

УДК 620

DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.84.144127>

Прогнозування структури і механічних властивостей титанового сплаву ВТ6 при пошаровому формуванні 3D виробів за допомогою адитивної технології електронно-променевого наплавлення

О.В. Махненко¹ • М.С. Ананченко² • С.М. Кандаля¹ • А.Є. Бабенко² • Д.В. Ковальчук³

1 - Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна;

2 - НТУУ «КПІ ім. Сікорського», Київ, Україна; 3 - ПАТ «НВО «Червона Хвиля», Київ, Україна

Received: 10 October 2018 / Accepted: 16 November 2018

Анотація. Розглянута проблема забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей конструкційних елементів із титанового сплаву, які отримані за допомогою адитивних технологій з використанням присадкових матеріалів, зокрема, технології електронно-променевого наплавлення xBeam 3D Metal Printer. Проведений аналітичний огляд існуючих даних щодо залежності механічних властивостей, розміру зерна та мікроструктурного складу титанового сплаву ВТ6 від швидкості охолодження матеріалу. На основі математичного моделювання визначені температурні розподіли в процесі пошарового формування 3D таврового зразку зі сплаву ВТ6, залишкові напруження та деформації формозміни. Зроблені прогнозні оцінки макро- і мікроструктури, а також механічних властивостей матеріалу зразка. Порівняння з результатами експериментального дослідження макроструктури показало задовільну точність моделювання. Розроблений підхід може використовуватися для прогнозування макроструктури і механічних властивостей виробів з титанових сплавів, отриманих за допомогою адитивних технологій пошарового формування. Але є потреба отримання експериментальних даних для високих швидкостей охолодження матеріалу в діапазоні 100-700 град/с.

Ключові слова: титанові сплави; адитивна технологія; швидкість охолодження; мікроструктура; розмір зерна; механічні властивості; математичне моделювання.

Вступ

Оптимізація адитивних технологій при пошаровому формуванні 3D виробів на основі застосування математичного моделювання з метою зниження обсягу експериментальних досліджень вимагає значних комп'ютерних і тимчасових витрат. Проте, вибір оптимальних технологічних параметрів на основі комп'ютерного прогнозування є найбільш перспективним.

Адитивні технології у виробництві титанових конструкційних елементів зі складною геометрією зараз бурхливо розвиваються, у першу чергу для аерокосмічної промисловості і медицини. Існує кілька різних підходів отримання металевих конструкцій на основі принципу пошарового формування об'єкта. Ці підходи відрізняються за типами витратних матеріалів і джерел нагріву. При використанні адитивних технологій на основі присадкових дротів швидкість нанесення і ефективність використання витратних матеріалів значно вище, ніж для порошкових матеріалів [1, 2, 3]. Електронно-променево наплавлення володіє більшим ККД у порівнянні з лазерним джерелом нагріву, але вимагає високого вакууму.

Основним недоліком підходів, що використовують наплавлення металевим дротом, є виникнення значних залишкових напружень і деформацій. Високі залишкові напруження можуть істотно знижувати експлуатаційні характеристики отриманих компонентів, особливо їх довговічність при циклічних навантаженнях, а залишкові деформації можуть призводити до неприпустимої формозміни і відбракування заготовок деталей. Позитивними є результати досліджень [3, 4, 6], які показали, що при оптимальних режимах електронно-променевого наплавлення можливо отримувати деталі складної форми з досить однорідною структурою металу наплавлених шарів, аналогічній структурі основного матеріалу підкладки. Тому прогнозування структури і механічних властивостей наплавленого матеріалу при пошаровому формуванні 3D виробів за допомогою адитивної технології електронно-променевого наплавлення є дуже актуальною проблемою.

1. Технологія електронно-променевого процесу багатощарового формування тривимірних зразків

У статті представлені результати дослідницької роботи з вивчення характерних особливостей процесу електронно-променевої наплавлення xBeam 3D Metal Printer деталей складної форми на прикладі модельних зразків невеликого розміру [6]. Технологічна схема на прикладі багатощарового формування характерного

✉ О.В. Махненко
makhnenko@paton.kiev.ua

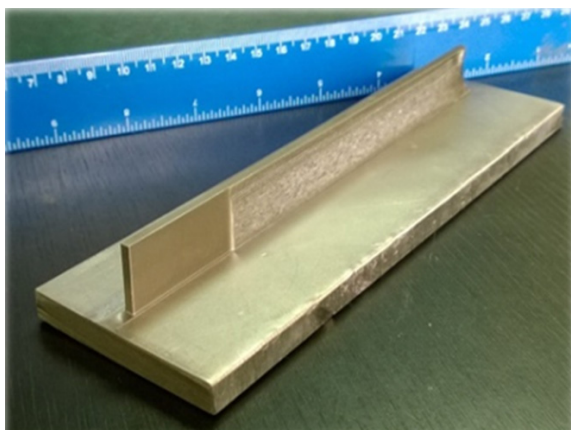
✉ М.С. Ананченко
Nikita_Ananchenko@i.ua

✉ С.М. Кандаля
st_kan@ukr.net

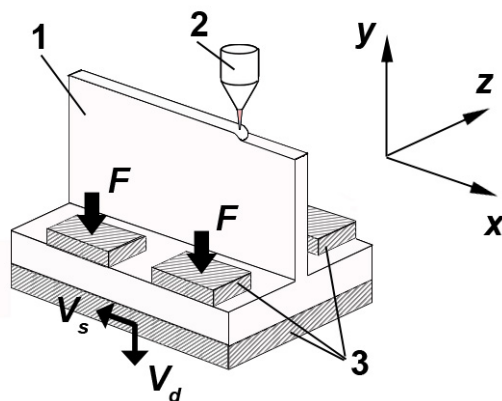
виробу таврового профілю представлена на рис.1. Процес проходить в умовах глибокого вакууму, дозволяє ефективно фокусувати електронний промінь і уникнути забруднення металу домішками впровадження в разі високої спорідненості з киснем і/або азотом. Підкладка формованого виробу (в даному випадку, це полка таврового профілю) поміщається в силове оснащення, яке притискає її до рухомої платформи зусиллям F , по нерухомому джерелі нагріву із заданою швидкістю V_s в площині пластини і переміщує періодично, в міру наплавлення кожного валика, в перпендикулярному напрямку зі швидкістю V_d .

