

ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД МУЛЬТИМАСШТАБНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ МОНТАЖНОМУ ЗВАРЮВАННІ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Запропоновано мультимасштабну методику моделювання кінетики напружено-деформованого стану великогабаритних конструкцій в процесі монтажного зварювання. В основу цієї методики покладено скінченно-елементне розв'язання задач нестационарної термопластичності, характерних для технологій зварювання плавленням, на мезомасштабному рівні з дрібним просторовим розбиттям області та з наступним перенесенням певного обсягу розрахункових даних в макроскопічну модель великогабаритної конструкції. Для цього запропоновано алгоритми відповідного усереднення властивостей та параметрів напружено-деформованого стану, що дозволяє проводити аналіз великогабаритних конструкцій в процесі зварювання без необхідності залучення суттєвих обчислювальних потужностей. На характерному прикладі монтажного зварювання циліндричної конструкції великого діаметра показано застосовність розробленого підходу для прогнозування просторових розподілів напружень та деформацій. При цьому найбільш ефективним є розрахунок полів напружень, де можливе суттєве розрідження просторового розбиття, тоді як розрахунок деформованого стану є значно більш чутливим до розміру скінченних елементів. Бібліогр. 14, рис. 3.

Ключові слова: великогабаритні конструкції, зварювання, напружено-деформований стан, математичне моделювання, мультимасштабний метод, ресурсомісткість розрахунку

Вступ. Розв'язання характерних задач оптимізації технологічних процесів монтажного зварювання великогабаритних конструкцій пов'язане з низкою об'єктивних труднощів, зумовлених протяжністю зварних швів і водночас локальністю впливу зварювального нагрівання. Зокрема, необхідним є прогнозування поточного та залишкового напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, що зумовлено необхідністю гарантування припустимості їх формозміни, локальної стійкості та опірності різним типам руйнування [1–3]. Експериментальне визначення розвитку полів температур, напружень і деформацій при зварюванні з метою гарантування належної якості кінцевого продукту ускладнюється матеріаломісткістю конструкції та значними супутніми фінансовими витратами, тому раціональним є використання сучасних методів чисельного моделювання зварювальних процесів. Це дозволяє виявити якісні та кількісні закономірності впливу зварювання на стан конкретної конструкції як при монтажу, так і в умовах подальшої експлуатації.

Поява нових методів прогнозування стану великогабаритних конструкцій, в тому числі, з великою кількістю зварних швів, відповідає розвитку розуміння фізико-механічних процесів в суцільних середовищах, математичних моделей їх описання, чисельних методів та комп'ютерних технологій. Сучасні принципи дискретного опи-

сання кінетики нестационарних мультифізичних процесів (перш за все, методами скінченних елементів) надають широкі можливості щодо розв'язання фундаментальних і прикладних задач. Адекватність і точність отримуваних чисельних результатів залежить, в тому числі, від мілкості просторового розбиття, тобто розміру скінченного елемента (СЕ), яке є достатнім для отримання точного розв'язку необхідних диференціальних рівнянь в різницевій постановці [4]. Але стосовно чисельного описання стану великогабаритних конструкцій при зварюванні це означає надмірну ресурсомісткість задач, тому що, з одного боку, високий градієнт температур, напружень і деформацій в області зварювання вимагає дрібного просторового розбиття, яке неможливо використати по всій конструкції, з іншого боку, велика різниця в розмірах СЕ призводить до нестабільності схем розв'язання відповідних крайових задач [5]. Це зумовило розвиток спрощених моделей, які дозволяють з необхідною точністю описати окремі технологічні та фізико-механічні процеси при зварюванні та споріднених процесах.

Зокрема, для прогнозування залишкової формозміни великогабаритних конструкцій в результаті монтажного зварювання набули поширення методи власних деформацій або функції усадки [6, 7]. Цей клас методів полягає в припущенні, що залишкові пластичні деформації, викликані зварюванням

(попередньо обчислені або виміряні експериментально) можуть бути задані в якості початкового стану конкретної конструкції, що особливо зручно у випадку наявності великої кількості однотипних швів – в корабельних обшивках, стрингерних панелях, тощо [8–10]. Недоліком вказаних методів є те, що вони не дозволяють простеження поточного НДС конструкцій при зварюванні, а розглядають лише задачу залишкового деформованого стану. Крім того, за відсутності даних про кінетику температурного поля та деформованого стану в процесі зварювання виникають об’єктивні труднощі при визначенні ефективної області для задання початкових інтегрованих чи розподілених пластичних деформацій в металі шва та зоні термічного впливу. Моделювання поточного стану великогабаритних конструкцій дозволяють так звані 2D-X моделі [11], проте їх застосовність є достатньо обмеженою. Тому практично важливим є подальший розвиток чисельних методів прогнозування поточного НДС великогабаритних конструкцій в процесі монтажного зварювання, зокрема, на прикладі типових циліндричних посудин тиску, що є метою цієї роботи.

