

ПРОГНОЗУВАННЯ КІНЕТИКИ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РІЗНОРІДНИХ ВИРОБІВ, ОТРИМУВАНИХ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО ФОРМУВАННЯ

О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, С.С. Козлітіна, Н.І. Півторак, Л.І. Дзюбак

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

Пошарове формування металевих конструкцій та елементів механізмів різного призначення є перспективним напрямком розвитку наукоємних технологій. Широкі можливості оптимізації технологічних параметрів і точність позиціонування формуючих шарів дозволяють виготовляти тонкостінні вироби різної геометрії. Окрім того, шляхом зміни присадного матеріалу можливе виробництво різнофазних конструкцій. Такий технологічний процес вимагає ретельної оптимізації відповідного технологічного циклу для гарантування необхідної якості різнофазної конструкції в залежності від форми виробу, матеріалів та особливостей конкретної технології. В даній роботі досліджено особливості кінетики температурного поля та напружено-деформованого стану різнофазних конструкцій в процесі багатоповітряного наплавлення на прикладі балкових конструкцій таврового профілю, виготовлених за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer. Бібліогр. 12, рис. 6.

Ключові слова: пошарове формування, різнофазна конструкція, температурне поле, напружено-деформований стан, математичне моделювання.

Одним з напрямків застосування сучасних технологій пошарового формування є реалізація промислових систем виробництва різнофазних елементів конструкцій і деталей механізмів. Це дозволяє отримувати конструкційні елементи складної форми з мінімальною витратою металу у порівнянні з класичними підходами фрезерування чи зварювання, що зумовлює інтерес до такого роду технологій в аерокосмічній та енергетичній галузях, приладобудуванні, медицині, тощо [1–3]. Стосовно відповідальних конструкцій з легких металів і сплавів, для яких ключовим аспектом при проектуванні є мінімізація ваги при збереженні необхідних експлуатаційних якостей (міцності, корозійної стійкості, жорсткості, тощо), раціональним шляхом їх є комбінація різних матеріалів шляхом нероз'ємного з'єднання різнофазних частин. Відомо, що отримання різнофазних з'єднань шляхом зварювання плавленням є обмеженим для великої кількості пар металів по причині їх незначної взаємної розчинності та схильності до утворення інтерметалідних включень і відповідного зниження експлуатаційних якостей конструкції [4, 5]. Тому для з'єднання різнофазних матеріалів використовують методи зварювання в твердій фазі, зварювання-паяння, зварювання через проміжні вставки, тощо. Одним з необхідних заходів при реалізації відповідної технології є оптимізація технологічних параметрів, зокрема, на основі результатів математичного та комп'ютерного моде-

лювання фізико-механічних процесів, що визначають якість кінцевого виробу.

Виготовлення різнофазних металевих конструкцій методами пошарового формування пов'язано з тими ж принциповими технологічними проблемами, що і зварювання плавленням. Але невелике перегрівання металу при наплавленні та можливості оптимізації технологічних параметрів дозволяють реалізувати технологічні схеми виготовлення якісних різнофазних виробів. Для цього необхідно враховувати особливості кінетики температурного поля при наплавленні шарів, а також залишковий напружено-деформований стан (НДС) конструкції.

Метою даного дослідження є чисельний аналіз характерних особливостей кінетики полів температур, напружень і деформацій різнофазних конструкцій при їх пошаровому формуванні на прикладі типового конструкційного елемента балкової форми.

