

УДК 629.7.02-029.39:621.791.725

doi: 10.32620/aktt.2022.2.05

А. С. ПОЛУПАН, В. Т. СІКУЛЬСЬКИЙ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З МІНІМАЛЬНИМ РІВНЕМ ПОРИСТОСТІ

Предметом вивчення в статті є процес виготовлення деталей аерокосмічної техніки методом селективного лазерного плавлення (СЛП) при використанні металевих порошків жароміцного сплаву Inconel 718. **Метою** є теоретичне визначення прийнятних режимів процесу СЛП, які забезпечують мінімальний рівень пористості, високий рівень герметичності та надійності деталей аерокосмічної техніки. **Завдання:** визначити раціональні розміри ванни розплаву відносно визначених параметрів процесу; дослідити рівень пористості виходячи з отриманих значень ванни розплаву; визначити найбільш прийнятний режим процесу СЛП. Використовуваними **методами** є: математичні моделі оптимізації, методи розв'язання нелінійних задач. При проведенні моделювання були враховані такі параметри як потужність лазерного випромінювання, швидкість сканування, розмір лазерної плями, температура плити побудови, товщина шару порошку та крок сканування. Отримані такі **результати**. Згідно отриманих даних були визначені оптимальні розміри ванни розплаву, які забезпечують стабільність та продуктивність процесу СЛП, мінімальний рівень пористості, високий рівень герметичності та надійності деталей аерокосмічної техніки. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: були отримані значення оптимальних параметрів процесу СЛП для виготовлення деталей з мінімальним рівнем пористості для матеріал жароміцного сплаву Inconel 718. Підтверджено, що можливо з високою ймовірністю, спрогнозувати розміри ванни розплаву, а також рівень пористості деталей, що виготовляються методами LPBF, а саме СЛП. Було виявлено, що оптимальний одиничний трек був сформований при двох комбінаціях режимів сканування, а саме: при потужності лазера 100 Вт, та швидкості сканування 600 мм/с; при потужності лазера 100 Вт, та швидкості сканування 700 мм/с. За результатами моделювання, згідно з критерієм, рівень пористості (співвідношення твердих частинок) становить менше 0,5%, найвища швидкість вищипування була виявлена при потужності 100 Вт, швидкості сканування 700 мм/с та відстані штрихування 0,1 мм.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення; пористість; ванна розплаву; закон Фур'є; моделювання процесу; параметри процесу.

Вступ

Одним із найбільш широко використовуваних методів адитивного виробництва (АВ) металевих виробів є селективне лазерне плавлення (СЛП), яке дозволяє виготовляти вироби складної геометрії, які важко або дорого досягти за допомогою традиційних методів. Селективне лазерне плавлення (СЛП) дозволяє вирощувати вироби різних сплавів, використовуючи високу енергію лазера для вибіркового пошарового плавлення частинок дрібнодисперсного металевих порошків [1-3].

Однією з найбільш вразливих проблем у виробках які виготовляються методом СЛП, є наявність пор в середині деталі. Пористість може пояснюватися злиттям розплавлених частинок порошкового матеріалу зі зменшенням об'єму та збільшенням щільності, а також наявністю термокапілярних сил, що утворюються внаслідок оплавлення частинок по-

рошкового матеріалу. Наявність навіть одиної пори здатне призвести до різкого зниження міцності виробу через концентрацію напружень на її межі, особливо при клиноподібній формі пори, яка називається тріщиною [4].

1. Постановка задачі дослідження

Наявність в об'ємі тіла досить великої кількості пір, посилює зниження міцності, а також пружні, в'язко-пластичні та інші властивості, які знижують функціональні можливості застосування виробу, виготовленого методом СЛП [1-3, 4]. Дослідження походження та зниження рівня пористості в деталях, описані в ряді експериментальних досліджень [5-7].

Однак, виробництво дослідних зразків даним методом є дорогим і не вигідним, тому для мінімізації ризиків виробництва виробів невідповідної якості, актуальним є проведення моделювання процесу СЛП

з використанням різних програмних продуктів. Одним із таких продуктів є програмна система кінцево-елементного (KE) аналізу ANSYS, яку розробляє американська компанія Ansys inc, а саме продукт ANSYS Additive. Теоретичні дослідження в даній області представлені в роботах [8, 9].

ANSYS Additive – це програмне забезпечення для моделювання, призначене для адитивного виробництва металів. Продукт Additive дозволяє проводити моделювання пошарового процесу виготовлення металевих деталей, що піддаються лазерному сплаву порошкових матеріалів (LPBF). По мірі обробки кожного шару область під лазером піддається надзвичайно інтенсивному локальному нагріванню, яке швидко охолоджується і призводить до теплових жолоблень. Представлений метод моделювання використовує пошарове накопичення власної деформації для прогнозування цього жолоблення [10].

Цей продукт включає такі модулі:

– Additive Print – інструмент для операторів машин, що дозволяє швидко моделювати деталі, щоб забезпечити їх успішний друк.