Джерело зварювального нагріву є складовою комплексних систем фокусування променю і подачі присадного дроту (Рис.2а). Фокусування електронного променю проводиться таким чином, щоб промінь мав форму гострого конуса, що сходиться максимально близько до поверхні формованої конструкції. Це дозволяє реалізувати ефективно і досить рівномірне розплавлення присадкового дроту без істотного її перегріву, а також супутній підігрів області наплавлення для активації поверхні твердого металу перед його контактом з рідким присадковим матеріалом. Наявність дроту в сфокусованому промені визначає складний розподіл потоку енергії в плямі нагріву, як це показано на Рис.2б.

Як показали експериментальні випробування, виріб під час пошарового наплавлення отримав певну залишкову згинальну деформацію в поздовжньому напрямку в результаті утворення зварювальної усадки металу в області наплавлення. Крім того, торцеві області характеризуються нерегулярною структурою стінки профілю в результаті нерівномірності нагріву при наплавленні. Одним з переваг використовуваної технологічної схеми є можливість програмного контролю тепловкладення при наплавленні, що дає широкі можливості оптимізації технологічних параметрів даного процесу. Також, ефективним методом оптимізації зазначеного процесу є варіювання часу затримки між наплавленням кожного з валиків, а також раціональний вибір способу і ступеня попереднього підігріву.



а

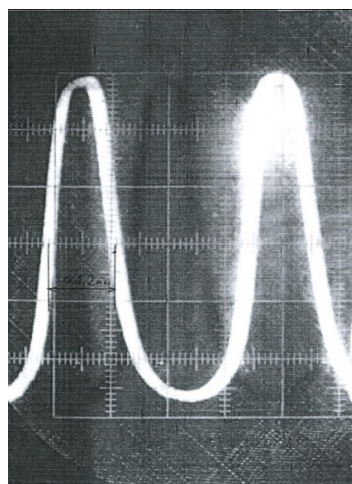


б

Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) виробу таврового профілю з титанового сплаву і технологічна схема процесу електронно-променевого багатозарового формування зразків таврового перетину (б)



а



б

Рис. 2. Схема модуля електронно-променевого нагріву (а) і експериментально визначена форма розподілу тепла в плямі нагріву (б)

2. Залежність механічних властивостей і мікроструктури матеріалу від швидкості охолодження

Відомо, що підвищення механічних властивостей конструкційних сталей та сплавів можливо досягти за рахунок зміни структури матеріалу. Як правило, експлуатаційні характеристики кращі у структури з меншим розміром зерна. Основним параметром, що визначає розмір зерна для сталей та сплавів є швидкість охолодження [7]. Зі збільшенням швидкості охолодження при кристалізації відбувається подрібнення структурних складових. На рис.3 показано залежність розміру зерна для титанового сплаву Ti-6Al-4V (BT6) в залежності від швидкості охолодження [8].

Швидкість охолодження сплаву BT6 визначають в діапазоні перетворень β мікроструктури в $\alpha+\beta$, яке відбувається в діапазоні від 1270 K (1000°C) до 940 K (670°C) (Рис. 4) [9].

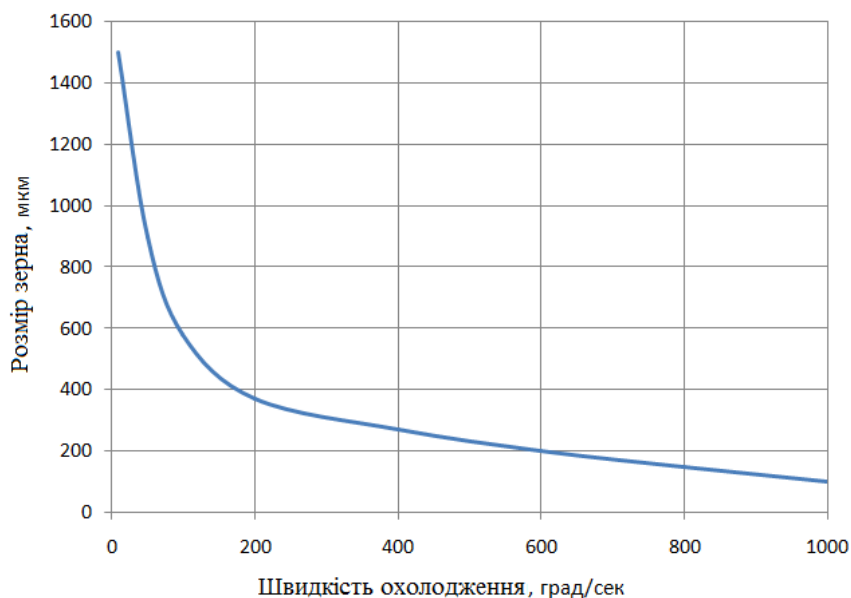


Рис. 3. Співвідношення між розміром зерна і швидкістю охолодження в сплаві BT6 [8]

