

ЧИСЕЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ БАЛКОВИХ ВИРОБІВ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ПРИ ПОШАРОВОМУ ФОРМУВАННІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ*

О.С. Міленін¹, О.А. Великоіваненко¹, С.С. Козлітіна¹, С.М. Кандаля¹, А.Є. Бабенко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Розроблено комплекс математичних моделей і засобів їх комп'ютерної реалізації для чисельного прогнозування кінетики температурних полів, фазового та структурного станів, механічних напружень і деформацій при пошаровому формуванні типових виробів зі сплавів на основі титану. На характерних прикладах електронно-променевого наплавлення балкових конструкцій таврового профілю з титанового сплаву ВТ6 за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer досліджено особливості кінетики їх стану в залежності від технологічних параметрів виробництва. Показано вплив товщини підкладки на закономірності розвитку температурного поля при пошаровому формуванні балкових елементів та на структурний стан металу після повного охолодження. На прикладі формування товстостінного таврового виробу показано, що важливим фактором, який дозволяє отримати низький рівень залишкових напружень, є оптимізація часу затримки між наплавленням кожного з валиків для забезпечення умов рівномірного охолодження конструкції. Бібліогр. 11, рис. 14.

Ключові слова: адитивні технології, електронно-променево наплавлення, xBeam 3D Metal Printer, математичне моделювання, макроструктура, механічні властивості, напружено-деформований стан

Стійкою сучасною тенденцією при розробці схем виробництва відповідальних конструкційних елементів складної форми є широке використання адитивних технологій. Зокрема, свого впровадження дістали схеми електронно-променевого наплавлення (ЕПН) деталей з легких металів (перш за все, титанових та алюмінієвих сплавів) для потреб авіакосмічної галузі [1–3]. Характерним прикладом реалізації такої технології в Україні є xBeam 3D Metal Printer, розроблений ПрАТ «НВО «Червона Хвиля» [4]. Цей технологічний процес передбачає пошарове формування за допомогою ЕПН типових виробів в умовах глибокого вакууму, що дозволяє ефективно фокусувати електронний промінь і уникати забруднення металу домішками проникнення в разі його високої спорідненості з киснем і/або азотом. Підкладка формованого виробу поміщається в силове оснащення на рухомій платформі, яка переміщується відносно нерухомого джерела нагрівання із заданою швидкістю V_s (рис. 1). Джерело нагрівання є складовою комплексної системи фокусування променя та подачі присадного дроту, електронний промінь фокусується таким чином, щоб він мав форму гострого конуса, який сходиться максимально близько до поверхні формованої деталі. Це дозволяє реалізу-

вати ефективно та досить рівномірне розплавлення присадного дроту без істотного його перегрівання, а також забезпечує супутнє підігрівання області наплавлення для активації поверхні твердого металу перед його контактом з рідким присадним матеріалом.

Для отримання виробів гарантованої якості необхідним є оптимізування технологічних параметрів відповідних виробничих процесів. Зокрема, це стосується забезпечення сплавлення послідов-

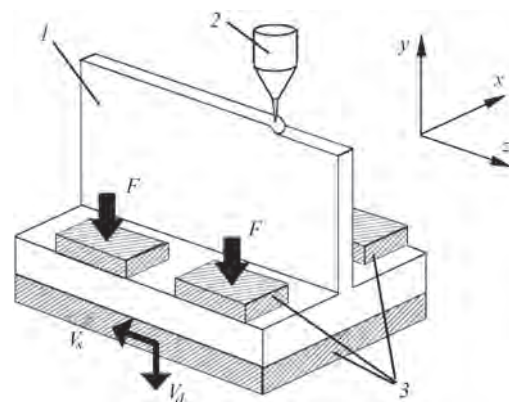


Рис. 1. Схема формування стінки балкової конструкції таврового профілю за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer: 1 — виріб, що формується; 2 — джерело нагрівання; 3 — технологічне оснащення

О.С. Міленін – <http://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, С.М. Кандаля – <http://orcid.org/0000-0002-2036-0498/>

*За матеріалами доповіді, представленого на IX міжнародній конференції «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів», 9–13 вересня 2019 р., м. Одеса (в роботі також приймали участь О.В. Махненко, Н.С. Ананченко, Д.В. Ковальчук).

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, С.С. Козлітіна, С.М. Кандаля, А.Є. Бабенко, 2020

них наплавлюваних шарів, гомогенності структури металу, низького рівня залишкових деформацій та напружень. Тому як проведення широкого спектра експериментальних досліджень пов'язано зі значними економічними втратами, раціональним є використання математичного та комп'ютерного моделювання процесів, що визначають кінцеву якість виробів.

В рамках цієї роботи було розроблено комплекс підходів для чисельного прогнозування кінетики температурних полів, фазового та структурного станів, механічних напружень і деформацій при пошаровому формуванні типових балкових конструкцій різного розміру за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer з метою вивчення особливостей впливу технологічних параметрів на поточний і кінцевий стан виробів.

Розробка математичної моделі кінетики температурного та напружено-деформованого станів типових конструкційних елементів при пошаровому формуванні зразка. Першим етапом чисельного дослідження кінетики стану виробу в процесі пошарового формування є прогнозування розвитку температурного поля. В свою чергу, нерівномірне нагрівання, зміна структурного складу, а також температурні залежності властивостей металу визначають просторовий розподіл напружень і деформацій у конструкції. Розподіл температур у часі та просторі визначається процесами кондуктивного поширення, для яких зв'язок між моментом часу t і полем температур $T = T(x, y, z)$ описується тривимірним рівнянням теплопровідності [5]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\lambda(x, y, z, T) \nabla T(x, y, z)) = \\ = \rho c_p(x, y, z, T) \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

де λ , c_p — відповідно, теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу конструкції в даній точці як функції від просторових координат і температури.

Джерелами тепла в розглянутому випадку є електронний промінь з потужністю q_i . Необхідно додатково зазначити, що використання присаджувального матеріалу означає, що частина енергії джерела витрачається на його розплавлення, і внесення тепла в конструкцію буде відбуватися двома шляхами: безпосередньо від джерела та переносом розплавленого металу на формований виріб. Це може бути враховано безпосередньою зміною профілю конструкції шляхом додавання ділянок, температура яких T_m трохи вища температури ліквідусу T_L для врахування перегрівання присаджувального матеріалу. При цьому величина ефективного тепловкладення джерела має бути зменшена на величину енерговитрат на розплавлення металу

присадки q_m . Таким чином, розподіл енергії в плямі нагрівання може бути описаний за допомогою нормального закону розподілу, який має наступний математичний вираз:

$$q(x, z) = \eta(q_i - q_m) \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2}{K_x} - \frac{(z-z_0)^2}{K_z} \right], \quad (2)$$

$$q_m = \int_{T_c}^{T_m} c_p(T) v_m S_m dT + g_{ft} v_m S_m \rho(T_L),$$

де η — коефіцієнт корисної дії джерела нагрівання (теплова ефективність); x_0, z_0 — координати центру джерела нагрівання; K_x, K_z — коефіцієнти концентрації потоку енергії у відповідних напрямках; ρ — густина металу конструкції як функція від температури; v_m — швидкість подачі присаджувального матеріалу, S_m — площа поперечного перерізу дроту; g_{ft} — прихована теплота плавлення присаджувального матеріалу.