Як було сказано вище, однією з особливостей стану великогабаритних конструкцій при зварюванні є різномасштабність фізико-механічних процесів в області зварювання та на периферії. Це ускладнює чисельну реалізацію відповідних математичних моделей загальноприйнятими методами, але робить раціональним використання багаторівневих мультимасштабних моделей. Так, розвиток температур і НДС при зварюванні має локальний характер і може бути описаний спільними моделями теплопровідного та пружнопластичного середовища. Для низки випадків локальний поточний та залишковий розподіл напружень і деформацій можуть бути описані в рамках спрощених двовимірних моделей, що дозволяє використовувати для їх скінченно-елементного описання невеликі СЕ без суттєвого збільшення розрахункового часу. Перенесення певного масиву розрахункових даних в повну тривимірну модель великогабаритної конструкції з власним скінченно-елементним розбиттям (таким, що дозволяє проводити відповідні розрахунки в реальному часі) з подальшим розрахунком загального НДС формалізує алгоритм мультимасштабного взаємозв’язку між розрахунковими рівняннями.

Так, в рамках цієї роботи було розглянуто два масштабних рівні, типових для задач прогнозування кінетики температурного та напружено-деформованого станів великогабаритних конструкцій, а саме мезорівень, на якому прийнято описувати зварювальні процеси, з характерним просторовим масштабом близько 1 мм, та макрорівень, який характерний для задач деформуван-

ня великогабаритних конструкцій з просторовим масштабом 1 см і більше. Для чисельного описання кінетики нестационарного температурного та напружено-деформованого станів в області монтажного зварювання було використано скінченно-елементне розв’язання спільних відповідних взаємопов’язаних задач. Відповідні алгоритми та математичні формулювання є розвитком комплексних підходів, розроблених авторами [12–14], в контексті мультимасштабної постановки.

Так, кінетика температурного поля прогнозувалась шляхом чисельного розв’язання нестационарного рівняння теплопровідності в двовимірному наближенні швидко рухаючогося джерела нагрівання. Це дозволило не тільки врахувати температурні залежності теплопровідності та теплоємності матеріалу конструкції, але і максимально зменшити просторове розбиття розрахункової області без суттєвого збільшення часу розрахунку.

На основі розрахункових полів температур в перерізі конструкції при її монтажному зварюванні формулювалась крайова задача нестационарної термопластичності матеріалу конструкції з відповідною скінченно-елементною реалізацією на основі восьмикутних СЕ (рис. 1). Так, приріст тензора деформацій може бути представлено у відповідності з наступним виразом:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + \delta_{ij} d\epsilon_T, \quad (1)$$

де $d\epsilon_{ij}^e$; $d\epsilon_{ij}^p$; $\delta_{ij} d\epsilon_T$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності та кінетикою неоднорідного температурного поля, відповідно.

Приріст деформацій, що зумовлений кінетикою температури T

$$d\epsilon_T = \alpha dT, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу.

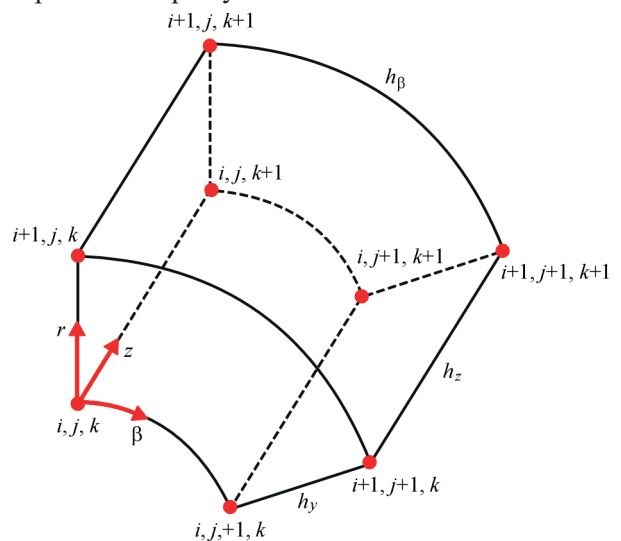


Рис. 1. Схема восьмикутного скінченного елемента в циліндричній системі координат

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (3)$$

де $\sigma = \frac{(\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz} + \sigma_{rr})}{3}$ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень

σ_{ij} , $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – модуль об'ємного стиску;

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль зсуву; E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона; φ – об'ємна деформація.

