PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 42.62.Cf, 61.43.Gt, 61.66.Dk, 61.72.Qq, 81.16.Mk, 85.40.Sz

Дослідження впливу технологічних параметрів на якість об'ємних зразків, виготовлених з Inconel 718 методом вибіркового лазерного топлення

С. В. Аджамський^{*,**}, Г. А. Кононенко^{**,***}

^{*}Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
просп. Гагаріна, 72,
49010 Дніпро, Україна

^{**}LLC 'Additive Laser Technology of Ukraine',
вул. Рибінська, 144,
49000 Дніпро, Україна

^{***}Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,
пл. Академіка Стародубова, 1,
49050 Дніпро, Україна

Технологія вибіркового лазерного топлення — один з видів адитивного виробництва, за якого виріб створюється методом пошарового протоплення порошку металу за допомогою лазерного променя, який рухається по заданій траєкторії згідно тривимірної моделі. Якість виробів істотно залежить від параметрів процесу. З літературних джерел відомо, що мінімальності кількості пор можна досягти за питомої об'ємної енергії 40–280 Дж/см³. Встановлення оптимальних режимів процесу є актуальним завданням, що вимагає комплексного науково обґрунтованого підходу. Метою роботи є встановлення впливу рівня питомої об'ємної енергії і способу його забезпечення на поруватість і мікроструктуру деталей з жароміцного

Corresponding author: Sergiy Viktorovych Adzhams'kyi
E-mail: info@alt-print.com

^{*}Oles Honchar Dnipro National University,
72 Gagarin Ave., UA-49010 Dnipro, Ukraine

^{**}LLC 'Additive Laser Technology of Ukraine',
144 Rybins'ka Str., UA-49000 Dnipro, Ukraine

^{***}Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute, N.A.S. of Ukraine,
1 Academician Starodubov Sqr., UA-49050 Dnipro, Ukraine

Citation: S. V. Adzhams'kyi and H. A. Kononenko, Study of Technological Parameters Influence on Quality of Bulk Samples Manufactured from Inconel 718 by the Selective Laser Melting Method, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 741–752 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.06.0741](https://doi.org/10.15407/mfint.43.06.0741).

стопу Inconel 718. Експерименти проводили методом варіювання параметрів процесу для зміни питомої густини енергії та за постійного рівня енергії з різними значеннями потужності лазера і швидкості сканування. Поруватість оцінено методом мікроструктурного аналізу зображень за допомогою оптичної мікроскопії (Carl Zeiss AXIOVERT 200M). Експериментальні результати обговорювали з точки зору утворення поруватості і мікроструктури експериментальних об'ємних зразків. Встановлено оптимальний рівень питомої об'ємної енергії, необхідної для створення виробів з мінімальною поруватістю на 3D-принтері «Alfa-150» (ТОВ «ALT Україна») зі стопу Inconel 718, який становить 40 Дж/см^3 за товщини шару 50 мкм. Встановлено, що за постійного рівня енергії і різних потужності (80–250 Вт) і швидкості сканування (400–1000 мм/с) кращі результати в рамках експерименту одержано за високих потужності і швидкості сканування. Це пояснюється тим, що за більшої потужності лазерного випромінювання одержання стабільного треку можливо в більш широкому діапазоні швидкостей сканування.

Ключові слова: селективне лазерне топлення, питома об'ємна енергія, поруватість, мікроструктура, Inconel 718.

Selective laser melting technology is one of the types of additive manufacturing in which the product is created by layer-by-layer melting of metal powder using a laser beam that moves along a predetermined path according to a three-dimensional model. Product quality significantly depends on the process parameters. According to the literature, it is known that the minimum number of pores can be achieved with a specific volumetric energy of $40\text{--}280 \text{ J/cm}^3$. Establishing optimal process conditions is an urgent task that requires a comprehensive, scientifically sound approach. The aim is to establish the influence of the specific volumetric energy level and the method of its provision on the porosity and microstructure of parts from the heat-resistant Inconel 718 alloy. The experiments are carried out with varying process parameters to change the specific energy density and at a constant energy level with different values of laser power and scanning speed. Porosity is evaluated by microstructural image analysis using optical microscopy (Carl Zeiss AXIOVERT 200M). The experimental results are discussed with respect to the formation of porosity and microstructure of the experimental bulk samples. The optimum level of specific volumetric energy needs to create a product with a minimum porosity on a 3D Alfa-150 printer (ALT Ukraine LLC) from Inconel 718 alloy, which is 40 J/cm^3 with a layer thickness of 50 μm , is established. A found, at a constant energy level and different powers (80–250 W) and scanning speed (400–1000 mm/s), the best results in the experiment are obtained at higher power and scanning speed. This is explained by the fact that with a higher laser radiation power, a stable track can be obtained in a wider range of scanning speeds.

