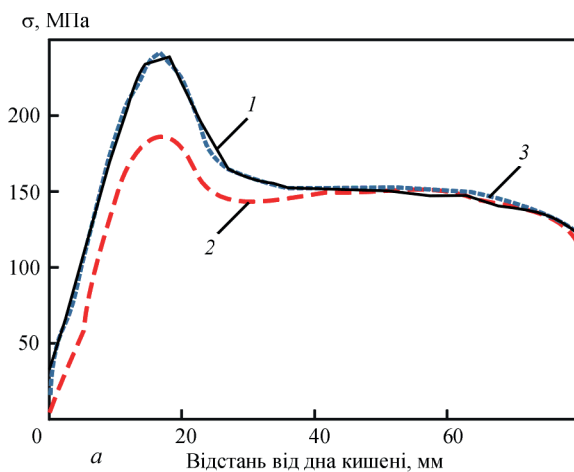


Рис. 4. Розподіл осьових  $\sigma_z$  (1), окружних  $\sigma_p$  (2) та еквівалентних  $\sigma_1 - \sigma_3$  (3) залишкових напружень на поверхні кармана з боку патрубка (а) та по товщині його стінки (б), починаючи від точки з максимальною напруженістю (за результатами двовимірних розрахунків [11])

Схеми 3D і 2D моделей вузла зварного з'єднання та скінченно-елементна сітка зображені відповідно на рис. 5 і 6. Залежності теплофізичних і механічних властивостей сталі 10ГН2МФА від температури наведені в табл. 1.

Кінетику температурних розподілів під час локальної термообробки визначали шляхом послідовного розв'язку рівняння нестационарної теплопровідності:

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

де  $T$  – температура, °C;  $c$  – питома теплоємність, Дж/кг·°C;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C).

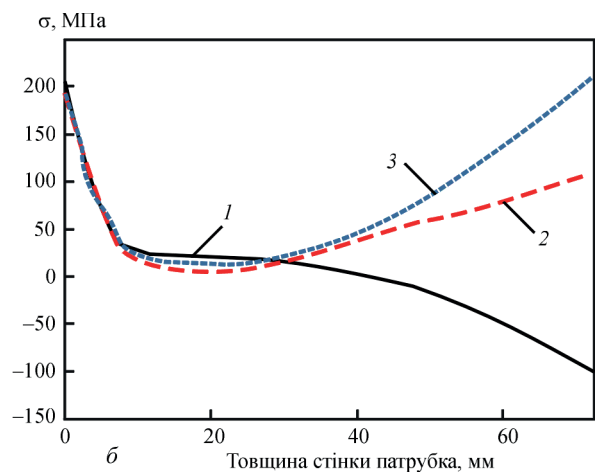
Особливістю моделі джерела нагріву при локальній термообробці є тепловиділення (тепловий потік) через контактні площини нагрівачів. При відсутності даних стосовно теплової потужності нагрівачів, змінний за часом тепловий потік на поверхні контакту нагрівачів у матеріал вузла з'єднання задавався через граничні умови контактного теплообміну з нагрівачем з температурою  $T_H(t)$ , як зазначено для режиму високого відпуску (рис. 3):

$$q_H(t) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h_H (T_H(t) - T), \quad (2)$$

де  $h_H$  – коефіцієнт теплопередачі в матеріал з'єднання від нагрівачів, значення  $h_H = 150$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C) вибиралось із умови забезпечення швидкості нагріву металу зварного вузла 45...100 °C/год згідно з режимом високого відпуску.

Граничні умови на поверхнях моделей вузла з'єднання з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавалися у вигляді:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T_0 - T), \quad (3)$$



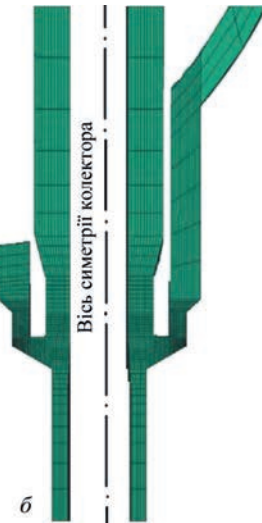
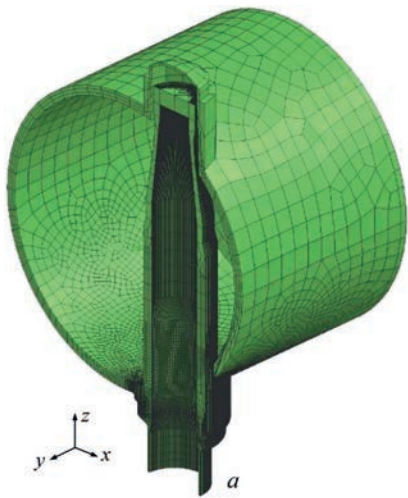