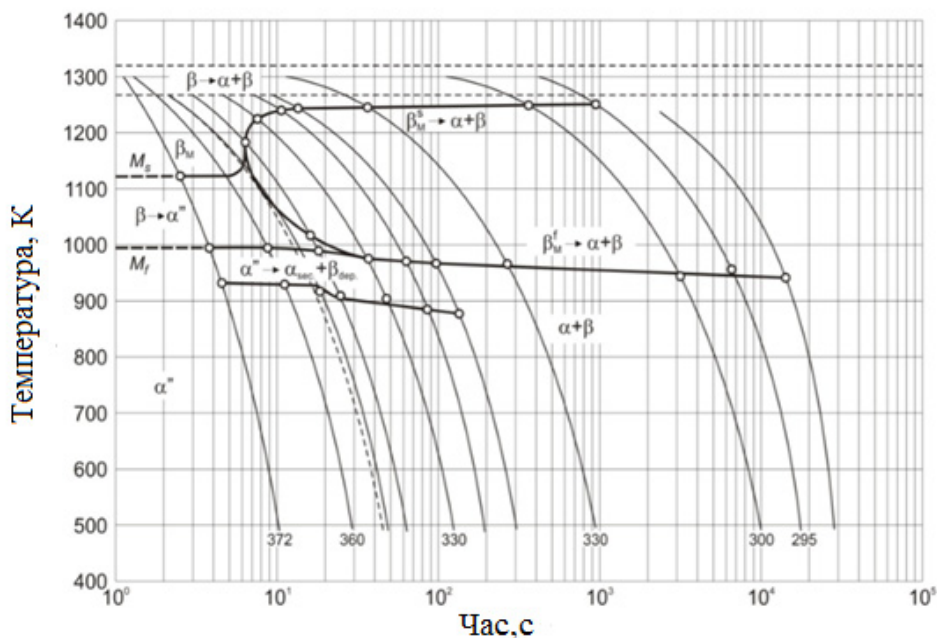


Рис. 4. Діаграма мікроструктурних перетворень сплаву Ti-6Al-4V при охолодженні [9]

Як було зазначено вище, механічні характеристики титанового сплаву BT6 залежать від швидкості охолодження при $\beta \rightarrow \alpha+\beta$ переході. Також вони залежать від відсоткового співвідношення α фази в $\alpha+\beta$ сплаві. Чим більше відсоткове відношення α фази – тим менша межа текучості [10]. Але при пошаровому електронно-променевому наплавленні за рахунок низьких тепловкладень і високих швидкостей руху джерела нагріву можливо досягнення досить високих швидкостей охолодження наплавленого матеріалу, що буде сприяти

утворенню мартенситної мікроструктури з вмістом α'' фази. Розглянемо більш детально вплив швидкості охолодження, адже це є основним параметром що впливає на міцність і пластичність матеріалу [9]. Як бачимо на рис.5 (а, б) [7], при збільшенні швидкості охолодження, а отже при зменшенні розміру зерна, межа текучості зростає, але відносне видовження зменшується. Також з рис.6 [11] видно, що при подрібненні структури межа текучості зростає. Отже можливо вибрати оптимальне співвідношення міцності та пластичності матеріалу.

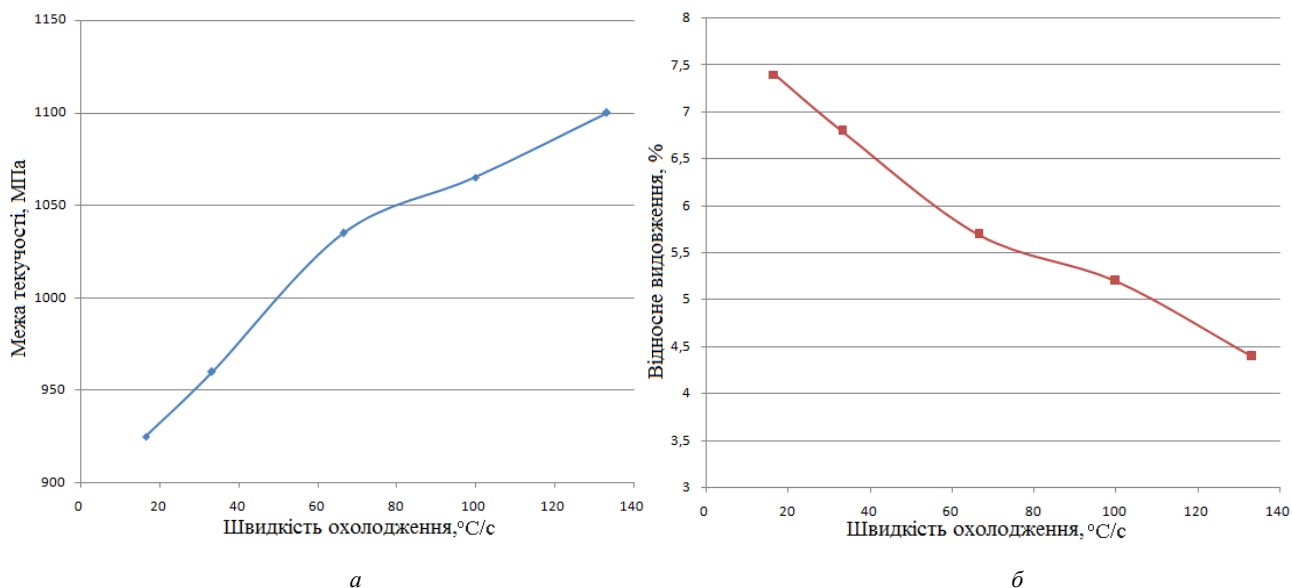


Рис. 5. Залежності механічних властивостей сплаву Ti-6Al-4V від швидкості охолодження [7]