– Additive Science – дослідницьке середовище, що дозволяє вченим визначити оптимальні параметри процесу для своїх машин та матеріалів. За допомогою даного середовища, зокрема, можна проводити дослідження одиничного треку та пористості.

Отже, метою даної роботи є визначення прийнятних режимів процесу СЛП при використанні металевого порошку жароміцного сплаву Inconel 718 методом математичного моделювання, за допомогою програмного продукту ANSYS Additive.

2. Теоретичний опис процесу

Відповідно до технічної документації [11], ANSYS Additive використовує традиційний підхід для визначення термічних перетворень у процесі LPBF та СЛП зокрема. Рівняння теплової рівноваги можна представити за допомогою нестационарного рівняння джерела тепла, що рухається, відповідно до закону Фур'є [12]:

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q, \quad (1)$$

де ρ – густина;

C_v – питома теплоємність;

T – температура;

t – час взаємодії;

k – теплопровідність;

Q – об'ємне тепловиділення;

∇ – оператор градієнта.

Тепловий потік через об'єм може бути поглинутий його компонентами q_x , q_y , q_z визначеними як:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2)$$

Рівняння 1 можна переписати, використовуючи визначення теплового потоку:

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + Q. \quad (3)$$

Внутрішній об'ємний коефіцієнт тепловиділення Q можна розрахувати за такою формулою:

$$Q = \int_v^{v+dv} q dz, \quad (4)$$

де в процесі LPBF лазерний потік q можна розрахувати з використанням найпоширенішого профілю гаусівського розподілу променя:

$$q = \frac{2AP}{\pi\omega^2} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}}, \quad (5)$$

де P – потужність лазера;

A – коефіцієнт поглинання;

ω – радіус лазерного променя;

r – відстань по радіусу між точкою у поточній області та поточним положенням центру лазерного променя.

Ці рівняння становлять основу, за допомогою якої в ANSYS Additive проводиться теплове моделювання цілих шарів для виявлення тенденцій в теплових умовах і характеристиках.

3. Моделювання

3.1. Дослідження одиничного треку

У прикладі параметричного моделювання одного треку (Single Bead), визначається діапазон прийнятних значень параметрів моделювання цього треку [13]. В даному дослідженні моделювання проводилося в діапазоні значень потужності лазера 100, 150, 200 (Вт) і швидкостями сканування 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 (мм/с), відповідно до характеристик машини Alfa-150D (ТОВ «АЛТ України») для матеріалу Inconel 718 (IN718). Таким чином, об'єднання показників потужності лазера та швидкості сканування, відповідно, було виконано для 21 випадків.

Температура плити побудови встановлена на 100°C , довжина треку – 3 мм, діаметр лазерного випромінювання – 45 мкм, а товщина шару – 40 мкм відповідно. Вхідні та вихідні параметри для параметричного моделювання одиничного треку показано на рисунку 1.

Оскільки товщина становить 40 мкм (0,04 мм), глибина ванни розплаву має бути не менше 0,1 мм, а еталонна середня глибина ванни розплаву повинна бути не менше 0,06 мм, що досягає принаймні половини третього шару. Глибина проникнення близько трьох шарів завтовшки знижує пористість за рахунок переплавлення попередніх шарів. Емпірично співвідношення глибини до ширини ванни розплаву має бути меншим за 0,95, а відношення довжини до ширини менше ніж 4,0. Дані про результати моделювання надаються як вихідний файл електронної таблиці (Meltpool.csv), з даними, що показують інформацію про просування по довжині трека.

Середні та медіанні значення довжини, ширини та еталонної глибини ванни розплаву для кожної перестановки представляються у зведеному файлі (Summary.csv). Оптимальний діапазон параметрів визначається зі зведеної таблиці комбінацій потужності/швидкості, враховуючи вищезазначені обмеження.

У параметричному моделюванні одиничного треку оптимальним діапазоном є найменша потужність та найвища швидкість сканування в діапазоні, в якому не відбувається утворення дефектів типу

замкової щілини, розбризкування та утворення грудок. У таблиці 1 показано результати аналізу даних вихідного файлу для прикладу параметричного моделювання одного треку в модулі Additive Science, як описано вище. Дані, виділені рамкою, є найкращим поєднанням параметрів.

Враховуючи вищевказані чинники, найбільш підходящими є комбінації потужності лазера 100 Вт та швидкості сканування 600 мм/с, а також 100 Вт та швидкості сканування 700 мм/с. Детальні розміри ванни розплаву другої комбінації моделювання представлені у файлі Simulation ID 377. Графік результату показаний на рисунку 2.

3.2. Дослідження рівня пористості

Для більш детального прогнозування характеристик виробу, що вирощується в модулі Additive Science існує можливість моделювання пористості прийнятних комбінацій, отриманих під час параметричного моделювання одиничного треку. Для високої достовірності результатів моделювання [14] рекомендується проводити симуляцію для куба розмірами не менше 3мм x 3мм x 3мм. Це перевірена геометрія, використовувана командою розробників ANSYS для матеріалів, наданих для теоретичних досліджень.