Рис. 5. Скінченно-елементна 3D модель зварного вузла № 111 парогенератора ПГВ-1000: а – загальний вигляд; б – поперечний переріз

Рис. 6. Скінченно-елементна осесиметрична 2D модель вузла зварного з'єднання № 111

де  $q$  – тепловий потік на поверхні елементів вузла;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $h$  – коефіцієнт теплопередачі з поверхні при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем. Зазвичай з поверхні в умовах природної конвекції на повітрі  $T_0 = 20$  °С,  $h = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), при встановленні теплоізолюючих матеріалів можна прийняти  $h = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Модель термов'язкопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання передбачає, що тензор загальних деформацій є сумою пружних, пластичних і деформацій повзучості:

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

Компоненти тензорів напружень і пружних деформацій пов'язані законом Гука:

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

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

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

$\alpha$  – коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії та асоційованою умовою текучості Мізеса:

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

де  $d\varepsilon_{ij}^p$  – приращення тензора  $\varepsilon_{ij}^p$ , яке в даний момент часу  $t$  обумовлене історією деформування,

напруженнями  $\sigma_{ij}$  та температурою  $T$ ;  $d\lambda$  – скалярна функція, яка визначається умовами течії:

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

$$d\lambda > 0, \text{ якщо } f = 0 \text{ і } df > 0;$$

стан  $f > 0$  неприпустимий;

$\sigma_i$  – інтенсивність напружень;  $\sigma_T(T)$  – границя текучості матеріалу при температурі  $T$ .

Для деформацій повзучості  $d\varepsilon_{ij}^c$  використовується рівняння зв'язку у вигляді [5]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)dt, \quad (8)$$

де  $\Omega(\sigma_i, T)$  – скалярна функція повзучості матеріалу при температурі  $T$  і рівні напруженості, що визначається інтенсивністю напружень  $\sigma_i$ .

Для даної задачі, коли при термообробці найбільш важливо враховувати деформації повзучості  $d\varepsilon_{ij}^c$ , оскільки від них істотно залежить процес релаксації напружень, функцію  $\Omega(\sigma_i, T)$  раціонально вибирати на основі експериментів з деформування при підвищеній температурі зразків із даного матеріалу.

Відповідно функцію повзучості в загальному вигляді в залежності від температури матеріалу, починаючи з температури 550 °С і вище, можна апроксимувати типовою залежністю:

$$\Omega(\sigma_i, T) = A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{G}{T + 273}\right), \quad (9)$$

де  $A, G$  – константи, пов'язані з властивостями матеріалу.

Представлена модель повзучості при підвищених температурах є досить загальною та дозволяє простежити деформаційні процеси при термообробці не тільки під час витримки, але й під час нагріву та охолодження при температурі, наприклад для сталей, 550°С і вище. Ця модель може бути ефективною при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній термообробці зварних

Таблиця 1. Механічні та теплофізичні властивості сталі 10ГН2МФА в залежності від температури [5]

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	Границя текучості $\sigma_f(T), \text{МПа}$	Коефіцієнт тепло-провідності $\lambda, \text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$	Об'ємна теплоємність $c_v, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	Коефіцієнт Пуассона $\mu, \text{б/р}$	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha, 1/^\circ\text{C}$
100	2,01	488	0,375	3,88	0,25	1,14
200	1,96	466	0,370	3,98	0,25	1,18
300	1,90	443	0,360	4,21	0,25	1,22
350	1,87	415	0,355	4,44	0,25	1,25
400	1,85	380	0,350	4,76	0,25	1,30
500	1,78	355	0,337	5,10	0,25	1,34
600	1,70	300	0,320	5,80	0,25	1,39
700	1,60	200	0,305	7,35	0,25	1,42
800	1,50	60	0,285	8,10	0,25	1,47
900	1,35	40	0,280	5,60	0,25	1,52
1000	1,15	20	0,275	5,00	0,25	1,65
1100	1,00	20	0,270	4,90	0,25	1,70
1200	1,00	20	0,267	4,90	0,25	1,62

конструкцій або у випадку пічної термообробки за короткий час витримки, коли за об'ємом зварної конструкції або вузла не забезпечується рівномірне прогрівання до заданої температури витримки.