Приріст деформацій миттєвої пластичності $d\varepsilon_{ij}^p$ в залежності від напруженого стану в конкретному СЕ може бути обчислений за допомогою лінійної залежності скалярної функції Λ і девіаторної складової тензора напружень, а саме [12]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (4)$$

Кількісне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні плинності матеріалу Φ , яка характеризується границею текучості σ_T :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_T \text{ недопустимий.} \end{aligned} \quad (5)$$

де $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ij}}$ – інтенсивність напружень.

Прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових [13]:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\varepsilon_T) - \\ & - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (6)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, індекс «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування; Ψ – функція стану матеріалу визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T, \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_T \text{ недопустимий.} \end{aligned} \quad (7)$$

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування (за часом або за приростом навантаження), що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плином матеріалу. Виходячи з конкретного зна-

чення функції Ψ із (7) визначається поле деформацій на кожному етапі навантаження з урахуванням залежності $\sigma_T(T)$:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \left(\Psi - \frac{1}{G}\right)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (8)$$

При цьому на кожному кроці ітерації по Ψ напруження σ_{ij} обчислюються згідно з наступним алгоритмом (за повторюваними індексами відбувається підсумовування) [14]:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\Delta\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta\varepsilon \right) + J_{ij}, \quad (9)$$

де

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon_{ii}}{3},$$

$$J_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left[(b_{ij} - \delta_{ij}b) + \delta_{ij} \left(K\sigma^* - \frac{\Delta\varepsilon_T}{K} \right) \right],$$

$$b = \frac{b_{ii}}{3}.$$

$$b_{ii} = \left(\frac{\sigma_{ij}}{2G} \right)^* + \delta_{ij} \left[\sigma^* \left(K - \frac{1}{2G} \right)^* - \Delta\varphi \right]. \quad (10)$$

Зв'язок між компонентами тензора деформацій $\Delta\varepsilon_{ij}$ і вектора приросту переміщень ΔU_i має наступний математичний вираз:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta U_{i,j} + \Delta U_{j,i}}{2}, \quad (11)$$

де комою позначено диференціювання в межах СЕ.

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянням статки для внутрішніх СЕ і граничним умовам – для поверхневих. У свою чергу, компоненти вектора $\Delta U_i = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ задовольняють відповідним умовам на границі.

Розв'язувана система рівнянь у змінних вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ визначається мінімізацією наступного функціонала (варіаційний принцип Лагранжа):

$$\mathcal{E}_I = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta\varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_p^{m,n,r}, \quad (12)$$

де \sum_V – оператор суми по внутрішніх СЕ; \sum_{S_p} – оператор суми по поверхневих СЕ, на яких задані компоненти силового вектора P_i , тобто наступна система рівнянь дозволяє отримати розв'язок в компонентах вектора приростів переміщень на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ для конкретного СЕ:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_I}{\partial \Delta U_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}_I}{\partial \Delta V_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}_I}{\partial \Delta W_{m,n,r}} = 0. \quad (13)$$

При розгляді циліндричних конструкцій з кільцевим зварним швом можуть бути використані

припущення двовимірної моделі плоского напруженого стану. Тензор напружень σ_{ij} ($i, j = r, \beta, z$) при такому описанні включає чотири ненульові компоненти $\sigma_{rr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\beta\beta}, \sigma_{rz}$. Аналогічні ненульові компоненти містить тензор приростів деформацій $\Delta\varepsilon_{ij}$. Компоненти цього тензора зв'язані з компонентами приростів переміщень ΔU_r і ΔU_z наступними співвідношеннями:

$$\Delta\varepsilon_{rr} = \frac{\partial\Delta U_r}{\partial r}, \Delta\varepsilon_{zz} = \frac{\partial\Delta U_z}{\partial z},$$

$$\Delta\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial\Delta U_r}{\partial z} + \frac{\partial\Delta U_z}{\partial r} \right), \Delta\varepsilon_{\beta\beta} = \frac{\Delta U_r}{r}. \quad (14)$$