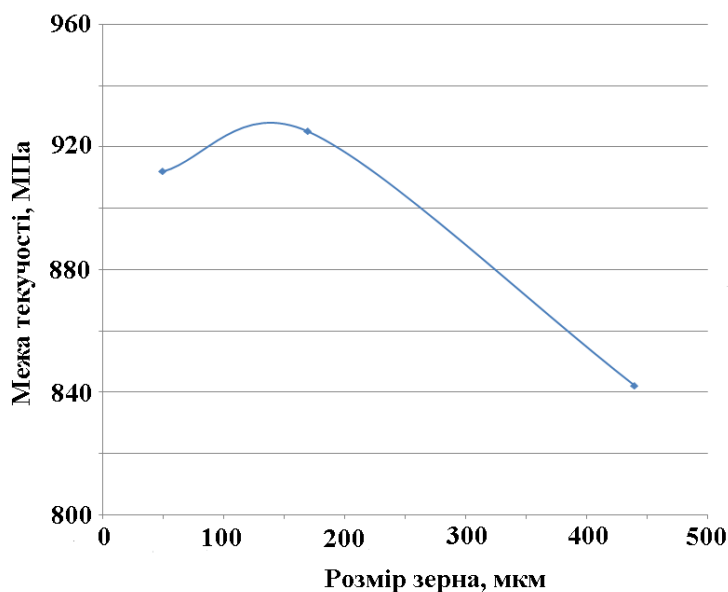


Рис. 6. Залежність межі текучості сплаву VT6 від розміру зерна [11]

3. Розробка математичної моделі теплових процесів

З метою вивчення характерних особливостей кінетики температурного стану конструкційних елементів з титанового сплаву в процесі електронно-променевого наплавлення на прикладі таврового тривимірного зразка (Рис.1) було використані методи математичного моделювання.

Відповідно необхідно було вирішити наступні завдання:

- розробити математичну модель для чисельного прогнозування кінетики тривимірного температурного поля зразка з титанового сплаву VT6, що наплавляється з урахуванням пошарового формування геометрії виробу;
- провести чисельний аналіз кінетики температурного стану при електронно-променевому формуванні стінки виробу таврового профілю з титанового сплаву VT6;
- оцінити характерні швидкості охолодження матеріалу в різних зонах таврового зразку при пошаровому формуванні за допомогою розглянутої адитивної технології.

Була розроблена відповідна скінчено-елементна модель тривимірного таврового зразка з титанового сплаву в комерційному пакеті ABAQUS. Рішення задач теплопровідності в процесі попереднього підігріву, подальшої наплавлення аж до повного охолодження виробу та зняття технологічного оснащення проводилося на спільних прямокутних сітках розбиття. На кожному етапі простеження стану матеріалу змінювалася форма виробу відповідно до швидкості наплавлення і геометрії формування валиків.

Для чисельного аналізу кінетики температурного поля $T(x, y, z)$ від часу t при електронно-променевому пошаровому формуванні виробу використовувався скінчено-елементний розв'язок тривимірного нестационарного рівняння теплопровідності:

$$c\gamma(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T) \cdot \nabla T] \quad (1)$$

де $c\gamma$, λ - питома теплоємність і теплопровідність матеріалу, відповідно.

Граничні умови, необхідні для вирішення завдання (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 характеризується тепловим випромінюванням (закон Стефана-Больцмана) з додатковим вкладенням енергії з торця виробу, що наплавляється, в разі розташування там джерела нагріву. Таким чином, граничні умови для вирішення задачі теплопровідності в даному випадку мають такий математичний вираз:

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_T \cdot (T - T_C), & \text{в області контакту з оснасткою} \\ \varepsilon \cdot \sigma_{SF} \cdot (T^4 - T_C^4) - q, & \text{на вільних поверхнях} \end{cases} \quad (2)$$

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 нагріву.

Вирішення зазначених завдань нестационарної теплопровідності згідно з наведеним математичним описом реалізувалося шляхом чисельного простеження температурних полів, починаючи з етапу попереднього підігріву підкладки, наплавлення кожного валика аж до повного охолодження виробу, в рамках відповідного скінчено-елементного опису.

Розроблена модель може використовуватися для оптимізації параметрів тепловкладень при електронно-променевому формуванні стінки виробу з титанового сплаву з метою забезпечення якості сплавлення шарів і рівномірності нагріву по товщині напавленої стінки. Для реалізації зазначеного завдання був формалізований алгоритм оптимізації за характерними розмірами зони проплавлення (Рис.7), шляхом послідовного виконання ряду чисельних експериментів (послідовного наближення) [5].

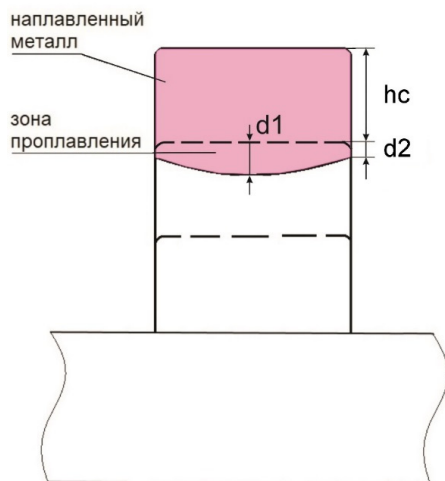


Рис. 7. Характерні розміри зони проплавлення в поперечному перерізі напавленого валика: d1 – глибина проплавлення в центрі; d2 – глибина проплавлення з краю; hc - висота напавленого шару

точки А, С, Е - точки в центрі напавленого шару, а В, D, F - точки на поверхні (Рис.8 а,е).