Коефіцієнти функції повзучості для основного матеріалу зварного вузла (сталі 10ГН2МФА) були визначені в [5] на основі обробки існуючих експериментальних даних [18] відповідно до ступеня релаксації залишкових напружень розтягу  $\sigma_{xx}$  за період витримки  $t = 2$  год термообробки після зварювання пластин зі сталі 10ГН2МФА в залежності від температури відпуску  $T = 550 \dots 700$  °C. У табл. 2 наведено результати розрахунку констант функції повзучості (8) з використанням експериментальних даних.

При математичному моделюванні напружено-деформованого стану в розглянутому вузлі навіть у випадку відсутності залишкових напружень перед локальною термообробкою доцільно враховувати процеси повзучості, оскільки під час локальної термообробки утворюються тимчасові температурні напруження, під дією яких у процесі довготривалої витримки при підвищених температурах можуть утворюватися значні пластичні деформації за механізмом повзучості.

Особливостями математичної моделі неізотермічного деформування матеріалу при локальному термічному відпуску вузла зварного з'єднання № 111 при максимальній температурі до 650 °C є: граничні умови, які відповідають вільному закріпленню моделі; відсутність структурних фазових змін і відповідних об'ємних ефектів; релаксація напружень за рахунок процесів миттєвої пластичності та температурної повзучості матеріалу, яка враховується функцією повзучості  $\Omega(\sigma_p, T)$ . Оскільки залишкові зварювальні напруження не враховуються, утворення та розвиток нових залишкових напружень у процесі локальної термообробки відбува-

Таблиця 2. Параметри функції повзучості  $\Omega(\sigma_p, T)$  для сталі 10ГН2МФА в діапазоні температури  $550 < T < 700$  °C [5]

$n$	$A, \text{МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{год}^{-1}$	$G, ^\circ\text{C}$
5	$8,46 \cdot 10^{17}$	-66394

ється внаслідок значної нерівномірності нагріву за об'ємом зварного вузла. У процесі довготривалої витримки (9 год) термічні напруження частково релаксують за рахунок повзучості матеріалу і утворюються пластичні деформації, що може також впливати на рівень залишкових напружень.

**Результати моделювання.** На рис. 7 наведено розподіли максимальних температур у процесі витримки при проведенні локальної післязварювальної термообробки за режимом високого відпуску при  $T = 650$  °C, отримані для 2D і 3D моделей вузла зварного з'єднання № 111. Из-за складної геометрії вузла нагрів за допомогою локально розташованих нагрівачів не забезпечує рівномірності розподілу температури в зоні зварного з'єднання в процесі термообробки (рис. 7).

З точки зору забезпечення цілісності зварного з'єднання № 111 за механізмом руйнування «корозія під напруженням» особливу важливість відіграють розподіли окружних і осьових залишкових напружень на внутрішній поверхні з'єднання. У результаті суттєво нерівномірний нагрів викликає утворення високих залишкових напружень (рис. 8). На внутрішній поверхні окружні напруження  $\sigma_{\theta\theta}$  досягають рівня 350 МПа, а на зовнішній – до 300 МПа (рис. 8, а). Осьові напруження розтягу  $\sigma_{zz}$  на внутрішній поверхні досягають рівня 400 МПа, а на зовнішній поверхні напруження стиску – до -300 МПа (рис. 8, б). Радіальні напруження в зоні наплавленого металу незначні, але утворюється зона досить високих напружень розтягу до 100 МПа на внутрішній поверхні в зоні радіусного переходу кармана (рис. 8, в).

На рис. 9 наведено розрахункові розподіли залишкових напружень по товщині вузла зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки (заводський режим) без моделювання зварюван-

ня ( $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ , термін витримки  $t = 8$  год), які отримані з використанням 2D і 3D моделей у порівнянні з існуючими даними [11]. Результати за осьовою компонентною  $\sigma_{zz}$  досить близькі за ха-