Зв'язок між σ_{ij} і $\Delta\varepsilon_{ij}$ може бути описаний у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= A_1 \Delta\varepsilon_{rr} + A_2 (\Delta\varepsilon_{\beta\beta} + \Delta\varepsilon_{zz}) + Y_{rr}, \\ \sigma_{\beta\beta} &= A_1 \Delta\varepsilon_{\beta\beta} + A_2 (\Delta\varepsilon_{rr} + \Delta\varepsilon_{zz}) + Y_{\beta\beta}, \\ \sigma_{zz} &= A_1 \Delta\varepsilon_{zz} + A_2 (\Delta\varepsilon_{rr} + \Delta\varepsilon_{\beta\beta}) + Y_{zz}, \\ \sigma_{rz} &= A_3 \Delta\varepsilon_{rz} + Y_{rz}, \end{aligned} \quad (15)$$

де

$$A_1 = \frac{\Psi + 2K}{3K\Psi}, A_3 = \frac{1}{\Psi}, A_2 = A_1 - A_3 = \frac{\Psi - K}{3K\Psi},$$

$$Y_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} \right)^* + \delta_{ij} \frac{(K\sigma)^* - \Delta\phi}{K}. \quad (16)$$

Рівняння (15), (16) формують систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно деформацій (переміщень), яка є основою скінченно-елементної реалізації чисельного розв'язку.

Як зазначалося вище, використання аналогічного підходу для описання температурного стану, поточного та залишкового НДС великогабаритної конструкції на основі дрібного просторового розбиття ускладнене або неможливе по причині надмірної ресурсомісткості подібної задачі. Але збільшення кроків просторового розбиття в макромасштабному підході може призвести до втрати точності розрахункової моделі аж до суттєво викривлених результатів. Тому в якості вхідних даних макромасштабного розрахунку використовувались результати, отримані відповідно до мезомасштабного розрахунку, але з урахуванням необхідної для цього інтегральної інтерпретації. Тобто для простежування стану одного СЕ макроскопічної задачі необхідно використовувати усереднений стан декількох СЕ мезозадачі протягом всього технологічного циклу монтажного зварювання. Результатом такого усереднення мають бути інтегральні значення механічних властивостей матеріалу нерівномірно нагрітої конструкції та параметри її поточного деформованого стану. Так, для усереднення механічних властивостей матеріалу, а саме модуля Юнга, коефіцієнта лінійного теплового розширення та границі текучості, можна використати спрощений підхід, аналогіч-

ний правилу сумішей. Це обґрунтовується характерно невеликими градієнтами властивостей на відстанях порядку розміру СЕ, що є необхідним для стабільного розв'язку крайової задачі нестационарної термопластичності в постановці (1)-(13). Тому якщо стан елемента mn в макрозадачі описується декількома елементами ij в мезомасштабній постановці, то відповідні механічні характеристики можуть бути оцінені наступним чином:

$$E'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j E(T_{ij}) s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}; \alpha'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j \alpha(T_{ij}) s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}; \quad (17)$$

де s_{ij} – площа ij -го СЕ; T_{ij} – температура в точці ij ; «'» відносить параметр до макрозадачі.

Слід зазначити, що співвідношення (17) сформульовано в двовимірній постановці, але аналогічним чином може бути реалізовано усереднення з двовимірної задачі на тривимірну.

Розвиток НДС в макроскопічній постановці потребує врахування силового фактору, а саме нерівномірної деформації матеріалу. Для розрахунку розподілу поточного та залишкового НДС, який задовольняє умові рівноваги (13) та не отримує суттєвого викривлення на грубих просторових сітках, було запропоновано наступне просторове усереднення чисельних компонент матриці (15) – (16) та функції стану матеріалу Ψ , визначеної згідно (7):

$$A'_{kmn} = \frac{\sum_i \sum_j A_{k mn} s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}, k=1, 2, 3$$

$$Y'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j Y_{ij} s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}; \Psi'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j \Psi_{ij} s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}. \quad (18)$$

Розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь (15) в рамках постановки макроскопічної задачі НДС дозволяє отримати на кожному кроці простеження рівноважні розподіли полів напружень та деформацій конструкції.

Межі застосовності та особливості розробленого мультимасштабного підходу було досліджено на характерному прикладі монтажного зварювання кільцевих з'єднань циліндричної конструкції з алюмінієвого сплаву АМг6 ($E = 71$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 170$ МПа, $\alpha = 2,26 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$ при 20°C) діаметром $D = 3900$ мм і товщиною стінки $t = 10$ мм, зварювання на режимі $U = 20$ В, $I = 380$ А, $v_{зв} = 2,23$ мм/с. Слід зазначити, що вибір конструкції для дослідження відповідає типовим конструкційним рішенням космічного призначення, зокрема, паливним бакам ракет-носіїв, хоча універсальність запропонованого підходу дозволяє розгля-

дати широкий спектр матеріалів, конструкційних елементів і технологій зварювання.