Key words: selective laser melting, specific volumetric energy, porosity, microstructure, Inconel 718.

(Отримано 7 лютого 2020 р.; остаточн. варіант — 29 квітня 2021 р.)

1. ВСТУП

Розвиток адитивних технологій, зокрема технології вибіркового лазерного топлення (Selective Laser Melted—SLM), дозволяє виготовляти вироби з металу складної геометричної форми, одержання яких традиційними методами, найчастіше, не видається можливим. SLM є пошаровим процесом, за якого лазерний промінь вибірково розтоплює шар порошку відповідно до двовимірних шарів, що згенеровані з тривимірної моделі. SLM володіє такими особливостями як швидка швидкість топлення і затвердіння локальних обсягів металу і, отже, має нерівноважну мікроструктуру з особливими властивостями. SLM є багатофакторною технологією: якість виробів залежить від великої кількості вихідних параметрів. Їх варіювання впливає на структуру, поруватість і, як наслідок, властивості стопу за рахунок певного енергетичного внеску, обсягу розтопленого металу в процесі виготовлення та ін. Для управління технологічним процесом необхідно розуміння закономірностей впливу того чи іншого параметра на кінцевий результат.

Технологію SLM застосовують для виготовлення деталей особливої форми, часто пов'язаної з внутрішніми каналами, з тонкими стінками для авіа- та космічної техніки, тому дуже важливо забезпечувати високу якість деталей. Основними проблемами забезпечення високої якості виробів за допомогою SLM-технології є поруватість, гаряче розтріскування, анізотропія, шорсткість поверхні, забезпечення необхідної мікроструктури синтезованого матеріалу. На якість деталей, вироблених SLM, може впливати безліч факторів. Вибір параметрів процесу SLM є одним з найважливіших з них. Оптимізація параметрів процесу SLM є важливим кроком для забезпечення характеристик матеріалу і якості виготовлених деталей. Густина енергії, яка безпосередньо впливає на властивості побудованих деталей, є ключовим фактором у процесі вибіркового лазерного топлення. Ця стаття вивчає вплив густини енергії на поруватість і мікроструктуру деталей з жароміцного стопу Inconel 718, який поєднує високу міцність і корозійну стійкість з чудовою зварюваністю, а також відсутністю схильності до корозійного розтріскування. Нині його широко використовують для виготовлення газових турбін, ракетних двигунів, космічних апаратів, атомних реакторів, у нафтохімічній промисловості.

Автори [1] показали, що підбір густини енергії індивідуальний для кожного матеріалу і залежить від його властивостей.

Попередні дослідження з використанням SLM в основному зосереджували на впливі параметрів технології на механічні властивості деталі у стані після термічної обробки. Хоча густина енергії є найважливішим показником енерговитрат, публікацій присвячених встановленню зв'язку між густиною енергії і деякими фунда-

ментальними властивостями деталі, такими як поруватість, мікроструктура і співвідношення фаз у комплексі мало [2, 3]. Нині необхідне краще розуміння впливу густини енергії на поруватість, мікроструктуру і шорсткість у разі використання порошків з Inconel 718 методом SLM для розробки оптимальних параметрів процесу, які сприятимуть підвищенню якості виробів, виготовлених з металевого порошку Inconel 718.