У таблиці 2 наведені необхідні діапазони вхідних та вихідних параметрів для параметричного моделювання пористості.

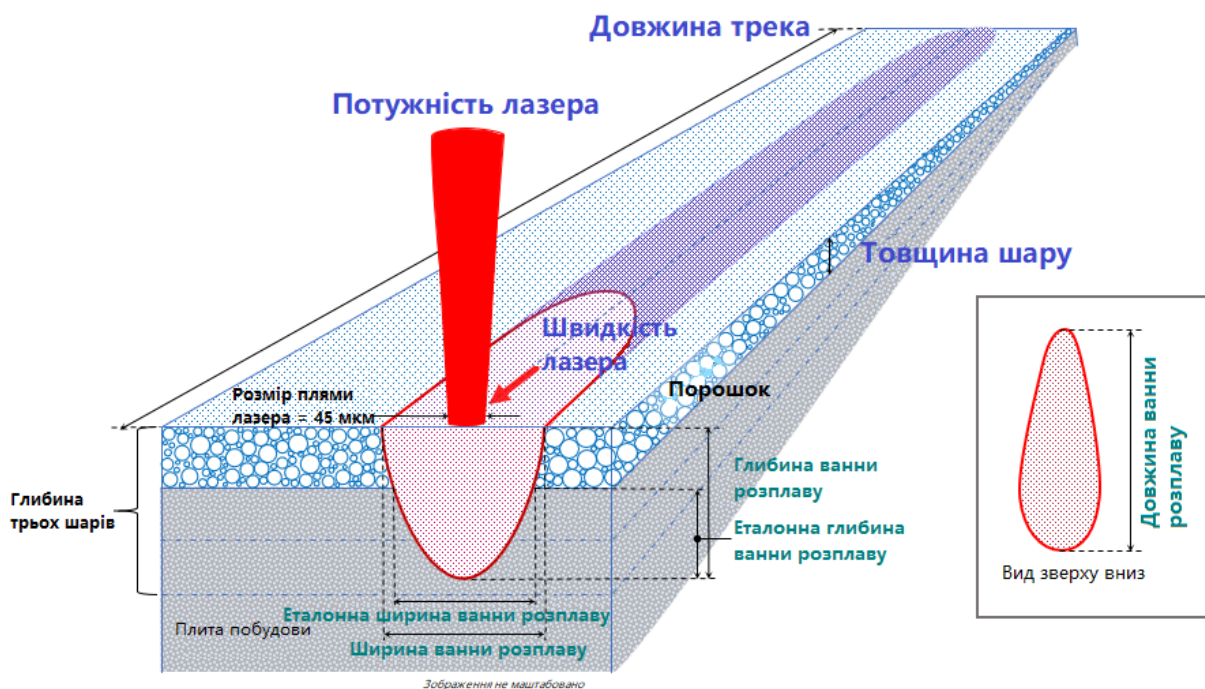


Рис. 1. Схема параметричного моделювання одиничного треку та перелік вхідних та вихідних параметрів процесу [13]

Таблиця 1

Результати симуляції одиничного треку

Потужність лазера (Вт)	Швидкість сканування (мм/с)	Simulation ID	Середня еталонна глибина басейну розплаву (мм)	Середня довжина ванни розплаву (мм)	Середня еталонна ширина ванни розплаву (мм)	Медіанна еталонна глибина ванни розплаву (мм)	Медіанна довжина ванни розплаву (мм)	Медіанна еталонна ширина ванни розплаву (мм)	Глибина/ширина (<0,95)	Довжина/ширина (<4,0)
100	1000	359	0,036	0,294	0,063	0,036	0,307	0,064	0,563	4,797
100	900	362	0,043	0,288	0,069	0,044	0,301	0,070	0,629	4,300
100	800	365	0,052	0,282	0,075	0,053	0,294	0,076	0,697	3,868
100	700	377	0,065	0,271	0,081	0,066	0,282	0,082	0,805	3,439
100	600	371	0,081	0,264	0,087	0,082	0,274	0,089	0,921	3,079
150	1000	367	0,084	0,368	0,083	0,086	0,391	0,084	1,024	4,655
150	900	361	0,098	0,360	0,087	0,100	0,381	0,089	1,124	4,281
100	500	374	0,102	0,257	0,097	0,104	0,267	0,099	1,051	2,697
150	800	364	0,115	0,351	0,093	0,116	0,371	0,095	1,221	3,905
100	400	358	0,134	0,248	0,107	0,135	0,258	0,109	1,239	2,367
150	700	368	0,137	0,340	0,099	0,139	0,360	0,101	1,376	3,564
200	1000	378	0,138	0,433	0,095	0,140	0,466	0,097	1,443	4,804
200	900	360	0,159	0,421	0,100	0,161	0,452	0,102	1,578	4,431
150	600	370	0,169	0,327	0,106	0,171	0,344	0,108	1,583	3,185
200	800	363	0,187	0,408	0,105	0,188	0,438	0,108	1,741	4,056
150	500	373	0,208	0,319	0,115	0,211	0,337	0,118	1,788	2,856
200	700	366	0,223	0,399	0,112	0,226	0,427	0,114	1,982	3,746
150	400	376	0,239	0,335	0,136	0,241	0,354	0,139	1,734	2,547
200	600	369	0,246	0,407	0,125	0,249	0,437	0,127	1,961	3,441
200	500	372	0,270	0,415	0,140	0,273	0,446	0,143	1,909	3,119
200	400	375	0,295	0,423	0,160	0,297	0,456	0,164	1,811	2,780