Граничні умови, необхідні для розв'язання задачі (1), залежать від природи стоку тепла з поверхні виробу. Так, в області контакту з технологічним оснащенням стік тепла може бути описаний законом Ньютона, тоді як на вільній поверхні він характеризується тепловим випромінюванням (закон Стефана–Больцмана) з додатковим вкладенням енергії з поверхні виробу, що наплавляється, при розміщенні там джерела нагрівання. Таким чином, граничні умови для розв'язання задачі теплопровідності в даному випадку мають такий математичний вираз:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_t (T - T_c), & \text{в області контакту з оснащенням} \\ \varepsilon \sigma_{SF} (T^4 - T_c^4) - q, & \text{на вільних поверхнях} \end{cases} \quad (3)$$

де n — нормаль до поверхні; α_t — коефіцієнт тепловіддачі; T_c — температура навколишнього середовища; ε — ступінь чорноти матеріалу; σ_{SF} — константа Стефана–Больцмана; q — потік енергії електронно-променевого нагрівання.

На основі результатів прогнозування кінетики температурного поля при пошаровому формуванні типових виробів з титанового сплаву ВТ6 можливо спрогнозувати розмір зерна металу та певні його властивості в різних частинах конструкції в залежності від технологічних параметрів процесу. Відомо, що зі збільшенням швидкості охолодження при кристалізації відбувається подрібнення структурних складових типових сплавів на основі титану. На рис. 2 показано залежність розміру зерна для сплаву ВТ6 від швидкості

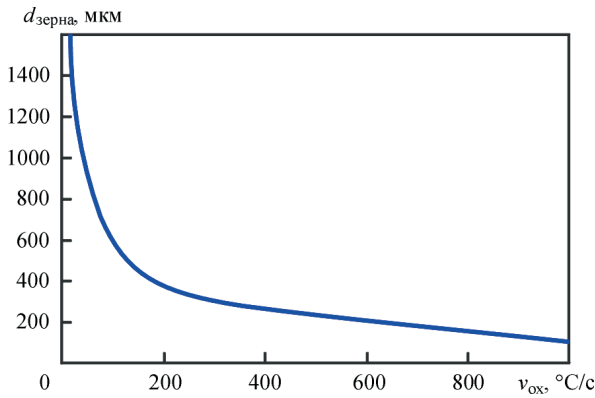


Рис. 2. Залежність розміру зерна титанового сплаву ВТ6 від швидкості охолодження [6]

охолодження [6], яка може бути апроксимована наступним рівнянням:

$$d_{\text{зерна}} = \begin{cases} 8220v_{\text{ox}}^{-0,58} \text{ мкм, при } v_{\text{ox}} \geq 6 \text{ } ^\circ\text{C/c} \\ 2500 \text{ мкм, при } v_{\text{ox}} < 6 \text{ } ^\circ\text{C/c} \end{cases}, \quad (4)$$

де $d_{\text{зерна}}$ — характерний розмір зерна металу; v_{ox} — швидкість охолодження.

Крім того, фактичні механічні характеристики сплаву ВТ6 залежать від швидкості охолодження при фазовому перетворенні, що визначає остаточне процентне співвідношення α -фази в $T, ^\circ\text{C}$

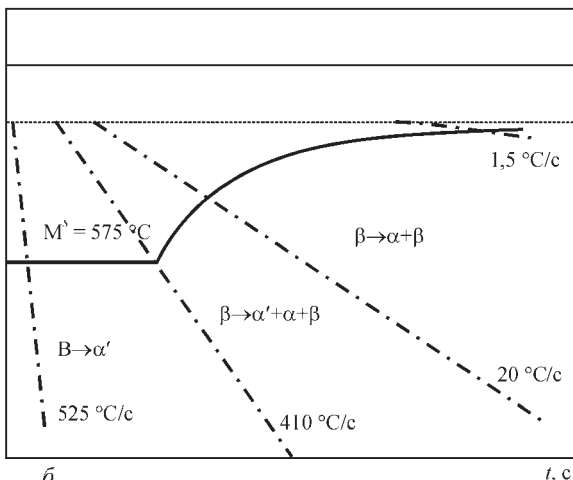
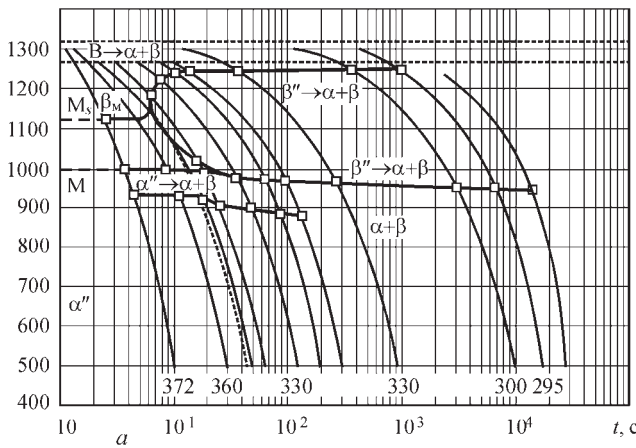


Рис. 3. Діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 при охолодженні: а — [7]; б — [8]

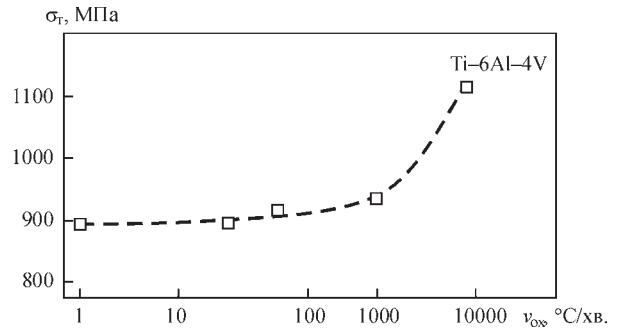


Рис. 4. Залежність границі текучості сплаву ВТ6 від швидкості охолодження [9]