Якість виробу, включно з кінцевою густиною і шорсткістю поверхні, насамперед залежить від характеристик ванн розтопу (форми і розміру), які значною мірою контролюються густиною енергії лазерного променя, що є по суті мірою енергії, що підводиться під час обробки матеріалів [4]. Забезпечення рівня густини енергії можна досягнути керуванням певними контрольованими параметрами. Потужність лазера (P), швидкість сканування (v), відстань між треками (перекриття ванни розтопу d) і товщина шару (t) є найважливішими параметрами і пов'язані з густиною енергії лазера наступною залежністю [5, 6]:

$$E = P/(vtd).$$

На рисунку 1 представлено літературні дані щодо режимів з різними рівнями питомої енергії, на яких досягнуто найкращі властивості виробів (за щільністю металу).

Ймовірно, це пов'язано з тим, що до формули в явному вигляді не входять такі важливі параметри як діаметр променя лазера, температура у камері, геометрія деталі, стратегія побудови, характеристики металевого порошку, тобто не враховано особливості облад-

Рис. 1. Вплив питомої об'ємної енергії на щільність металу зразка з Inconel 718, одержаного методом селективного лазерного топлення.

Fig. 1. The influence of the specific gravity of the bulk energy on the density of the sample from Inconel 718 obtained by selective laser melting.

нання, матеріалу та інших умов процесу.

Крім того, той самий рівень густини питомої об'ємної енергії можна забезпечувати за різних поєднань швидкості сканування і потужності лазера (рис. 2).

Водночас, з літератури відомо, що у випадку однакового рівня питомої енергії швидкість сканування може мати вирішальне значення: за малих швидкостей можливий прояв ефекту «кулькоутворення» — утворення кульок металу, формування високих термічних напружень, а за високих швидкостей можлива втрата стабільності треку, він може ставати переривчастим, що так само призведе до формування пор і зниження якості виробу.

Отже, метою роботи є встановлення впливу рівня питомої об'ємної енергії і способу її забезпечення на якість деталей з жароміцного стопу Inconel 718.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.

За результатами попередніх досліджень встановлено, що інтенсивність впливу зміни швидкості сканування вища, ніж потужності лазера, на геометрію одиничного треку (рис. 3).

Також встановлено, що режими, за яких глибина треку станов-

Рис. 2. Залежність питомої об'ємної енергії від швидкості сканування і потужності лазера за постійної товщини шару (50 мкм) і відстані між треками (0,1 мм).

Fig. 2. Dependence of specific volumetric energy on the scanning speed and laser power at constant layer thickness (50 μm) and the distance between tracks (0.1 mm).

Рис. 3. Глибина одиночного треку для різних рівнів потужності лазера (80–400 Вт) і швидкості сканування: 450–700 мм/с (а), 750–1000 мм/с (б).

Fig. 3. The depth of a single track at different levels of laser power (80–400 W) and scanning speed: 450–700 mm/s (a), 750–1000 mm/s (б).

ла 80–120 мкм (глибиною 1,5–2,5 шару) мали питому енергію $E = 45\text{--}55 \text{ Дж/мм}^3$ (рис. 4). Очевидно, що у разі вирощування масивного зразка додатково буде впливати тепло сусіднього треку і шару та за таких режимів будуть створюватися умови з більш високим рівнем енергії, що передається. Тому E понад 50 Дж/мм³ в експерименті не застосовували. Як найперспективніші досліджували режими з $E = 40$ і 30 Дж/мм^3 , режим з $E = 20 \text{ Дж/мм}^3$ застосовували як явно низький рівень.

У треків з глибиною 80–120 мкм ширина ванни становила 130–150 мкм. За різними літературними даними оптимальним вважа-

Рис. 4. Геометричні параметри треку в одиночному шарі за різних рівнів питомої об'ємної енергії.

Fig. 4. Geometric parameters of the track in a single layer at different levels of specific volumetric energy.

ТАБЛИЦЯ 1. Умови експерименту.

TABLE 1. Experimental conditions.

