МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛАКСАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПІСЛЯЗВАРЮВАЛЬНОЇ ТЕРМООБРОБКИ

О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.Ф. Мужиченко, С.М. Кандала, О.М. Савицька, Г.Ю. Саприкіна

IEЗ ім. €.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua З метою зниження рівня залишкових напружень зварні з'єднання ряду конструкційних сталей піддають загальній чи локальній післязварювальній термообробці за режимом високого відпуску. Для забезпечення постійно зростаючих вимог до якості зварних з'єднань і оптимізації технології зварювання поряд з експериментальними методами досліджень широко використовують методи математичного моделювання. При математичному моделюванні процесу термічної обробки зварних з'єднань часто використовують спрощену функцію повзучості за законом Нортона-Бейлі при фіксованій температурі витримки, але при цьому не враховуються процеси в'язкого деформування, які мають місце при нижчих температурах під час повільного тривалого нагрівання і охолодження. Також існують більш загальні моделі, що дозволяють простежити процеси повзучості при проведенні післязварювальної термообробки під час витримки, нагрівання та охолодження.В роботі досліджувалась ефективність використання різних моделей температурної повзучості для математичного моделювання процесів релаксації залишкових напружень в зварних з'єднаннях з метою розробки рекомендацій за їх використанням для різних характерних випадків післязварювальної термообробки. Порівняння результатів моделювання процесу релаксації напружень, проведене на ряді прикладів, показало, що спрощена функція повзучості при короткотерміновій витримці під час загальної пічної термообробки може давати суттєву похибку відносно більш загальної моделі повзучості. Моделювання технології локальної термообробки показало, що складна геометрія вузла і невдалий вибір розташування нагрівальних елементів може призводити до негативних наслідків – утворення нових високих залишкових напружень. Належне моделювання процесів релаксації і перерозподілу залишкових напружень у зварних з'єднаннях та конструкціях у результаті загального (пічного) або локального післязварювального термооброблення може оптимізувати процес термічної обробки та покращити якість та довговічність зварних конструкцій. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: післязварювальна термообробка, високий відпуск, залишкові зварювальні напруження, релаксація напружень, математичне моделювання, функція повзучості

Вступ. Забезпечення постійно зростаючих вимог промисловості до якості зварних з'єднань з позицій їх надійності пов'язане з відповідними фундаментальними дослідженнями основних фізичних процесів, які визначають якість зазначеної вище продукції після виготовлення та певного терміну експлуатації. Поряд з експериментальними дослідженнями широке застосування знаходять методи математичного моделювання та сучасні інформаційні технології.

Зварні з'єднання цілого ряду конструкційних сталей (феритно-перлітного, бейнітного, мартенситного класів), зокрема, зварні з'єднання великих товщин, піддають загальній (у печі) або локальній термообробці (ТО) за режимом високого відпуску для зниження рівня залишкових зварювальних напружень [1, 2]. Ця технологічна операція особливо необхідна в тому випадку, коли конструкція буде експлуатуватися при низьких температурах, циклічних навантаженнях, в агресивному середовищі, тобто, коли роль залишкових напружень в забезпеченні структурної цілісності може стати вельми суттєвою [3, 4].

Режими післязварювальної ТО не завжди бувають оптимальними. В ряді випадків застосуван-

ня локального або загального відпуску зварних з'єднань залишкові зварювальні напруження під час нагрівання можуть частково релаксувати, але потім при охолодженні утворюються нові, якщо нагрівання або охолодження матеріалу з'єднання відбувалось нерівномірно [5, 6] чи теплофізичні властивості матеріалів не співпадають, як у випадку різнорідних з'єднань і наплавлень [7, 8]. Через це розробка адекватних режимів технології післязварювальної ТО, зокрема, з використанням методів математичного моделювання, може дозволити істотно знизити матеріальні витрати, пов'язані із забезпеченням надійної експлуатації відповідального обладнання. Тому метою роботи є дослідження ефективності використання різних моделей температурної повзучості для математичного моделювання процесів релаксації залишкових напружень в зварних з'єднаннях і розробка рекомендацій за їх використанням для різних характерних випадків післязварювальної ТО.

Методологія. За деформаційною теорією пластичності для пружнопластичного тіла існує залежність між деформацією та напруженням. Для ізотропного тіла інтенсивність деформації дорів-

Махненко О.В. – https://orcid.org/0000-0002-8583-0163, Міленін О.С. – https://orcid.org/0000-0002-9465-7710, Мужиченко О.Ф. – https://orcid.org/0000-0002-4870-3659, Кандала С.М. – https://orcid.org/0000-0002-2036-0498, Савицька О.М. – https://orcid.org/0000-0002-9363-6184, Саприкіна Г.Ю. – https://orcid.org/0000-0003-1534-7253 © О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.Ф. Мужиченко, С.М. Кандала, О.М. Савицька, Г.Ю. Саприкіна,

нює сумі інтенсивностей пластичних та пружних деформацій [9, 10]. Пластична деформація, яка збільшується з часом при постійному напруженні, називається деформацією повзучості (є^с). Графічне зображення залежності пластичної деформації від часу *t* випробувань у разі дії постійних напружень і температури називають кривою повзучості (рис. 1) [9].