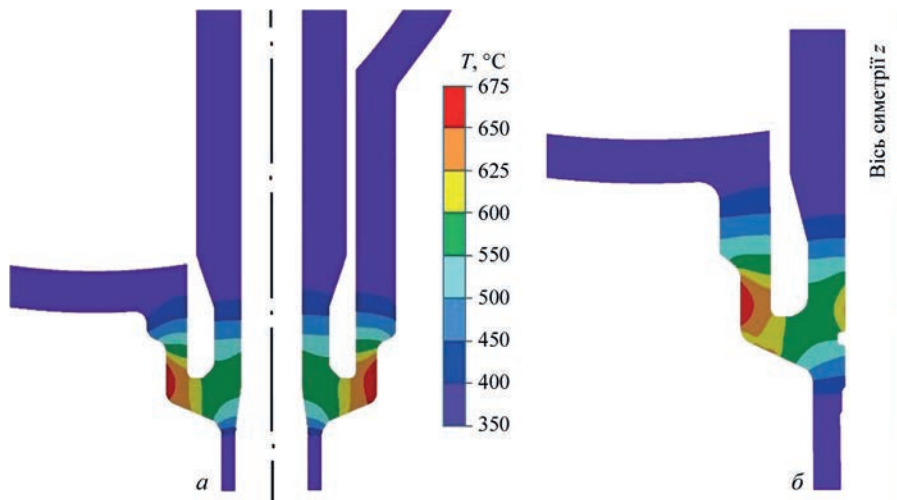


Рис. 7. Розподіли максимальних температур у процесі витримки при проведенні локальної термообробки за режимом високого відпуску при  $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ : *a* – 3D модель, режим ремонтної термообробки; *б* – 2D модель, режим заводської термообробки

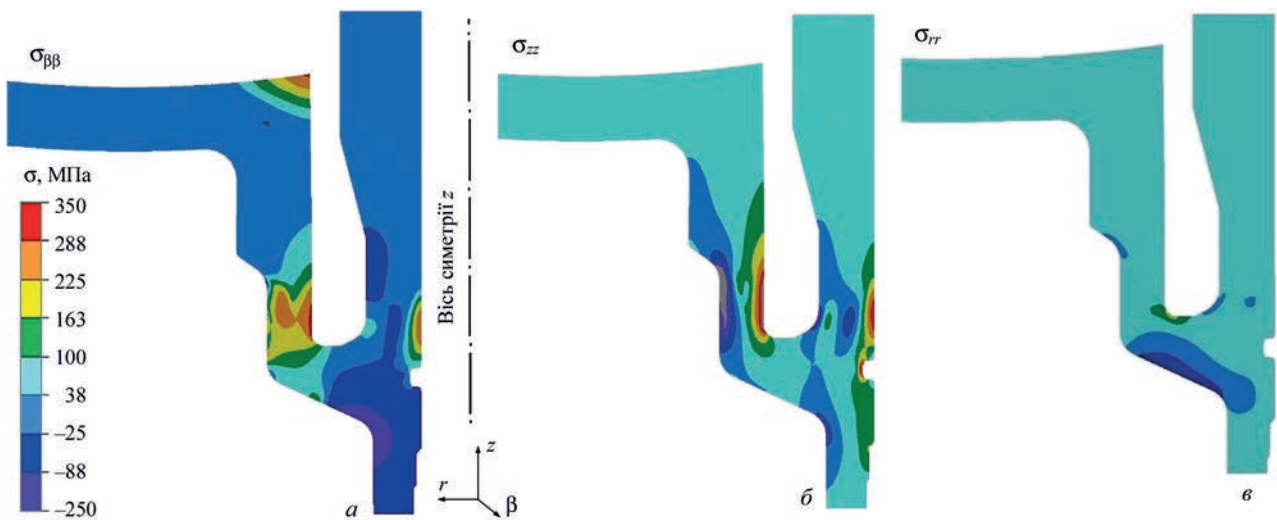


Рис. 8. 2D модель. Залишкові напруження в зварному з'єднанні № 111 після локальної термообробки (заводська) без моделювання зварювання ( $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ , термін витримки  $t = 8$  год.), МПа: *a* – окружні  $\sigma_{\beta\beta}$ ; *б* – осьові  $\sigma_{zz}$ ; *в* – радіальні  $\sigma_{rr}$