Розглянемо для точки С особливості знаходження швидкості охолодження (Рис.10). В діапазоні мікроструктурних перетворень від 1000°C до 670°C матеріал в точці С нагрівається і охолоджується 3 рази, перший раз під час наплавлення шару, де знаходиться точка С, і потім під час наплавлення наступних двох шарів. Останній цикл охолодження в указаному діапазоні температур визначає залишкову мікроструктуру і

4. Результати моделювання температурних полів при пошаровому формуванні таврового зразка і прогнозування мікроструктури і механічних властивостей матеріалу

Результати розв'язку задачі нестационарної теплопровідності показали, що кінетика температурного поля для пошарового формування таврового зразка на досить масивній підкладці розміром 8×30×70 мм носить істотно тривимірний характер (Рис. 8). На рис.9 приведені розподіли максимальних температур в середньому по довжині поперечному перерізі таврового зразка, що характеризують розміри зони проплавлення на різних шарах формування, а саме на 1-4, 10 і 20 шарах.

Також при моделюванні процесу наплавлення були отримані дані відносно часу охолодження і побудовані термоцикли для точок поперечного перерізу на різних рівнях пошарового формування. Для прикладу розглянуто точки А і В - на 1-му шарі, С і D - на 5-му шарі, Е і F - на 20-му шарі. При чому

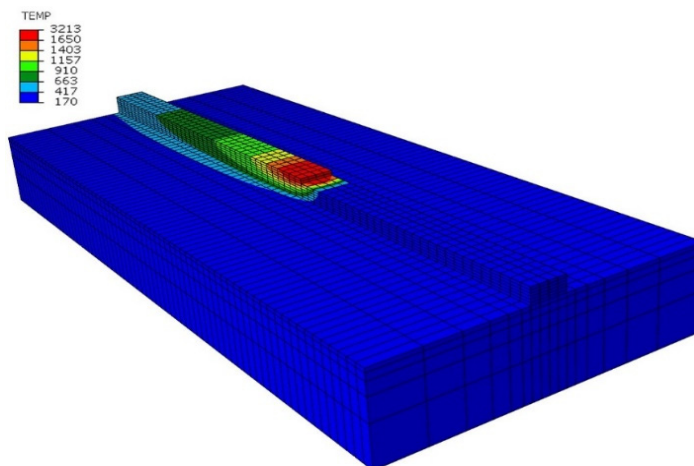


Рис. 8. Розподіл температур в тавровому зразку в процесі пошарового формування на підкладці розміром 8×30×70 мм

розмір зерна (Таблиця 1). Максимальна температура нагріву в точці С від наплавлення наступних, більш віддалених шарів нижче температури 1000°C, тому вважається, що мікроструктурних перетворень і значних змін розміру зерна в точці С більше не відбувається.

Відповідно результатам розрахунку отримані досить високі швидкості охолодження (160-660 °C/c). Згідно до діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 (рис.4) в наплавленому матеріалі таврового зразку утворюється мартенситна мікроструктура з вмістом α'' фази. Згідно даних на рис.3 в точках А і В першого шару, де отримана сама висока швидкість охолодження із-за наявності масивної холодної підкладки, утворюється зерно розміром 180 мкм, а в точках С, D, E, F при формуванні 5 і 20 шарів, де матеріал наплавляється на вже розігрітий зразок, розмір зерна значно крупніше 300-450 мкм.

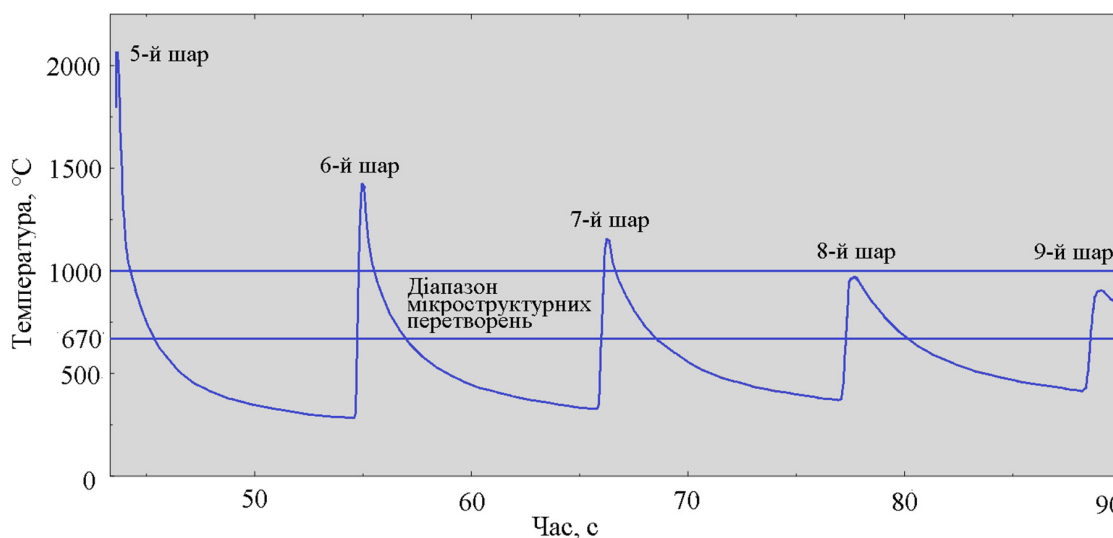


Рис. 9. Характерний термоцикл в матеріалі таврового зразку (в точці С) при пошаровому формуванні

Таблиця 1

Швидкості охолодження, розмір зерна і механічні властивості для різних точок зразка

	A	B	C	D	E	F
Час охолодження, t (с)	0,5	0,5	1,15	1,14	2,05	2,05
Швидкість охолодження, V (°C/c)	660	660	287	289	160	160
Розмір зерна, (мкм). (згідно даних на рис.3)	180	180	310	310	450	450
Границя текучості, (МПа). (згідно даних на рис.6)	924	924	882	882	842	842

