

КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КІЛЬЦЕВОГО ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

Л.М. Лобанов, О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.Р. Басистюк, Г.Ю. Саприкіна

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

Комп'ютерна програма «Girth Weld» дозволяє для типових випадків зварних кільцевих з'єднань трубопроводів та посудин тиску розрахунковим шляхом отримувати інформацію щодо механічних властивостей металу зварного шва та ЗТВ, залишкових напружень і деформацій, визначати перерозподіл напружено-деформованого стану в результаті термічної обробки, впливу експлуатаційних і випробувальних навантажень, прогнозувати працездатність і ресурс зварних конструкцій з дефектами несущільності, які виявлено в результаті неруйнівного контролю або постулюються. Комп'ютерна програма не вимагає від користувача спеціальної підготовки в галузі розрахункових методів за рахунок повної автоматизації процесів створення математичної моделі багатопрохідного кільцевого з'єднання, розбиття області на скінченні елементи, пошуку рішення та візуалізації результатів. При цьому комп'ютерна програма забезпечує високу точність прогнозних результатів при обмежених вимогах до комп'ютерних і часових ресурсів за рахунок застосування сучасних підходів моделювання фізико-хімічних процесів при зварюванні та економічних алгоритмів вирішення нелінійних завдань і систем диференційних рівнянь високого порядку. Бібліогр. 6, табл. 3, рис. 16.

Ключові слова: багатопрохідне зварювання, кільцеве з'єднання, комп'ютерна програма, математичне моделювання, метод скінченних елементів, механічні властивості, залишкові напруження, деформації, термічна обробка, експлуатаційне навантаження, допустимість дефектів

Вступ. З розвитком обчислювальної техніки, методів розв'язання задач термопластичності та опису характерних змін у матеріалі зварного з'єднання при зварювальному нагріванні розрахункові підходи та математичне моделювання процесів зварювання знаходять широке застосування у промисловості. Однак при цьому дуже актуальним є питання доступності застосування такого підходу для користувача, що має обмежений доступ до комерційних пакетів комп'ютерних програм скінченно-елементного аналізу типу SYSWELD, ABAQUS, ANSYS, MARC та ін.

Для вирішення цієї проблеми було створено вузькоспрямовану спеціалізовану комп'ютерну програму «Girth Weld», яка включена до пакету програм «Weldprediction», для математичного моделювання напружено-деформованого стану та механічних властивостей у зоні стикового кільцевого зварного з'єднання при дуговому зварюванні, що орієнтована для інженерного та наукового застосування та не вимагає від користувача спеціальної підготовки в галузі розрахункових методів.

Комп'ютерна програма «Girth Weld» дозволяє для типових випадків зварних вузлів трубопроводів та елементів обладнання розрахунковим шля-

хом отримувати інформацію щодо механічних властивостей металу зварного шва та ЗТВ, залишкових технологічних напружень і деформацій, визначати перерозподіл напружено-деформованого стану в результаті термічної обробки, впливу експлуатаційних і випробувальних навантажень, прогнозувати працездатність і ресурс відповідальних зварних конструкцій з дефектами несущільності, які виявлено в результаті неруйнівного контролю або постулюються.

Комп'ютерну програму «Girth Weld» розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. При розробці даної програми використувався багаторічний досвід математичного моделювання фізико-хімічних процесів під час зварювання, наплавлення, термообробки та споріднених технологій, а також сучасні досягнення чисельних методів, механіки деформованого тіла та механіки руйнування.

При цьому спеціалізована комп'ютерна програма має такі переваги:

– висока точність прогнозних результатів при обмежених вимогах до комп'ютерних і часових ресурсів (нетривалий час розрахунку) за рахунок застосування сучасних підходів моделювання фізико-хімічних процесів при зварюванні та економічних алгоритмів вирішення нелінійних завдань і систем диференційних рівнянь високого порядку;

– зниження трудомісткості за рахунок простого інтерфейсу введення даних і повної автоматизації процесів створення математичної моделі, формування скінченно-елементної сітки, пошуку рішення та візуалізації результатів;

– виключення обслуговуючого персоналу, оскільки працювати з програмою може інженер-зварник або технолог, а не тільки фахівець із чисельних методів вирішення математичних завдань.

Загальний опис і призначення комп'ютерної програми. Комп'ютерна програма «Girth Weld» являє собою самостійний проблемно-орієнтований програмний продукт для чисельного скінченно-елементного аналізу технологічних і фізико-механічних процесів при багатопрхідному зварюванні кільцевих з'єднань трубопровідних елементів і посудин тиску. Програма призначена для вирішення характерних завдань експертного аналізу технологічної міцності відповідальних конструкцій при плануванні монтажного та/або ремонтного зварювання та післязварювальної термообробки кільцевих з'єднань, а також прогнозуванні короточасної та тривалої статичної міцності в процесі подальшої експлуатації зварної конструкції з урахуванням як її залишкового післязварювального стану, так і всього комплексу діючих зовнішніх робочих навантажень.

Комп'ютерна програма «Girth Weld» рекомендована до застосування організаціями енергетичної, транспортної та аерокосмічної галузей при проектуванні, оптимізації монтажу та плануванні ремонтних робіт відповідальних трубопровідних елементів та посудин тиску з окржними зварними з'єднаннями. Також цей програмний код рекомендується використовувати при обґрунтуванні працездатності та експертній оцінці ресурсу безпечної експлуатації зварних конструкцій з урахуванням як їх прогнозованого стану та умов роботи, так і беручи до уваги виявлені при технічній діагностиці дефекти несущільності (тріщини, неметалеві включення, локальні стоншення, газові пори).

Використання комп'ютерної програми «Girth Weld» дозволяє вирішити такі завдання:

– розрахунок оптимального розкладання валиків при багатопрхідному зварюванні залежно від технічних умов процесу та критеріїв оптимізації зварювання;

– визначення кінетики температурного поля при багатопрхідному зварюванні кільцевих швів трубопровідних елементів та посудин тиску з урахуванням технологічних параметрів зварювального процесу, геометричних особливостей

конкретної конструкції, типу та властивостей матеріалу в залежності від хімічного складу та поточної температури;

– чисельна оцінка специфіки формування зони проплавлення по товщині конструктивного елемента;

– прогнозування поточних і залишкових властивостей, а також мікроструктурного фазового складу металу зварного шва та зони термічного впливу залежно від типу зварювального та основного матеріалів і умов термічного впливу при зварюванні;

– прогнозування кінетики поля пружно-пластичних деформацій у процесі багатопрхідного зварювання стикового кільцевого шва аж до повного остигання конструкційного елемента та подальшого експлуатаційного силового й термічного впливу;

– моделювання розподілу механічних напружень у конструкції, обумовлених як зварювальним впливом (тимчасові та залишкові), так і впливом температурно-силових умов експлуатації конкретного виробу;

– розрахунок залишкової формозміни конструкції у результаті нерівномірного зварювального нагріву за допомогою оцінки незворотних усадкових явищ в області зварного з'єднання;

– чисельна оцінка кінетики накопичення залишкових пластичних деформацій, яка є важливою характеристикою схильності металу конструкції, що зварюється, до гарячого розтріскування.

Графічний інтерфейс користувача комп'ютерної програми «Girth Weld» реалізує діалоговий режим проведення чисельного аналізу та передбачає наступні можливості відображення на екрані й збереження у вигляді файлів або твердих копій наступних результатів чисельних експериментів:

– оптимальні розрахункові схеми розкладання валиків у розділці кільцевого шва;

– двовимірні розподіли розрахункових величин (температур, максимальних миттєвих температур, напружень, деформацій, пластичних деформацій, зони проплавлення) як у формі малюнків, так і таблиць;

– розподіл мікроструктурних фазових складових і механічних властивостей металу конструкції в області зварного шва з урахуванням впливу локального нагріву в процесі багатопрхідного зварювання з відомими параметрами тепловкладення;

– ризики утворення холодних і гарячих тріщин;

– форма конструкції після зварювання з урахуванням незворотних зварювальних деформацій усадки;

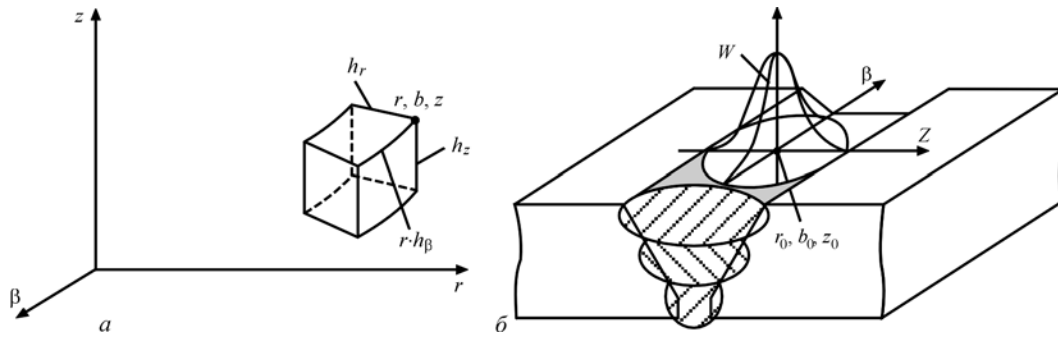


Рис. 1. Схема об'ємного елемента в циліндричній системі координат (r, β, z) (а); розподіл теплової потужності $W(r, \beta, z, t)$ при багатопрхідному зварюванні (б)

- релаксація залишкових напружень за рахунок післязварювальної термообробки;
- перерозподіл залишкових напружень в умовах навантаження (температура та внутрішній тиск);
- оцінка опору втоми кільцевого зварного з'єднання в умовах циклічного навантаження;
- імовірнісна оцінка працездатності циліндричної конструкції за наявності макроскопічних дефектів несучільності металу шва.