В загальному випадку термомеханічного навантаження для визначення характеру та величини деформації виробу необхідні дані про модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю текучості матеріалу в залежності від температури, а також швидкості деформацій повзучості матеріалу при заданій температурі залежно від величини навантаження (напружень).

В зварних елементах, що піддаються ТО, спільний вплив високих температур і внутрішніх залишкових напружень зумовлює появу та розвиток пружнопластичних деформацій. Для математичної моделі, яка використовується для моделювання пружнопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання, приймається, що приріст тензора деформацій $d\varepsilon_{ij}$ у довільній точці (x, y, z) в момент часу *t* подається у виді суми [3]:

$$d\varepsilon_{ii} = d\varepsilon^{e}_{ii} + d\varepsilon^{p}_{ii} + d\varepsilon^{c}_{ii}, \qquad (1)$$

де $d\varepsilon_{ij}^{e}$ – пружна складова тензора деформацій; $d\varepsilon_{ij}^{p}$ – складова від миттєвої пластичності та $d\varepsilon_{ij}^{c}$ – складова деформації повзучості (дифузійної пластичності).

Для моделювання процесу термічної обробки зварних з'єднань часто використовують функцію повзучості матеріалу відповідно до закону Нортона-Бейлі [11], а саме степенева залежність між інтенсивністю напружень σ_i та швидкістю повзучості при фіксованій температурі витримки ТО:

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = A\sigma_i^n \,, \tag{2}$$

або в модифікованій формі з додатковим впливом часу витримки t [12]



Рис. 1. Крива повзучості: І – стадія неусталеної повзучості; ІІ – стадія усталеної повзучості; ІІІ – стадія руйнування; ε_0 – миттєва початкова деформація

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = A\sigma_i^n t^m, \qquad (3)$$

де *A*, *n*, *m* – коефіцієнти, що визначають експериментально як характеристики матеріалу при заданій температурі *T* = const.

Приведена модель розроблена для прогнозування накопичення деформацій повзучості в залежності від часу на стадії І неусталеної повзучості і стадії ІІ усталеної повзучості (рис. 1), що відповідає умовам деформування під час післязварювальної ТО. Але при використанні такої моделі повзучості при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень не враховуються процеси повзучості, які мають місце при більш низьких температурах ніж температура витримки при ТО, тобто при нагріванні і охолодженні матеріалу або в зонах зварного з'єднання, де температура матеріалу під час локальної ТО нижче заданої температури витримки.

Розглянемо математичну модель повзучості Ареніуса, що враховує накопичення деформацій повзучості в широкому діапазоні температур матеріалу [13].

$$\frac{d\varepsilon^{c}}{dt} = B\sigma_{i}^{n} \exp\left(\frac{Q/k}{T(K)}\right) = B\sigma_{i}^{n} \exp\left(\frac{G}{T(^{\circ}\mathrm{C}) + 273}\right),(4)$$

де Q – енергія активації повзучості; k – постійна Больцмана; T(K) – абсолютна температура за шкалою Кельвіна; $T(^{\circ}C)$ – температура в градусах Цельсія; B, G, n – константи.

Представлена модель (4) повзучості при підвищених температурах – досить загальна, вона дозволяє простежити деформаційні процеси при ТО. Ця модель ефективна при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній або пічній ТО зварних конструкцій за короткий час витримки, коли по об'єму зварної конструкції або вузла не забезпечується рівномірне прогрівання до заданої температури витримки.

Відповідно до наведених моделей високотемпературної повзучості та відомих моделей пружнопластичного деформування матеріалу [3] можуть бути побудовані математичні моделі спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності та повзучості для високотемпературного нагрівання елементів в результаті післязварювальної ТО. Тут значною мірою можуть бути використані сучасні розробки розв'язання задач теорії пружності та будівельної механіки, які базуються на широкому застосуванні методу скінченних елементів. Метод послідовного простежування дозволяє врахувати кінетику розвитку напруженого стану не тільки від послідовно виконаних зварювальних проходів, а й від операції післязварювальної ТО. Достовірність отриманих за описаною методикою кінцевих результатів

у значній мірі залежить від вихідних даних про теплофізичні та механічні властивості матеріалу досліджуваного об'єкту і параметрів теплового та силового впливу.

Розглянемо низку прикладів використання математичних моделей повзучості (1) і (4) при моделюванні характерних (типових) випадків післязварювальної ТО.

Приклад 1. Повздовжнє зварне з'єднання циліндричної оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора BBEP-1000.

Внутрішньокорпусна шахта (ВКШ) ядерного реактора BBEP-1000 це зварна циліндрична обичайка з аустенітної сталі 08Х18Н10Т із зовнішнім діаметром 3610 мм і товщиною стінки 60 мм, що містить повздовжні та кільцеві стикові з'єднання, які можуть бути виконані багатопрохідним дуговим зварюванням під флюсом з наступною TO для релаксації залишкових напружень.