Типові задачі оптимізації технологічних параметрів при пошаровому формуванні різнофазних конструкційних елементів. В залежності від конкретних типів металів в конструкційному елементі можуть бути реалізовані принципово різні підходи щодо отримання якісного сплавлення шарів в області різнофазного контакту. Так, в разі безперервної взаєморозчинності металів оптимізація параметрів тепловкладення при наплавленні формуючих шарів визначається

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, С.С. Козлітіна, Н.І. Півторак, Л.І. Дзюбак, 2021

для однорідних та різнорідних частин конструкції однаковими вимогами, а саме необхідністю активації твердої поверхні попереднього шару при одночасному запобіганню перегрівання рідкого металу. В попередніх роботах авторами було показано, що раціональним методом оптимізації температурного поля в такому випадку є відповідний вибір часу затримки між накладанням формуючих шарів, що дозволяє відвести надлишкове тепло в підкладку або в оточуюче середовище [6, 7].

Якщо для пари металів характерна обмежена взаємна розчинність, а їх температури плавлення суттєво відрізняються, то можлива реалізація сплавлення різнорідних шарів зі схемою зварювання-паяння [8]. Суть цього методу полягає в тому, що під дією джерела нагрівання метал з більш високою температурою плавлення залишається твердим, а метал з більш низькою температурою плавлення певний час перебуває в рідкому стані, утворюючи зварювально-паяний контакт. Це дозволяє знизити максимальні температури нагрівання поверхні контакту рідкого та твердого металів, зменшивши тим самим ризик утворення інтерметалідних включень. Формально вимоги оптимізації температурного поля в різнорідному контакті описуються температурно-часовими залежностями латентного періоду інтерметалідоутворення.

Відомо, що залишковий НДС різнорідних конструкцій в разі суттєвої різниці коефіцієнтів лінійного температурного розширення характеризується концентрацією напружень в області різнорідного контакту. Таку особливість залишкового стану слід очікувати для конструкційних елементів, виготовлених методами пошарового формування. В силу того, що підвищені напруження негативно впливають на роботоздатність, необхідно визначити вплив технологічних факторів виробництва на залишковий НДС та шляхи можливого зниження концентрації напружень в області різнорідного з'єднання.

Математична модель кінетики температурного поля та напружено-деформованого стану при пошаровому формуванні різнорідних балкових конструкцій. Першим етапом чисельного дослідження кінетики стану вказаного виробу в процесі пошарового формування є прогнозування розвитку температурного поля. Так, кінетика температурного поля визначається процесами кондуктивного поширення, для яких зв'язок між моментом часу t і полем температур $T = T(x, y, z)$ описується тривимірним рівнянням теплопровідності:

$$c\rho(x, y, z, T) \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = \nabla [\lambda(x, y, z, T) \nabla T(x, y, z)], (1)$$

де λ , $c\rho$ – відповідно, теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу конструкції в декартовій системі координат (x, y, z) .

Джерелами тепла в розглянутому випадку є електронний промінь з тепловою потужністю q_I , розподіл енергії в плямі нагрівання може бути описаний за допомогою нормального закону. Стік тепла з поверхні розглянутої конструкції відбувається променистим теплообміном і відведенням тепла в технологічне оснащення. Відповідно, потік енергії випромінювання з поверхні виробу q_R залежить від температури поверхні та навколишнього середовища, а також відбивальних властивостей поверхні, і кількісно може бути описаний законом Стефана-Больцмана:

$$q_R = \varepsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_C^4), (2)$$

де ε – ступінь чороти випромінюючої поверхні, $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж·с⁻¹·м⁻²·°С⁻⁴ – константа Стефана-Больцмана.

Потік теплової енергії в силове оснащення q_N описується законом Ньютона в наступній формі:

$$q_N = \alpha_T (T - T_C), (3)$$

α_T – коефіцієнт поверхневої тепловіддачі.

Виходячи з умов теплового балансу, потік тепла до поверхні нерівномірно розігрітого тіла, обумовлений процесами кондуктивної теплопровідності, дорівнює стоку тепла з поверхні, що дозволяє сформулювати граничні умови для задачі (1):

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} + q_I + q_R + q_N = 0, (4)$$

n – нормаль до поверхні розглянутої області конструкції.

