

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.001

ВПЛИВ НОМІНАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ШАРУ ЗА БЛИЗЬКИХ ЗНАЧЕНЬ VED НА ПОРИСТІСТЬ СПЛАВУ INCONEL 718, ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ LPBF

Аджамський С.В.¹, Кононенко Г.А.² [ORCID],

Подольський Р.В.³ [ORCID], Подольська О.А.⁴

¹ТОВ «АЛТ України», ІТСТ НАН України, докт. філ., Україна

²ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка», докт. техн. наук., ст. досл., Україна

³ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН України, докт. філ., Україна

⁴ІЧМ НАН України, науковий співробітник, Україна

Анотація. У роботі досліджено вплив номінальної товщини шару на формування пористості сплаву Inconel 718, виготовленого методом лазерного плавлення в порошковому шарі (LPBF), за умови забезпечення близьких значень питомої об'ємної щільності енергії (VED). Виготовлено два дослідних зразки розміром 10×10×10 мм із близькими значеннями VED (40,2 та 39,9 Дж/мм³), але різною номінальною товщиною шару (40 та 60 мкм). Металографічний аналіз виконано на оптичному мікроскопі з подальшою кількісною оцінкою пористості методом аналізу зображень (Image). Встановлено, що за близьких значень VED рівень пористості зразків є співставним, однак спостерігаються відмінності в розподілі розмірів пор. Для зразка з більшою товщиною шару зафіксовано наявність поодиноких пор більшого розміру (до 15...16 мкм), що може свідчити про підвищену схильність до формування дефектів типу Lack of Fusion. Отримані результати підтверджують, що використання показника VED як єдиного критерію оптимізації процесу є недостатнім, оскільки різні комбінації параметрів за близьких значень VED можуть призводити до відмінностей у морфології дефектів.

Ключові слова: LPBF; Inconel 718; об'ємна щільність енергії (VED); товщина шару; пористість; продуктивність процесу.

Лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF) добре зарекомендувало себе, як технологія для швидкого прототипування, реінжинірінгу, топологічної оптимізації та ін. Наразі всі ці операції необхідні для створення деталей складної форми, що містять інтегровані функціональні елементи, зокрема внутрішні канали охолодження, порожнини змінного перерізу, ґратчасті структури, енергопоглинаючі осередки та інші конструктивні рішення,

реалізація яких традиційними методами є технологічно складною або економічно недоцільною. Завдяки можливості пошарового формування матеріалу LPBF забезпечує високу ступінь свободи проектування, що дозволяє поєднувати геометричну складність із функціональною та зменшенням маси конструкції. Це особливо актуально для авіаційної, енергетичної та медичної галузей, де поєднання високих механічних властивостей, оптимізованої маси та ефективного тепловідведення визначає експлуатаційну надійність виробів.

Але слід врахувати, що досягнення необхідних механічних та експлуатаційних властивостей, конструкційної міцності необхідне формування високої відносної щільності деталі. Як відомо з ряду робіт [1-2], пора може слугувати концентратором, що сприяє первинному руйнуванню або є розвитком вже наявних магістральних тріщин. Таким чином, за наявності високої пористості, топологічна оптимізація буде ірраціональною, оскільки відносна щільність буде відігравати важливу роль в забезпеченні конструкційної міцності деталі.

Наразі перед дослідниками в області матеріалознавства постає ряд завдань в області дослідження LPBF- технології, серед яких є продуктивність процесу і взаємозв'язок «час-щільність» [3]. Для цього дослідники застосовують різні підходи до виготовлення деталей: застосування адаптивної фокусної плями для збільшення ширини пробігу лазера; підвищення швидкості нанесення порошку; збільшення номінальної товщини шару плавлення та інші різноманітні підходи. В більшості випадків це є дієвим, але це потребує додаткової підготовки обладнання до виготовлення деталей, раціоналізації параметрів, виконання додаткових операцій калібрування скануючих систем і навіть встановлення додаткових модулів обладнання, що значно збільшує загальний час процесу швидкого прототипування чи реінжинірингу [4]. Більше того, аналіз та співставлення результатів, отриманих після даних експериментів з раціональними параметрами, стає складнішим або неможливим. Часто автори приходять до доволі відомого показника об'ємної щільності енергії (VED), що дозволяє узагальнити багатопараметричний процес, який включає потужність, швидкість сканування, відстань між треками