($\alpha+\beta$)-сплаві. На рис. 3 представлені діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 при охолодженні [7, 8], швидкість охолодження визначається в діапазоні перетворень мікроструктури β в ($\alpha+\beta$), яке відбувається в діапазоні від 1000 до 670 $^\circ\text{C}$. Слід зазначити, що пошарове ЕПН за рахунок низького тепловкладення та високих швидкостей руху джерела нагрівання характеризується досить високою інтенсивністю охолодження наплавленого матеріалу, що сприяє утворенню мартенситної мікроструктури з вмістом α' -фази. Як видно на рис. 4 [9] та при збільшенні швидкості охолодження, отже, і при зменшенні розміру зерна, границя текучості сплаву ВТ6 зростає. Дані на рис. 5 [8], які отримані стосовно адитивної технології пошарового формування зразків методом ЕПН показують, що збільшення відносного вмісту α' -фази $V_{\alpha'}$ викликає незначне зниження границі текучості сплаву ВТ6, а відносне подовження δ при цьому знижується досить помітно (рис. 5, б). Ці залежності можуть бути апроксимовані наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= 995 - 0,107v_{\text{ox}} - 18V_{\alpha'}, \text{ МПа,} \\ \delta &= -9V_{\alpha'} + 10,9, \%, \end{aligned} \quad (5)$$

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля та розвитку НДС базується на скінченно-елементному описанні з використанням восьмивузлових скінченних елементів (СЕ). У межах об'єму СЕ розподіли температур, напружень і деформацій приймаються однорідними. Приріст тензора деформацій може бути представлено як суперпозиція наступних компонентів [10]:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + \delta_{ij}d\epsilon_T, \quad (i, j = x, y, z), \quad (6)$$

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, температурним розширенням, відповідно; δ_{ij} — символ Кронекера.

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

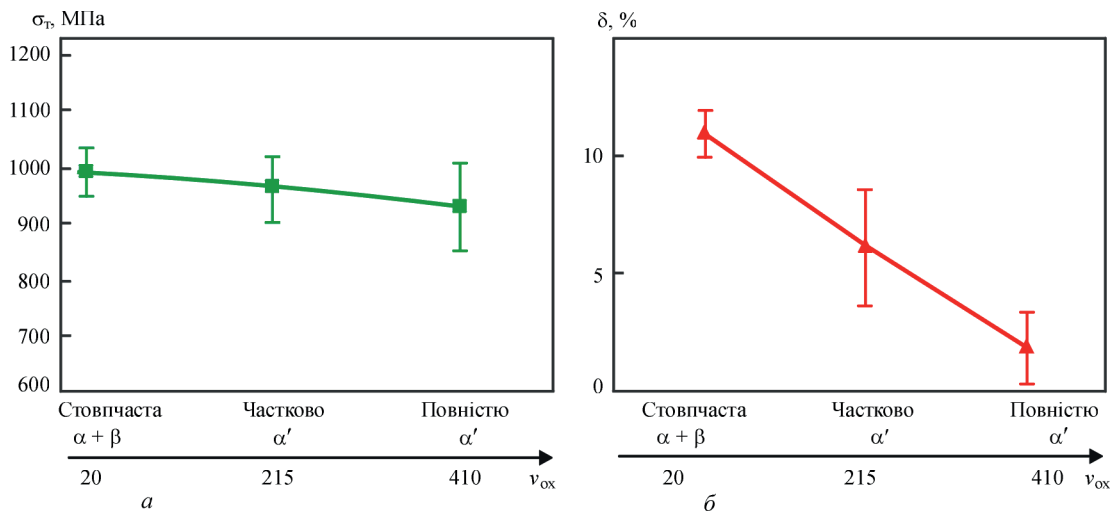


Рис. 5. Залежність границі текучості (а) та відносного подовження (б) сплаву ВТ6 від швидкості охолодження та кількості α' -фази [8]

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (7)$$

де σ — середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij} , тобто $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$; $K = (1 - 2\nu)/E$ — модуль об'ємного стиску; G — модуль зсуву, E — модуль Юнга; ν — коефіцієнт Пуасона; φ — об'ємні деформації.

Приріст деформацій миттєвої пластичності $d\epsilon_{ij}^p$ в конкретному СЕ обчислювався за допомогою лінійної залежності скалярної функції Λ і девіаторної складової тензора напружень, а саме:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\Lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (8)$$

Конкретне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні пластичного плину матеріалу Φ , яка характеризується напруженням σ_s :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_s \text{ недопустимий,} \end{aligned} \quad (9)$$

де σ_i — інтенсивність напружень.

Виходячи зі сказаного вище, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{ij} &= \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\epsilon_T) - \\ &- \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (10)$$

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування; Ψ — функція стану матеріалу визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T, \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \text{ стан } \sigma_i > \sigma_s \text{ недопустимий.} \end{aligned} \quad (11)$$

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування у рамках крайової задачі нестационарної термопластичності, що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плином матеріалу. Виходячи з конкретного значення функції Ψ із (11) визначається поле деформацій на кожному етапі навантаження з урахуванням залежності $\sigma_s(T, \epsilon_p)$:

$$\Delta\epsilon_{ij} = \left(\Psi - \frac{1}{2G}\right) \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (12)$$

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

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\Delta\epsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta\epsilon \right) + J_{ij}, \quad (13)$$

де

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\epsilon_{ii}}{3},$$

$$J_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left[(b_{ij} - \delta_{ij}b) + \delta_{ij} \left(K\sigma^* - \frac{\Delta\epsilon_T}{K} \right) \right], \quad (14)$$

$$b_{ij} = \left(\frac{\sigma_{ij}}{2G}\right)^* + \delta_{ij}[\sigma_m^* (K - \frac{1}{2G})^* - \Delta\varphi], \quad b = \frac{b_{ii}}{3}.$$

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянням статки для внутрішніх СЕ і граничним умовам — для поверхневих. У свою чергу, компоненти вектора переміщень $\Delta U_i = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ задовольняють відповідним умовам на границі. Розв'язувана система рівнянь у змінних вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному

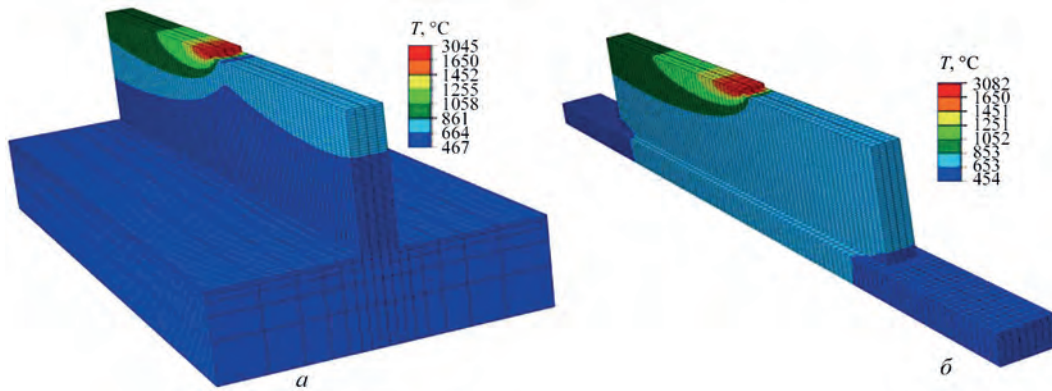


Рис. 6. Порівняння розподілу температур в тавровому зразку з великою (а) та малою (б) підкладками в процесі пошарового формування деталі