З урахуванням (2)–(3) гранична умова (4) до рівняння (1) має вигляд:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = -q_I + \alpha_T (T - T_C) + \varepsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_C^4). (5)$$

Процес плавлення та подальшої кристалізації металу при зварюванні супроводжується, відповідно, поглинанням і виділенням теплоти фазового переходу першого роду g_{fl} . Це явище відбувається в досить вузькому діапазоні температур металу, а саме в його твердо-рідкому стані між температурами ліквідус T_L і солідус T_S , що ускладнює математичне описання теплового балансу. Для врахування виділення/поглинання прихованої теплоти фазового переходу було використано ефективну теплоємність матеріалу в температурному діапазоні $T_S - T_L$ в наступній формі:

$$c\rho(T) = \begin{cases} c\rho(T_S) + \frac{g_{fl}}{T_L - T_S}, & T_S < T < T_L \\ c\rho(T_L), & T \geq T_L \end{cases}. (6)$$

У ванні рідкого металу особливості передачі тепла обумовлені переважно процесами конвективного перемішування, які визначаються гідродинамікою нерівномірно нагрітого розплаву. В рамках даної роботи інтенсифікація теплопередачі в рідкому металі в результаті конвективного перемішування враховувалася збільшенням коефіцієнта теплопровідності:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda(T), T_S < T < T_L; \\ \lambda(T_L)n_K, T \geq T_L, \end{cases} \quad (7)$$

де $n_K = 3 \dots 5$ – коефіцієнт, що дозволяє врахувати конвективне теплоперенесення у рідкому металі зварювальної ванни.

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля та розвитку НДС базується на скінченно-елементному описанні з використанням восьмивузлових скінченних елементів (СЕ). Приріст тензора деформацій було представлено наступним чином [9]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij}d\varepsilon_T, \quad (8)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^p$, $\delta_{ij}d\varepsilon_T$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності, кінетикою неоднорідного температурного поля, відповідно, $i, j = (x, y, z)$.

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

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (9)$$

де σ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij} , тобто $\sigma = \sigma_{ii}/3$, $K = (1-2\nu)/E$ – модуль об'ємного стиску.

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

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (10)$$

Конкретне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні плинності матеріалу. Виходячи зі сказаного вище, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових [10]:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\varepsilon_T) - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \quad (11)$$

де символ «*» відносить змінну до попереднього кроку простежування; Ψ – функція стану матеріа-

лу, що визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T, \\ \Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T, \quad (12)$$

стан $\sigma_i > \sigma_T$ недопустимий.

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування в рамках крайової задачі нестационарної термопластичності, що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плином матеріалу.

Запропоновані підходи було програмно реалізовано за допомогою високопродуктивних алгоритмів паралельного розв'язування крайової задачі нестационарної термопластичності [11], що дозволило провести відповідні дослідження впливу технологічних параметрів пошарового формування на поточний та залишковий стан різнохідних балкових конструкцій таврового профілю.

Результати і обговорення. Комплекс досліджень в контексті наведених задач було проведено на прикладі пошарового формування за допомогою технології xBeam 3D Printer балкової конструкції таврового профілю (рис. 1) з наступних комбінацій сплавів: однорідна конструкція з титанового сплаву ВТ6; різнохідна конструкція з титанових сплавів ВТ6 і ВТ1; різнохідна конструкція з титанового сплаву ВТ6 та технічно чистого алюмінію. Слід зазначити, що як однорідна конструкція (ВТ6), так і різнохідна титанова (ВТ6-ВТ1) не мають особливостей сплавлення шарів, викликаних металургійною несумісністю, тому для оптимізації температурного поля може бути використаний єдиний критерій. В якості такого критерію було обрано одночасне виконання наступних умов [6]:

відсутність перепплавлення попереднього валика; забезпечення сплавлення між валиками.