Для повздовжнього багатопрохідного зварного з'єднання (10...12 проходів) циліндричної обичайки ВКШ методом математичного моделювання отримані розподіли залишкових зварювальних напружень [14]. Після зварювання процедура загальної (пічної) ТО зварного з'єднання змодельована для режиму: T = 650 °C, тривалість витримки 10 год. Для сталі 08Х18Н10Т при температурі T = 650 °C значення коефіцієнтів A, n у рівнянні Нортона-Бейлі (2) були прийняті наступними [15]:

 $A = 6,07307 \cdot 10^{-14} \text{ МПа}^{-n}$ год, n = 4,8351.

Для цієї математичної моделі параметри A і *n* прийняті однаковими для основного металу та металу шва. На рис. 2 показано графік функції повзучості для сталі 08Х18Н10Т при температурі T = 650 °C і прийнятих параметрах A і *n*, який демонструє, що при високих значеннях інтенсивності напружень (більше 100 МПа), утворення деформацій повзучості відбувається з досить високою швидкістю (0,0003...0,01 год⁻¹). При низьких напруженнях процеси їх релаксації значно уповільнюються.

Зварна конструкція ВКШ може піддаватись загальній пічній ТО. Таку ТО можна моделювати на основі використання двох принципово різних підходів визначення температурних розподілів. Перший піхід максимально спрощений і припускає, що під час нагрівання, витримки та охолодження температура матеріалу примусово задається рівномірною по всьому об'єму зварного вузла. Другий підхід враховує можливу нерівномірність розподілу температури по товщині конструкції за рахунок конвекційного нагрівання з поверхні.

Результати розрахунку напружено-деформованого стану ВКШ після зварювання і ТО показали, що максимальні осьові напруження σ_{zz} , які після зварювання були на рівні 200 МПа, після ТО знизилися до 48 МПа. Максимальні окружні напру-



Рис. 2. Функція повзучості для сталі 08Х18Н10Т при температур
і $T=650\ ^{\circ}\mathrm{C}$

ження $\sigma_{\beta\beta}$ в результаті ТО знизилися з 174 до 50 МПа, радіальні σ_{rr} – з 63 до 10 МПа.

На рис. З показано зміну температури повітря в об'ємі печі, які відповідають заданим параметрам ТО, а також розрахункові результати кінетики максимальної температури нагрівання металу зварного з'єднання за рахунок конвекційного теплообміну та результати кінетики релаксації залишкових напружень σ_{zz} при різних швидкостях нагрівання та охолодження. Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні зварного з'єднання з повітрям в об'ємі печі приймався в діапазоні $\alpha = (1, 5...3, 0) \cdot 10^{-4} Дж/(мм^2 \cdot c \cdot град) в залежності$ від температури нагрітого металу.

При нагріванні відбувається релаксація залишкових напружень за рахунок миттєвої пластичності, а після нагрівання до температури 650 °С під час витримки – за рахунок процесу температурної повзучості. Треба зазначити, що в розробленій спрощеній моделі прийнято припущення про те, що процес повзучості починається при температурі витримки. Таким чином, процес повзучості при 650 °С починається досить інтенсивно, за першу годину витримки відбувається значна релаксація напружень, після чого швидкість повзучості помітно знижується. Після охолодження рівень залишкових напружень трохи підвищується за рахунок підвищення температурної залежності границі текучості матеріалу.

При розглянутих варіантах швидкостей нагрівання та охолодження зварне з'єднання завтовшки 60 мм прогрівається по товщині досить рівномірно та відрізняється величиною затримки при досягненні температури витримки 650 °С. У досить тривалому періоді витримки (10 год), що прийнятий при розрахунку, результати за ефективністю релаксації залишкових напружень для різних швидкостей нагрівання та охолодження майже не відрізняються (рис. 4). Максимальні σ_{zz} , які після зварювання були на рівні 200 МПа, після ТО знижуються до 45...48 МПа.

Залежність ефективності релаксації залишкових зварювальних напружень о₂₂ від часу витримки представлена на рис. 5. Результати розрахунку при ТО для підходу конвекційного нагрівання в печі при швидкості нагрівання до 650 °C та охо-



Рис. 3. Зміна температури повітря в печі (штрихова лінія) і розрахункові результати кінетики максимальної температури нагрівання металу зварного з'єднання та релаксації максимальних залишкових напружень (осьова компонента σ_{zz}) при різних швидкостях нагрівання та охолодження: a - 100 град/год; $\delta - 50$; e - 30

лодження 100 град/год показують, що час витримки – дуже важливий параметр. Різниця в релаксації залишкових напружень при витримці 10 і 5 год невелика: залишкові напруження σ_z знижуються до 45 і 50 МПа відповідно. При більш короткому терміні витримки при 650 °С ефективність ТО знижується. При тригодинній витримці σ_{zz} знизились до 60 МПа, за 2 год – до 86 МПа.