кроці простежування та ітерацій по Ψ визначається мінімізацією наступного функціонала (варіаційний принцип Лагранжа):

$$\Theta_I = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_P^{m,n,r}, \quad (15)$$

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:

$$\frac{\partial \Theta_I}{\partial \Delta U_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_I}{\partial \Delta V_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_I}{\partial \Delta W_{m,n,r}} = 0. \quad (16)$$

Результати моделювання температурних полів при пошаровому формуванні таврового зразка та прогнозування структури і механічних властивостей матеріалу. Особливості кінетики температурного поля досліджувались на характерному прикладі пошарового формування балкового виробу таврового профілю. Рекомендовані параметри процесу наступні: присаджувальний матеріал — титановий пруток діаметром 1,6 мм, потужність електронного променя — 4,5 кВт, швидкість подачі присаджувального матеріалу — 14 мм/с, швидкість переміщення підкладки — 14 мм/с. Для визначення впливу геометричних особливостей виробу розглядалося ЕПН на підкладки різної товщини, а саме масивній розміром 8×30×70 мм та малій — 3×6×110 мм. Результати розв'язання задачі нестационарної теплопровідності показали, що кінетика температурного поля при пошаровому формуванні таврового зразка на масивній підкладці має істотно тривимірний характер, тоді як для випадку малої підкладки відбувається більш рівномірне прогрівання зразка за об'ємом (див. рис. 6), що можна пояснити ефектом накопичення тепла.

Як показав аналіз термоциклів (рис. 7), в діапазоні мікроструктурних перетворень від 1000 до 670 °С матеріал нагрівається та охолоджується 3 рази: перший раз під час наплавлення шару, потім — під час наплавлення наступних двох шарів. Останній цикл охолодження в зазначеному діапазоні температур визначає залишкову мікроструктуру та розмір зерна. Максимальна температура нагрівання в розглянутій області від наплавлення наступного третього та більш віддалених шарів — нижче температури 1000 °С, тому мікроструктурні перетворення та значна зміна розміру зерна не відбуваються. Крім того, даний процес характеризується досить високими швидкостями охолодження (160...660 °С/с), тому згідно діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 (див. рис. 2) в наплавленому матеріалі таврового зразка прогнозується мартенситна мікроструктура з вмістом α' -фази. За даними розрахунків в матеріалі першого шару, де отримана найвища швидкість охолодження через наявність масивної холодної підкладки, утворюється зерно розміром 180 мкм, а в точках при формуванні 5 і 20 шарів, де матеріал наплавляється на вже розігрітий зразок, розмір зерна значно більший і досягає 300...450 мкм.

Ці результати відповідають наявним експериментальним даним [4] про макроструктуру зразка титанового сплаву ВТ6, отриманого за технологією пошарового формування xBeam 3D Metal Printer: розмір зерна в верхніх шарах зразка ста-

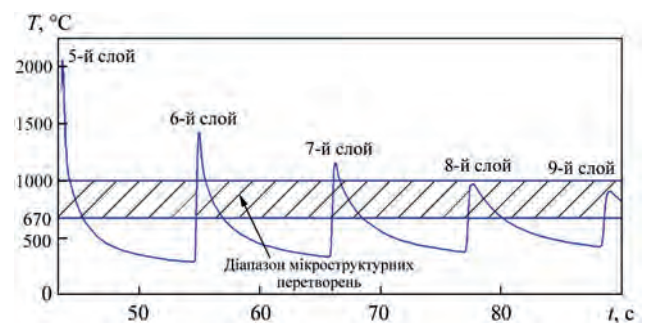
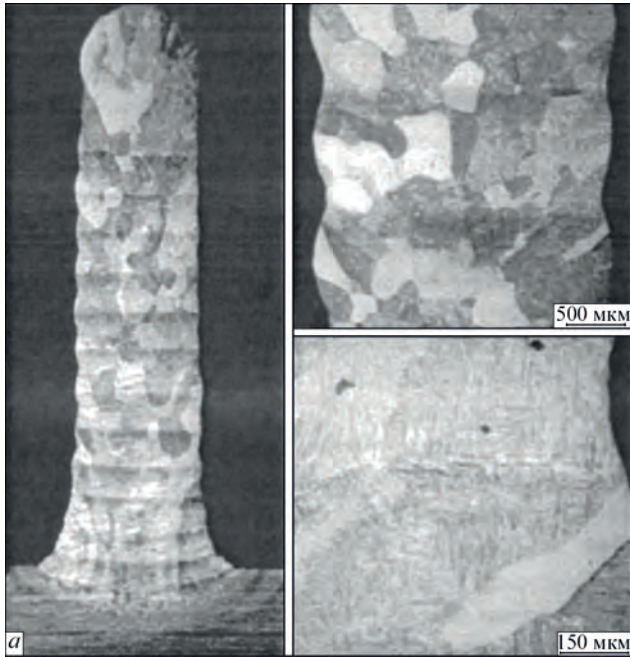


Рис. 7. Характерний термоцикл в матеріалі таврового зразка (5-й шар) при багатшаровому формуванні

новить приблизно 300...450 мкм, а в шарах біля основи зразка 150...250 мкм (рис. 8). Таким чином, результати прогнозування показали задовільну точність у порівнянні з експериментом, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування макроструктури та механічних властивостей металу конструкцій, отриманих за допомогою подібних технологій.