Методи чисельної та програмної реалізації розрахункових алгоритмів програми. Розробка математичної моделі для моделювання процесів зварювання залежить від мети моделювання. Для прогнозування температурних циклів, об'ємних часток фаз мікроструктури, деформацій і залишкових напружень у багатопрхідному зварному з'єднанні зазвичай використовують скінченно-елементні моделі об'ємного джерела тепла та неізо-термічного деформування матеріалу, асоційованого з умовою текучості Мізеса [1, 2]. Моделювання базується на відстеженні кінетики формування та розвитку пластичних деформацій і напружень у зварному виробі під час нагрівання та охолодження кожного зварювального проходу з'єднання. Враховуються мікроструктури перетворення, які викликають об'ємні ефекти та зміну фізико-механічних властивостей матеріалу в зоні зварювання.

У загальному вигляді при зварюванні в системі координат r, β, z (рис. 1, а) під час руху за часом центра джерела нагріву $r_0(t), \beta_0(t), z_0(t)$, виділення тепла в точці r, β, z у момент часу t описується залежністю:

$$W(r, \beta, z, t) = W_0(t) \exp [-K_r(r-r_0)^2 - K_\beta(\beta-\beta_0)^2 - K_z(z-z_0)^2], \quad (1)$$

де $W_0(t)$ – тепла потужність в точці (r_0, β_0, z_0) ; K_r, K_β, K_z – коефіцієнти концентрації нагріву в напрямках r, β, z відповідно. Між K_r, K_β, K_z і відповідними розмірами ефективної зони нагріву d_r, d_β, d_z

існує зв'язок $K_j = \frac{d_j^2}{4} = 3,0, d_j = \frac{3,46}{\sqrt{K_j}}$. $W_0(t)$ мож-

на виразити через ефективну потужність нагріву $q_{ef}(t)$, інтегруючи (1) за x, y, z у межах виробу, що нагрівається. Наприклад, якщо джерело рухається по поверхні масивного циліндра вздовж зварного з'єднання (рис. 1, б), тоді:

$$W_0(t) = \frac{2q_{ef}(t)\sqrt{K_x \cdot K_y \cdot K_z}}{\pi\sqrt{\pi}}. \quad (2)$$

При задаванні достатньо адекватних значень K_x, K_y, K_z можна отримувати досить точні результати за температурами поблизу зони плавлення матеріалу, який зварюється, що важливо з позицій мікроструктурних фазових перетворень, механічних властивостей і т.п.

Математичне формулювання задачі поширення тепла в теплопровідному тілі згідно із заданим джерелом нагріву $W(r, z, \beta, t)$ та відповідними умовами теплообміну з навколишнім середовищем з температурою T_c за законом Ньютона:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_T (T - T_c), \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу за температури T , α_T – коефіцієнт поверхневого теплообміну [3].

До умов (3) потрібно додати початкову умову при $t = 0$ та диференціальне рівняння теплопровідності, яке в системі координат (r, β, z) має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \beta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(r, \beta, z, t) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$$T(r, \beta, z, t = 0) = T_0 \quad (5)$$

де $c\gamma$ – об'ємна теплоємність матеріалу за температури T .

Об'ємні ефекти, викликані зміною температурного поля, умовно поділяють на температурні та ефекти, викликані мікроструктурними перетвореннями [5]. Температурні об'ємні ефекти у будь-якій точці зварного з'єднання:

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

де φ – функція температурних подовжень, $\alpha(T)$ – середнє значення коефіцієнта відносного температурного подовження в діапазоні температур $(T_0 - T)$.

При зварюванні сталей, схильних до загартування, мікроструктурний склад у будь-якій точці ЗП та ЗТВ визначається в момент часу t величинами відносного вмісту j -ї фази $V_j(t)$, де $j = a$ відповідає аустеніту, $j = m$ – мартенситу, $j = f$ – фериту, $j = b$ – бейніту, $j = fp$ – ферито-перлітній суміші. При цьому $\sum V_j(t) \equiv 1$. Об'ємні ефекти в будь-якій точці за рахунок мікроструктурних перетворень в діапазоні температур $(T_0 - T)$:

$$3\varphi = \frac{\sum V_j(T,t)\gamma_j(T) - \sum V_j(T_0)\gamma_j(T_0)}{\sum V_j(T_0)\gamma_j(T_0)}, \quad (7)$$

де $\gamma_j(T)$ – об'єм одиниці маси j -ої фази за температури T . Згідно з [3] для конструкційних сталей, $\text{см}^3/\text{г}$:

$$\begin{aligned} \gamma_m(T) &= 0,12282 + 8,56 \cdot 10^{-6}T + 2,15 \cdot 10^{-3}C \\ \gamma_a(T) &= 0,12708 + 4,448 \cdot 10^{-6}T + 2,79 \cdot 10^{-3}C; \quad (8) \\ \gamma_{b,fp}(T) &= 0,12708 + 5,528 \cdot 10^{-6}T. \end{aligned}$$

Границя текучості матеріалу скінченного елемента (об'єму) при температурі T з урахуванням мікроструктурних перетворень розраховується як:

$$\begin{aligned} \sigma_T(T) &= \sum \sigma_j(T)V_j(T), \quad (j = a, f, fp, b, m) \\ \sigma_T^j(T) &= \sigma_T^j(20) \cdot f_j(T) \end{aligned} \quad (9)$$

де $\sigma_j(T)$ – границя текучості відповідної j -ї мікроструктурної фази при температурі T , C – хімічний вміст вуглецю (% за вагою).

Високі температури при зварювальному нагріванні та сильна нерівномірність у розподілі функції $\varphi(r, \beta, z, t)$ зумовлюють появу як пружних деформацій, так і непружних. Прийнято загальний тензор деформацій $\varepsilon_{ij}(r, \beta, z, t)$ представляти у вигляді суми трьох тензорів:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c, \quad (10)$$

де індекс e – відповідає пружній деформації; p – деформації миттєвої пластичності; c – деформації дифузійної пластичності чи повзучості.

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

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad i, j = x, y, z, \quad (11)$$

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

σ_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:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)dt, \quad (12)$$

де $\Omega(\sigma_i, T)$ – скалярна функція повзучості матеріалу при температурі T і рівні напруженості, що визначається інтенсивністю напружень σ_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°C і вище, можна апроксимувати типовою залежністю:

$$\Omega(\sigma_i, T) = A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{G}{T + 273}\right), \quad (13)$$

де A, G, n – 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°C і вище. Ця модель може бути ефективною при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній термообробці зварних 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.

Приріст тензора деформації $\Delta\varepsilon_{ij}$ у діапазоні часу від $(t - \Delta t)$ до t , де Δt – крок відстеження, який є досить малим:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi) - b_{ij}, \quad (i, j = x, y, z) \\ \psi &= \frac{1}{2G} + \Delta\lambda + \Delta t \Omega(T, \sigma_{eq}), \\ b_{ij} &= \left[\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma) \right]_{t-\Delta t} - \delta_{ij}\Delta\varphi \end{aligned} \quad (14)$$

де σ_{ij} – тензор напружень; σ – середній тиск; σ_e – еквівалентні напруження; δ_{ij} – одиничний тензор; модуль об'ємного стиснення $K = \frac{1-2\nu}{E}$; модуль зсуву $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; E – модуль Юнга; ν – коефі-

ціент Пуассона; $\Delta\lambda$ – скалярна функція; $\Omega(T, \sigma_{eq})$ – функція повзучості.