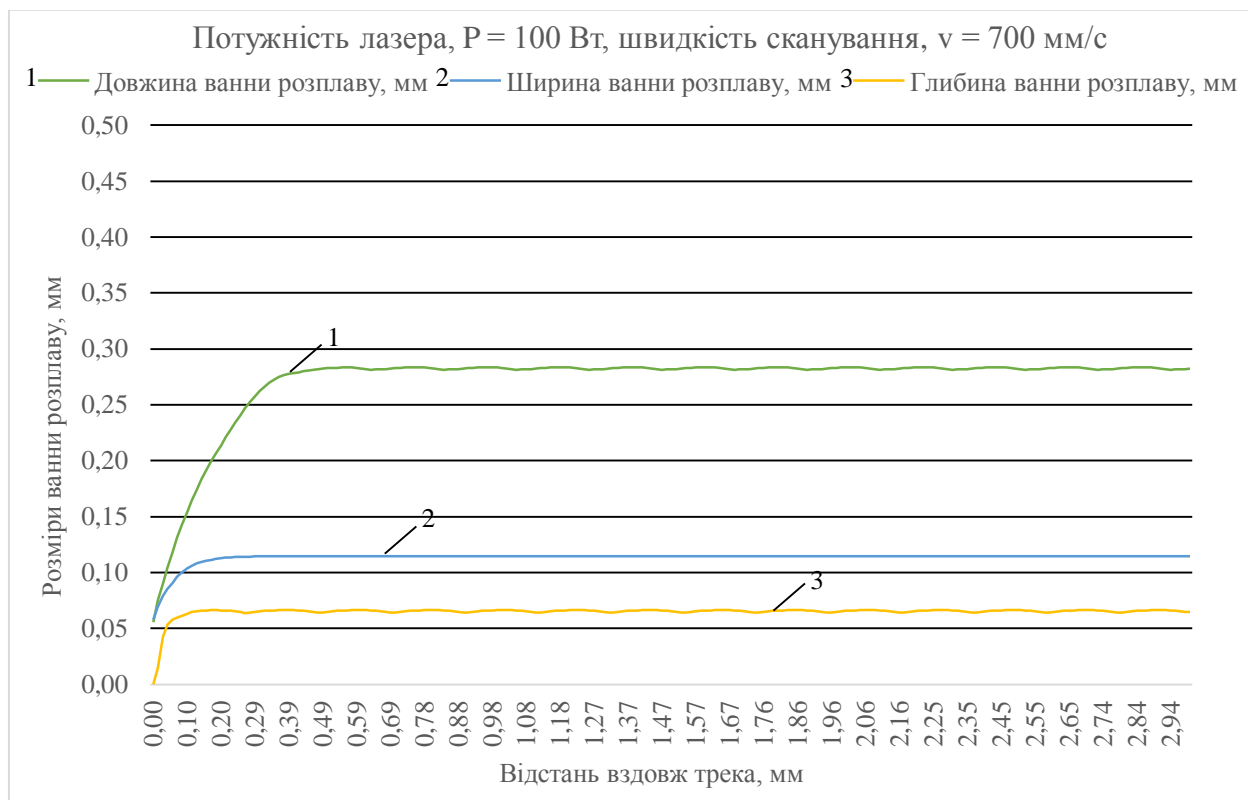


Рис. 2. Детальний аналіз ванни розплаву (комбінація Simulation ID 377)

У прикладі параметричного моделювання пористості, виходячи з результатів параметричного моделювання одиничного треку, потужність лазера (Вт) та швидкість сканування (мм/с) становили 100 та 600 (Моделювання А), 100 та 700 (Моделювання В).

В даному типі моделювання додається ще один необхідний параметр, що впливає на якість деталі, що виготовляється - крок сканування. Крок сканування вибирається 0,04-0,13 мм [15, 16] з інтервалом 0,01 мм, відповідно, необхідно провести розрахунки

10 комбінацій цих параметрів, для кожного моделювання. Загальна кількість комбінацій становить 20 випадків для розрахунків (таблиця 3). На рисунку 3

показано результати аналізу даних вихідного файлу для цього прикладу моделювання параметричної пористості.