Як було показано авторами в попередніх роботах, одним з ефективних шляхів оптимізації температурних полів при пошаровому формуванні типових балкових конструкцій є використання змінного по висоті виробу часу затримки Δt наплавлення кожного з валиків [11]. Це дозволяє забезпечити природну дисипацію надлишкового тепла, яке накопичується по мірі наплавлення ви-

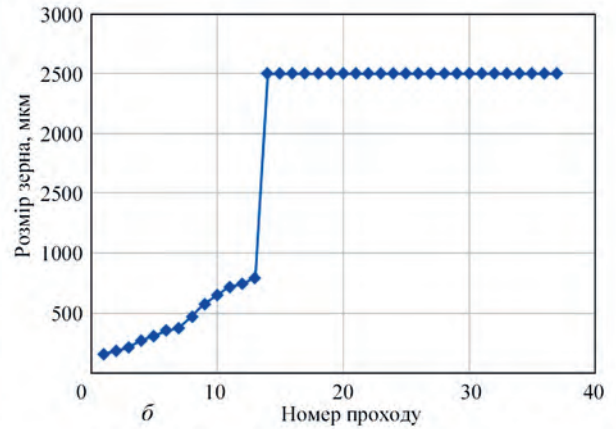


Рис. 8. Макроструктура таврового зразка з титанового сплаву ВТ6: *a* — експериментальні дослідження [11]; *б* — результати розрахунку

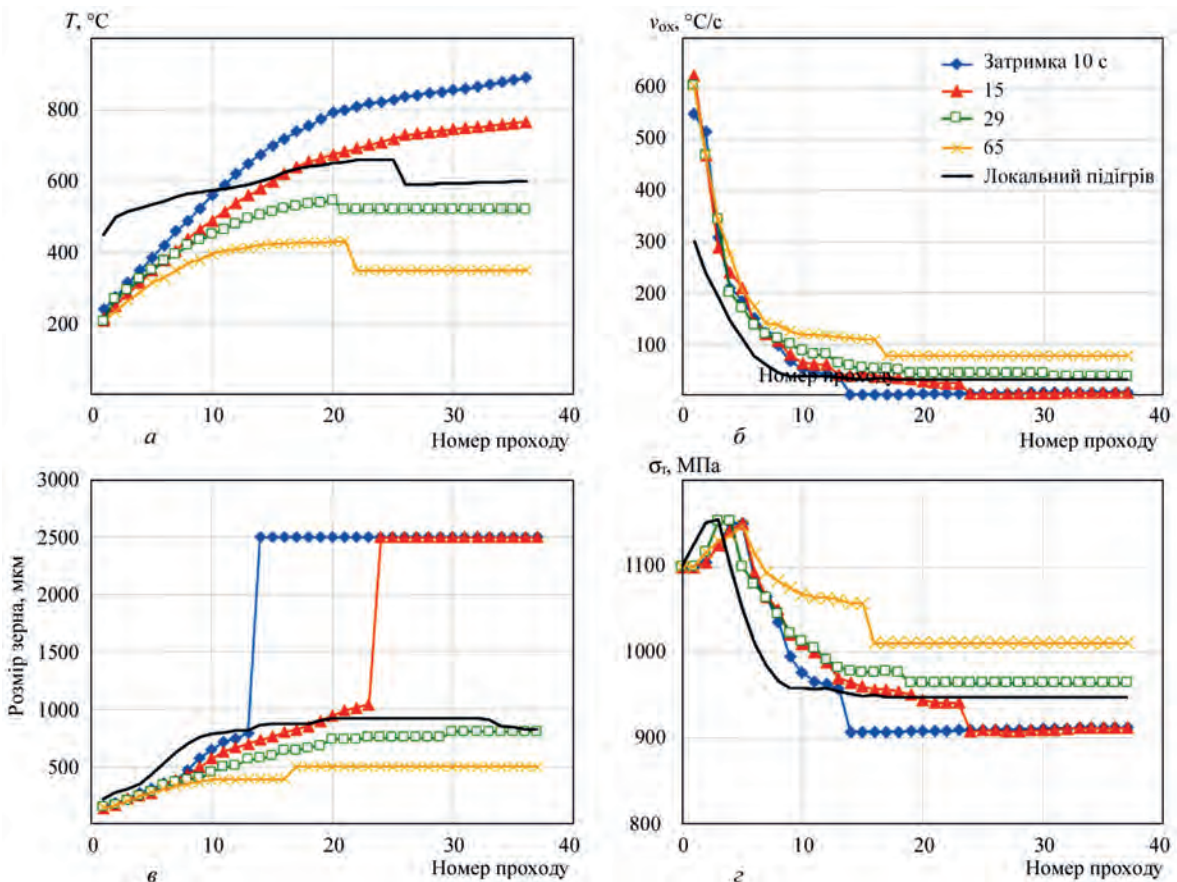


Рис. 9. Залежність температури у точці перед наплавленням наступного шару (*a*), швидкості охолодження (*б*), розміру зерна (*в*) і границі текучості матеріалу (*г*) від номера проходу для різного часу затримки між проходами

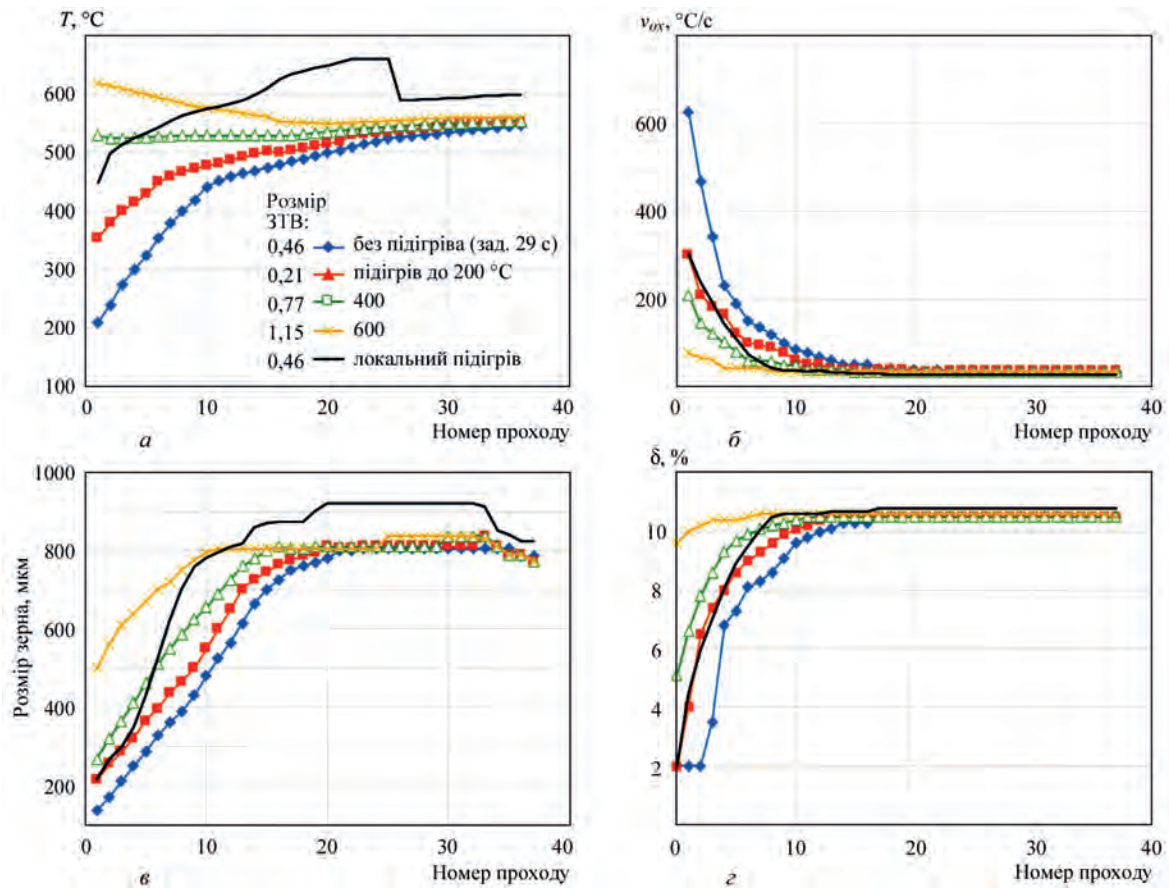


Рис. 10. Залежність температури у точці перед наплавленням наступного шару (а), швидкості охолодження (б), розміру зерна (в) і відносного видовження (д) від номера проходу для різного попереднього підігрівання підкладки