На рис. 6 наведено порівняння результатів моделювання релаксації залишкових зварювальних напружень σ₇₇ при ТО у випадку примусового рівномірного нагрівання (підхід 1) з результатами моделювання ТО нагріванням за рахунок конвекції (підхід 2) для витримки протягом 2 і 10 год при 650 °C, швидкість нагрівання та охолодження 100 град/год.

При досить тривалій витримці, коли зварне з'єднання повністю нагрівається по товщині, результати чисельного прогнозування релаксації залишкових напружень за спрощеним підходом 1 близькі до більш точного підходу 2, який враховує ступінь нагрівання по товщині та затримку нагрівання до температури витримки. Так, при витримці 10 год результати релаксації максимальних залишкових напружень σ_{zz} (рис. 6), отримані за підходами 1 і 2, дають відповідно 45 і 43 МПа. Для короткотермінової витримки (2 год) спрощений підхід 1 дає суттєву похибку, а саме 59 МПа проти 86 МПа за більш точним підходом 2, отже, похибка складає приблизно 30 %.

Приклад 2. Кільцеве зварне з'єднання трубопроводу зі сталі підвищеної міцності перлітного класу.

Зварні з'єднання трубопроводів енергетичного обладнання, як правило, підлягають післязварювальній ТО. Наприклад, зварні з'єднання головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ) Ду850 зі сталі 10ГН2МФА (перлітного класу) виконують ручним або автоматичним зварюванням. Корінь зварного шва виконують вручну аргонодуговим зварюванням з присадковим дротом 08Г2С



Рис. 4. Кінетика релаксації максимальних залишкових напружень σ_{\pm} при ТО в зоні зварного з'єднання при різних швидкостях нагрівання та охолодження (100, 50, 30 град/год), час витримки 10 год, $T_{\text{тих}} = 650$ °C, для моделі конвекційного нагрівання в печі



Рис. 5. Кінетика релаксації максимальних залишкових напружень σ_{\pm} при ТО в зоні зварного з'єднання від часу витримки (2, 3, 5, 10 год, $T_{\text{max}} = 650$ °C), при швидкості нагрівання та охолодження 100 град/год, для моделі конвекційного нагрівання в печі



Рис. 6. Порівняння умов примусового рівномірного нагрівання (підхід 1) з нагріванням за рахунок конвекції (підхід 2) при ТО за результатами моделювання релаксації максимальних залишкових зварювальних напружень σ_{zz} для різного часу витримки 2 і 10 год., $T_{max} = 650 \,^{\circ}$ С, швидкість нагрівання та охолодження 100 град/год діаметром 2...3 мм, висота кореневого проходу 6...8 мм. Заповнення основної частини шва вико-

6...8 мм. Заповнення основної частини шва виконують ручним зварюванням електродами ПТ-30 діаметром 4 мм, а при автоматичному зварюванні використовується дріт Св10ГН1МА діаметром 2 мм. Зварювання виконують з попереднім і супутнім підігріванням до 150 °С.

Для визначення залишкових зварювальних напружень проведено математичне моделювання в двомірній осесиметричній постановці задач нестаціонарної теплопровідності і термопластичного деформування при зварювальному нагріві кільцевого багатопрохідного зварного з'єднання (112 проходів) циліндричної обичайки з внутрішнім діаметром $D_{\rm внутр.} = 850$ мм, товщиною $\delta = 60$ мм, режим дугового зварювання проходу $I_{\rm 3B} = 250$ A, $U_{\rm 3B} = 11,5$ B, $v_{\rm 3B} = 5,5$ мм/с, $Q_{\rm n} = 520$ Дж/мм, коефіцієнт теплової ефективності дорівнює 0,8.

Отримано досить високий рівень окружної компоненти залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}$ до 400...500 МПа, тобто до межи текучості матеріалу, а в локальній зоні завершальних зварювальних проходів максимальні розрахункові окружні напруження досягають навіть 690 МПа.

Після зварювання з метою релаксації залишкових напружень застосовується високий відпуск при температурі 650 °C, час витримки при заданій температурі 6...7 год, охолодження до 200 °C в печі при заданій швидкості охолодження до 100 град/год, потім на повітрі вільне охолодження до температури 20 °C.

Для моделювання процесу релаксації залишкових напружень при ТО використано дві функції повзучості для визначення можливої розбіжності результатів і забезпечення необхідної точності прогнозування. Перша – спрощена (2), не залежить від температури і діє тільки при досягненні температурі витримки при ТО. Друга (4) – більш загальна і залежить від температури матеріалу, починаючи с температури 550 °С і вище.