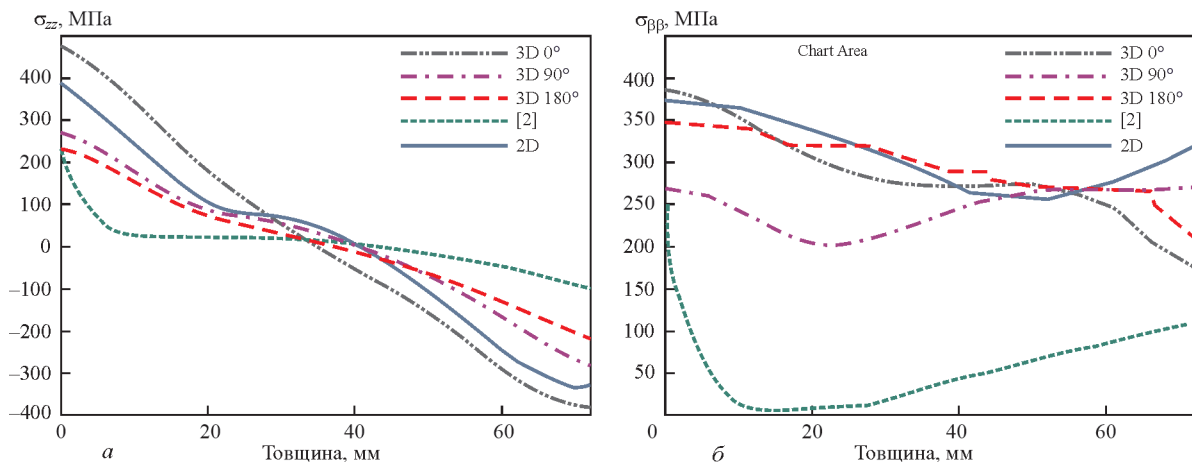


Рис. 9. Розподіл залишкових напружень по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки (заводський режим) без моделювання зварювання ( $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ , термін витримки  $t = 8$  год): *a* – осьова компонента  $\sigma_{zz}$ ; *б* – окружна компонента  $\sigma_{\beta\beta}$  (для 3D моделі кутова координата відраховується від найменшої довжини патрубку  $\varphi = 0^\circ$ , відповідно найбільша довжина патрубку відповідає  $\varphi = 180^\circ$ )

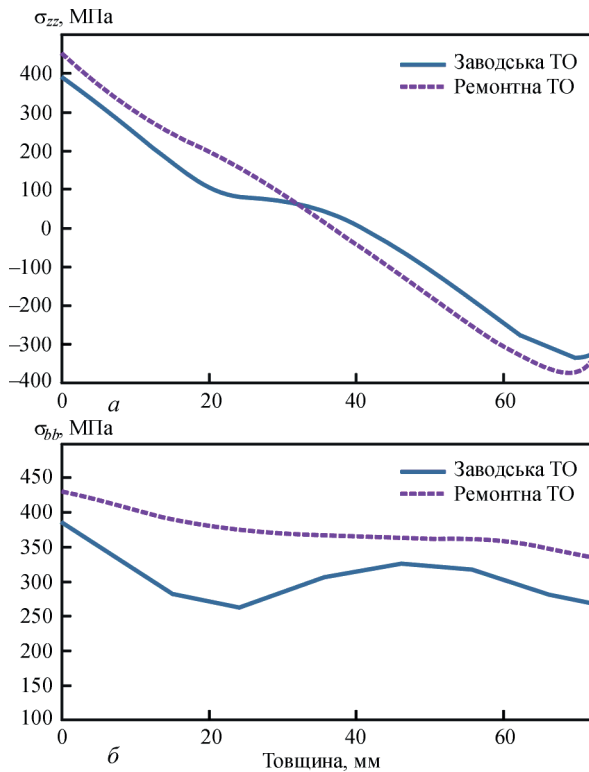


Рис. 10. Розподіл залишкових напружень по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної заводської або ремонтної термообробки без моделювання зварювання ( $T = 650$  °C, термін витримки  $t = 8$  год):  $a$  – осьова компонента  $\sigma_{zz}$ ;  $b$  – окружна компонента  $\sigma_{\phi\phi}$

рактором розподілу (рис. 9,  $a$ ). Так, за отриманими даними на зовнішній поверхні з'єднання осьові залишкові напруження є стискальними, а на внутрішній поверхні – розтягувальними, але суттєво відрізняються за абсолютною величиною. За існуючими даними розтягувальні напруження досягають 230 МПа, за результатами 2D моделі – майже 400 МПа, а 3D модель дає різні значення в залежності від кутових координат  $\phi$ , а саме, від 220 МПа в зоні з високою висотою патрубку ( $\phi = 180^\circ$ ) до 480 МПа в зоні з низькою висотою патрубку ( $\phi = 0^\circ$ ).