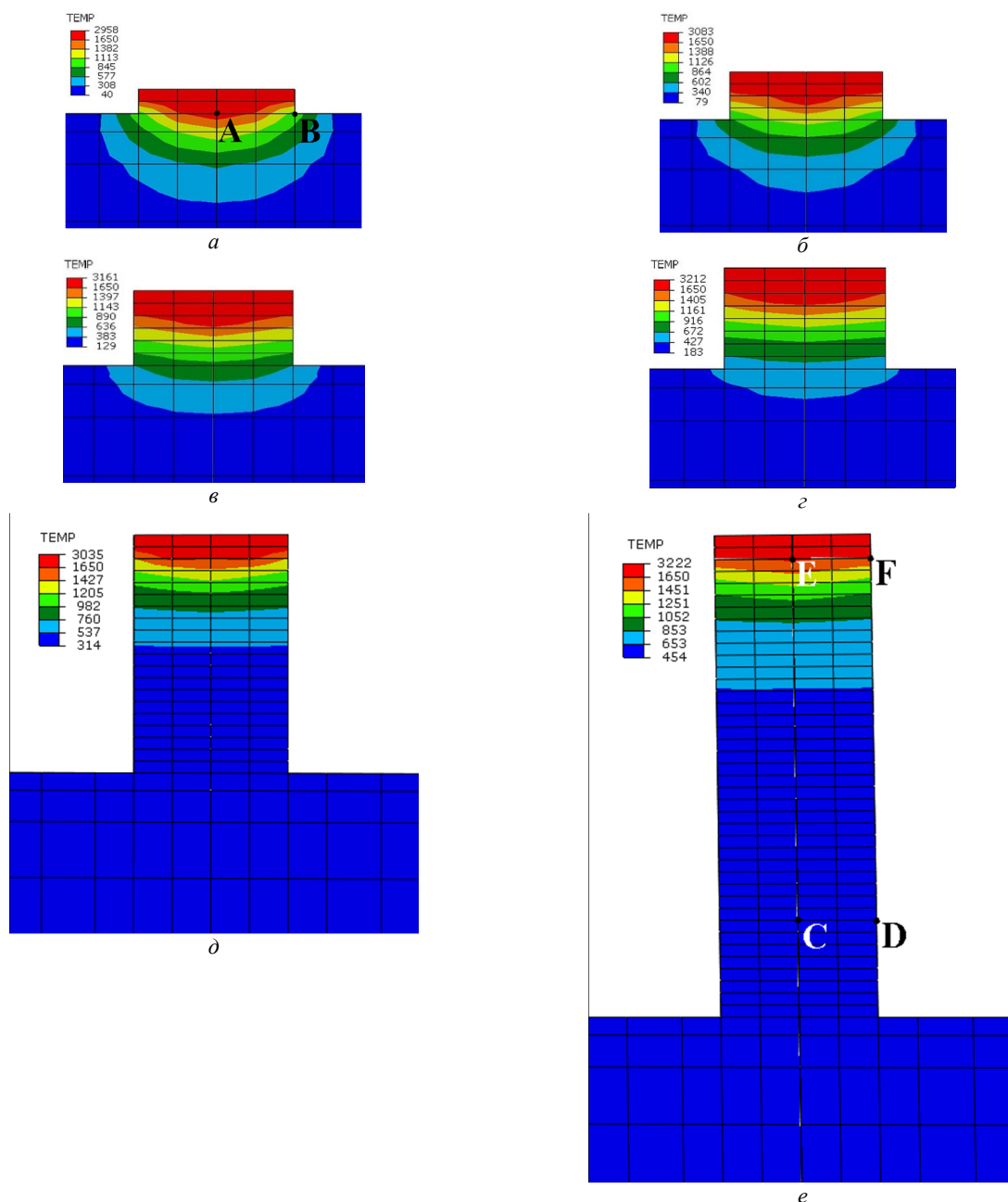


Рис. 10. Зона проплавлення (червоний колір) для різних шарів наплавлення:
а) 1-ий; б) 2-ий; в) 3-ій; г) 4-ий; д) 10-ий; е) 20-ий

5. Зіставлення з експериментальними даними

За експериментальними даними [6] макроструктури зразка титанового сплаву Ti-6Al-4V, отриманого за технологією пошарового формування xBeam 3D Metal Printer, розмір зерна в верхніх шарах зразка складає приблизно 300–450 мкм, а в шарах біля основи зразка 150–250 мкм (рис.11). В результаті моделювання температурних циклів охолодження було зроблено прогнозування розміру зерна в верхніх шарах приблизно 450 мкм, в середині – 310 мкм, в шарах біля підкладки – 180 мкм. Таким чином результати прогнозування показали задовільну точність в порівнянні з експериментом, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування макроструктури і механічних властивостей виробів з титанових сплавів, отриманих за допомогою адитивних технологій пошарового формування, при наявності надійних експериментальних даних для кожного сплаву і для відповідних швидкостей охолодження в діапазоні 100–700 град/с.

6. Результати моделювання залишкових напружень та деформацій

В результаті моделювання напружено-деформованого стану таврового зразку в процесі його пошарового формування на основі застосування загальної моделі термопружньопластичного деформування матеріалу були отримані розподіли залишкових напружень та деформацій формозміни. Після наплавлення 20 шарів і повного охолодження був отриманий залишковий прогин, максимальне значення якого на довжині 70 мм досягає 0,3 мм (Рис.12). Найбільш високий рівень залишкових напружень має повздовжня компонента, а саме, в середній частині

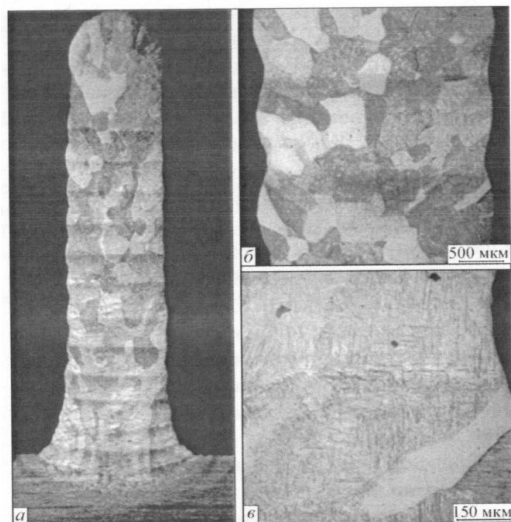


Рис. 11. Макроструктура таврового зразка з титанового сплаву Ti-6Al-4V [6]

зразка по довжині, на віддаленні від крайових ефектів, розтягуючи напруження досягають рівня 740 МПа (Рис.13).