Коефіцієнти функції повзучості для основного матеріалу трубопроводу ГЦТ (сталі 10ГН2МФА) визначені на основі обробки експериментальних даних. На рис. 7 приведені дані роботи [3] відповідно до ступеня релаксації розтягуючих за-

лишкових повздовжніх напружень за період витримки 2 год ТО після зварювання пластин зі сталі 10ГН2МФА в залежності від температури відпуску T = 550...700 °C. У таблиці наведено результати розрахунку констант A, B, G, n функцій повзучості (2) і (4) з використанням цих експериментальних даних.

Спрощену функцію повзучості можна отримати на основі даних тільки для температури витримки T = 650 °C при TO і представити у вигляді (2)

при $n = 6, A = 1,73 \cdot 10^{-14} 1/(M\Pi a^n \cdot год),$

Відповідно функцію повзучості в загальному вигляді в залежності від температури матеріалу, починаючи с температури 550 °С і вище, можна апроксимувати типовою залежністю (4) з відповідними коефіцієнтами *B*, *G*, *n* з таблиці.

Отримані результати моделювання релаксації залишкових напружень в зоні кільцевого зварного з'єднання ГЦТ Ду850 після ТО та повного охолодження до 20 °С свідчать про досить високий рівень ефективності релаксації залишкових напружень при заданих параметрах (T = 650 °С, час витримки 7 год). Рівень максимальних залишкових напружень розтягу, а саме окружної компоненти $\sigma_{\beta\beta}$ і осьової σ_{zz} не перевищує 30...40 МПа,

Результати розрахунку коефіцієнтів функцій повзучості (2) і (4) з використанням експериментальних даних [3]

<i>T</i> , °C	А, 1/(МПа ⁿ ·год)	<i>B</i> , 1/(МПа ^{<i>n</i>} ·год)	G,(K)
	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 6
550	0,43.10-17	exp(41,28)	- 66394
600	1,13.10-15		
650	1,73.10-14		
700	3,77.10-12		



Рис. 7. Вплив температури двогодинного відпуску на рівень залишкових напружень і твердість в зоні зварного з'єднання зі сталі 10ГН2МФА [16]



Рис. 8. Залежність ефективності релаксації залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}$ (окружна компонента) в зоні стикового зварного з'єднання ГЦТ Ду850 при ТО від вибору функції повзучості та часу витримки (T = 650 °C): *a* - 0,5; δ - 2 i *s* - 5 год задані відповідним тепловим потоком через по-

напруження стискання на внутрішній поверхні трохи вищі – від –70 до –80 МПа.

Порівняння точності моделювання процесу релаксації напружень з використанням спрощеної функції повзучості на основі закону Нортона-Бейлі для фіксованої температури витримки та більш загальної функції повзучості представлені на рис. 8. Порівнювались саме ефективності релаксації залишкових окружних напружень о в зоні стикового зварного з'єднання ГЦТ Ду850 при ТО у залежності від вибору функції повзучості та часу витримки при T = 650 °C (0,5; 2 і 5 год), швидкість нагрівання та охолодження 100 град/год. Можна відзначити, що в залежності від функції повзучості змінюється кінетика релаксації напружень: при більш загальній функції повзучості процеси релаксації за рахунок повзучості починаються раніше при температурі T =550 °С, але під час витримки криві повзучості зближуються і майже співпадають. Максимальні залишкові напруження $\sigma_{_{\beta\beta}}$ в зоні зварного з'єднання знижуються з 710 до 50 МПа. Тільки у випадку дуже короткої витримки (0,5 год) релаксація напружень за спрощеною моделлю не встигає відбутися та різниця у величині залишкових напружень після ТО становиться помітною – 50 та 65 МПа. Таким чином, спрощена функція повзучості у випадках дуже короткої витримки може давати суттєву похибку результатів моделювання релаксації залишкових напружень відносно більш загальної функції повзучості, яка враховує залежність процесу повзучості від температури на стадії нагрівання та охолодження. В розглянутому випадку відносна похибка склала приблизно 30 %.

Приклад 3. Локальна ТО зварного з'єднання № 111 колектора до патрубка Ду1200 парогенератора ПГВ-1000

Патрубок Ду1200 парогенератора та колектор виготовляють зі сталі перлітного класу 10ГН2МФА. Зварний шов виконують ручним або автоматичним зварюванням, корінь зварного шва виконують вручну аргонодуговим зварюванням з присадковим 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. Операції проміжного та остаточного високого відпуску (рис. 9) виконуються кільцевими нагрівачами (рис. 10) з метою релаксації залишкових напружень, пов'язаних або з монтажним зварюванням або з локальним ремонтом окремих дефектів за схемою багатошарового заповнення відповідних розробок зварного з'єднання № 111.

Додаткові джерела нагрівання, що забезпечують локальну ТО зварного вузла, можуть бути задані відповідним тепловим потоком через поверхню нагрівання або зміною поверхневої температури в зоні нагрівання, якщо остання проводиться за заданою програмою, як зазначено для режиму високого відпуску.