Таким чином, на основі чисельного дослідження кінетики температурного поля необхідно

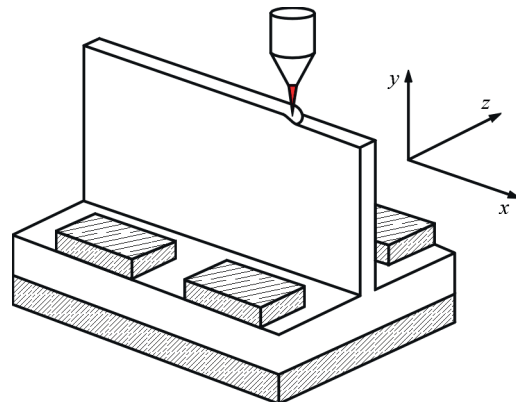


Рис. 1. Схема пошарового формування балкової конструкції таврового профілю за допомогою технології xBeam 3D metal printer

визначити оптимальні часові інтервали між наплавленням валиків різнохідної конструкції dt , що дозволяють отримати виконання вказаних умов і якісне сплавлення шарів в залежності від їх порядкового номера N .

Для різнохідної титан-алюмінієвої конструкції (BT6-Al) безпосереднє використання вказаного вище критерію не гарантуватиме отримання якісного виробу, що пов'язано з обмеженою розчинністю алюмінію в титані. Тому при наплавлюванні алюмінієвого валика на титановий необхідно запобігати змішуванню їх рідких фаз. Але відомо, що титановий сплав BT6 має суттєво вищу температуру плавлення, ніж алюміній (1640 °C у порівнянні з 660 °C), що дозволяє використати для їх з'єднання принцип зварювання-паяння. Як було зазначено вище, при цьому необхідно гарантувати нетривалий час контакту між рідким алюмінієм, який залежить від температури контактної поверхні, що пов'язано з наявністю так званого латентного періоду формування інтерметалідів [12], залежність якого від температури наведено на рис. 2. Тому додатково до умов оптимізації температурного поля однорідної частини конструкції при контакті різнохідних валиків необхідно враховувати час контакту розплавленого алюмінію з твердим титаном.

Як показали результати розрахунків, при пошаровому формуванні різнохідної балкової конструкції з титанових сплавів BT6 та BT1 відносно невелика різниця фізичних властивостей цих матеріалів та безперервна розчинність зумовлюють те, що наявність різнохідного переходу незначно впливає на стан конструкції. Так, залежність оптимального часового інтервалу затримки між наплавленням шарів dt , що забезпечує достатню дисипацію надлишкової теплової енергії у виробі, фактично не змінює свого характеру після 20 валика, коли відбувається зміна матеріалу (рис. 3, а).

В разі суттєвої різниці фізико-механічних властивостей матеріалів, як це має місце в парі BT6-Al, пе-

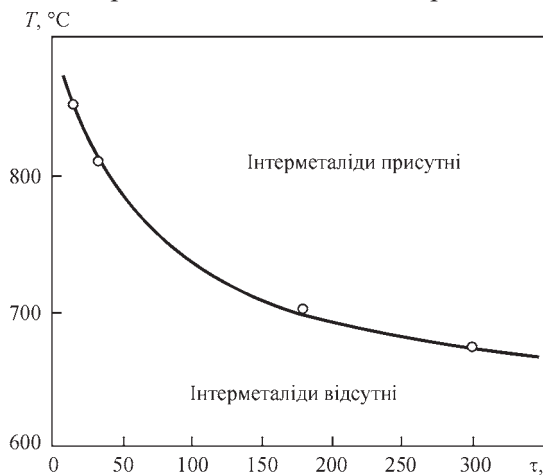


Рис. 2. Температурна залежність часу латентного періоду формування інтерметалідів при поверхневому контакті титану та алюмінію [12]

