

УДК 539.4

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ, РОЗМІРУ ЗЕРНА ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ6 ПРИ ПОШАРОВОМУ ФОРМУВАННІ 3D ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ У СЕРЕДОВИЩІ АВАQUS

Махненко<sup>1</sup> О.В., Ананченко<sup>2</sup> М.С., Бабенко<sup>2</sup> А.Є., Кандаля<sup>1</sup> С.М.

1 - ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, м. Київ, Україна

2 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація.** У даний час виробництво титанових конструкційних елементів зі складною геометрією за допомогою адитивної технології є перспективною альтернативою традиційному виробництву. У роботі розглядається оптимізація адитивних технологій наплавлення засновану на комп'ютерному моделюванні, зокрема технологію "xBeam 3D Metal Printer". В результаті отримано температурні поля в процесі електронно-променевого наплавлення 3D-зразка таврового профілю. Також розблено прогнози щодо розміру зерна, мікроструктури та міцнісних характеристик зразка. Отримані результати порівняли з результатами експерименту.*

***Ключові слова:** "xBeam 3D Metal Printer", зерна, температурні поля.*

У даний час адитивні технології у виробництві титанових конструкційних елементів, завдяки малій витраті матеріалу, є напрямом що стрімко розвивається [1-2]. В Україні розробляється технологічний процес електронно-променевого наплавлення xBeam 3D MetalPrinter [2]. Зразок зроблений при багатошаровому формуванні Т-подібного 3D виробу, представлений на рис. 1. Процес проходить в умовах вакууму -3 порядку. Джерело зварювального нагріву складається з променя у формі порожнистого конусу.

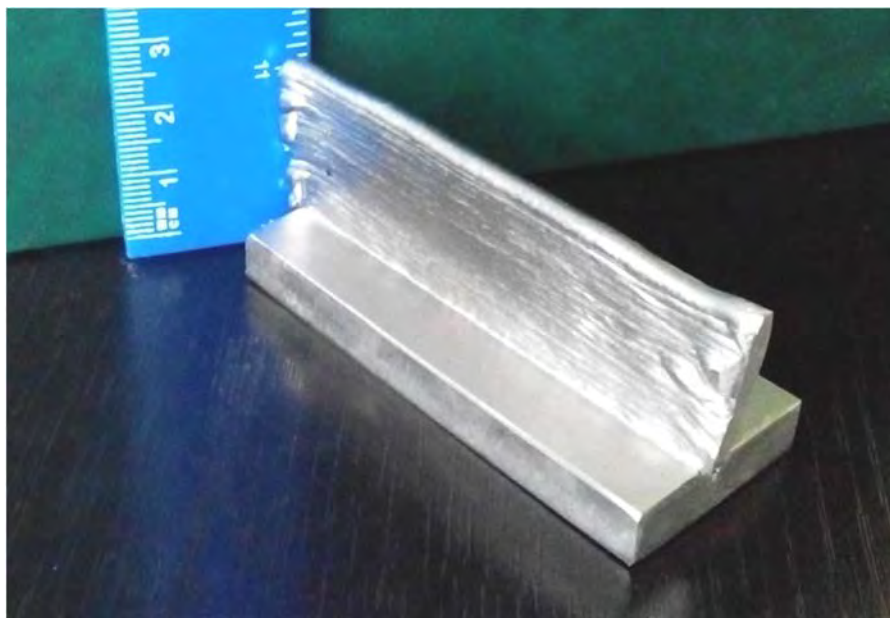


Рис. 1. Зразок таврового профілю з титанового сплаву

Відомо, що механічні, експлуатаційні та міцнісні характеристики матеріалу кращі у структури з меншим розміром зерна. Як показано на рис. 2, зі збільшенням швидкості охолодження відбувається подрібнення структурних складових. Швидкість охолодження треба визначати в діапазоні перетворення  $\beta$  структури в  $\alpha+\beta$  структуру, яке для титанового сплаву ВТ6 відбувається в діапазоні від 1000градусів до 670 градусів.