В результаті проведеного математичного моделювання задач нестаціонарної теплопровідності і термопластичного деформування при зварювальному нагріві під час виконання всіх (до 100) проходів заповнення розробки зварного з'єднання № 111 і наступного повного охолодження отримані розподіли компонент залишкових напружень, які є досить нерівномірні по товщині зварного з'єднання. Найбільш високий рівень мають окружні розтягуючи напруження σ_{gg} (до 650 МПа). Осьові залишкові напруження σ_{gg} є стискаючими (до –170 МПа) на внутрішній поверхні з'єднання і розтягуючими на зовнішній (до 350 МПа). Радіальна компонента σ_{rr} має напруження розтягу до 200 МПа.

З точки зору забезпечення опірності зварного з'єднання № 111 руйнуванню за механізмом стрес-корозійого розтріскування особливо важливі розподіли окружних і осьових залишкових напружень на внутрішній поверхні з'єднання. Після монтажного зварювання в указаній зоні визначені досить високі окружні залишкові напруження розтягнення (до 300 МПа) і осьові напруження стискання. З урахуванням геометричної складності вузла зварного з'єднання № 111, технологічна операція локальної післязварювальної ТО може не тільки знизити рівень, а викликати утворення нових залишкових напружень.

При виконанні даного дослідження, аналогічно до попередніх прикладів, було використано два підходи моделювання температурних розподілів під час проведення післязварювальної ТО. Так, перший спрощений підхід відповідає умовам загальної пічної ТО, коли примусово рівномірно нагрівається весь вузол зварного з'єднання згідно заданого режиму ТО. Другий підхід відповідає реальним умовам локальної ТО, тобто в зоні установки нагрівачів (рис. 10) температура поверхні змінюється в часі t (починаючи з початку роботи нагрівача) за графіком режиму ТО (рис. 9). Решта поверхні вузла має теплоізоляцію або теплообмін з навколишнім середовищем за законом Ньютона-Ріхмана.

Виконання загальної ТО зварного з'єднання № 111, моделювання якої забезпечується рівномірним прогріванням (підхід 1) вузла до температури витримки 650 °С, призводить при тривалості витримки 8 год до значної релаксації залишкових напружень, а саме, рівень всіх компонент залишкових напружень знизився до 100 МПа і нижче (рис. 11).

При моделюванні релаксації та перерозподілу залишкових напружень в зварному з'єднанні



Рис. 9. Графік ТО за режимом високого відпуску



Рис. 10. Схема встановлення нагрівачів і теплоізолюючих матеріалів на ділянки зварного з'єднання № 111 при проведенні післязварювальної ТО (КТ1-КТ5 – контрольні точки)

№ 111 при виконанні локальної ТО шляхом прикладення теплових потоків від нагрівачів з поверхні вузла (підхід 2), отримані результати принципово відрізняються. По-перше, через складну геометрію вузла нагрівання за допомогою локально розташованих нагрівачів не забезпечує рівномірності розподілу температури в зоні зварного з'єднання в процесі витримки (рис. 12). В результаті, суттєво нерівномірне нагрівання викликає утворення нових залишкових напружень, розподіл і рівень яких значно відрізняється від залишкових напружень після зварювання (рис. 11).

Після локальної ТО окружні зварювальні залишкові напруження $\sigma_{\beta\beta}$ на внутрішній поверхні з'єднання майже не змінюються і досягають рівня 350 МПа, а на зовнішній поверхні досить високі після зварювання окружні залишкові напруження розтягу на рівні 400 МПа знижуються до 0...100 МПа (рис. 11, *a*). Осьові залишкові напруження σ_{zz} на внутрішній поверхні, які були після зварювання напруженнями стиску на рівні –100 МПа, після локальної ТО стають напруженнями розтягу і досягають рівня 200...300 МПа, а на зовнішній поверхні мають значення стиску до –300 МПа (рис. 11, δ).

Таким чином, локальний високий відпуск з нерівномірним розподілом температури в зоні зварного з'єднання в умовах досить жорсткого вузла зварного з'єднання № 111 призводить до певного зниження окружних залишкових напружень на зовнішній поверхні шва, але утворюється нова зона високих осьових напружень розтягу на внутрішній поверхні з'єднання.

Представлені результати щодо вивчення ефективності технології локальної ТО зварного з'єднання № 111 показали, що невдалий вибір роз-



Рис. 11. Розподіл залишкових напружень осьових $\sigma_{z}(a)$ і окружних $\sigma_{\beta\beta}(\delta)$ по товщині зварного з'єднання № 111 після зварювання та після загальної та локальної ТО



Рис. 12. Розподіли температури в процесі витримки при проведенні локальної післязварювальної ТО

міщення нагрівачів при локальній ТО може призводити до негативних наслідків, а саме, утворення нових залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного вузла. Низька ефективність розглянутої технології післязварювальної ТО та можливо навіть її негативний вплив на забезпечення цілісності зварного з'єднання № 111 свідчать про необхідність оптимізації технології локальної ТО із залученням, в тому числі, методів математичного моделювання.