Рівняння зв'язку (14) містить функцію ψ , що визначається умовою пластичної течії (11) та розвитком деформацій повзучості (12). Ця функція істотно залежить від вихідного рішення для моменту t та її визначення вимагає певних підходів. Найпростіші підходи ґрунтуються на використанні рішення для моменту $(t - \Delta t)$. За рахунок зменшення кроку Δt можна помітно знизити похибки, пов'язані з ризиком отримання неприпустимих станів (11). Проте при зварювальному нагріванні такий ризик дуже суттєвий, тому більш поширеними є підходи, засновані на побудові відповідних ітераційних процесів розкриття фізичної нелінійності, пов'язаної з $\Delta\lambda$ і $\Omega(T, \sigma_{eq})$.

Добре апробований практикою наступний ітераційний процес:

$$\psi^{(n+1)} = \left[\frac{1}{2G} + \Delta t \Omega(T, \sigma_{eq}^{(n-1)}) \right] (1-p) + p\psi^{(n)},$$

якщо $\sigma_{eq}^{(n)} - \sigma_s(T, \sigma_{eq}^{(n)}) < -m$;

$$\psi^{(n+1)} = \psi^{(n)}, \text{ якщо } -m < \sigma_i^{(n)} - \sigma_s(T, \sigma_{eq}^{(n)}) < m; \quad (15)$$

$$\psi^{(n+1)} = \psi^{(n)} \cdot \frac{\sigma_{eq}^{(n)}}{\sigma_s(T, \sigma_{eq}^{(n)})}, \text{ якщо } \sigma_{eq}^{(n)} - \sigma_s(T, \sigma_{eq}^{(n)}) > m.$$

Процес (15) закінчується, якщо:

$$\left| \frac{\psi^{(n+1)}}{\psi^{(n)}} - 1 \right| < \delta, \quad (16)$$

де $n, n+1$ – номери ітерацій, $0 \leq p < 1, m \ll \sigma_s(T, \sigma_{eq}^{(n)})$, $\delta \leq 1$ – параметри ітераційного процесу.

Після процедури лінеаризації структура рівняння зв'язку (14) формально відповідає рівнянню нерозривності теорії пружності зі змінними параметрами пружності (ψ замість $1/2G$), і додатковими деформаціями b_{ij} , значення яких відоме згідно з рішенням на попередньому кроці стеження $(t - \Delta t)$ і полем температури в моменти t і $(t - \Delta t)$.

Оскільки в більшості типових випадків зварювання та експлуатації трубопровідних елементів і посудин тиску розподіл полів напружень і деформацій характеризується незначною зміною в окружному напрямку (вздовж лінії зварного з'єднання), з метою зниження часу чисельного дослідження та вимог до потужності обчислювальних засобів чисельні схеми у програмному коді реалізовані у двовимірній осесиметричній постановці.

Дана комп'ютерна програма забезпечена базою вхідних даних фізико-механічних властивостей типових сталей і алюмінієвих сплавів, які використовуються для виробництва трубопровідних елементів і посудин тиску, що спрощує порядок проведення розрахунків і знижує похибку результатів чисельного аналізу, зумовлену неповнотою наявної у користувача довідкової інформації. Аналогічно геометрія обробки зварного стикового з'єднання може бути визначена як з набору наявних попередньо встановлених варіантів, які

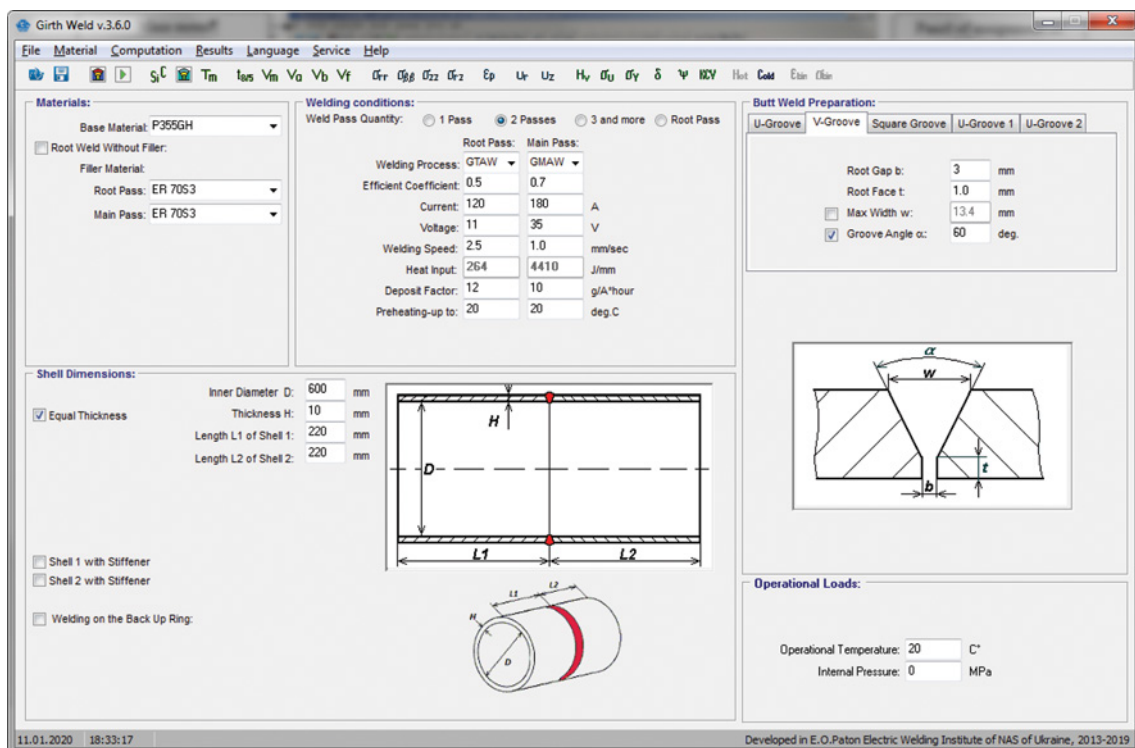


Рис. 2. Основне вікно комп'ютерної програми «Girth Weld»

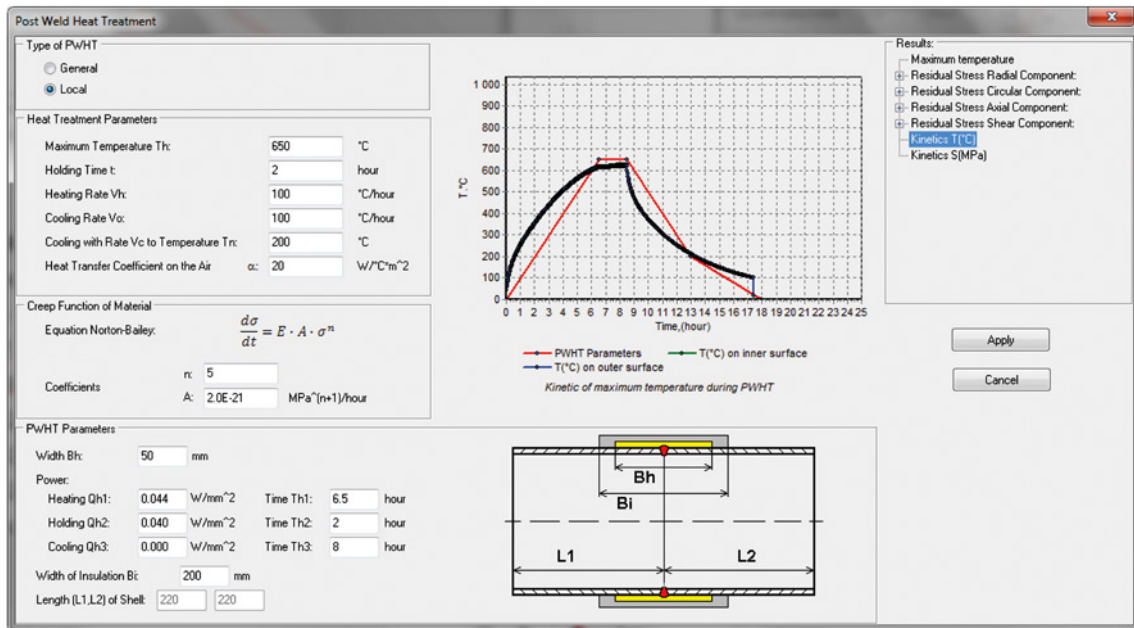


Рис. 3. Вікно моделювання післязварювальної термообробки використовуються для конструкційних елементів відповідального призначення, так і введена користувачем у разі наявності необхідної інформації щодо конкретного конструктивного рішення.