Маркування зразка	$E = 40 \text{ Дж/мм}^3$		Маркування зразка	$E = 50 \text{ Дж/мм}^3$		Маркування зразка	$E = 30 \text{ Дж/мм}^3$	
	$P, \text{ Вт}$	$V, \text{ мм/с}$		$P, \text{ Вт}$	$V, \text{ мм/с}$		$P, \text{ Вт}$	$V, \text{ мм/с}$
4-10-08	80	400	5-10-14	140	560	3-10-08	80	533
4-10-11	110	550	5-10-17	170	680	3-10-11	110	733
4-10-14	140	700	5-10-20	200	800		$E = 20 \text{ Дж/мм}^3$	
4-10-17	170	850	5-10-23	230	920		2-10-08	80 800
4-10-20	200	1000	5-10-25	250	1000			

ється перекриття треків від 0 до 50%. У нашому експерименті було вибране середнє значення — близько 30%. За такої умови інтервал між треками повинен складати $(130-150) \times 0,7 = 91-105 \text{ мкм}$. В експерименті відстань між треками була постійною і становила 0,1 мм, товщина шару — 50 мкм.

Основні параметри процесу під час виконання експерименту наведено в табл. 1. Зразки мали вигляд паралелограмів розмірами $10 \times 10 \times 3 \text{ мм}^3$ на підтримках висотою 2 мм. Друк виконували на установці «Alfa-150» ALT Ukraine, обладнаній волоконно-оптичним лазером потужністю 400 Вт. Робочу камеру продували аргіном, щоб знизити вміст кисню до 0,1%. Всі зразки виготовляли відповідно до технологічних параметрів, наведених у табл. 1. Попередньо нагрівали платформи для побудови до 80°C до початку збирання, щоб мінімізувати залишкові напруження за рахунок зменшення теплового градієнта між нанесеними шарами.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.

Мікроструктуру дослідних зразків, виготовлених з різними параметрами процесу, представлено на рис. 5–8.

У зразку, виготовленому з параметрами, що забезпечують рівень питомої енергії 20 Дж/см^3 , спостерігалася максимальна поруватість металу (табл. 2), в порах розташовані непротоплені часточки вихідного матеріалу металевго порошку. Питома об'ємна енергія на такому рівні є недостатньою для розтоплення частинок порошку.

За рівня питомої енергії 30 Дж/мм^3 поруватість зразків склала 8,2–3,5%. Водночас спостерігалася наступна тенденція: для більш високих потужностей лазера і швидкості сканування формували більш якісний зразок з меншою кількістю пор (рис. 6). Однак і на тих фрагментах зразків, які за малих збільшень мали однорідний

Рис. 5. Мікроструктура зразка з питомою об'ємною енергією 20 Дж/мм³.

Fig. 5. Microstructure of a sample with a specific volumetric energy of 20 J/mm³.

Рис. 6. Мікроструктура зразків з питомою об'ємною енергією 30 Дж/мм³.

Fig. 6. Microstructure of samples with specific volumetric energy 30 J/mm³.

щільний вигляд, за великих збільшень спостерігали мікроефекти, ймовірно пов'язані з непротопом попереднього шару, тобто рівень питомої об'ємної енергії виявився також недостатнім для одержання якісних зразків.

Під час аналізу зразків, виготовлених за питомої об'ємної енергії на рівні 40 Дж/мм³, встановлено, що за такого рівня даного параметра одержано максимальну кількість зразків задовільної якості (рис. 7). Таким чином, у рамках експерименту даний рівень пито-

ТАБЛИЦЯ 2. Щільність дослідних зразків, виготовлених за різних режимів.

TABLE 2. Density of samples manufactured in various modes.

Маркування зразка	P , Вт	V , мм/с	Щільність, %	Маркування зразка	P , Вт	V , мм/с	Щільність, %
2-10-08	80	800	68	4-10-20	200	1000	99,9
3-10-08	80	533	91,8	5-10-14	140	560	96
3-10-11	110	733	96,5	5-10-17	170	680	97
4-10-08	80	400	99,8	5-10-20	200	800	95
4-10-11	110	550	99,5	5-10-23	230	920	97
4-10-14	140	700	99,8	5-10-25	250	1000	98
4-10-17	170	850	99,9				

мої енергії є оптимальним.

Крім того, встановлено тенденцію: за однакового рівня питомої енергії мінімальна поруватість формується у випадку більшої потужності і швидкості.