робу, та уникнути його перегрівання без необхідності варіювання потужності (швидкості) джерела нагрівання. Цей технологічний параметр суттєво впливає на швидкість охолодження, розмір зерна і, як наслідок, на границю текучості матеріалу виробу (рис. 9, а–в). З наведених даних видно, що кращі міцнісні характеристики та більш рівномірна структура матеріалу визначені в зразку, виготовленому з більшим часом Δt , тоді як недостатній час між наплавленням валиків $\Delta t = 10$ с та 15 с має наслідком понижені міцнісні характеристики металу на верхніх шарах, і нерівномірність зерна по висоті. З іншого боку, занадто великий час між проходами (65 с) веде до формування надлишку α' -фази, і зменшення пластичності матеріалу. Попереднє підігрівання підкладки дозволяє отримати більш рівномірною структуру на нижніх шарах і суттєво покращує пластичність матеріалу (рис. 10, а–в). Для часу між наплавленням валиків $\Delta t = 10$ с та 15 с розмір зерна суттєво збільшується, починаючи з номера валика, на якому температура між проходами перевищує $670\ ^\circ\text{C}$: тоді зерно остаточно формується після повного охолодження зразка, і швидкість охолодження при цьому низька. При часі між наплавленням валиків $\Delta t = 29$ с, температура між валиками не перевищує $670\ ^\circ\text{C}$, отже отримане зерно більш рівномірне.

Характерні особливості формування залишкового напружено-деформованого стану при пошаровому формуванні товстостінних виробів таврового профілю за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer. У попередніх роботах авторами було досліджено особливості кінетики напружено-деформованого стану (НДС) при пошаровому формуванні балкових, циліндричних і сферичних конструкційних елементів при використанні технології xBeam 3D Metal Printer [11].

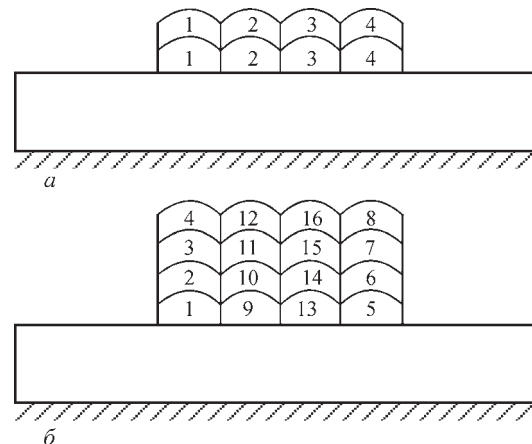


Рис. 11. Характерні схеми послідовності наплавлення валиків при формуванні балкової конструкції таврового профілю: а – наплавлення шарами (схема А); б – наплавлення стовпцями (схема Б)

Зокрема, підкреслювалося, що однією з переваг даної технології є можливість наплавлення досить вузьких валиків рідкого металу та виробництво тонкостінних конструкційних елементів (з товщиною стінки 2...3 мм) з невеликими геометричними допусками. Але застосовність xBeam 3D Metal

Printer не обмежується тільки тонкостінними виробами: при необхідності отримання товстостінних деталей можуть бути використані різні схеми послідовності накладення формуючих валиків, які дозволяють отримувати конструкції з різною товщиною стінки без істотної зміни відповідних тех-

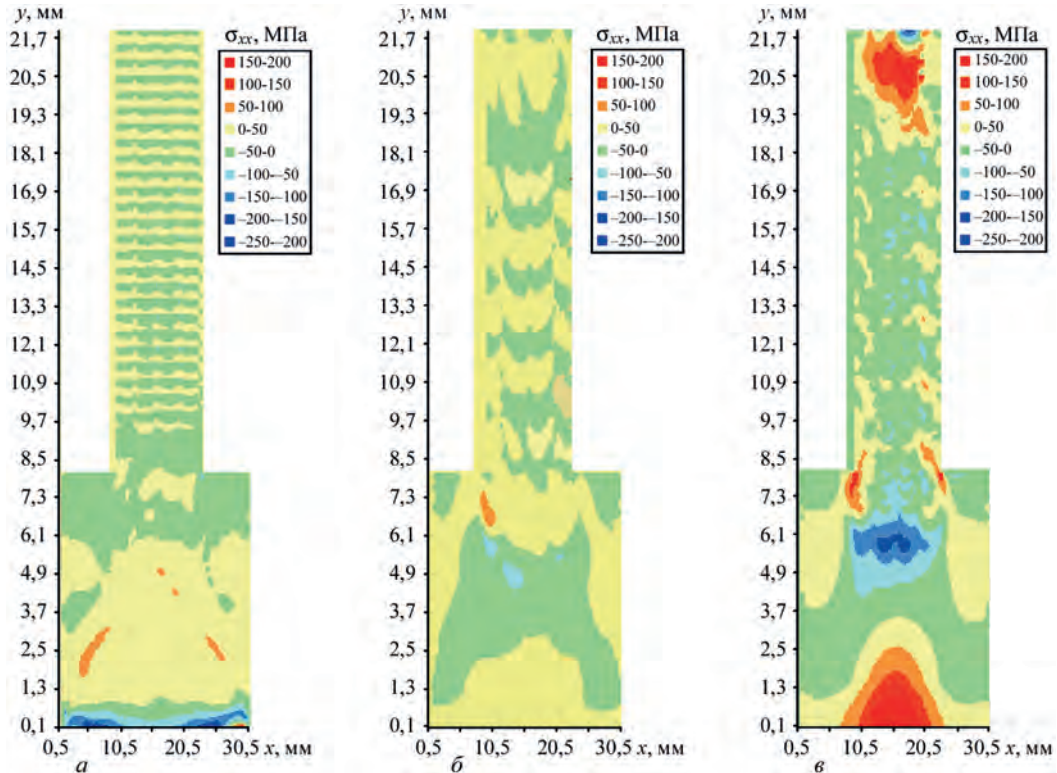


Рис. 12. Розподіл залишкових напружень σ_{xx} (МПа) в перерізі виробу таврового профілю: *a* — схема А з оптимізацією; *б* — схема Б з оптимізацією; *в* — схема Б без оптимізації (див. рис. 11)