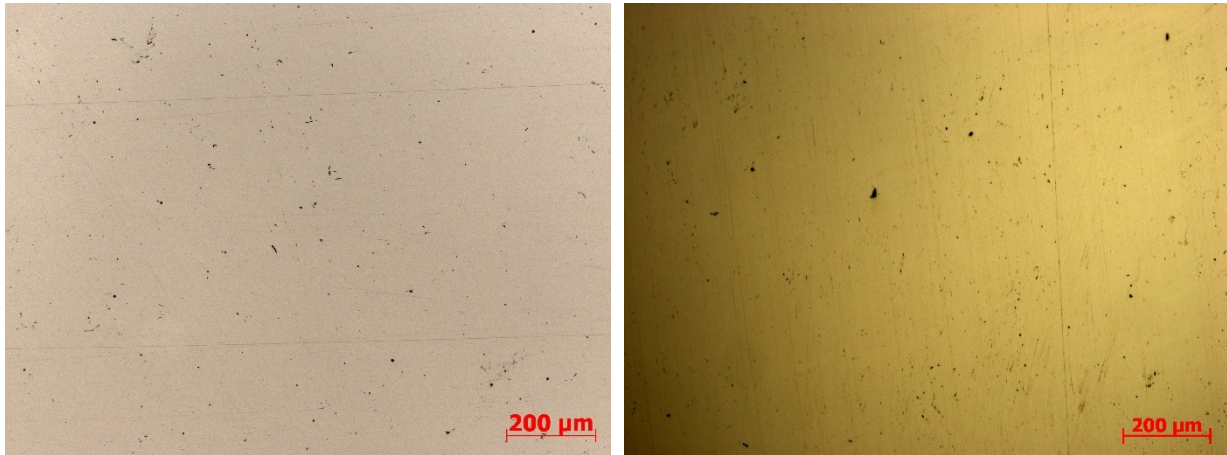
та номінальну товщину шару, для зручності надання рекомендацій. Але в більшості випадків ці рекомендації можуть включати взаємозалежні комбінації параметрів, які приводять до близьких (подібних) значень VED.

В даній роботі буде зроблено спробу проаналізувати металографічним способом вплив VED, яка забезпечується застосуванням різних технологічних параметрів, в тому числі з підвищеною продуктивністю за рахунок збільшення номінальної товщини шару, на відносну щільність зразків жароміцного сплаву Inconel 718.

В рамках роботи було виготовлено два дослідних зразка розмірами 10x10 x10 мм з близькими значеннями VED, а саме дослідний зразок №1: VED 40,2 Дж/мм³, потужність 195 Вт, швидкість сканування 1100 мм/с, відстань між треками 0,11 мм, номінальна товщина шару 40 мкм; дослідний зразок №2: VED 39,9 Дж/мм³, потужність 290 Вт, швидкість сканування 1100 мм/с, відстань між треками 0,11 мм, номінальна товщина шару 60 мкм. Дослідні зразки виготовлялись із жароміцного сплаву Inconel 718 з діапазоном розмірів частинок 25±15 мкм. Металографічні дослідження були виконанні на попередньо механічно підготовлених зразках. Дослідження виконувалось на оптичному світловому мікроскопі Axiovert 200 M MAT в світлопольному режимі освітлення. Пористість в зразках вимірювались з застосуванням програмного забезпечення ImageJ з використанням вбудованої функції «Аналіз частинок». Під час досліджень елементи розміром менше 2 мкм відфільтровувались для запобігання впливу потенційних дефектів, що сформувались в процесі підготовки зразків, на результат оцінки пористості.

Металографічний аналіз показав, що в дослідних зразках №1 та №2 присутні пори різного розміру, переважно пори мають сферичну форму, результати представлені на рис. 1. В результаті оцінки пористості встановлено, що розмір пор дослідного зразка 1 відповідає значенням 2...10 мкм, а для дослідного зразка №2 - 2...16 мкм. Слід зазначити, що в дослідному зразку №1 кількість пор в діапазоні 2...4 мкм більша порівняно з дослідним зразком №2. Але в дослідному зразку №2 було виявлено поодинокі пори розміром 10 мкм та більше. Виявлена пора розміром 15,5 мкм в дослідному зразку

№2 ймовірно є дефектом Lack of Fusion. Відповідно до побудованого графіку розподілу пор за розмірами можна зробити висновок, що переважно розмір пор для обох зразків відповідає значенням в діапазоні 3...4 мкм.