Таблиця 2

Необхідний діапазон вхідних та вихідних параметрів моделювання пористості

Вхідні параметри моделювання	Вихідні параметри моделювання
Потужність лазера (P), Вт = 100 Вт	Відношення глибини ванни розплаву до ширини = 0,4
Швидкість сканування (v), мм/с = 600, 700	Відношення довжини ванни розплаву до ширини = 0,95
Крок сканування (h), мм = 0,04 - 0,13	Глибина ванни розплаву = 0,1 мм
Товщина шару (t), мкм = 40	Еталонна глибина ванни розплаву = 0,06 або більше
Розміри куба, мм = 3 x 3 x 3	

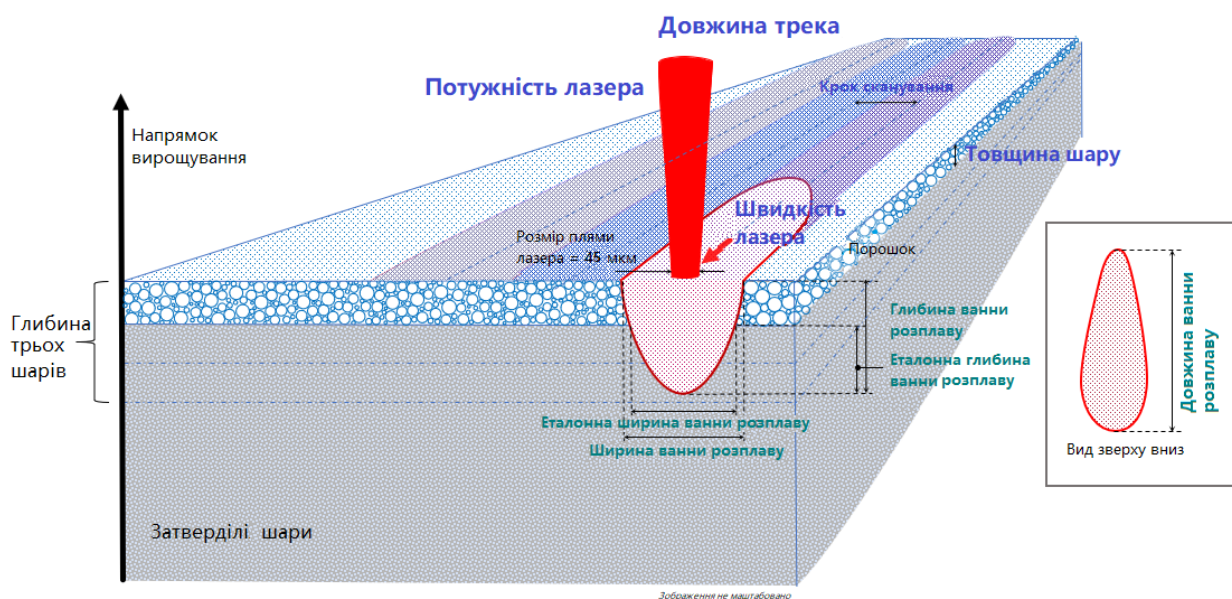


Рис. 3. Схема параметричного моделювання пористості та перелік вхідних та вихідних параметрів процесу [14]

Таблиця 3

Параметри симуляції моделювання пористості

Моделювання А	Моделювання В
Потужність, P = 100 Вт	Потужність, P = 100 Вт
Швидкість, v = 600 мм/с	Швидкість, v = 700 мм/с
Крок сканування h = 0,04	Крок сканування h = 0,04
Крок сканування h = 0,05	Крок сканування h = 0,05
Крок сканування h = 0,06	Крок сканування h = 0,06
Крок сканування h = 0,07	Крок сканування h = 0,07
Крок сканування h = 0,08	Крок сканування h = 0,08
Крок сканування h = 0,09	Крок сканування h = 0,09
Крок сканування h = 0,1	Крок сканування h = 0,1
Крок сканування h = 0,11	Крок сканування h = 0,11
Крок сканування h = 0,12	Крок сканування h = 0,12
Крок сканування h = 0,13	Крок сканування h = 0,13
10 комбінацій	10 комбінацій

При параметричному моделюванні пористості значення відношення твердих речовин (Solid Ratio) менше 1, прогнозує наявність пор, порожнеч, порошку або несплавлення. Відповідно, ідеальне тверде тіло матиме значення відношення твердих речовин, рівне 1 (допускається відхилення в 0,5%). Виходячи з отриманих даних, оптимальний режим виготовлення може бути обраний з випадків, при значеннях найменшої потужності лазерного променя, найвищій

швидкості сканування та найширшого кроку сканування. Області, виділені зеленим кольором, у таблиці 4 показують кілька груп прийнятних комбінацій, які можна вибрати відповідно допустимому рівню пористості. Виходячи з перерахованих вище чинників, можна визначити, що найвища швидкість вирощування в цих випадках являє собою поєднання потужності 100 Вт, швидкості сканування 700 мм/с і кроком сканування 0,1.