Мезомасштабна постановка була реалізована в рамках спільного розв'язання задачі кінетики температурного поля при зварюванні та розвитку пружнопластичного деформованого та напруженого станів конструкції в області з'єднання в двовимірному формулюванні, що дозволило використати дрібне та регулярне просторове скінченно-елементне розбиття з лінійним розміром елемента в радіальному та осьовому напрямках $h_r = h_z = 1$ мм. При постановці тривимірної задачі було кратно збільшено лінійний розмір скінченних елементів в радіальному та аксіальному напрямках – в 2, 4 та 8 разів і проведено порівняння полів напружень і деформацій, отриманих в рамках мультимасштабної постановки задачі та прямого тривимірного моделювання з просторовим кроком $h_r = h_z = h_\beta = 1$ мм.

Як показано на рис. 2, порівняння розрахункових розподілів окружних $\sigma_{\beta\beta}$ та осьових σ_{zz} напружень для різного макромасштабного просторового розбиття підтверджують високий ступінь відповідності результатів мультимасштабного моделювання прямими розрахунками. Суттєві відмінності з'являються тоді, коли характерний просторовий розподіл локальних напружень стає меншим за один крок макромасштабної задачі, де відбувається відповідне усереднення (зокрема, при збільшенні h_z до 8 мм). При цьому на інших ділянках конструкції, де градієнт залишкових напружень менш суттєвий, відповідність розрахунків за двома підходами висока (похибка менше 2%). Така точність мультимасштабного підходу пов'язана з фізичною сутністю математичного формулювання (18), а саме, перенесення усередненої внутрішньої енергії деформованого матеріалу. Це дозволяє використовувати запропоновану методику для аналізу напруженого стану великогабаритних зварних конструкцій, в тому числі під дією складного екс-

плуатаційного навантаження, а також для аналізу крихкої міцності. Слід зазначити, що максимальна величина залишкових напружень дещо перевищує границю текучості матеріалу за кімнатної температури. Це пояснюється тим, що циліндрична конструкція характеризується двовісним напруженим станом, тому значення інтенсивності напружень σ_i є дещо нижчим за деякі окремі компоненти тензора напружень. Але саме визначає σ_i поверхню границю текучості матеріалу Φ відповідно до умови текучості Мізеса, зокрема, у формі (5).

Аналогічні розрахунки кінетики полів деформацій показали, що вплив мультимасштабного підходу на похибку результатів прогнозування залишкового деформованого стану суттєво вищий (рис. 3). Так, збільшення h_r в обраних межах незначно впливає на розрахункову величину окружних деформацій $\epsilon_{\beta\beta}$ (похибка складає близько 1,7%), тоді як для повздовжніх деформацій ϵ_{zz} задовільний результат мультимасштабного моделювання спостерігається для невеликого збільшення просторового розбиття (в 2 рази до розміру 2 мм). Аналогічний висновок про відносно невеликі можливості збільшення h_z : розрідження просторового розбиття до 4 разів дозволяє отримувати задовільну величину похибки мультимасштабного прогнозування $\epsilon_{\beta\beta}$ (похибка менше 7%), тоді як для коректних результатів ϵ_{zz} збільшення h_z не має бути більше ніж в 2 рази до розміру 2 мм.

Такі результати аналізу пояснюються тим, що одним із основних припущень скінченно-елементного моделювання є однорідність властивостей кожного зі СЕ. Суттєве збільшення розміру елементів призводить до некоректності постановки задачі, яка проявляється, в першу чергу, в невідповідності поля деформацій істинному розв'язку на дрібних сітках. Проте ця нестійкість стосується, перш за все, деформованого стану в осьовому напрямку, де спостерігається максимальний градієнт деформацій, тоді як для $\epsilon_{\beta\beta}$ та напруженого стану можливо-