Висновки

1. При загальній пічній ТО зварної конструкції теплові процеси можна моделювати на основі використання двох різних підходів. Перший, більш економний за реалізацією підхід припускає, що під час нагрівання, витримки і охолодження температура матеріалу задається згідно заданого режиму термообробки примусово рівномірною за об'ємом зварного вузла. Другий, більш точний підхід враховує можливу нерівномірність розподілу температури конструкції в результаті нагрівання і охолодження з поверхні за рахунок конвекції з навколишнім повітрям у печі.

2. Порівняння результатів моделювання релаксації залишкових зварювальних напружень при ТО у випадку примусового рівномірного нагрівання з результатами моделювання ТО нагріванням за рахунок конвекції показало, що у випадку досить тривалої витримки при ТО, коли зварне з'єднання встигає повністю прогрітися по товщині, перший підхід дає результати за релаксацією залишкових напружень дуже близькі до другого, який враховує ступінь нагрівання по товщині та затримку нагрівання до температури витримки. Для короткого часу витримки перший підхід може давати суттєву похибку.

3. Для моделювання процесу ТО зварних з'єднань часто використовують спрощену функцію повзучості матеріалу за законом Нортона-Бейлі як степеневу залежність між інтенсивністю напружень та швидкістю деформацій повзучості при фіксованій температурі витримки. Більш загальні математичні моделі повзучості, наприклад, модель Ареніуса, можуть враховувати накопичення деформацій повзучості в широкому діапазоні температур матеріалу, дозволяють простежити деформаційні процеси не тільки при температурі витримки, але і при нижчих температурах матеріалу і можуть бути ефективними при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній ТО зварних конструкцій або у випадку загальної пічної термообробки за короткий час витримки, коли за об'ємом зварної конструкції або вузла не забезпечується рівномірне прогрівання до заданої температури витримки.

4. Порівняння результатів з ефективності релаксації залишкових напружень показали, що в залежності від функції повзучості змінюється розрахункова кінетика релаксації напружень. Так, при більш загальній функції повзучості процеси релаксації за рахунок повзучості починаються раніше при нагріванні, але в процесі витримки криві повзучості за спрощеною та загальною моделями зближуються і майже співпадають. У випадках дуже короткої витримки спрощена функція повзучості може давати суттєву похибку результатів моделювання релаксації залишкових напружень відносно більш загальної функції повзучості, яка враховує залежність процесу повзучості від температури на стадії нагрівання та охолодження. В розглянутому випадку ТО стикового зварного з'єднання ГЦТ Ду850 відносна похибка склала 30 %.

5. Вивчення ефективності технології локальної ТО зварних з'єднань показало, що складна геометрія вузла та невдалий вибір розміщення нагрівачів може призводити до негативних наслідків, а саме, до утворення нових залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного вузла. Це пов'язано з досить значною нерівномірністю розподілу температури при локальному нагріванні вузла. Для підвищення ефективності технології післязварювальної локальної ТО і виключення її можливого негативного впливу на забезпечення цілісності зварних з'єднань доцільно проводити оптимізацію нових технологій локальної ТО із залученням методів математичного моделювання.

Список літератури

- 1. Корольков П.М. (2006) *Термическая обработка сварных соединений*. Київ, Екотехнологія.
- 2. (2007) ASME boiler & pressure vessel code VIII Div 2e an international code. New York, The American society of Mechanical Engineers.
- 3. Махненко В.И. (2006) Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. Київ, Наукова думка.

- 4. (2013) *Guide to methods of assessing the acceptability of flaws in metallic structures.* The British Standards Institution. BS7910:2013.
- Махненко О.В., Кандала С.М., Басистюк Н.Р., Черкашин М.В. (2021) Математичне моделювання залишкових напружень во внутрішньокорпусних елементах BBEP-1000 після термічної обробки. Автоматичне зварювання, 3, 10–16. https://doi.org/10.37434/as2021.03.02
- 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.
- Макаренко А.А., Махненко О.В. (2022) Математичне моделювання залишкових напружень в композитних зварних з'єднаннях кришки корпусу реактора BBEP-1000 з патрубками СУЗ. Автоматичне зварювання, 1, 33–40. https://doi.org/10.37434/as2022.01.05
- Махненко О.В., Костеневич Е.С. (2020) Вплив технологічних параметрів дугового наплавлення антикорозійного шару в корпусі реактора BBEP-1000 на розподіл залишкових напружень. *Там само*, **12**, 3–16. https://doi. org/10.37434/as2020.12.01
- 9. Работнов Ю.Н. (1966) Ползучесть элементов конструкций. Москва, ГИФМЛ.
- 10. Ильюшин А.А. (2004) Труды (1946–1966). Т. 2. Пластичность. Москва, Физматлит.
- Катанаха Н.А., Семенов А.С., Гецов Л.В. (2013) Единая модель длительной и кратковременной ползучести и идентификация ее параметров. *Проблемы прочности*, 4, 143–157.
- Betten J. (2008) Creep mechanics. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540- 85051-9
- Naumenko, K., Altenbach, H. (2007) Modeling of Creep for Structural Analysis. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. https://www.springer.com/gb/book/ 9783540708346
- 14. Махненко О.В., Мирзов И.В., Порохонько В.Б. (2016) Моделирование остаточных сварочных напряжений, радиационного распухания и напряженного состояния выгородки реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. *Автоматическая сварка*, 4 (752), 35–41.
- Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Buchatskii, A.A. (2006) Modeling for fracture in materials under longterm static creep loading and neutron irradiation. Part 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, 38(5), 449–457.
- 16. Гривняк И. (1984) Свариваемость сталей. Москва, Машиностроение.