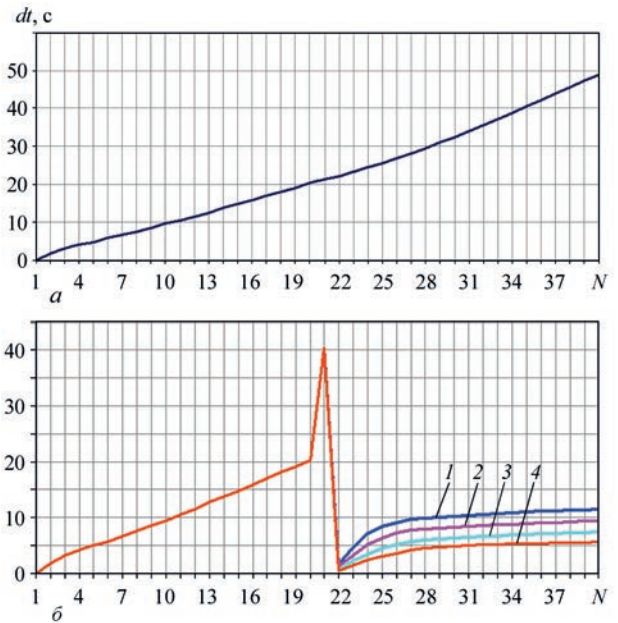


Рис. 3. Залежність часових інтервалів між наплавленням валиків різнохідної конструкції dt , що дозволяють отримати якісне сплавлення шарів, від порядкового номера валика N : а – BT6-BT1; б – BT6-Al (1 – q ; 2 – $0,9 q$; 3 – $0,8 q$; 4 – $0,7 q$)

рехід до іншого матеріалу (в даному випадку, з титанового сплаву до алюмінію) вимагає значних змін параметрів тепловкладення та інтервалу затримки dt . Так, перехід від наплавлення титанових шарів до алюмінієвої частини виробу має супроводжуватись певним охолодженням титанової частини з метою зниження температури поверхні перед нанесенням більш легкоплавкого металу (Рис. 3, б). Подальше наплавлення відбувається за режимами, характерними для виготовлення алюмінієвих конструкцій.

Різниця механічних властивостей титану та алюмінію викликає формування локальних кон-

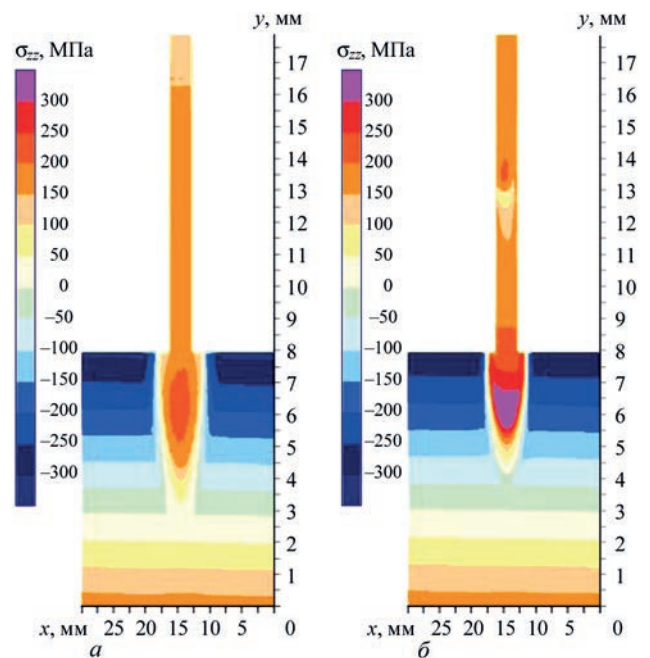


Рис. 4. Поле залишкових напружень σ_zz в перерізах однорідної (BT6) (а) та різнохідної конструкції (BT6-Al) (б)