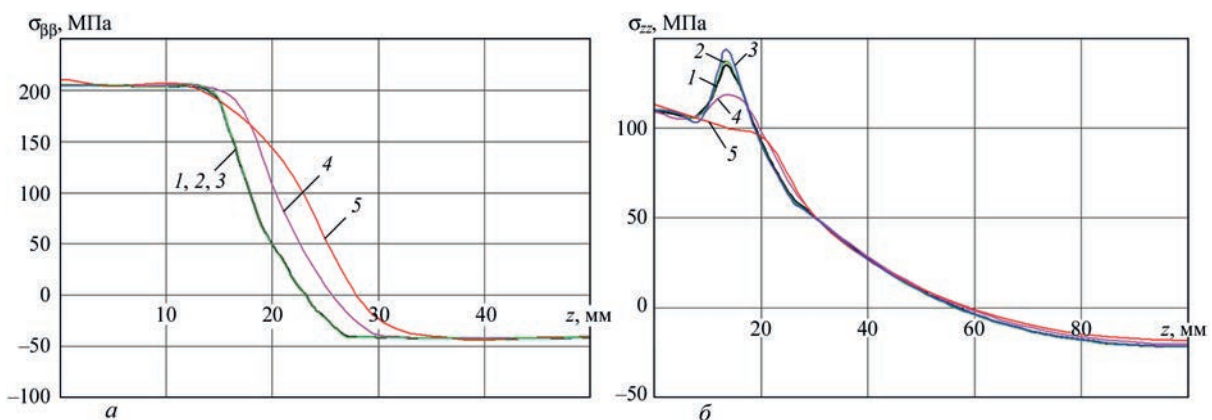


Рис. 2. Розрахунковий розподіл залишкових післязварювальних окружних $\sigma_{\beta\beta}$ (а) і осьових σ_{zz} (б) напружень: 1 – контрольний тривимірний розрахунок при $h_r = h_z = h_\beta = 1$ мм; 2 – мультимасштабний розрахунок при $h_r = 4$ мм, $h_z = h_\beta = 1$ мм; 3 – мультимасштабний розрахунок при $h_r = 8$ мм, $h_z = h_\beta = 1$ мм; 4 – мультимасштабний розрахунок при $h_z = 4$ мм, $h_r = h_\beta = 1$ мм; 5 – мультимасштабний розрахунок при $h_z = 8$ мм, $h_r = h_\beta = 1$ мм (на рис. 2, а криві 1, 2 та 3, фактично, співпадають)

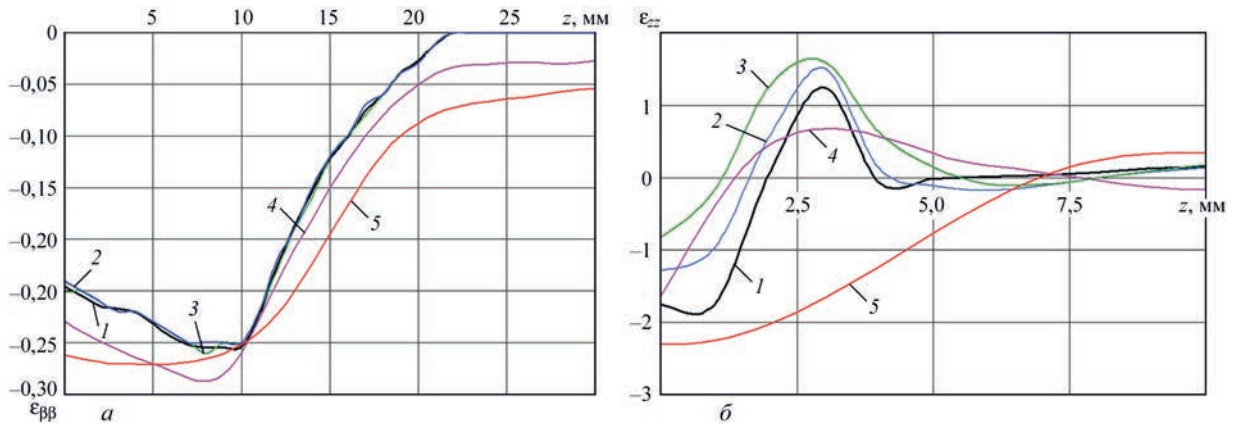


Рис. 3. Розрахунковий розподіл залишкових післязварювальних окружних $\epsilon_{\phi\phi}$ (а) і осевих ϵ_{zz} (б) деформацій (опис кривих 1–5 див. на рис. 2)

сті оптимізації розрахунків великогабаритних конструкцій шляхом використання запропонованого мультимасштабного підходу значно вищі.

Як показали розрахунки, одночасне збільшення просторових кроків в радіальному та осьовому напрямках несуттєво змінює отримані висновки, тому що превалюючою є нестійкість окремих розв’язків внаслідок розрідження в осьовому напрямку.

Незважаючи на те, що в роботі було розглянуто конкретний приклад зварної великогабаритної конструкції з алюмінієвого сплаву, отримані результати є достатньо загальними для більш широкого використання розробленої методики та загальних рекомендацій для випадків конструкцій з інших матеріалів, з відмінними геометричними розмірами або виготовленої із застосуванням інших технологій або режимів монтажного зварювання. Принципова різниця буде полягати в поточних і залишкових градієнтах напружень та деформацій, які визначатимуть допустимий лінійний розмір усереднення згідно (17), (18). Наприклад, зменшення зони термічного впливу (при використанні меншого тепловкладення чи за меншої теплопровідності матеріалу великогабаритної конструкції) визначатиме пропорційно менший розмір просторового розбиття макроскопічної задачі в області зварювання, але більший на периферії, де відповідні градієнти напружень та деформацій будуть суттєво меншими.