Рис. 7. Мікроструктура зразків з питомою об'ємною енергією 40 Дж/мм³.

Fig. 7. Microstructure of samples with a specific volumetric energy of 40 J/mm³.

Під час аналізу зразків, виготовлених з питомою енергією 50 Дж/см³ встановлено, що глибина протопу становила до 5–7 шарів, також зазначалася наявність мікротріщин і ділянок грубої мікроструктури.

Рис. 8. Мікροструктура зразків з питомою об'ємною енергією 50 Дж/мм³.

Fig. 8. Microstructure of samples with a specific volumetric energy of 50 J/mm³.

Спостерігалася структура пор, характерних для умов глибокого протоплення. Ймовірно, це пов'язано з часовим інтервалом між створенням сусідніх треків, тобто розбивкою зразка на поля залежно від довжини треку: за короткого треку наступний сусідній трек формується через коротший інтервал часу і попередній не встигає охолонути.

Зберігається така ж тенденція, що й для попередніх серій зразків: максимальна кількість дефектів формується за мінімальної швидкості сканування і потужності лазера.

Отримані результати свідчать про перспективи використання вибіркового лазерного топлення для виготовлення об'ємних зразків зі стопу Inconel 718 з високою щільністю.

4. ВИСНОВКИ

1. В рамках експерименту встановлено оптимальний рівень питомої об'ємної енергії ~ 40 Дж/см³ для виготовлення зразків зі стопу Inconel 718 (установка «Alfa-150») за товщини шару 50 мкм методом вибіркового лазерного топлення.
2. Встановлено нові технологічні режими, що дозволяють отримати зменшення поруватості виробів до 0,1–0,2 % завдяки більш високим швидкостям сканування (700–1000 мм/с) за більшого рівня потужності лазера (140–200 Вт).
3. Для уточнення оптимальних режимів залежно від геометрії виробів (тонка/товста стінка або короткий/довгий трек) необхідно провести додаткові дослідження.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. I. Yadroitsev, A. V. Gusarov, I. Yadroitsava, and I. Smurov, *J. Materials Processing Technology*, **210**, Iss. 12: 1624 (2010).
2. H. Meier and C. Haberland, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **39**, No. 9: 665 (2008).
3. M. Islam, T. Purtonen, and H. Piili, *Physics Procedia*, No. 41: 828 (2013).
4. B. Fotovvati, S. F. Wayne, G. Lewis, and E. Asadi, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2018**: 1 (2018).
5. J. J. S. Dilip, S. Zhang, C. Teng, K. Zeng, C. Robinson, D. Pal, and B. Stucker, *Progress in Additive Manufacturing*, **2**: 157 (2017).
6. H. Gu, H. Gong, D. Pal, K. Rafi, T. Starr, and B. Stucker, *24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*: 474 (2013).
7. Zemin Wang, Kai Guan, Ming Gao, Xiangyou Li, Xiaofeng Chen, and Xiaoyan Zeng, *J. Alloys Compounds*, **513**: 518 (2012).
8. K. N. Amato, S. M. Gaytan, L. E. Murr, E. Martinez, P. W. Shindo, J. Hernandez, S. Collins, and F. Medina, *Acta Mater.*, **60**, Iss. 5: 2229 (2011).
9. Qingbo Jia and Dongdong Gu, *J. Alloys Compounds*, **585**: 713 (2014).

10. E. Chlebus, K. Gruber, B. Kuźnicka, J. Kurzac, and T. Kurzynowski, *Materials Science Engineering: A*, **639**: 647 (2015).
11. V. A. Popovich, E. V. Borisov, A. A. Popovich, V. Sh. Sufiiarov, D. V. Masaylo, and L. Alzina, *Materials and Design*, **114**: 441 (2016).
12. Joon-Phil Choi, Gi-Hun Shin, Sangsun Yang, and Dong-Yeol Yang, *Powder Technology*, **310**: 60 (2017).
13. Yaakov Idell, L. E. Levine, A. J. Allen, and F. Zhang, *JOM*, **68**: 950 (2016).
14. Yen-Ling Kuo, Shota Horikawa, and Koji Takehi, *Scripta Mater.*, **129**: 74 (2017).