Таблиця 4

Аналіз вихідних результатів для моделювання пористості

Висота (мм)	Довжина (мм)	Ширина (мм)	Стартовий кут шару (град)	Кут повороту шару (град)	Потужність лазера (Вт)	Швидкість сканування (мм/с)	Товщина шару (мм)	Крок сканування (мм)	Співвідношення твердих частин
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,040	1,0000
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,050	1,0000
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,060	1,0000
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,070	1,0000
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,080	1,0000
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,090	0,9999
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,100	0,9994
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,110	0,9936
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,120	0,9767
3	3	3	57	67	100	600	0,040	0,130	0,9550
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,040	1,0000
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,050	1,0000
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,060	1,0000
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,070	1,0000
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,080	0,9999
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,090	0,9993
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,100	0,9927
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,110	0,9728
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,120	0,9411
3	3	3	57	67	100	700	0,040	0,130	0,9162

Висновки

У цій роботі було досліджено загальний метод моделювання, за допомогою ANSYS, для прогнозування технології моделювання в області АВ. Зокрема, було вивчено метод моделювання за допомогою модуля Additive Science. У ході моделювання було отримано наступні результати:

1. Використовуючи даний продукт можливо з високою ймовірністю, спрогнозувати розміри ванни розплаву, а також рівень пористості деталей, що виготовляються методами LPBF, а саме СЛП.

2. У прикладі параметричного моделювання одиничного треку (Single Bead) було змодельовані 21 випадок шляхом комбінування потужності лазера (3 випадків) та швидкості сканування (7 випадків) для матеріалу IN718. Було виявлено, що оптимальний одиничний трек був сформований при потужності лазера 100 Вт та швидкості сканування 600 мм/с, а також при потужності лазера 100 Вт та швидкості сканування 700 мм/с.

3. У прикладі параметричного моделювання пористості (Porosity) була виконана симуляція на основі двох прийнятних випадків результатів параметричного моделювання одиничного треку. Комбінація двох випадків потужності лазера та швидкості сканування та 10 випадків кроку сканування була виконана для 20 випадків. За результатами моделювання, згідно з критерієм, рівень пористості (співвідношення твердих частинок) становить менше 0,5 %, найвища швидкість вирощування була виявлена при потужності 100 Вт, швидкості сканування 700 мм/с та відстані штрихування 0,1 мм.

Література

1. Зленко, М. А. *Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.*

2. Гибсон, Я. Технология аддитивного производства [Текст] / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – М. : Техносфера, 2016. – 657 с.
3. Аджамский, С. В. Реализация SLM - технологии для изготовления образцов из жаропрочного сплава INCONEL 718, применяемого в авиационно-космической технике [Текст] / С. В. Аджамский // *Авиационно-космична техніка і технологія*. – 2019. – №2 – С. 69-75. DOI: 10.32620/akt.2019.2.09.
4. Волосова, М. А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом [Текст] / М. А. Волосова, А. А. Окунькова // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – Самара, 2012. – Т. 14, № 4–2. – С. 578–591.
5. Experimental investigation of porosity distribution in selective laser melted Inconel 718 [Text] / Fengyi Wang, Hernan Bosque, James Hyder, Mike Corliss, Wayne Hung // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – No. 48. – P. 807-813. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.117.
6. Influence of laser processing parameters on porosity in Inconel 718 during additive manufacturing [Text] / Pankaj Kumar, Jano Farah, Javed Akram, Chong Teng, Jon Ginn, Mano Misra // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – No. 103. – P. 1487-1507. DOI: 10.1007/s00170-019-03655-9.
7. Mechanism of porosity formation and influence on mechanical properties in selective laser melting of Ti-6Al-4V parts [Text] / Jonathan Stef, Angeline Poulon, Abdelkrim Redjaïmia, Jaafar Ghanbaja, Olivier Ferry, Matthias Sousa, Mohamed Goune // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 156. – P. 480-493. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.06.049.
8. Kim, Yong. Investigation to Metal 3D Printing Additive Manufacturing (AM) Process Simulation Technology (II) [Text] / Yong Kim, Seong Choi, Soon Yang // *Journal of Drive and Control*. – 2019. – No. 16. – P. 51-58. DOI: 10.7839/ksfc.2019.16.3.051.
9. Fatigue performance of selective laser melted Ti6Al4V components: State of the art [Text] / Behzad Fotovvati, Navid Namdari, Amir Dehghanghadikolaie // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6, no.1. – Article No. 012002. DOI: 10.1088/2053-1591/aae10e.
10. ANSYS_Additive_Users_2022_R1, Why Use Additive? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/add_print/add_print_why_use_aa.html. – 10.02.2022.
11. Combination of Modeling and Thermal Sensing to Understand Additive Manufacturing Processes [Электронный ресурс] / Z. R. Francis, C. Teng, J. S. Ginn, H. Dong, L. Jacquemetton, S. Betts, D. Beckett, & J. Heigel. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2022/may/quick-request/combination-of-modeling-and-thermal-sensing-to-understand-additive-manufacturing-processes.pdf>. – 10.02.2022.
12. Калінчак, В. В. Фізика теплопровідності та експериментальні методи визначення коефіцієнту теплопровідності речовин [Текст] / В. В. Калінчак, С. Г. Орловська, О. С. Черненко; ОНУ ім. І.І. Мечникова, Фіз. ф-т, Каф. теплофізики. – Одеса, 2012. – 52 с.
13. ANSYS_Additive_Users_2022_R1, Performing a Single Bead Parametric Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/add_print/add_print_science_single_ad. – 10.02.2022.
14. ANSYS_Additive_Users_2022_R1, Performing a Porosity Parametric Simulation [Электронный ресурс], Режим доступа: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/add_print/add_print_science_porosity.html. – 10.02.2022.
15. Zhang, Lai-Chang. Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review [Text] / Lai-Chang Zhang, Hooyar Attar // *Advanced Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 463-475. DOI: 10.1002/adem.201500419.
16. Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: Modeling and Experimental Approaches [Text] / Zhichao Dong, Yabo Liu, Wei-Bin Wen, Jingran Ge, Jun Liang // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – Article No. 50. DOI: 10.3390/ma12010050.