Висновки

1. З метою створення ефективних методів аналізу технологічних процесів зварювання великогабаритних конструкцій без суттєвого збільшення ресурсомісткості відповідних розрахунків запропоновано мультимасштабний підхід чисельного прогнозування кінетики температур і напружено-деформованого стану. В основу цієї методики покладено скінченно-елементне розв’язання задач нестационарної термопластичності, характерних для технологій зварювання плавленням, на мезомасштабному рівні з дрібним просторовим розбиттям конструкції в двовимірній постановці та з

наступним перенесенням певного об’єму розрахункових даних в тривимірну макроскопічну модель з розрідженою сіткою. Для цього запропоновано алгоритми відповідного усереднення властивостей та параметрів напружено-деформованого стану, що дозволяє проводити аналіз стану великогабаритних конструкцій в процесі зварювання без необхідності залучення суттєвих обчислювальних потужностей.

2. На прикладі монтажного зварювання кільцевого шва великогабаритної посудини тиску з алюмінієвого сплаву АМгб показано високу відповідність результатів скінченно-елементних розрахунків напруженого стану в рамках розробленої моделі та контрольними розрахунками за стандартними підходами. Показано, що можливе суттєве (до восьми разів) збільшення просторового скінченно-елементного розбиття аж до тих пір, поки характерний просторовий розподіл локальних напружень не стане меншим за один крок макромасштабної задачі, де відбувається відповідне усереднення.

3. Показано, що можливості використання запропонованого підходу для прогнозування деформованого стану великогабаритних конструкцій внаслідок усадкових процесів при нерівномірному зварювальному нагріванні обмежені. Це зумовлено високими розрахунковими градієнтами деформацій, особливо в осьовому напрямку, в такому випадку просторове усереднення властивостей матеріалу конструкції, що зварюється, може призвести до збіжності задачі в рамках скінченно-елементної постановки, до хибного розв’язку.

Список літератури/References

1. Deng, D., Murakawa, H., Liang, W. (2007) Numerical simulation of welding distortion in large structures. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 196, 4613–4627. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2007.05.023>
2. Park, J.-U., An, G., Woo, W. et al. (2014) Residual stress measurement in an extra thick multi-pass weld using initial stress integrated inherent strain method. *Marine Structures*, 39, 424–437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.10.002>
3. Zhang, L., Michaleris, P., Marugabandhu, P. (2007) Evaluation of Applied Plastic Strain Methods for Welding Distortion Prediction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129, 1000–1010. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2716740>
4. Liu, R.-F., Wang, J.-C. (2022) Application of finite element method to effect of weld overlay residual stress on probability of

5. Li, S., Coraddu, A., Oneto, L. (2022) Computationally aware estimation of ultimate strength reduction of stiffened panels caused by welding residual stress: From finite element to data-driven methods. *Engineering Structures*, 264, 114423. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114423>
6. Bayraktar, C., Demir, E. (2022) A thermomechanical finite element model and its comparison to inherent strain method for powder-bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 54, 102708. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102708>
7. Takezawa, A., To, A.C., Chen, Q. et al. (2020) Sensitivity analysis and lattice density optimization for sequential inherent strain method used in additive manufacturing process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 370, 113231. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113231>
8. Liangfeng, L., Cheng, L., Jie, S., Yansong, Z. (2022) Numerical prediction of welding deformation in ship block sub-assemblies via the inhomogeneous inherent strain method. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 860–873. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.044>
9. Honaryar, A., Iranmanesh, M., Liu, P., Honaryar, A. (2020) Numerical and experimental investigations of outside corner joints welding deformation of an aluminum autonomous catamaran vehicle by inherent strain/deformation FE analysis. *Ocean Engineering*, 200, 106976. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106976>
10. Makhnenko, O.V., Muzhichenko, A.F., Seyffarth, P. (2009) Application of mathematical modelling in thermal straightening of shipbuilding panels. *Paton Welding J.*, 1, 6–11.
11. Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Semyonov, A.P. (2007) Mathematical modelling of thermal-deformation processes in braze-welding of butt joints of the titanium-aluminium type. *Ibid*, 11, 5–9.
12. Makhnenko, V.I., Pochinok, V.E. (2006) *Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections*. E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
13. Махненко В.І. (2006) *Ресурс безпечної експлуатації сварних з'єдинень у вузлів сучасних конструкцій*. Київ, Наукова думка.
14. Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 1, 117–127. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>