Інтерфейс користувача. Інтерфейс користувача програмного забезпечення призначений для інженерів зі зварювання, які не мають спеціальних знань у математичних методах. Усі завдання з розробки скінченно-елементної моделі кільцевого багатопрохідного зварного з'єднання циліндричної конструкції повністю автоматизовані. Усі розрахункові результати можна представити як у графічній, так і в табличній формі. Є можливість скопіювати інформацію з будь-якого вікна в графічний файл, буфер обміну або на принтер. Для збереження всіх вхідних даних і результатів обчислень є функція для збереження варіанту. Доступні мови інтерфейсу: англійська, російська. На рис. 2–4 наведено вигляд вікон комп'ютерної програми. Основне вікно (рис. 2) – для введення розмірів циліндричної конструкції і кільцевого зварного з'єднання, основного матеріалу та зварювального матеріалу, режимів зварювання та експлуатаційного навантаження. Також наведено вигляд вікон моделювання післязварювальної термообробки (рис. 3) і модуля для ймовірнісної оцінки допустимості тріщиноподібного дефекту в зоні кільцевого зварного з'єднання (рис. 4).

Основні обмеження комп'ютерної програми:

- металеві матеріали: сталі, легкі сплави, титанові та нікелеві сплави;
- розміри циліндричної конструкції:
 - діаметр $D = 2...10000$ мм,
 - товщина стінки $H = 1...20$ мм, $H < D/2$,

- довжина $2L = 30...2000$ мм, $L > 30H$;
- оброблення кромки зварного кільцевого з'єднання одностороннє (із зовнішнього боку);
- кількість зварювальних проходів у кільцевому з'єднанні не більше 200;
- матеріал конструкції розглядається як макросуцільне ізотропне пружно-пластичне середовище, здатне до деформаційного зміцнення;
- максимальні температури при зварюванні не перевищують температури кипіння металу конструкції;
- конструкції не схильні до впливу криогенних температур під час експлуатації;

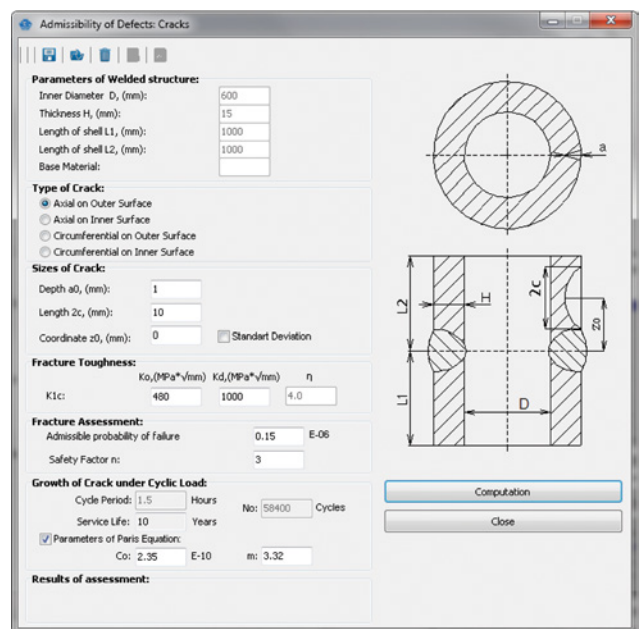


Рис. 4. Вікно модуля для ймовірнісної оцінки допустимості тріщиноподібного дефекту в зоні кільцевого зварного з'єднання

– експлуатаційні навантаження: внутрішній тиск від 0 до $P < (0,5 \cdot \sigma_T \cdot 2H/D)$; наприклад, якщо $H = 5$ мм, $D = 400$ мм, $\sigma_T = 170$ МПа, тоді $P < 2,125$ МПа;

– допустимість дефектів визначається умовами статичної або квазістатичної міцності, при цьому застосування методів оцінки відповідає рамкам застосування конкретних критеріїв, що використовуються згідно з відповідними нормативними документами;

– тріщини: напівеліптичні в осьовому та окружному напрямках, на зовнішній і внутрішній поверхнях; розміри тріщин: глибина $a_0 < H$, довжина $2c_0$, $a/c < 0,7$; зростання тріщин за механізмом втоми;

– пори: діаметр $d_0 < 1,0$ мм, глибина r_0 ; $d_0/2 < r_0 < H-d_0/2$;

– стоншення стінки: на зовнішній і внутрішній поверхнях; розміри стоншення: глибина a_0 ; $a_0 < H/2$, довжина $2s_0$; $2s_0 < L/2$; зростання стоншень за механізмом корозії.

Похибка, що забезпечується в області допустимих параметрів чисельного аналізу. Адекватність розроблених моделей та їх програмної реалізації забезпечується та підтверджується як проведеними валідаційно-верифікаційними процедурами, так і досвідом успішного впровадження та використання окремих методик і програмного забезпечення в цілому при оптимізації промислових циклів зварювання кільцевих швів відповідальних конструкцій та підтвердження їх працездатності й ресурсу вітчизняними та зарубіжними підприємствами енергетичної, машинобудівної, транспортної, аерокосмічної галузей.

Як показує порівняння результатів розрахунків за допомогою комп'ютерної програми «Girth Weld» вер.3.6 з натурними експериментальними вимірами, похибка чисельного аналізу не перевищує 10...15 %.

Верифікація результатів моделювання зварювання різнорідного кільцевого з'єднання

трубопроводу. Залишкові напруження є важливими для розгляду проблем розтріскування та руйнування зварних конструкцій і можуть бути змодельовані для процесу зварювання. Розробка нових жаростійких сталей для енергетики, де часто використовуються труби, зварені круговим зварюванням, потребує вивчення впливу процесів зварювання та залишкових напружень на безпечну й надійну роботу електростанцій.

Скінченно-елементне моделювання багатопрхідного процесу зварювання SMAW (ручне зварювання електродами) проводилося для стикового зварного з'єднання труби із зовнішнім діаметром 42 мм і товщиною стінки 7 мм з 12 % Cr сталі та різнорідних матеріалів (аустенітна або перлітна сталь). Такі зварні з'єднання використовуються для труб у пароперегрівачах котла на теплоелектростанціях.

Метою математичного моделювання є прогнозування температурних полів і кінетики напружено-деформованого стану при багатопрхідному зварюванні з урахуванням мартенситного класу сталі, вибору зварювальних матеріалів, умов зварювання, температури попереднього підігріву, а також визначення залишкового напруженого стану після зварювання та можливої післязварювальної термообробки.

Після попередніх експериментів з відпрацюванням технології зварювання був обраний більш прийнятний варіант параметрів зварювання. Заповнення розділки – чотирма проходами зварювання (рис. 5). Для різнорідного зварного з'єднання (сталь 12 % Cr + аустенітна сталь 0,12C-Cr18Ni10T) обрано електроди типу E-0.11C-Cr16Ni25Mo6Mn2N діаметром 3,0 мм. Параметри зварювання: 1-й прохід $I = 75...85$ А, $U = 24$ В, $V \approx 1,8$ мм/с; 2–4-й проходи $I = 85...90$ А, $U = 24$ В, $V \approx 2,6$ мм/с.

Хімічний склад, механічні та термічні властивості основних матеріалів і наповнювача представлені в табл. 1, 2.

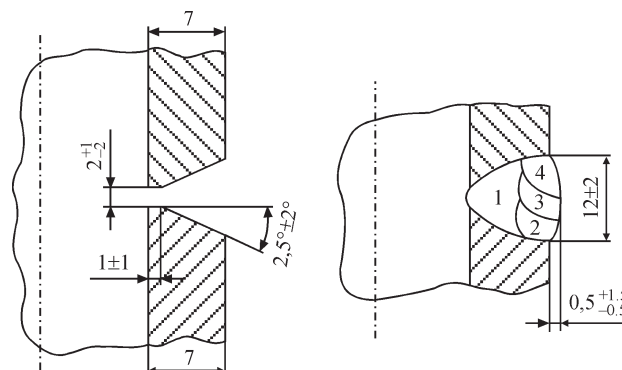


Рис. 5. Підготовка кромки одного U-типу для зварних з'єднань труб (процес зварювання SMAW) (а), передбачувана конфігурація зварного шва та розташування зварних валиків (б)

Таблиця 1. Механічні та теплофізичні властивості матеріалів різнохідного зварного з'єднання

$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{МПа}$	$\alpha, 10^{-6} 1/\text{K}$	$\lambda, \text{Дж}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C})$	$c, \text{Дж}/(\text{см}^3\cdot^\circ\text{C})$
Сталь мартенситна 12 % Cr				
20	215404	12,1	0,18	3,53
100	211697	12,1	0,19	3,75
200	205591	12,4	0,20	4,02
300	197750	12,8	0,22	4,32
400	188169	13,1	0,23	4,68
500	177028	13,5	0,24	5,15
600	164580	13,9	0,25	6,09
700	154030	13,0	0,27	6,00
800	131900	12,1	0,29	5,20
900	120604	11,1	0,31	4,64
1000	111687	12,5	0,32	4,75
1100	102607	13,6	0,33	4,90
1400	34172	17,5	0,36	9,50
1500	0	24,1	0,35	5,64
Сталь аустенітна 0,12C-Cr18Ni10T				
20	196531	19	0,146	3,54
100	191369	19	0,156	3,70
200	184280	19	0,168	3,86
300	176922	20	0,180	3,99
400	169296	20	0,193	4,11
500	161416	20	0,205	4,24
600	153303	20	0,218	8,32
700	141463	21	0,236	4,73
800	133320	21	0,249	4,56
900	125217	21	0,262	4,77
1000	116988	22	0,275	4,80
1100	108545	22	0,288	4,96
1200	99881	22	0,301	5,13
1300	88793	23	0,316	5,87
1400	2102	26	0,319	27,00
1500	0	30	0,319	5,64
Зварювальний матеріал E-0.11C-Cr16Ni25Mo6Mn2N (аустенітний)				
20	203437	18	0,119	3,58
100	198385	18	0,130	3,73
200	191493	18	0,145	3,87
300	184422	18	0,160	3,99
400	177172	19	0,175	4,10
500	169742	19	0,190	4,21
600	162130	19	0,205	4,41
700	153178	19	0,220	4,57
800	144799	20	0,235	4,84
900	135985	20	0,249	5,05
1000	126625	21	0,263	5,32
1100	117816	21	0,277	4,88
1200	109326	21	0,292	4,99
1300	100669	21	0,307	5,10
1400	74695	22	0,320	11,56
1500	0	28	0,319	5,74

Враховуючи мартенситний клас високохромистої (12 %) сталі, прийнято наступні умови фазового перетворення мікроструктури ЗТВ:
якщо $T > A_c$, тоді $V_a = 1,0$, $V_m = 0$

$$\text{якщо } T < A_c \text{ та } \left(\frac{\partial T}{\partial t} < 0 \right), \text{ тоді } V_j = V_j(T, t), j = a, m$$

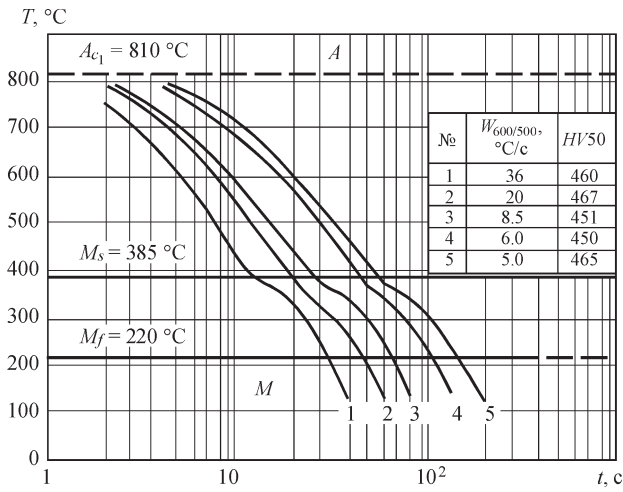


Рис. 6. Термокінетична діаграма розпаду аустеніту для сталі X10CrMoVNb91 [4]

$$V_m(T) = 1 - \exp\left(3 \frac{T_s^{(m)} - T}{T_s^{(m)} - T_e^{(m)}}\right); \quad (17)$$

$$V_a(T) = 1 - V_m(T), \quad \sum_j V_j(t) \equiv 1;$$

де $j = a$ відповідає аустеніту, $j = m$ – мартенситу, $V_j(T, t)$ – визначається за термокінетичною діаграмою розпаду аустеніту сталі з відповідним хімічним складом. Приклад такої діаграми наведено на рис. 6 для сталі X10CrMoVNb91 [4].

Порівняння результатів чисельних розрахунків за моделями 2D і 3D для чотирипрохідного стикового зварювання труб із різномірних матеріалів (12 % Cr сталь + аустенітна сталь 0,12C-Cr18Ni10T) показує задовільний збіг.

Результати за 2D і 3D моделями на рис. 9 показують досить близькі розподіли максимальних температур при зварюванні всіх чотирьох про-

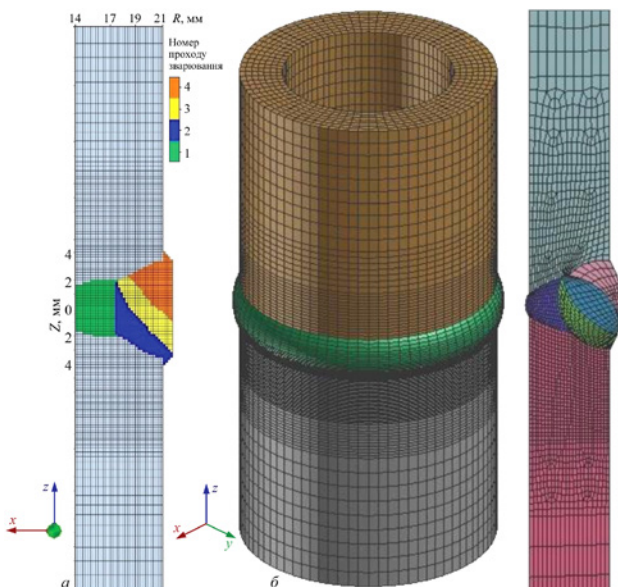


Рис. 8. Скінченно-елементна сітка 2D (а) і 3D (б) моделі кільцевого стикового з'єднання труби

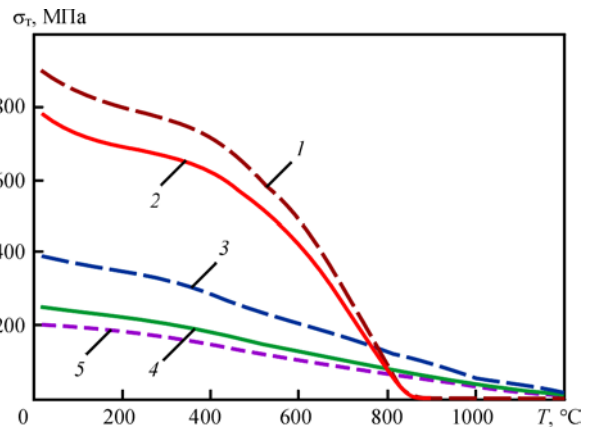


Рис. 7. Залежність границі текучості від температури та стану мікроструктури: 1 – $V_m = 1,0$ мартенсит Thermanit MTS616; 2 – $V_m = 1,0$ мартенсит сталі 12 % Cr; 3 – $V_a = 1,0$ аустеніт сталі 12 % Cr; 4 – аустенітний наповнювач E-0,11C-Cr16Ni25Mo6Mn2N; 5 – аустенітний основний матеріал 0,12C-Cr18Ni10T

дів. На діаграмах червоний колір відповідає формі зони плавлення, розмір ЗТВ обмежений ізотермою 800...850 °C і досягає приблизно 1,5...2,5 мм, відстань проплавлення металу шва в основний матеріал становить приблизно 1 мм. Розплавлені зони, відстань проплавлення зварного шва та діапазон температур у ЗТВ відповідають загальним тепловим очікуванням.

На рис. 10 наведено розрахункові розподіли зварювальних залишкових напружень (окружна складова). У зоні розплаву, де присадний матеріал має аустенітну мікроструктуру, виникають високі напруження розтягу до 450 МПа. Поруч із зоною плавлення в ЗТВ основного матеріалу сталі 12 % Cr (нижня частина труби на рис. 10) через мартенситне перетворення з'являються локальні високі напруження стиснення до -350 МПа, а також локальні напруження розтягу до 180...300 МПа за 2D аналізом і до 50 МПа за 3D аналізом, які врівноважують напруження стиснення. Ширина зони кільцевих залишкових напружень розтягу в трубі досить мала (приблизно 2 мм). Далі на периферії труби зі сталі 12 % Cr виникають стискаючі напруження до -640 МПа на внутрішній поверхні та розтягуювальні напруження до 180 МПа – на зовнішній поверхні. На рис. 11 показано залишкові кільцеві напруження по товщині зварного з'єднання 2D моделі та у різних перерізах за кутовою координатою від місця початку-закінчення зварювання 3D моделі (0, 90, 180, 270 °). Одна крива напружень значно відрізняється від іншої через ефект початку та кінця зварювання в 3D моделі. Кільцеві напруження, визначені двовимірною моделлю, близькі до результатів тривимірної моделі.

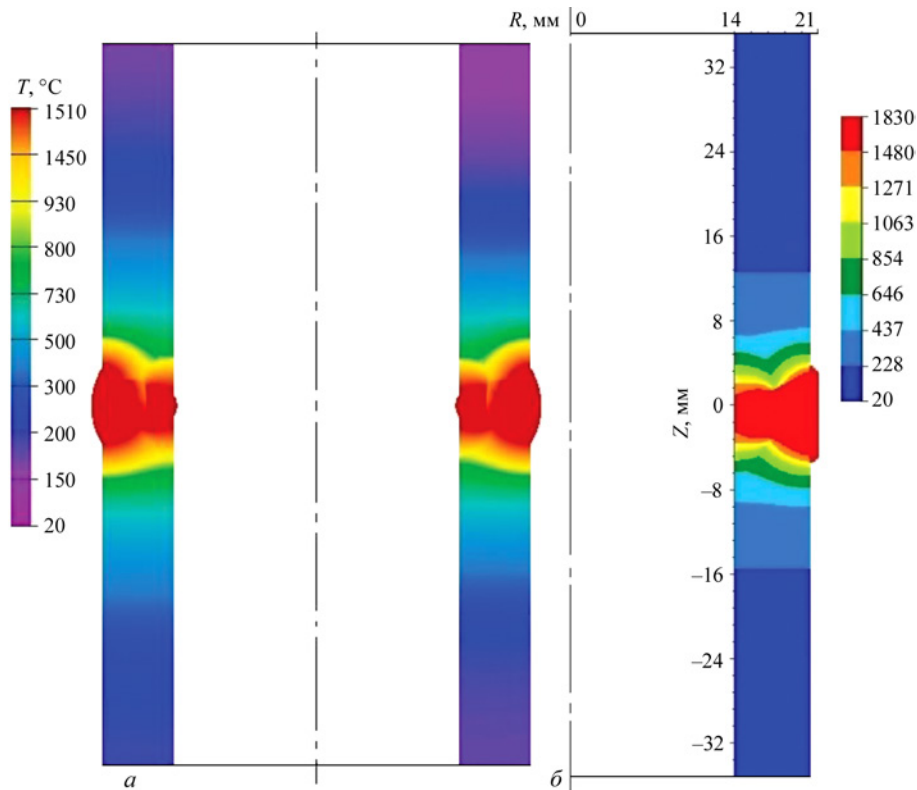


Рис. 9. Порівняння розрахункових розподілів максимальної температури та зон розплавлення (червоний колір) у поперечному перерізі кільцевого зварного з'єднання труби: *a* – 3D модель; *б* – 2D модель «Girth Weld»

Результати розподілу зварювальних залишкових напружень для осової компоненти на рис. 12, 13 за 2D і 3D моделями також добре збігаються. Мартенситна структура сталі 12 % Cr викликає зміну маючих традиційний вигляд залишкових осових напружень розтягу на внутрішній поверхні на напруження стиснення до -400 МПа і, від-

повідно, напруження стиснення на зовнішній поверхні – на напруження розтягу до 400 МПа. Цей ефект може бути позитивним для труб з корозійним середовищем з внутрішньої сторони.

Незважаючи на незначну різницю розподілу залишкових напружень, визначених 3D моделлю в різних поперечних перерізах труби за кутвою

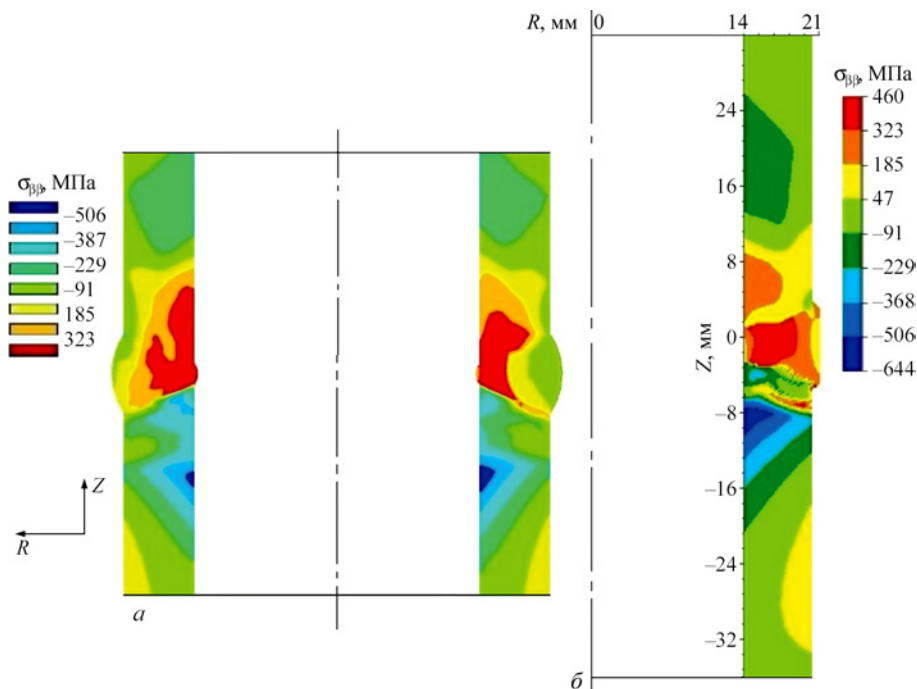


Рис. 10. Порівняння чисельно розрахованих розподілів зварювальних залишкових напружень (окружна компонента): *a* – 3D модель; *б* – 2D модель «Girth Weld»

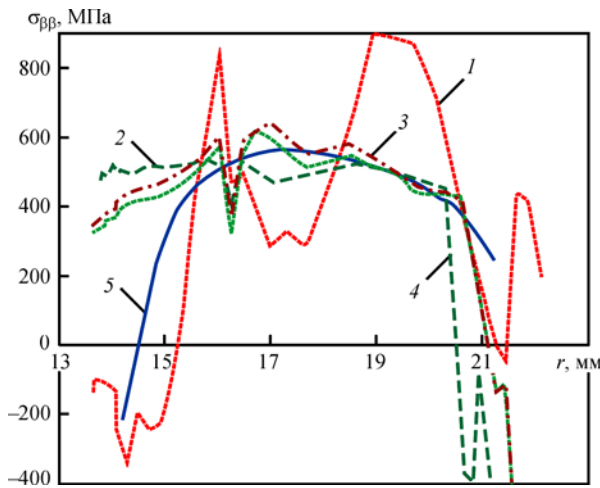


Рис. 11. Залишкові кільцеві напруження по товщині зварного з'єднання 2D моделі та у різних перерізах за кутовою координатою від місця початку-закінчення зварювання 3D моделі (1 – 0°, 2 – 90°, 3 – 180°, 4 – 270°)

координатою, прийнято хорошу узгодженість з 2D моделлю. Таким чином, 2D модель кільцевого з'єднання можна використовувати для моделювання розподілів максимальних температур, мікроструктурного фазового складу, механічних властивостей, залишкових напружень і деформацій при багатопрхідному зварюванні стикового з'єднання трубопроводів і циліндричних оболонок (посудин).

Валідація результатів моделювання багатопрхідного зварювання кільцевого з'єднання трубопроводу. Розрахунки за допомогою комп'ютерної програми «Girth Weld» дозволили отримати

повну інформацію щодо розподілу зварювальних напружень по всьому об'єму зварного з'єднання головного циркуляційного трубопроводу Ду850 для реакторів типу ВВЕР-1000. Для валідації результатів розрахунку використовувались дані експериментальних вимірювань, які були виконані на зразку-макеті зварного з'єднання елементів ГЦТ Ду850 на доступних поверхнях зварних елементів після проведення термообробки за режимом високого відпустку з метою порівняння з розрахунковими даними.

В основу розрахункової методики покладено послідовне простеження розвитку температурних полів, напружень і деформацій при послідовному заповненні оброблення зварного шва окремими валиками (рис. 14). Для кожного проходу на основі експериментальних даних щодо параметрів режиму дугового зварювання неплавким електродом у середовищі аргону визначалися розміри зони проплавлення й зони термічного впливу основного матеріалу (сталь 10ГН2МФАА). За розмірами зони проплавлення та хімічним складом присадного металу (дріт Св-08Г1НМА) визначався хімічний склад зон проплавлення кожного валика.