Треба відмітити, що залишкові напруження і деформації залежать від механічних властивостей матеріалу, в тому числі, від границі текучості. Якщо в результаті відмінностей температурного циклу наплавлення різні шари помітно відрізняються за механічними властивостями, це може значно вплинути на результати моделювання напружено-деформованого стану при пошаровому наплавленні, що необхідно враховувати при розробці математичної моделі. Запропонований підхід прогнозування механічних властивостей матеріалу при пошаровому наплавленні дозволяє це робити при необхідності отримання результатів з підвищеною точністю.

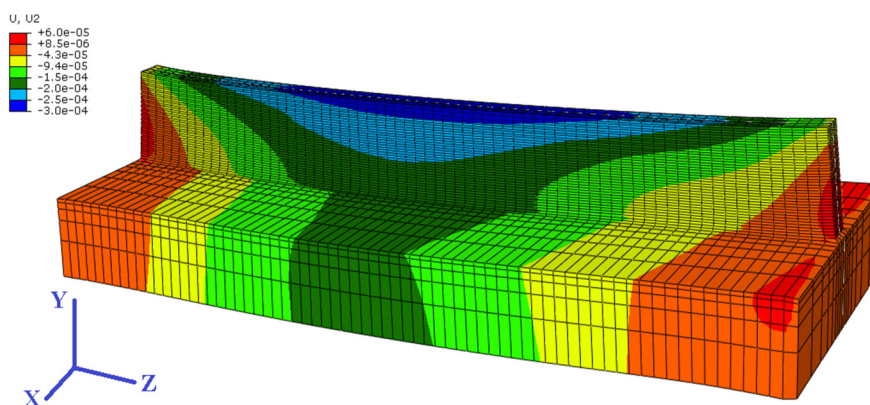


Рис. 12. Результати розрахунку залишкового прогину зразка, м

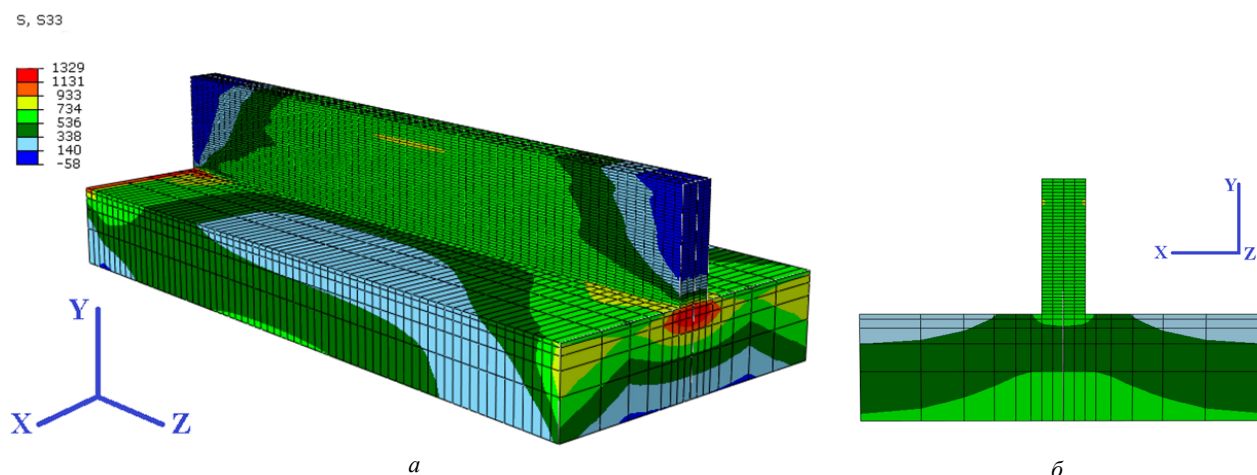


Рис. 13. Розподіл повздовжньої компоненти залишкових напружень: загальний вигляд (а), та в середньому поперечному перерізі (б), МПа

Висновки

1. Експлуатаційні характеристики і механічні властивості деталей з титанових сплавів, виготовлених за допомогою адитивних технологій пошарового формування на основі присадкових дрітків, значно залежать від режимів охолодження матеріалу в процесі виготовлення. Для їх прогнозування можуть використовуватись експериментальні дані відносно залежності величини розміру зерна і значень механічних властивостей від швидкості охолодження матеріалу в діапазоні поліморфних перетворень.

2. На основі розробленої математичної моделі нестационарної теплопровідності для таврового зразка зі сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V) при його пошаровому формуванні за допомогою адитивної технології електронно-променевого наплавлення отримані результати прогнозування швидкостей охолодження матеріалу в різних точках виробу.

3. Виконані прогнозні оцінки розмірів зерна і границі текучості матеріалу в різних точках таврового зразка. Порівняння з результатами експериментального дослідження макроструктури зазначеного зразка, виготовленого за технологією пошарового формування xBeam 3D Metal Printer, показало задовільну точність зіставлення, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування макроструктури і механічних властивостей виробів з титанових сплавів, отриманих за допомогою адитивних технологій пошарового формування. Але є необхідність отримання додаткових експериментальних даних для високих швидкостей охолодження матеріалу в діапазоні 100-700 град/с.