Що стосується окружної компоненти  $\sigma_{\phi\phi}$  (рис. 9,  $b$ ), то за існуючими даними залишкові напруження на внутрішній поверхні з'єднання є розтягувальними до 250 МПа, а потім різко падають майже до нульових значень. Залишкові напруження, які отримані з використанням 2D і 3D моделей, є розтягувальними по всій товщині з'єднання, але на внутрішній поверхні згідно з 2D моделлю – до 370 МПа, а згідно з 3D моделлю – від 270 МПа ( $\phi = 180^\circ$ ) до 380 МПа ( $\phi = 0^\circ$ ).

Представлені результати показали, що, по-перше, за існуючими даними [11] залишкові розтягувальні напруження на внутрішній поверхні зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки є суттєво нижчими, ніж отримані в даній роботі з

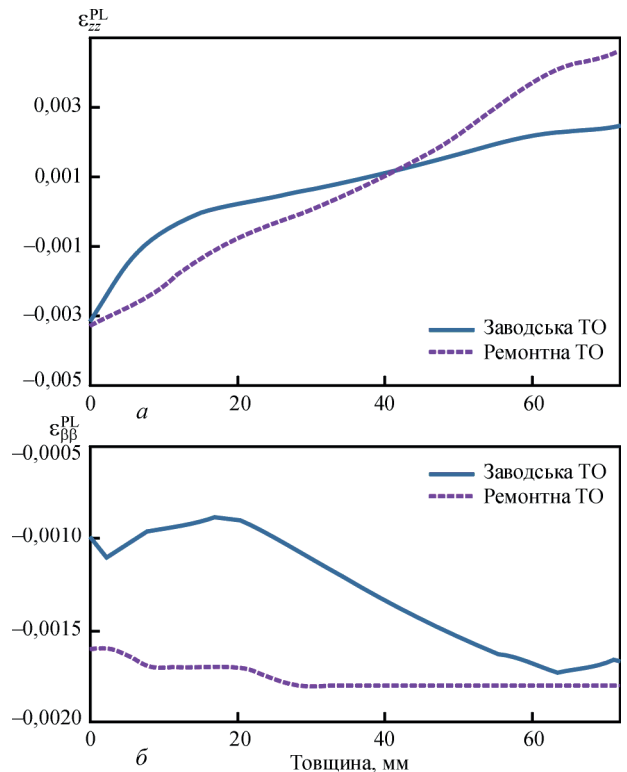


Рис. 11. Розподіл пластичних деформацій по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної заводської або ремонтної термообробки без моделювання зварювання ( $T = 650$  °C, термін витримки  $t = 8$  год):  $a$  – осьова компонента  $\epsilon_{zz}^P$ ;  $b$  – окружна компонента  $\epsilon_{\phi\phi}^P$

використанням 2D і 3D моделей. По-друге, використання осесиметричної 2D моделі з малою довжиною патрубку забезпечує досить консервативні результати у порівнянні з 3D моделлю.

Ще одна задача, яка досліджувалась у роботі, – це відмінність залишкових напружень після проведення локальної термообробки за заводським режимом, коли є доступ до внутрішньої поверхні колектора, де можна розташувати додатковий нагрівач (рис. 2,  $a$ ), і за ремонтним режимом, коли нагрівачі розташовані тільки з зовнішньої сторони вузла (рис. 2,  $b$ ).

На рис. 10 і 11 наведено розрахункові результати, які отримані з використанням 2D моделі, щодо розподілів залишкових напружень і пластичних деформацій по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки за заводським і ремонтним режимами термообробки без моделювання зварювання ( $T = 650$  °C, термін витримки  $t = 8$  год). Добре видно, що ремонтна локальна термообробка пов'язана з вищим рівнем залишкових напружень на внутрішній поверхні вузла, приблизно на 10...15 %.

Якщо припустити, що в процесі витримки під час термообробки залишкові зварювальні напруження значною мірою релаксують, то в процесі охолодження утворюються нові залишкові напруження. Особливо сильно це відбувається в металі

близько до внутрішньої поверхні, де утворюються досить високі (до 350...450 МПа) окружні та осьові залишкові напруження розтягу.

Представлені результати щодо вивчення ефективності технології локальної термообробки зварного з'єднання № 111 показали, що невдалий вибір або обмежені можливості щодо розміщення нагрівачів при локальній термообробці може призводити до негативних наслідків, а саме, утворення нових залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного з'єднання.