References

1. Korolkov, P.M. (2006) Heat treatment of welded joints. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].

- (2007) ASME boiler & pressure vessel code VIII Div 2e an international code. New York, The American Society of Mechanical Engineers.
- Makhnenko, V.I. (2006) Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- 4. (2013) *Guide to methods of assessing the acceptability of flaws in metallic structures.* The British Standards Institution. BS7910:2013.
- Makhnenko, O.V., Kansala, S.M., Basystyuk, N.R., Cherkashyn, M.V. (2021) Mathematical modeling of residual stresses in WWER-1000 elements after heat treatment. *The Paton Welding J.*, 3, 10–16. https://doi.org/10.37434/as2021.03.02
- Stepanov, G.V., Kharchenko, V.V., Babutsky, A.I. et al. (2006) Stress-strain state of unit of collector welding-up to branch pipe of steam generator vessel during local heat treatment. *Problemy Prochnosti*, 6, 43–50 [in Russian].
- Makarenko, A.A., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical modeling of residual stresses in composite welded joints of WWER-1000 reactor vessel cover with CSS nozzles. *The Paton Welding J.*, 1, 33–40. https://doi.org/10.37434/ as2022.01.05.
- Makhnenko, O.V., Kostenevych, O.S. (2020) Impact of technological parameters of arc deposition of an anticorrosion layer in the vessel of WWER-1000 reactor on residual stress distribution. *The Paton Welding J.*, **12**, 2-14. https:// doi.org/10.37434/as2020.12.01
- 9. Rabotnov, Yu.N. (1966) Creep of structure elements. Moscow, GIFML [in Russian].
- Iliyushin, A.A. (2004) Transactions (1946-1966). Vol. 2: Ductility. Moscow, Fizmatlit [in Russian].
- Katanakha, N.A., Semenov, A.S., Getsov, L.V. (2013) Unified model of long-term and short-time creep and identification of its parameters. *Problemy Prochnosti*, 4, 143–157 [in Russian].
- Betten, J. (2008) Creep mechanics. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540- 85051-9
- Naumenko, K., Altenbach, H. (2007) Modeling of Creep for Structural Analysis. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. https://www.springer.com/gb/book/ 9783540708346
- Makhnenko, O.V., Mirzov, I.V., Porokhonko, V.B. (2016) Modeling of residual stresses, radiation swelling and stressed state of in-service WWER-1000 reactor baffle. *The Paton Welding J.*, 4, 32-38.
- Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Buchatskii, A.A. (2006) Modeling for fracture in materials under longterm static creep loading and neutron irradiation. Pt 2: Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, 38(5), 449–457.
- 16. Hrivnak, İ. (1984) Weldability of steels. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL STRESS RELAXATION DURING PERFORMANCE OF POSTWELD HEAT TREATMENT

O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, O.F. Muzhychenko, S.M. Kandala, O.M. Savytska, G.Yu. Saprykina

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

In order to lower the level of residual stresses, welded joints of a number of structural steels are subjected to general or local postweld heat treatment by the high-temperature tempering mode. Mathematical modeling methods are widely used, alongside the experimental investigation methods, to satisfy the continuously growing requirements to welded joint quality and to optimize the welding technology. Mathematical modeling of the process of welded joint heat treatment is often performed using a simplified creep function by Norton-Bailey law at a fixed soaking temperature, but here the processes of ductile deformation taking place during slow prolonged heating and cooling, are ignored. The effectiveness of application of different models of temperature creep for mathematical modeling of the processes of relaxation of residual stresses in welded joints was studied in this work with the purpose of developing recommendations for their application for various characteristic cases of postweld heat treatment. Comparison of the results of modeling the process of stress relaxation performed on a number of examples, showed that the simplified creep function at short-term soaking during general furnace treatment can give an error compared to a more general creep model. Modeling of the local heat treatment technology revealed that the complex geometry of the component and poor choice of the heating element arrangement may lead to negative consequences, namely formation of new high residual stresses. Proper modeling of the processes of relaxation and redistribution of residual stresses in welded joint post-weld heat treatment may optimize the process of furnace heat treatment and improve the quality and fatigue life of the welded structures. 16 Ref., 1 Tabl., 12 Fig.

Keywords: postweld heat treatment, high-temperature annealing, residual welding stresses, stress relaxation, mathematical modeling, creep function

Надійшла до редакції 10.05.2023