Прогнозирование структуры и механических свойств титанового сплава ВТ6 при послойном формировании 3D изделий с помощью адитивной технологии электронно-лучевой наплавки

О.В. Махненко, Н.С. Ананченко, С.М. Кандаля, А.Е. Бабенко, Д.В. Ковальчук

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения необходимых эксплуатационных свойств конструкционных элементов из титанового сплава, полученные с помощью аддитивных технологий с использованием присадочных материалов, в частности, технологии электронно-лучевой наплавки xBeam 3D Metal Printer. Проведенный аналитический обзор существующих данных относительно зависимости механических свойств, размера зерна и микроструктурного состава титанового сплава ВТ6 от скорости охлаждения материала. На основе математического моделирования определены температурные поля в процессе послойного формирования 3D таврового образца из сплава ВТ6, остаточные напряжения и деформации формоизменения. Сделаны прогнозные оценки макро и микроструктуры, а также механических свойств материала образца. Сравнение с результатами экспериментального исследования макроструктуры показало удовлетворительную точность моделирования. Разработанный подход может использоваться для прогнозирования макроструктуры и механических свойств изделий из титановых сплавов, полученных с помощью аддитивных технологий послойного формирования. Но есть потребность получения экспериментальных данных для высоких скоростей охлаждения материала в диапазоне 100-700 град/с.

Ключевые слова: Титановые сплавы; адитивная технология; скорость охлаждения; микроструктура; размер зерна; механические свойства; математическое моделирование.

Prediction of structure and mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V during layer formation of 3D products by additive technology of electron beam cladding

O.V. Makhnenko, N.S. Ananchenko, S.M. Kandala, A.E. Babenko, D.V. Kovalchuk

Abstract. The problem of providing the necessary operational properties of titanium alloy structural elements produced by additive technologies using filler materials, in particular xBeam 3D Metal Printer electron beam welding technology, is considered. An analytical review of the existing data on the dependence of mechanical properties, grain size and microstructure of the titanium alloy Ti-6Al-4V on the cooling rate of the material has been carried out. On the base of mathematical modeling, temperature fields in the process of multilayer formation of a 3D fillet sample from Ti-6Al-4V alloy, residual stress and distortions are determined. Then macro and microstructure, as well as mechanical properties of the sample material are predicted. Comparison with the results of the experimental study of the macrostructure showed satisfactory accuracy of the modeling. The developed approach can be used to predict the macrostructure and mechanical properties of titanium alloy products obtained by additive layer-forming technologies. But there is a need to obtain experimental data for high cooling rates of material in the range of 100-700 degrees/c.

Keywords: titanium alloys; additive technology; cooling rate; microstructure; grain size; mechanical properties; mathematical modeling.

References

1. Дінг Д., Пен З., Цуйіуі Д., Лі Х. Адитивні технології з подачею металевої проволочки: технології, розвиток та майбутній інтерес // Міжнародний журнал передових виробничих технологій. – 2015. –Том 1, № 81. – С. 465-481.
2. Брандль Е. та ін. Адитивне виробництво ВТ6, використовуючи зварювальну проволочку: порівняння лазерного та дугового променю осадження та оцінка, враховуючи космічну специфікацію матеріалів // Фізична Проседія. – 2010. - № 5 (ч. В). – С. 595 – 606.
3. Едвардс П. та ін. Електронно-променеве адитивне виробництво титанових компонентів: Властивості та продуктивність // Журнал виробничої науки та інженерії. – 2013. – том 135, № 6. – С. 061016/1-061016/7. DOI: 10.1115/1.4025773
4. ISO/ASTM 52900 «Стандартна технологія для адитивних технологій виробництва - загальні принципи - термінологія», ASTM книга Стандартів, Західний Коншохокен, ПА: ASTM Інтернешнал. - 2017. - С. 1-9.
5. Махненко О.В., Міленін А.С., Великоіваненко Є.А., Розинка Г.Ф., Півторак Н.І., Козлітіна С.С., Дзюбак Л.І. Моделювання температурних полів для різних типів 3D-моделей при їх пошаровому формуванні на обладнанні електронно-променевого наплавлення xBeam 3D Metal Printer // Сб. докл. VIII Міжн. конф. «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів». Одеса, Україна, 10-16 вересня 2017 р
6. Ковальчук Д.В., Мельник В.І., Мельник І.В. Нові можливості адитивного виробництва з технологією xBeam 3D Metal Printing // Збірник праць восьмої міжнародної конференції «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів». Київ, Україна, 2017. - 51 с.
7. Лютерінг Г., Вільямс Дж. С. Мікроструктура та механічні властивості титанових сплавів // Мікроструктура та властивості матеріалів, том 2 / Під ред. Дж. С. М. Лі. – М.: Ворлд Сайнтіфі. - 2000. – С. 26-29.
8. Полькін И.С. Підвищення властивостей металевих матеріалів за рахунок застосування нових технологічних процесів // Перспективні технології легких і спеціальних сплавів. – Москва: Фізматліт. - 2006. - С. 66-73.
9. Сінявські Дж., Зіайя В., Кубяк К. Мікроструктура та механічні властивості високоміцних двофазних титанових сплавів // Титанові сплави / Під ред. Сінявські Дж. – М.: Інтех Опен. - 2013. – С. 69-79. DOI: 10.5772/56197
10. Патіл С., Кекаде С., Фапале К. Ефект α та β фазного відсоткового співвідношення на характеристики обробки титанового сплаву ВТ6 // 16-та Конференція інновацій обробки для аерокосмічної індустрії. Гарбсен, Німеччина, 2016. - 65 с.
11. Грабін В.Ф. Структура та властивості зварних з'єднань з титанових сплавів. – Київ: Наукова думка, 1964. –59 с.