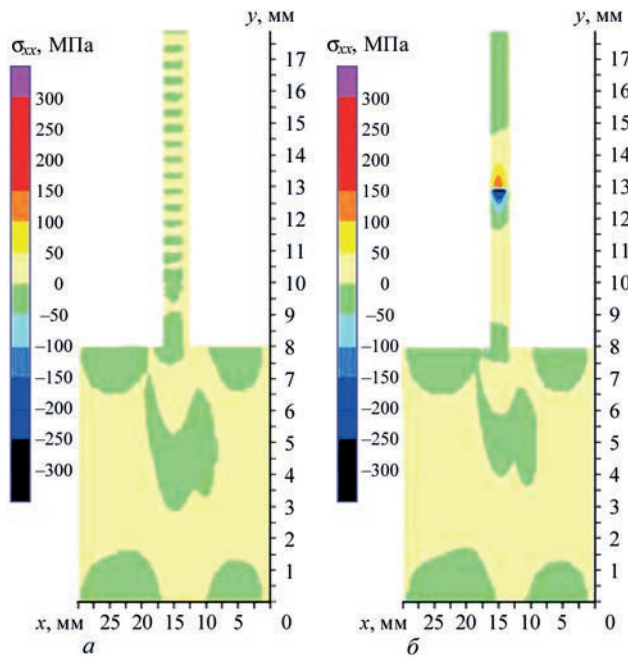


Рис. 5. Поле залишкових напружень σ_{xx} в перерізах однорідної (BT6) (а) та різнорідної конструкції (BT6-Al) (б)

центрацій напружень. Як показали результати чисельного моделювання, найпомітніше збільшення напружень в області різнорідного з'єднання відбувається в поздовжньому напрямку (напруження σ_{zz} , рис. 4), а також у поперечному (σ_{xx} , рис. 5). Крім того, нерівномірність охолодження по висоті наплавленої конструкції, викликана необхідністю зупинки процесу при переході від титанової частини до алюмінієвої, веде до збільшення σ_{zz} в області підкладки в порівнянні з однорідною конструкцією. При цьому зміна потужності тепловкладення несуттєво впливає на концентратор напружень в

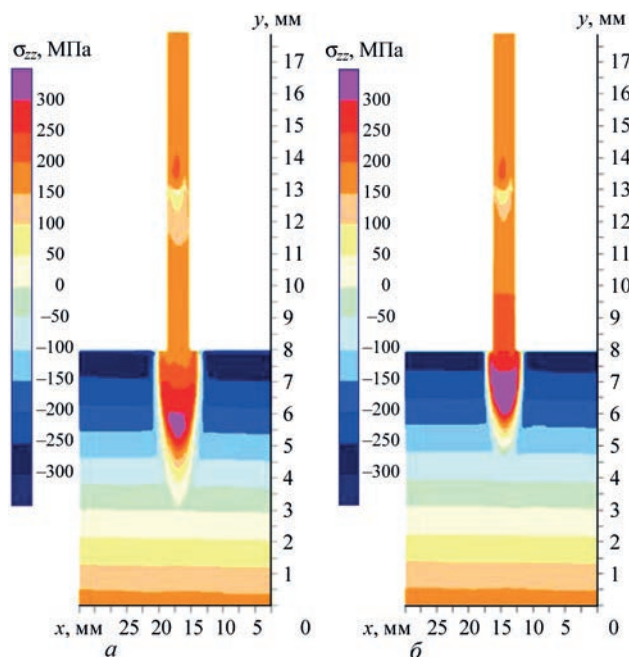


Рис. 6. Вплив тепловкладення q_i на поле залишкових поздовжніх напружень σ_{zz} в перерізі різнорідної (BT6-Al) конструкції: а – 5 кВт; б – 4

області різнорідного переходу, але дозволяє до певної міри перерозподілити залишкові напруження в області переходу полиці тавра в стінку (рис. 6).

Висновки

1. Розроблено комплекс математичних моделей і комп'ютерних програм для чисельного прогнозування кінетики температурного поля та напружено-деформованого стану типових конструкційних елементів в процесі пошарового формування за технологією xBeam 3D Printer.