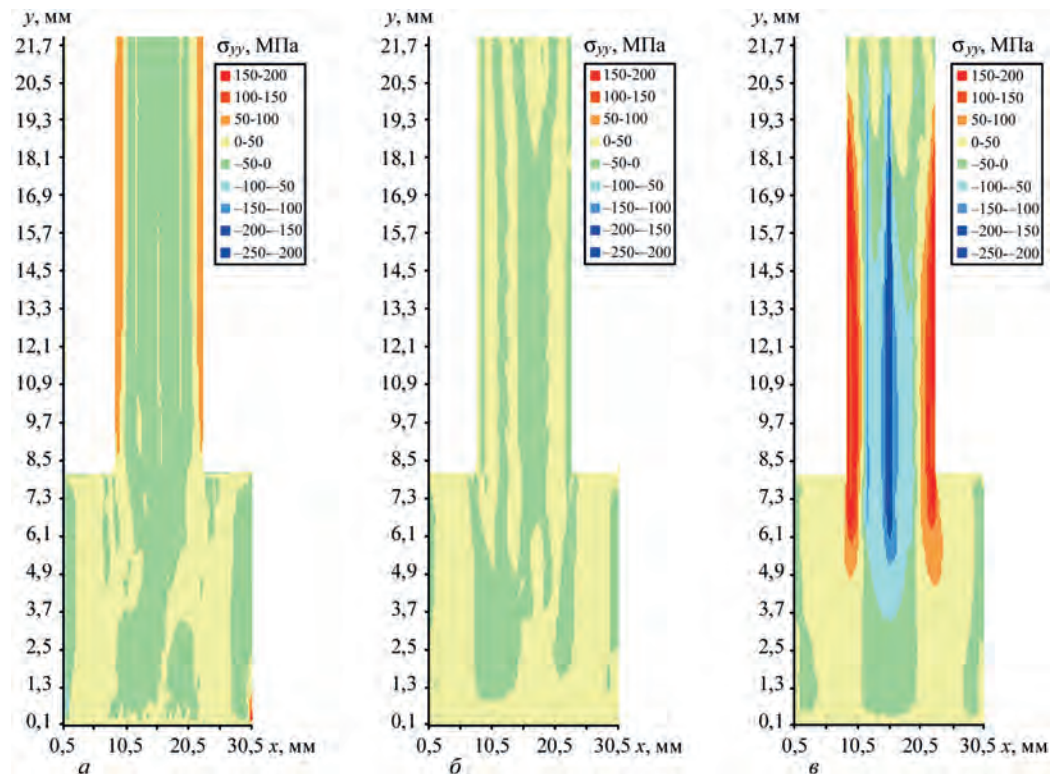


Рис. 13. Розподіл залишкових напружень σ_{yy} (МПа) в перерізі виробу таврового профілю: *a* — схема А з оптимізацією; *б* — схема Б з оптимізацією; *в* — схема Б без оптимізації (див. рис. 11)

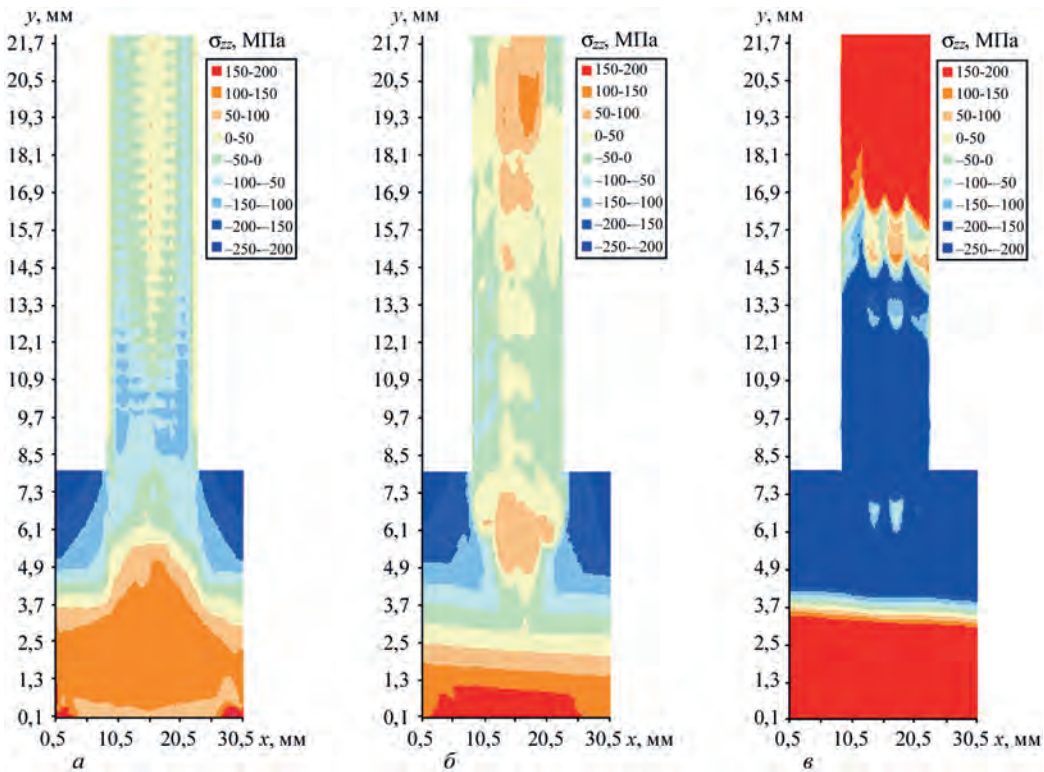


Рис. 14. Розподіл залишкових напружень σ_{zz} (МПа) в перерізі виробу таврового профілю: *a* — схема А з оптимізацією; *b* — схема Б з оптимізацією; *v* — схема Б без оптимізації (див. рис. 11)

нологічних параметрів. Проте такий процес, безумовно, вимагає оптимізації, в тому числі, з точки зору раціонального вибору часу початку формування кожного валика (час затримки Δt) та формування сприятливого залишкового НДС.

В рамках цієї роботи на прикладі товстостінної балки таврового профілю було досліджено особливості залишкового НДС в залежності від технологічних умов виробництва. Так, було розглянуто дві характерні схеми наплавлення стінки тавра товщиною 12,8 мм, яка складається з чотирьох паралельних валиків шириною 3,2 мм і висотою 0,8 мм (рис. 11), матеріал конструкції – титановий сплав ВТ6. Принципова різниця між цими схемами полягає в тому, що для схеми А стінка формується послідовними горизонтальними шарами, тоді як для схеми Б формуючими є вертикальні стовпці.