References

1. Zlenko, M. A., Nagaitsev, M. V., Dovbysh, V. M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, GNTs RF FGUP «NAMI» Publ., 2015. 220 p.
2. Gibson, Ya., Rozen, D., Staker, B. *Tekhnologiya additivnogo proizvodstva* [Additive manufacturing technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016. 657 p.
3. Adzhamskii, S. Implementation of SLM - technology for the manufacture of samples from the heat-resistant alloy INCONEL 718, used in aerospace technology. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 2, pp.69-75. DOI: 10.32620/akt.2019.2.09 (In Russian).
4. Volosova, M. A., Okun'kova, A. A. Ways to optimize the selective laser melting process by choosing a laser beam treatment strategy. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, Vol. 14, no. 4–2, pp. 578–591 (In Russian).
5. Wang, Fengyi., Bosque, Hernan., Hyder, James., Corliss, Mike., Hung, Wayne. Experimental

investigation of porosity distribution in selective laser melted Inconel 718. *Procedia Manufacturing*, 2020, no. 48, pp. 807-813. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.117.

6. Kumar, Pankaj., Farah, Jano., Akram, Javed., Teng, Chong., Ginn, Jon., Misra, Mano. Influence of laser processing parameters on porosity in Inconel 718 during additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 103, pp. 1487-1507. DOI: 10.1007/s00170-019-03655-9.

7. Stef, Jonathan., Poulon, Angeline., Redjaïmia, Abdelkrim., Ghanbaja, Jaafar., Ferry, Olivier., Sousa, Matthias., Goune, Mohamed. Mechanism of porosity formation and influence on mechanical properties in selective laser melting of Ti-6Al-4V parts. *Materials & Design*, 2018, vol. 156, pp. 480-493. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.06.049.

8. Kim, Yong., Choi, Seong., Yang, Soon. Investigation to Metal 3D Printing Additive Manufacturing (AM) Process Simulation Technology (II). *Journal of Drive and Control*, 2019, no. 16, pp. 51-58. DOI: 10.7839/ksfc.2019.16.3.051.

9. Fotovvati, Behzad., Namdari, Navid., Dehghanhadikolaie, Amir. Fatigue performance of selective laser melted Ti6Al4V components: State of the art. *Materials Research Express*, 2018, vol. 6, no.1, article no. 012002. DOI: 10.1088/2053-1591/aae10e.

10. ANSYS Additive Users 2022 R1, Why Use Additive?. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/add_print/add_print_why_use_aa.html (accessed 10.02.2022).

11. Francis, Zachary Ryan., Teng Chong., Ginn Jon S., Dong Hai., Jacquemetton Lars., Betts Scott., Beckett

Darren., Heigel Jared. *Combination of Modeling and Thermal Sensing to Understand Additive Manufacturing Processes*. Available at: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2022/may/quick-request/combination-of-modeling-and-thermal-sensing-to-understand-additive-manufacturing-processes.pdf> (accessed 10.02.2022).

12. Kalinchak, V. V., Orlovs'ka, S. H., Chernenko, O. S. *Fizyka teploprovodnosti ta eksperymental'ni metody vyznachennya koefitsiyentu teploprovodnosti rehovyn* [Thermal conductivity physics and experimental methods for determining the thermal conductivity of substances]. Odessa nat. univ., Fiz. f-t, Kaf. Teplofizyky, Odessa, 2012. 52 p.

13. ANSYS Additive Users 2022 R1, Performing a Single Bead Parametric Simulation. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/add_print/add_print_science_single_ad. (accessed 10.02.2022).