Отримані результати прогнозування відносяться для всіх з'єднань № 111, як «гарячих», так і «холодних» колекторів, оскільки окремі відхилення, пов'язані з розмірами розробки, кількістю проходів, параметрами режиму зварювання та термообробки в межах розглянутого технологічного процесу помітно не впливають на кінцеві результати. Низька ефективність розглянутої технології післязварювальної термообробки та, можливо, навіть її негативний вплив на забезпечення цілісності зварного з'єднання № 111 свідчать про необхідність оптимізації технології локальної термообробки із залученням методів математичного моделювання.

## Висновки

Результати математичного моделювання залишкового НДС вузла приварювання колектора до патрубку Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000 (зварне з'єднання № 111) у результаті локальної термообробки за режимом високого відпустку без урахування залишкових напружень після зварювання показали, що:

1. На внутрішній поверхні вузла в зоні зварного з'єднання № 111 внаслідок значної нерівномірності нагріву по товщині, а також процесів повзучості під час витримки при високій температурі утворюються досить високі залишкові напруження розтягу (до 350...450 МПа) як в окружному, так і в осьовому напрямку.

2. Осесиметрична 2D скінченно-елементна модель вузла з малою довжиною патрубка Ду1200 забезпечує достатню консервативність результатів у порівнянні з 3D моделлю, суттєво знижує вимоги до розрахункових ресурсів і може бути використана при розрахунках залишкових напружень після багатопрохідного зварювання та наступної локальної термообробки.

3. Локальна термообробка під час ремонту зварного з'єднання № 111 на АЕС пов'язана з вищим рівнем залишкових розтягувальних напружень на внутрішній поверхні з'єднання (приблизно на 10...15%), ніж під час виготовлення парогенератора в заводських умовах, коли є доступ до внутріш-

ньої поверхні колектора, де можна розташувати додатковий нагрівач.

4. Невдалий вибір або обмежені можливості щодо розміщення нагрівачів при локальній термообробці зварного з'єднання № 111 можуть призводити до негативних наслідків, а саме утворення нових високих залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного вузла.

## Список літератури

1. Воеводин В.Н., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С. и др. (2014) Идентификация несплошностей в металле сварного соединения корпуса парогенератора с коллектором на энергоблоках ВВЭР-1000. *Вопросы атомной науки и техники*, 4(92), 82–87.
2. Дуб А.В., Дурынин В.А., Разыграев А.Н. и др. (2014) Разработка методик ультразвукового контроля и определения работоспособности узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 36–51.
3. Харченко В.В., Чирков А.Ю., Кобельский С.В., Кравченко В.И. (2017) Совершенствование расчетного анализа напряженно-деформированного состояния и сопоставления разрушению узлов приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М АЭС. *Проблемы прочности*, 3, 5–20.
4. Махненко В.И., Маркашова Л.И., Махненко О.В. и др. (2012) Рост коррозионных трещин в конструкционной стали 10ГН2МФА. *Автоматическая сварка*, 8, 3–6.
5. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
6. Степанов Г.В., Широков А.В. (2014) Оценка кинетики трещины в сварном шве СШ № 111 соединения коллектора с патрубком корпуса парогенератора по ресурсу пластичности. *Проблемы прочности*, 3, 96–105.
7. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. (2003) Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС. *Проблемы прочности*, 5, 142–153.
8. Харченко В.В., Степанов Г.В., Кравченко В.И. и др. (2009) Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки. *Проблемы прочности*, 3, 25–31.
9. Ходаковский А.А., Чирков А.Ю., Харченко В.В. (2013) Расчетный анализ напряженного состояния узла соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при сейсмическом воздействии. *Проблемы прочности*, 4, 125–134.
10. Банько С. (2012) Напряженный стан вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000м з каверною. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 67(3), 56–63.
11. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. (2006) Напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку корпуса парогенератора при локальной термообработке. *Проблемы прочности*, 6, 43–50.
12. Мужиченко О.Ф., Махненко О.В. (2019) Математичне моделювання залишкових напружень в вузлі приварювання колектору до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000. Збірка наук. праць міжн. конф. «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах PolyWeld 2019», 23–24 травня 2019, Київ, сс.82–83.
13. Махненко О.В., Міленін О.С., Мужиченко О.Ф. та ін. (2023) Математичне моделювання релаксації залишкових напружень при проведенні післязварювальної термообробки. *Автоматичне зварювання*, 6, 35–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.06.01>
14. (2015) ASTM E837-13a. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. ASTM International.
15. Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2014) Technology and equipment for determination of residual stresses in

- welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Materials Science Forum*, **768-769**, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166/>
16. Rogante, M. (2020) Inside welds: advanced characterization of residual stresses by neutron diffraction. *The Paton Welding J.*, **11**, 18–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.04>
  17. Senchenkov, I.K., Chervinko, O.P., Banyas, M.V. (2013) Modeling of thermomechanical process in growing viscoplastic bodies with accounting of microstructural transformation: *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer Ref., Vol. 6, 3147–3157.
  18. Гривняк І. (1984) *Сваруємость сталей*. Пер. со слов. Л.С. Гончаренко. Макаров Э.Л. (ред.). Москва, Машиностроение.
  8. Kharchenko, V.V., Stepanov, G.V., Kravchenko, V.I. et al. (2009) Redistribution of stresses in the header-PGV-1000 steam generator connector weldment under loading after thermal treatment. *Strength of Materials*, **41**, 251–256. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9130-7>
  9. Khodakovskii, A.A., Chirkov, A.Yu., Kharchenko, V.V. (2013) Calculation analysis of the stress-strain state of the collector-to-nozzle weld in the steam generator under seismic loading. *Strength of Materials*, **45**, 482–488. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9483-9>
  10. Banko, S. (2012) Stressed state of the collector-case connection unit of the PGV-1000M steam generator with a cavity. *Visnyk Ternopilskoho NTU*, **67(3)**, 56–63 [in Ukrainian].
  11. Stepanov, G.V., Kharchenko, V.V., Babutskii, A.I. (2006) Stress-strain state of the header-steam generator connector weldment induced by local thermal treatment. *Strength of Materials*, **38**, 595–600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0081-y>
  12. Muzhychenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2019) Mathematical modeling of residual stresses in the collector to nozzle Du1200 welding unit of steam generators PGV-1000. In: *Proc. Papers of the Intern. Conf. on Innovative Technologies and Engineering in Welding and Related Processes PolyWeld 2019*, May 23–24, 2019, Kyiv, 82–83.
  13. Makhnenko, O.V., Milenin, O.S., Muzhychenko, O.F. et al. (2023) Mathematical modeling of residual stress relaxation during performance of postweld heat treatment. *The Paton Welding J.*, **6**, 32–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.06.05>
  14. (2015) ASTM E837-13a. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. ASTM International.
  15. Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2014) Technology and equipment for determination of residual stresses in welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Mat. Sci. Forum*, **768-769**, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166/>
  16. Rogante, M. (2020) Inside welds: Advanced characterization of residual stresses by neutron diffraction. *The Paton Welding J.*, **11**, 18–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.04>
  17. Senchenkov, I.K., Chervinko, O.P., Banyas, M.V. (2013) Modeling of thermomechanical process in growing viscoplastic bodies with accounting of microstructural transformation: *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer Ref., Vol. 6, 3147–3157.
  18. Hrivnak, I. (1984) *Weldability of steels*. Ed. by E.L. Makarov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

References

RESIDUAL STRESSES IN THE JOINT OF THE COLLECTOR TO THE DN1200 BRANCH PIPE OF THE PGV-1000 STEAM GENERATOR DUE TO LOCAL HEAT TREATMENT

O.V. Makhnenko, O.F. Muzhichenko, I.I. Prudkiy, N.R. Basistykh

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [makhnenko@paton.kiev.ua](mailto:makhnenko@paton.kiev.ua)

When assessing the extension of the service life of WWER-1000 NPP power units, the welded joint of the collector to the DN1200 branch pipe of the PGV-1000 steam generator is an object of increased attention due to its tendency to the formation of discontinuity defects. In order to obtain more detailed information regarding the loading of this welded joint, mathematical modeling of the kinetics of formation of residual stresses and plastic strains, as a result of local postweld heat treatment in the high-temperature tempering mode, was carried out using the finite element method. The complex geometry of the joint and the local arrangement of the heaters cause significant nonuniformity of heating during heat treatment, which can lead to negative consequences, namely, formation of high residual tensile stresses in the hazardous zones of the welded joint. It is proven that the axisymmetric 2D finite element model of the joint with the shortest length of the DN1200 branch pipe provides sufficient conservativeness of the results compared to the general 3D model. 18 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

*Keywords:* PGV-1000 steam generator; welded joint No. 111, local heat treatment, residual stresses, plastic strains, mathematical modeling, creep

Отримано 27.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 21.03.2025

Прийнято 15.09.2025