На рис. 12–14 показані результати прогнозування залишкових полів напружень в перерізі товстостінної балки для схем А і Б з урахуванням оптимізації температурних полів шляхом вибору оптимального часу затримки Δt , а також наплавлення за схемою Б без такої оптимізації. Як видно з наведених результатів, оптимізація температурного поля дозволяє отримати достатньо рівномірне за товщиною прогрівання конструкції, незважаючи на різну послідовність накладення валиків. Таким чином, реалізуються умови рівномірного охолодження виробу і, відповідно, низький рівень залишкових напружень. Природним концентратором напружень в такому випадку є область пе-

реходу полиці таврового профілю в стінку, де умови рівномірного охолодження не виконуються з причини масивності підкладки (полиці тавра). Якщо вимоги оптимізації температурного поля не дотримуються і конструкція прогривається нерівномірно, то це призводить до формування високих напружень, особливо, в поздовжньому напрямку (див. рис. 14, *v*). Тому раціональний вибір часу затримки між наплавленням валиків є важливим не тільки з точки зору гарантування сприятливих для якісного формування виробу умов, а й для зниження залишкових напружень, що необхідно для високих показників роботоздатності одержуваних конструкційних елементів.

Висновки

1. Розроблено комплекс математичних моделей для чисельного прогнозування кінетики температурних полів, фазового та структурного станів, механічних напружень і деформацій при пошаровому формуванні типових балкових конструкцій з титанового сплаву ВТ6 за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer. Порівняння з даними експериментальних досліджень показало задовільну точність отримуваних розрахункових результатів прогнозування макроструктури та механічних властивостей металу конструкцій.

2. Досліджено вплив розміру підкладки на кінетику температурного поля в процесі пошарового наплавлення стінки таврового профілю. Показано, що при масивній підкладці товщиною 8 мм розподіл тем-

ператур має істотно тривимірний характер, тоді як для випадку малої підкладки товщиною 3 мм відбувається більш рівномірне прогрівання зразка за об'ємом, що пояснюється ефектом накопичення тепла.

3. Показано, що кращі міцнісні характеристики та більш рівномірна структура матеріалу деталі, отриманої пошаровим формуванням, можна досягти при максимальному збільшенні часу затримки між наплавленням валиків, тоді як недостатній час має наслідком понижені міцнісні характеристики металу на верхніх шарах, і нерівномірність зерна по висоті. Проте, збільшення часу між проходами може привести до формування надлишку α' -фази і зменшення пластичності матеріалу. Ефективним шляхом для отримання більш рівномірною структури та покращення пластичності матеріалу є попереднє підігрівання пластини перед початком виготовлення конструкції.

4. На характерному прикладі пошарового формування балкової конструкції таврового профілю досліджено закономірності залишкового напруженого стану при виготовленні товстостінних конструкцій. Показано, що важливим фактором, який дозволяє отримати низький рівень залишкових напружень, є оптимізація часу затримки наплавлення кожного з валиків. При цьому забезпечуються умови рівномірного охолодження конструкції (за винятком області переходу полиці тавра в стінку) і суттєве зниження залишкових напружень. Порушення оптимального теплового режиму може призвести до істотного зростання залишкових напружень (особливо, поздовжніх), зумовивши негативний ефект на роботоздатність такої конструкції.

Список літератури/References

1. Edwards P. et al. (2013). Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, 6. DOI: 061016/1-061016/7.
2. Juechter V., Franke M.M., Merenda T. et al. (2018) Additive manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by selective electron beam melting for automotive applications. *Additive Manufacturing*, 22, 118–126. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.008.
3. Dutta B., Froes F.H. (2016) *Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges and Opportunities*. Oxford: Butterworth-Heinemann. DOI: 10.1016/C2015-0-02470-4.
4. Ковальчук Д.В., Мельник В.И., Мельник И.В. (2017) Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing. *Сборник трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*, Киев, сс. 45–52. Kovalchuk, D.V., Melnik, V.I., Melnik, I.V. (2017) New possibilities of additive manufacturing with technology xBeam 3D Metal Printing. *In: Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Processing of Materials*. Kyiv, 45-52.
5. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка. Makhnenko, V.I. (2006) *Safety service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Полькин И.С. (2006) Повышение свойств металлических материалов за счет применения новых технологических процессов. *Перспективные технологии легких и специальных сплавов*. Москва, Физматлит, сс. 66–73. Polkin, I.S. (2006) Improvement of properties of metallic materials due to application of new technological processes. *In: Advanced technologies of light and special alloys*. Moscow, Fizmatlit, 66-73 [in Russian].
7. Sieniawski J., Ziaja W., Kubiak K. (2013) Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys. *Titanium alloys*, 69–79.
8. Liu S., Shin Y.C. (2019) Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials and design*, 164, 1–23.
9. Patil S., Kekade S., Phapale K. (2016) Effect of α and β phase volume fraction on machining characteristics of titanium alloy Ti6Al4V. *16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry*, 65.
10. 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. DOI: 10.1007/s10559-019-00117-8.
11. 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 Journal*, 3, 7–14. DOI: 10.15407/tpwj2017.03.02.

NUMERICAL PREDICTION OF KINETICS OF THE STATE OF BEAM PRODUCTS OF DIFFERENT THICKNESSES DURING LAYER-BY-LAYER ELECTRON BEAM SURFACING

O.S. Milenin¹, O.A. Velikoivanenko¹, S.S. Kozlitina¹, S.M. Kandala¹, A.E. Babenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Pobedy Ave., Kyiv-56, Ukraine

A complex of mathematical models and their computer means for numerical prediction of the kinetics of temperature fields, phase and structural states, mechanical stresses and deformations in layer-by-layer formation of typical products of titanium-based alloys was developed. On the typical examples of electron beam surfacing of T-shaped beam structures of titanium VT6 alloy produced with the help of xBeam 3D Metal Printer technology, the peculiarities of their kinetics depending on the technological parameters of production were investigated. The influence of the thickness of the substrate on regularities of the temperature field development during layer-by-layer formation of beam elements and on the structural state of the metal after complete cooling was shown. On the example of forming a thick-walled T-shape product it was shown, that an important factor, that allows obtaining a low level of residual stresses, is the optimization of the delay time between the surfacing of each of the beads to provide the conditions of uniform cooling of the structure. 11 Ref., 14 Fig.

Keywords: additive technologies, electron beam surfacing, xBeam 3D Metal Printer, mathematical modelling, macrostructure, mechanical properties, stress-strain state

Надійшла до редакції 21.11.2019