A NUMERICAL METHOD OF MULTISCALE MODELING OF THE STRESS- STRAIN STATE OF LARGE-SIZED SSTRUCTURES IN SITE WELDING

O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozynka, N.I. Pivtorak

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

E-mail: asmilenin@ukr.net

A multiscale procedure was proposed for modeling the kinetics of stress-strain state of large-sized structures during site welding. This procedure is based on finite-element solution of nonstationary thermoplasticity problems, characteristic for fusion welding technologies, at the mesoscale level with fine spatial breakdown of the region and with subsequent transfer of a certain amount of calculation data into a macroscopic model of a large-scale structure. Algorithms of the respective averaging of the properties and stress-strain state parameters are proposed for this purpose, which allows performing analysis of large-sized structures during welding without the need to involve significant computing power. A characteristic example of site welding of a cylindrical structure of a large diameter is used to show the applicability of the developed approach for prediction of spatial distribution of stresses and strains. Here, the most effective method is calculation of the stress fields, where a much greater sparseness of the spatial breakdown can be achieved, while calculation of the strained state is much more sensitive to finite element size. 14 Ref., 3 Fig.

Keywords: large-sized structures, welding, stress-strain state, mathematical modeling, multiscale method, resource intensity of calculation

Надійшла до редакції 03.04.2023

НОВІ КНИГИ

Ахонін С.В., Березос В.О., Северин А.Ю. Електронно-променева плавка зливків інтерметалідів на основі алюмініду титану. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 98 с.

У монографії розглянуто технологію електронно-променевої плавки зливків сплавів інтерметаліду системи Ti–Al. Проведено дослідження, які дозволили розробити методику вибору технологічних параметрів електронно-променевої плавки (ЕПП) зливків інтерметаліду TiAl за допомогою математичної моделі випаровування легуючих елементів, що дозволяє визначити точний хімічний склад вихідної шихти. Показано особливості кристалізації рідкого металу зливків сплавів інтерметаліду системи Ti–Al в умовах дії електронно-променевого нагріву. Досліджено можливість отримання зливків ЕПП інтерметаліду TiAl з введенням додаткових легуючих елементів Nb, Cr, Mo, Zr, V, La. Описано дослідні плавки зливків методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Наведено характеристики хімічного стану, макро-, мікроструктури та деяких механічних властивостей сплавів, отриманих методом ЕПП. Розглянуто можливість деформаційної обробки інтерметаліду TiAl, додатково легovanого бором і лантаном. Описано мікроструктуру та механічні властивості деформованого та термічно обробленого металу. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей. Бібліогр. 131, табл. 25, рис. 56.

Позняков В.Д. Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 232 с.

У науково-технічному посібнику розглянуто питання щодо впливу різних факторів на структуру та механічні властивості металу швів і зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних низьколегованих та легованих високоміцних сталей з границею текучості 350...700 МПа. Розглянуто проблеми стосовно стійкості зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин і продемонстровано, як на цей процес впливають залишкові напруження, хімічний склад, структура, вміст дифузійного водню в наплавленому металі та технологічні параметри зварювання. Запропоновано способи зменшення рівня залишкових напружень у характерних для ремонтного зварювання жорстко закріплених з'єднаннях великої товщини, які реалізуються шляхом оптимізації технології зварювання. Розглянуто питання щодо впливу ремонтно-зварювальних технологій і зміцнюючих обробок на механічні властивості та циклічну довговічність зварних з'єднань високоміцних сталей. Викладено загальні рекомендації стосовно способів видалення дефектів і підготовки з'єднань до ремонтного зварювання, вибору зварювальних матеріалів, температури попереднього підігріву та режимів і техніки зварювання високоміцних сталей. Наведено приклади застосування ремонтно-зварювальних технологій при відновленні цілісності та працездатності металевих конструкцій кар'єрних екскаваторів і автосамоскидів великої потужності, резервуарів для переробки нафти, суцільнолитих масивних базових вузлів пресового обладнання та дробарок. Посібник призначено для наукових працівників дослідних установ та ВУЗів, аспірантів, студентів, інженерних працівників, що спеціалізуються у галузі виготовлення і ремонту зварних металевих конструкцій тривалої експлуатації. Бібліогр. 126, табл. 54, рис. 159.

Замовлення на книги надсилати до редакції журналу.