Для моделювання мікроструктурних фазових перетворень у ЗТВ низьколегованих сталей під час зварювання або наплавлення застосовувався підхід, заснований на використанні параметричних (регресійних) рівнянь, отриманих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [5].

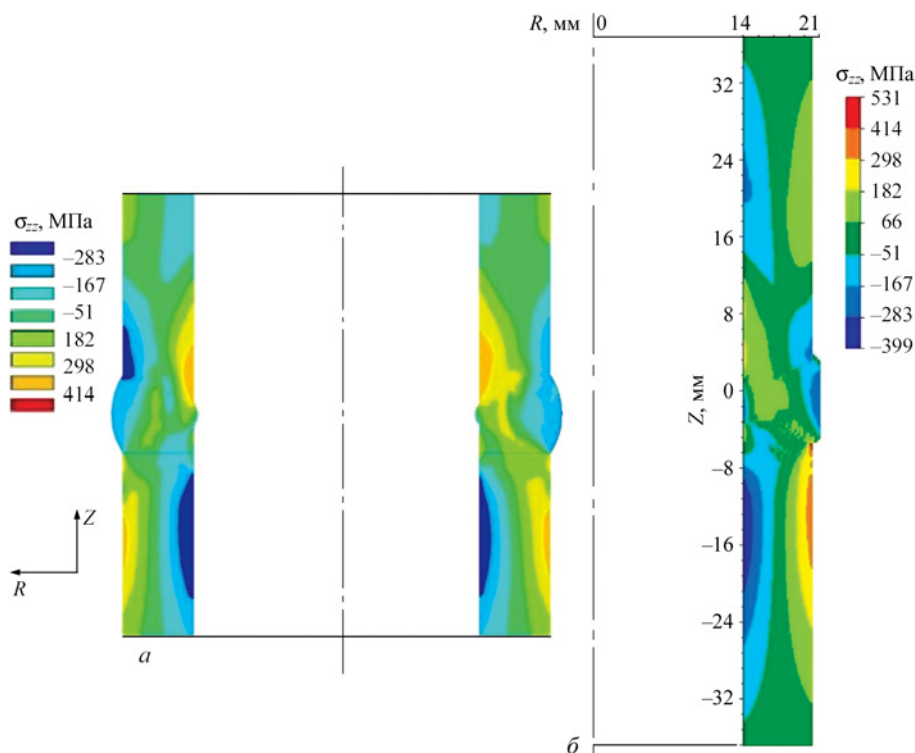


Рис. 12. Порівняння чисельно розрахованих розподілів зварювальних залишкових напружень (осьова компонента): а – 3D модель; б – 2D модель «Girth Weld»

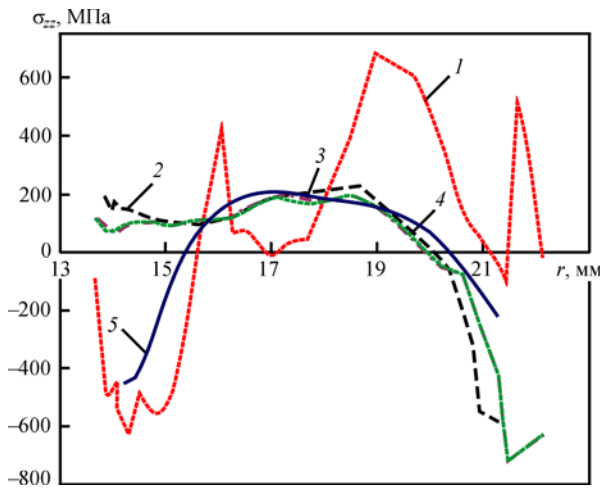


Рис. 13. Залишкові осьові напруження по товщині зварного з'єднання 2D моделі та у різних перерізах за кутовою координатою від місця початку–закінчення зварювання 3D моделі (1 – 0°, 2 – 90°, 3 – 180°, 4 – 270°)

Згідно з кінетикою мікроструктурних перетворень у металі шва і ЗТВ визначали об'ємні ефекти у відповідні моменти часу t при температурі T . Для сталі 10ГН2МФАА використовували для визначення γ залежності (8).

Величина границі текучості $\sigma_T(T)$ матеріалу скінченного елемента (об'єму) при температурі T з урахуванням мікроструктурних перетворень визначалась згідно з рівнянням (9). Коефіцієнти функції повзучості для основного матеріалу зварного з'єднання (сталі 10ГН2МФА) були визначені в [1] на основі обробки експериментальних даних: $n = 5$, $A = 8,46 \cdot 10^{17} \text{ МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{год}^{-1}$, $G = -66394 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 15 наведено розрахункові дані щодо розподілу залишкових напружень, окружної та осьової компоненти в зоні зварного кільцевого з'єднання ГЦТ ДУ850 після зварювання та проведення термообробки за режимом високого відпустку.

Експериментальні вимірювання залишкових напружень проводилися на завареному та термообробленому зразку-макеті зварного з'єднання. Вимірювання проводилися на поверхнях, тобто в

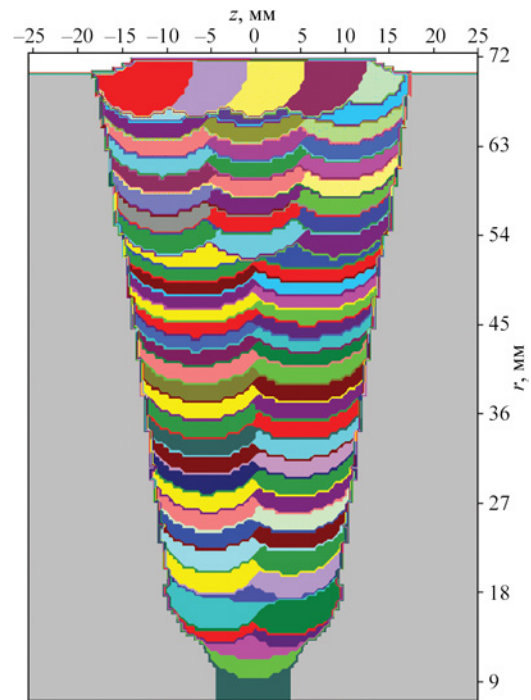


Рис. 14. Результати розрахункового моделювання заповнення обробки стику зварного з'єднання елементів ГЦТ ДУ850

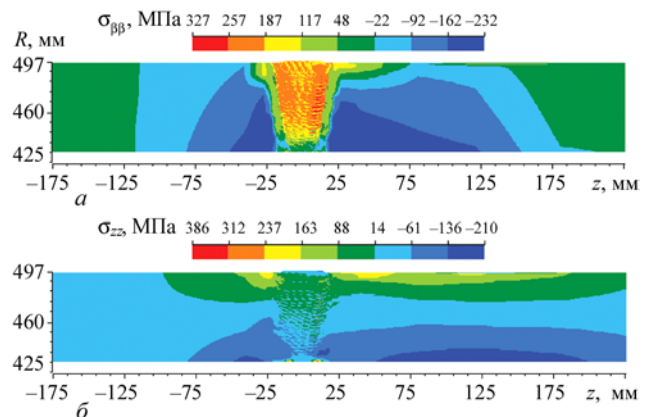


Рис. 15. Розрахункові дані щодо розподілу залишкових напружень в зоні зварного кільцевого з'єднання ГЦТ ДУ850 після проведення термообробки за режимом високого відпустку: а – окружна компонента; б – осьова компонента

місцях, доступних для встановлення тензодатчиків і подальшого свердління отворів для реалізації відомого методу Матара. Вимірювання було ви-

Таблиця 2. Режими зварювання при заповненні обробки кромок стикового зварного з'єднання дротом $\varnothing 0,9 \text{ мм}$

Порядок заповнення обробки	Зварювальні параметри					
	I , А імпульс/пауза	U_d , В	$V_{зв}$, мм/хв	Подача дроту, $V_{под}$, мм/хв, імпульс/пауза	Час, мкс імпульс/пауза	Витрати аргону, л/хв
Перший кореневий прохід (1)	150/120	9,5	80	880/360	100/100	20...25
Шар розгладжування (2)	160/90	10	86	–	100/100	20...25
Третій кореневий прохід (3)	220/130	11,5	91	2000/1000	225/275	20...25
Четвертий кореневий прохід (4)	250/150	11,5	89	2600/1300	225/275	20...25
Проміжний шар заповнення (5–8)	300/180	11,5	89	3400/1620	225/275	20...25
Шар основного заповнення (9–104)	340/200	12	110	3200/1620	225/275	20...25
Шар підсилення шва (105–112)	260/110	11,5	80,3	1520/1000	175/325	20...25