Дослідний зразок №1

Дослідний зразок №2

Рисунок 1 – Металографічний аналіз дослідних зразків

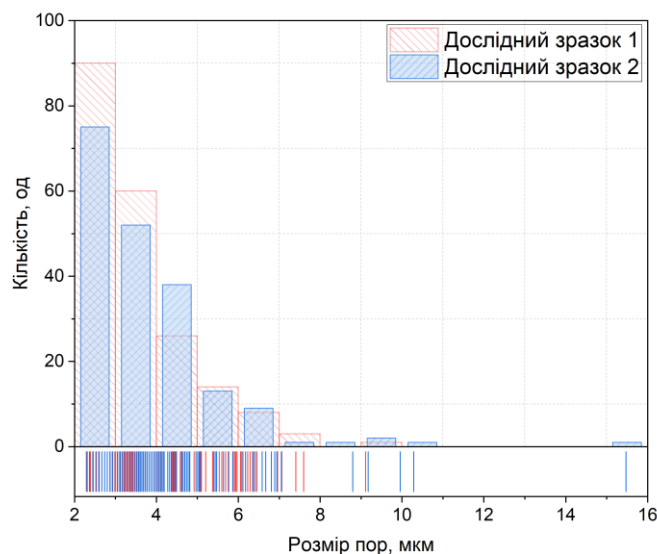


Рисунок 2 – Кількісна оцінка пористості дослідних зразків

Таким чином можна зробити попередній висновок, що за використання близьких VED та застосування різних технологічних параметрів, включно зі збільшенням номінальної товщини шару для підвищення продуктивності процесу, пористість має близький співставний рівень. Але слід зазначити, що за збільшення номінальної товщини шару порошку та застосування близьких значень VED розмір сформованих пор більший, що може вказувати на схильність до формування ймовірного дефекту Lack of Fusion. Враховуючи

вище зазначено, в подальшому є необхідність проведення більш детального аналізу даного ефекту на серії дослідних зразків для підтвердження даної залежності.

Висновки

1. Встановлено, що за близьких значень об'ємної щільності енергії ($VED \approx 40 \text{ Дж/мм}^3$) рівень пористості сплаву Inconel 718 є співставним незалежно від номінальної товщини шару під час реалізації LPBF-технології.

2. Збільшення товщини шару з 40 до 60 мкм призводить до формування поодиноких пор більшого розміру (до 15–16 мкм), що може свідчити про зміну механізму формування ванни розплаву та підвищену ймовірність формування дефектів типу Lack of Fusion.

3. Показано, що близькі значення VED не гарантують ідентичної морфології пор, оскільки різні комбінації технологічних параметрів можуть формувати відмінні умови кристалізації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Shi X., Wang H., Feng W., Zhang Y., Ma S., Wei J., The crack and pore formation mechanism of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020, 91. Id. 105247. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105247>.
2. Meng G., Zhang J., Li J., Jiang Z., Gong Y., Zhao J. Impact of pore defects on laser additive manufacturing of Inconel 718 alloy based on a novel finite element model: Thermal and stress evaluation, *Optics & Laser Technology*, 167, 2023, 109782, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109782>.
3. Antikainen A., Reijonen J., Lagerbom J., Lindroos M., Pinomaa T., Lindroos T. Single-Track Laser Scanning as a Method for Evaluating Printability: The Effect of Substrate Heat Treatment on Melt Pool Geometry and Cracking in Medium Carbon Tool Steel. *JMEPEG* - 2022. 31. 8418–8432. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06826-0>
4. Ackermann L., Roider C., Gehring M., Cvecek K., Schmidt M. High-speed speckle averaging for phase-only beam shaping in laser materials processing. *Optics and Lasers in Engineering* – 2023. 165. id. 107537. <https://doi.org/10.1007/10.1016/j.optlaseng.2023.107537>

**INFLUENCE OF NOMINAL LAYER THICKNESS AT CLOSE VED VALUES ON THE
POROSITY OF INCONEL 718 ALLOY MANUFACTURED BY LPBF METHOD**

S.V. Adjamsky, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Podolska

Abstract. *The work investigated the effect of the nominal layer thickness on the formation of porosity in the Inconel 718 alloy manufactured by the laser powder bed melting (LPBF) method, provided that similar values of the specific volumetric energy density (VED) were provided. Two test specimens measuring 10×10×10 mm were manufactured with similar VED values (40.2 and 39.9 J/mm³), but different nominal layer thicknesses (40 and 60 μm). Metallographic analysis was performed on an optical microscope with subsequent quantitative assessment of porosity using the image analysis method (ImageJ). It was found that at similar VED values, the porosity level of the samples is comparable, however, differences in the pore size distribution are observed. For the sample with a larger layer thickness, the presence of single pores of larger size (up to 15-16 μm) was recorded, which may indicate an increased tendency to the formation of defects of the Lack of Fusion type. The obtained results confirm that the use of the VED indicator as the only criterion for process optimization is insufficient, since different combinations of parameters at close VED values can lead to differences in defect morphology.*

Keywords: *LPBF; Inconel 718; volumetric energy density (VED); layer thickness; porosity; process performance.*