14. ANSYS Additive Users 2022 R1, Performing a Porosity Parametric Simulation. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/add_print/add_print_science_porosity.html (accessed 10.02.2022).

15. Zhang, Lai-Chang., Attar, Hooyar. Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 2015, vol. 18, iss. 4, pp. 463-475. DOI: 10.1002/adem.201500419.

16. Dong, Zhichao., Liu, Yabo., Wen, Wei-Bin., Ge, Jingran., Liang, Jun. Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: *Modeling and Experimental Approaches*. *Materials*, 2018, vol. 12, no. 1, article no. 50. DOI: 10.3390/ma12010050.

Поступила в редакцію 18.03.2022, рассмотрена на редколлегии 15.04.2022

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ПОРИСТОСТИ

А. С. Полуван, В. Т. Сикульский

Предметом изучения в статье является процесс изготовления деталей аэрокосмической техники методом селективного лазерного плавления (СЛП) при использовании металлического порошка жаропрочного сплава Inconel 718. **Целью** является теоретическое определение приемлемых режимов процесса СЛП, обеспечивающих минимальный уровень пористости, высокий уровень герметичности и надежности деталей аэрокосмической техники. **Задание:** определить рациональные размеры ванны расплава относительно определенных параметров процесса; исследовать уровень пористости исходя из полученных значений ванны расплава; определить наиболее приемлемый режим процесса СЛП. **Используемые методы:** математические модели оптимизации, методы решения нелинейных задач. При проведении моделирования были учтены такие параметры как мощность лазерного излучения, скорость сканирования, размер лазерного пятна, температура плиты построения, толщина слоя порошка и шаг сканирования. **Получены следующие результаты.** Согласно полученным данным были определены оптимальные размеры ванны расплава, обеспечивающие стабильность и производительность процесса СЛП, минимальный уровень пористости, высокий уровень герметичности и

надежности деталей аэрокосмической техники. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: были получены значения оптимальных параметров процесса СЛП для изготовления деталей с минимальным уровнем пористости для материал жаропрочного сплава Inconel 718. Подтверждено, что возможно с высокой вероятностью спрогнозировать размеры ванны расплава, а также уровень пористости что изготавливаются методами LPBF, а именно СЛП. Было обнаружено, что оптимальный единичный трек был сформирован при двух комбинациях режимов сканирования, а именно: при мощности лазера 100 Вт, и скорости сканирования 600 мм/с; при мощности лазера 100 Вт и скорости сканирования 700 мм/с. По результатам моделирования, согласно критерию, уровень пористости (соотношение твердых частиц) составляет менее 0,5%, высокая скорость выращивания была определена при мощности 100 Вт, скорости сканирования 700 мм/с и расстоянии штриховки 0,1 мм.

Ключевые слова: селективная лазерная плавнение; пористость; ванна расплава; закон Фурье; моделирование процесса; параметры процесса.

THEORETICAL DETERMINATION OF SELECTIVE LASER MELTING MODES FOR THE MANUFACTURE OF PARTS WITH MINIMUM POROSITY

Anton Polupan, Valeriy Sikulskiy

The subject of this article is the process of manufacturing parts of aerospace technology by selective laser melting (SLM) using metal powder of heat-resistant alloy Inconel 718. **Objectives:** to determine the reasonable size of the melt bath in relation to certain process parameters; to examine the level of porosity based on the obtained values of the melt bath; to determine the most acceptable mode of the SLM process. **The methods used are** mathematical models of optimization and methods for solving nonlinear problems. The simulation took into account such parameters as the power of the laser radiation, the scanning speed, the size of the laser spot, the temperature of the construction plate, the thickness of the powder layer and the hatch spacing. **The following results were obtained.** According to the obtained data, the optimal dimensions of the melt bath were determined, which ensure the stability and productivity of the SLM process, the minimum level of porosity, a high level of tightness and the reliability of aerospace parts. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows: the values of the optimal parameters of the SLM process for the manufacture of parts with a minimum level of porosity for heat-resistant alloy material Inconel 718 were confirmed. LPBF methods, namely SLM. It was found that the optimal single track was formed at two combinations of scanning modes, namely: at a laser power of 100 W, and a scanning speed of 600 mm/s; at a laser power of 100 W, and a scanning speed of 700 mm/s. According to the simulation results, according to the criterion, the level of porosity (solids ratio) was less than 0.5%, the highest growth rate was detected at 100 W, scan speed 700 mm/s and hatch spacing 0.1 mm.

Keywords: selective laser melting; porosity; melt bath; Fourier law; process modeling; process parameters.

Полупан Антон Сергійович – асп. каф. «Технології виробництва літальних апаратів», Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Сікульський Валерій Терентійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Технології виробництва літальних апаратів», Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Anton Polupan – PhD student at the Department of technology of production of aircraft, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: polupananton@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0158-7312.

Valeriy Sikulskiy – Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of technology of production of aircraft, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: vsikulskij@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5944-4728.