Таблиця 3. Механічні та теплофізичні властивості сталі 10ГН2МФА у залежності від температури [1]

$T, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\sigma_f(T), \text{МПа}$	$\lambda, \text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$	$c\gamma, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	ν	$\alpha, 1/^\circ\text{C}$
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

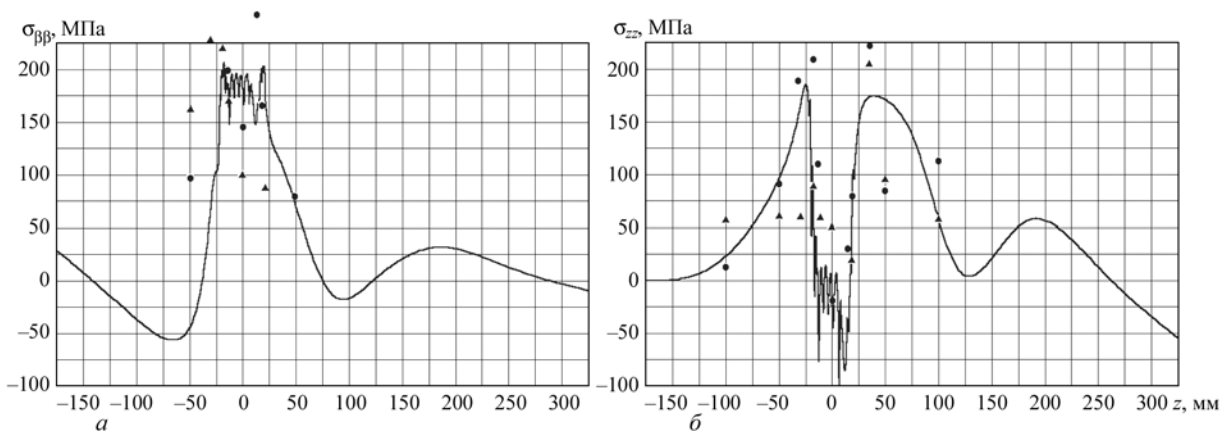


Рис. 16. Співставлення розрахункових та експериментальних даних щодо розподілу залишкових напружень на зовнішній поверхні зварного з'єднання ГЦТ ДУ850 [1]: а – окружна компонента; б – осьова компонента

конано у 24 місяцях. На рис. 16 показано співставлення розрахункових та експериментальних даних щодо розподілу залишкових напружень на зовнішній поверхні ГЦТ ДУ850, яке підтвердило досить високу точність розрахункової методики визначення залишкових зварювальних напружень.

Висновки

Комп'ютерна програма «Girth Weld» дозволяє для типових випадків зварних кільцевих з'єднань трубопроводів і посудин тиску розрахунковим шляхом отримувати інформацію щодо механічних властивостей металу зварного шва та ЗТВ, залишкових напружень і деформацій, визначати перерозподіл напружено-деформованого стану в результаті термічної обробки, впливу експлуатаційних і випробувальних навантажень, прогнозувати працездатність і ресурс зварних конструкцій з дефектами несучільності, які виявлені в результаті неруйнівного контролю або постулюються.

Комп'ютерна програма орієнтована для інженерного та наукового застосування й не вимагає від користувача спеціальної підготовки в галузі розрахункових методів за рахунок повної автома-

тизації процесів створення математичної моделі, розбиття області на скінченні елементи, пошуку рішення та візуалізації результатів.

При цьому програма забезпечує високу точність прогнозних результатів при обмежених вимогах до комп'ютерних і часових ресурсів за рахунок застосування сучасних підходів моделювання фізико-хімічних процесів при зварюванні та економічних алгоритмів вирішення нелінійних завдань і систем диференціальних рівнянь високого порядку.

Проведено розрахунки за двома тестовими завданнями, що мають практичний інтерес і відображають основні заявлені можливості комп'ютерної програми «Girth Weld». Результати верифікації свідчать про те, що реалізовані в програмі фізичні моделі та процеси є коректними, відповідають прийнятим сучасним походам опису фізико-хімічних процесів при зварювальному нагріванні, механіки тіла, що деформується, й механіки руйнування. Виходячи із задовільного збігу розрахункових результатів з даними експериментальних вимірювань на тестовому зразку (зварне кільцеве з'єднання трубопроводу Ду850 першого контуру реакто-

ра ВВЕР-1000 із перлітної сталі типу 10ГН2МФА), комп'ютерна програма «Girth Weld» пройшла валідацію та може використовуватися для моделювання механічних властивостей і напружено-деформованого стану в зоні стикових кільцевих зварних з'єднань трубопроводів і посудин тиску.

Список літератури

1. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Київ, Наук. думка.
2. Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, E.A., Pochinok, V.E., Makhnenko, O.V., Rozyuka, G.Ph., Pivtorak, N.I. (1999) Numerical methods for the predictions of welding stresses and distortions. *Welding and Surfacing Reviews*, 13(1), 1–146.
3. Юрьев С.Ф. (1950) *Удельные объемы фаз в мартенситном превращении аустенита*. М., Металлургиздат.
4. Mannesmann. CCT diagram for steel X10CrMoVNb91. — Data Sheet 435 R, material 1/4903. — February 1996 Edition.
5. Касаткин О.Г., Зайффарт П. (2002) Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при сварке низколегированных сталей. *Сборник трудов международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*. Киев, сс. 103–106.

6. Беломытцев М.Ю., Моляров В.Г. (1994) Исследование структуры и построение термокинетической диаграммы распада аустенита стали 10ГН2МФА. *Известия высших заведений. Черная металлургия*, 3, 47–49.

References

1. Makhnenko, V.I. (2006) *Resource of safe operation of welded joints and units of modern structures*. Kyiv, Naukova dumka [in Russian].
2. Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, E.A., Pochinok, V.E., Makhnenko, O.V., Rozyuka, G.Ph., Pivtorak, N.I. (1999) Numerical methods for the predictions of welding stresses and distortions. *Welding and Surfacing Reviews*, 13(1), 1–146.
3. Yuryev, S.F. (1950) *Specific volumes of phases in the martensitic transformation of austenite*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
4. Mannesmann. CCT diagram for steel X10CrMoVNb91. — Data Sheet 435 R, material 1/4903. — February 1996 Edition.
5. Kasatkin, O.G., Zeiffarth, P. (1001) Calculation models for evaluation of mechanical properties of HAZ metal in welding of low-alloy steels. In: *Collection of works of the international conference «Mathematical modeling and information technologies in welding and related processes»*. Kyiv, pp. 103–106 [in Russian].
6. Belomytsev, M.Yu., Molyarov, V.G. (1994) Study of the structure and construction of the thermokinetic diagram of the decomposition of austenite in 10GN2MFA steel. *Izvestiya vysshikh zavedenyi. Chernaia metallurhiya*, 3, 47–49 [in Russian].

COMPUTER PROGRAM FOR STRESS-STRAIN STATE MODELING CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT

L.M. Lobanov, O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, O.A. Velykoivanenko, G.P. Rozyuka, N.R. Basystuk, G.Yu. Saprykina

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

The «Girth Weld» computer program enables computational analysis of mechanical properties in circumferential welded joints (girth welds) of pipelines and pressure vessels, including: weld metal and heat-affected zone (HAZ) properties, residual stresses and deformations, stress-strain state redistribution under post-weld heat treatment, operational loads, or pressure testing, structural integrity assessment and service life prediction for welds with discontinuities (detected by non-destructive testing or postulated). The program requires no specialized skills in computational methods, automating key processes such as parametric modeling of multi-pass girth welds, finite element mesh generation, solver execution and results visualization. Despite minimal hardware and time requirements, «Girth Weld» ensures high accuracy through advanced modeling of welding physico-chemical processes, efficient algorithms for nonlinear problems, optimized solutions for high-order differential equations. 6 Ref., 3 Tabl., 16 Fig.

Keywords: multi-pass welding, girth welded joint, computer program, mathematical modeling, finite element method, mechanical properties, residual stresses, deformations, post weld heat treatment, operational loads, defect acceptability

ORCID

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Великоіваненко О.А. – <https://orcid.org/0009-0007-3704-2000>, Розинка Г.П. – <https://orcid.org/0009-0009-1750-7266>, Саприкіна Г.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-1534-7253>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

О.В. Махненко

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

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Л.М. Лобанов, О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.Р. Басистюк, Г.Ю. Саприкіна (2026) Комп'ютерна програма для моделювання напружено-деформованого стану кільцевого зварного з'єднання. *Автоматичне зварювання*, 02, 3–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.02.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 22.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 24.11.2025

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 11.04.2026