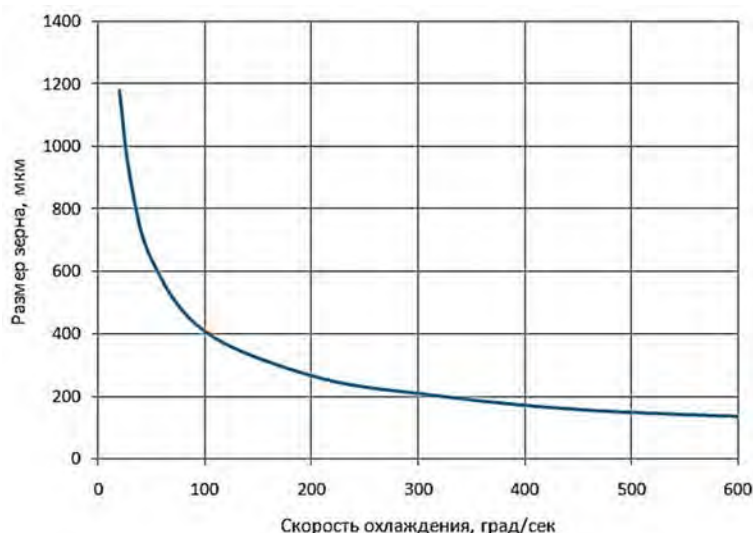


Рис. 2 Розрахункове співвідношення між розміром зерна і швидкістю охолодження в сплаві ВТ6[3]

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

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

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

Граничні умови для задачі теплопровідності мають такий вираз:

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

де  $n$  - нормаль до поверхні;  $\alpha_T$  - коефіцієнт тепловіддачі;  $T_C$  - температура навколишнього середовища;  $\varepsilon$  - ступінь чорноти матеріалу;  $\sigma_{SF}$  - константа Стефана-Больцмана;  $q$  - потік енергії електронно-променевого нагріву.

Були розглянуті параметри джерела нагріву, які забезпечують якісне сплавлення між шарами. На рис. 3 можемо побачити різницю у зоні проплавлення, при наплавленні 1-4 валиків. На основі розв'язку температурної задачі були отримані розподіли температур (Рис. 3), а також побудовані термоцикли для точок поперечного перерізу.

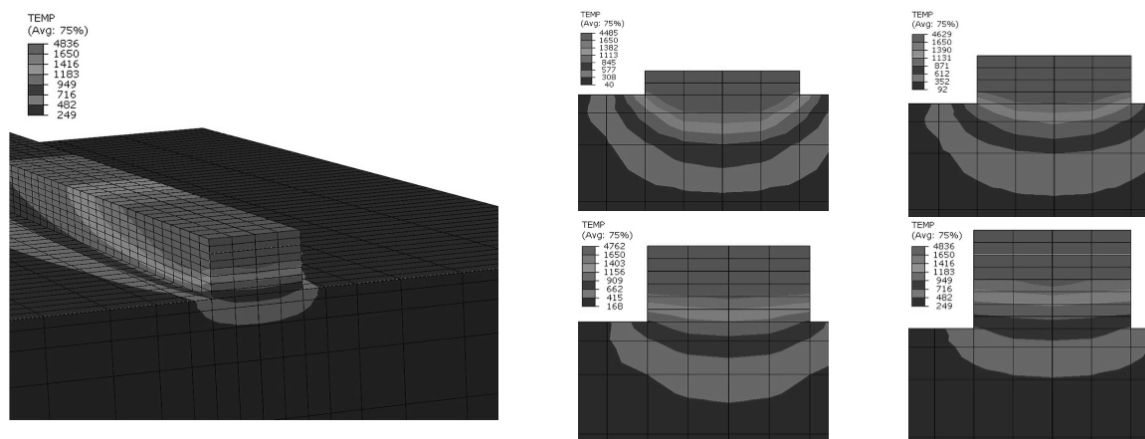


Рис. 3. Скінченно-елементна модель і розподіл температур у тавровому профілі для 1-4-го шару наплавлення

З термоциклів був знайдений час охолодження від 1000 до 670 градусів для точок на першому, третьому і четвертому рівнях наплавлення. Швидкість охолодження у цьому діапазоні була знайдена, як зміна температури поділити на зміну часу. Швидкість охолодження для точок на третьому і четвертому рівнях відповідає розміру зерна 400-500 мкм, а для точок на першому рівні відповідає розміру зерна 250-300 мкм. З результату експериментальних даних макроструктури зразка визначили, що розмір зерна в верхніх шарах зразка складає приблизно 430-450 мкм, а в шарах біля основи зразка 230-250 мкм [2]. Результат розрахунку показує задовільну точність в порівнянні з експериментом. Також був отриманий зв'язок між механічними властивостями, такими як границя міцності, границя текучості, твердість і отриманим розміром зерна рис.4. Таким чином треба шукати оптимальне співвідношення при отриманні розміру зерна, щоб матеріал був досить міцний і не занадто крихкий, адже крихкість суттєво знижує експлуатаційні характеристики готової деталі при ударі. Оптимізація технології електронно-променевого наплавлення (швидкість руху джерела, час затримки між наплавленнями валиків і т.д.), задля отримання високих експлуатаційних характеристик і якісної структури, є метою подальшої роботи по моделюванню цього процесу.

Висновки: Експлуатаційні характеристики деталей, виготовлених за допомогою адитивної технології ЕПН, залежать від режимів охолодження матеріалу при наплавленні. На основі розробленої математичної моделі отримані результати прогнозування швидкостей охолодження матеріалу в різних точках виробу. За результатами швидкостей охолодження матеріалу виконані оцінки розмірів зерна зразка і механічних характеристик виробу. Порівняння з результатом експерименту показало задовільну відповідність.

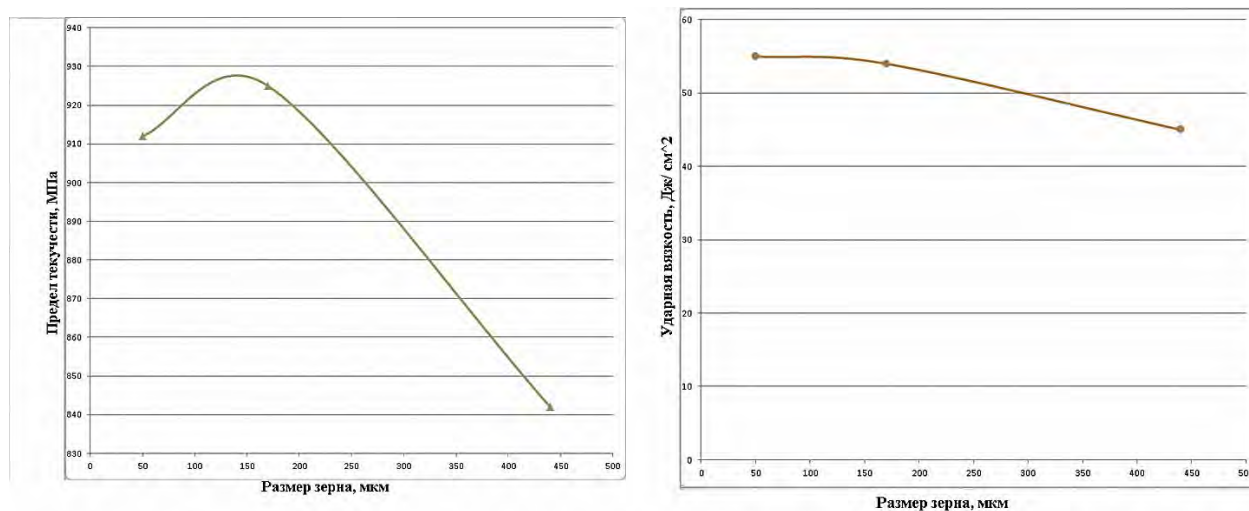


Рис.4. Залежність механічних властивостей для титану VT6 від величини розміру зерна [4]

#### Список літератури:

1. *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / Ding D., Pan Z., Cuiuri D. & Li H. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 81(1). – p.465-481.*
2. *Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3DMetalPrinting / Ковальчук Д. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А. // Сб. трудов 8 межд. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» 2017 – с. 45-52*
3. *Повышение свойств металлических материалов за счет применения новых технологических процессов / Полькин И.С. // Перспективные технологии легких и специальных сплавов. – 2006. – с. 66-73.*
4. *Грабин В.Ф.// Структура и свойства сварных соединений из титановых сплавов. – 1964 – с. 59.*