2. Запропоновано критерії вибору оптимального часу між наплавленням формуючих валиків. Для різнорідного контакту металів з істотною різницею температур плавлення температурний режим має забезпечувати умову нерозплавлення тугоплавкої частини конструкції за принципом зварювання-паяння.

3. На прикладі пошарового формування балкових конструкцій таврового профілю за допомогою технології xBeam 3D metal printer досліджені особливості залишкових полів напружень і деформацій в перерізі різнорідної конструкції (BT6-Al) у порівнянні з однорідною (BT6). Показано, що наявність різнорідного переходу та необхідність істотного охолодження останнього титанового валика перед наплавленням алюмінієвого визначає формування локального концентратора напружень (поздовжніх і поперечних). При цьому зміна потужності джерела нагрівання незначно впливає на максимальні напруження в області різнорідного переходу, більшою мірою визначаючи локальний напружено-деформований стан в області переходу полиці тавра в стінку.

Список літератури/References

1. Wang, Y., Zhou, Y., Lin, et al. (2020) Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites. Composites Part A: *Applied Science and Manufacturing*, 139, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106114>.
2. Ryan, K.R., Down, M.P., Banks, C.E. (2021) Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. *Chemical Engineering J.*, 403, 126–162. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126162>.
3. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G. et al. (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
4. Dak, G., Pandey, C. (2020) A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 377–406. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.019>.
5. Darwish S.M. (2004) Analysis of weld-bonded dissimilar materials. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.11.007>.
6. O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, S.S. Kozlitina, S.M. Kandala, A.E. Babenko. (2020) Numerical prediction of the state of beam products of different thickness during layer-by-layer electron beam surfacing. *The Paton Welding J.* 1, 14–23. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.01.02>.
7. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-

- strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, **3**, 7–14. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.02>.
8. A.S. Milenin. (2008) Physical and technological aspects of braze-welding of titanium-aluminium joints (Review). *The Paton Welding J.*, **4**, 16–19.
 9. Махненко В.И. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев. Наукова думка.
Makhnenko, V.I. (1976) *Computational methods for investigation of kinetics of welding stresses and strains*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 10. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
 - Makhnenko V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 11. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Popov, A.V. 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.
 12. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Замков В.Н. (ред.). Киев, Наукова думка.
(1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Ed. by V.N. Zamkov. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

PREDICTION OF THE KINETICS OF TEMPERATURE FIELDS AND STRESS-STRAIN STATE OF DISSIMILAR PRODUCTS, MANUFACTURED BY LAYER-BY-LAYER FORMING

O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozyinka, S.S. Kozlitina, N.I. Pivtorak, L.I. Dzyubak

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str, 03150, Kyiv, Ukraine,
E-mail: office@paton.kiev.ua

Layer-by-layer forming of metal structures and elements of various-purpose mechanisms is a promising venue of development of high technologies. Broad possibilities for optimization of technology parameters and accuracy of positioning the forming layers allow manufacturing thin-wall products of different geometry. Moreover, dissimilar structures can be produced by changing the filler material. Such a technological process requires thorough optimization of the respective technology cycle to guarantee the required quality of the dissimilar structure, depending on product shape, materials and features of a specific technology. This work is a study of the features of the kinetics of temperature field and stress-strain state of dissimilar structures during multilayer surfacing in the case of T-beam structures, made by xBeam 3D Metal Printer technology. 12 Ref., 6 Fig.

Keywords: layer-by-layer forming, dissimilar structure, temperature field, stress-strain state, mathematical modeling

Надійшла до редакції 30.11.2021

XIII Міжнародна спеціалізована виставка КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК



IEC **МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua,
plast@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

НОВІ
ДАТИ

13–15 квітня
2021

Генеральний
інформаційний партнер:



Ексклюзивний
медіа партнер:



Технічний
партнер:

