

УДК 621.762.8:004.923

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ Inconel 718, ВИГОТОВЛЕНОГО ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВИБІРКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ З ДИНАМІЧНИМ ФОКУСУВАННЯМ НА ПОВЕРХНІ НАНЕСЕННЯ

С. В. АДЖАМСЬКИЙ<sup>1,2</sup>, Г. А. КОНОНЕНКО<sup>1,3</sup>, Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> LLC “Additive Laser Technology of Ukraine”, Дніпро;

<sup>2</sup> Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро;

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро;

<sup>4</sup> Український державний університет науки і технологій, Дніпро

Технологія вибіркового лазерного плавлення – один зі сучасних методів виготовлення деталей складної геометрії, які важко відтворити в умовах традиційного виробництва. Під час фокусування променя лазера на поверхні платформи побудови виникає розфокусування за його відхилення від центра платформи. Забезпечити стабільні параметри та якість друку можна методом динамічного фокусування під час переміщення оптичної системи по осі Z. Експеримент виконано на 3D-принтері Alfa-280 (ТОВ “АЛТ України”), оснащеному двома сканувальними системами з одномодовими волоконними ітербієвими лазерами. Вивчено вплив розташування на платформі дослідних зразків зі жароміцного сплаву Inconel 718 на їх механічні властивості. Встановлено, що розбіжності значень тимчасового опору, відносних видовження та звуження зразків, розміщених у кутах платформи, спадають від 1 до 38% через зміщення області розфокусування променя. Рекомендовано під час виготовлення розташовувати вироби якомога ближче до осі оптичної системи.

**Ключові слова:** вибіркоче лазерне плавлення, динамічне фокусування, корекція фокусної відстані, сплав Inconel 718, механічні властивості.

The technology of selective laser melting is one of the modern methods of manufacturing parts of complex geometry, which are difficult to reproduce in the conditions of traditional production. When focusing the laser beam on the surface of the construction platform, there is a problem of defocusing the laser beam when it deviates from the center of the platform. One of the ways to ensure stable parameters and print quality is the method of dynamic focusing when moving the optical system along the Z axis. The experiment was performed on an Alfa-280 3D printer (ALT Ukraine LLC), equipped with two scanning systems with single-mode fiber ytterbium lasers. The influence of the location on the platform of test samples made of heat-resistant alloy Inconel 718 on the features of mechanical properties was studied. It was established that the mechanical properties (temporal resistance, relative elongation, relative narrowing) of samples located in the corners of the platform had differences in values from 1 to 38% due to the displacement of the beam defocusing area. When manufacturing products, it is recommended to place them as close as possible to the axis of the optical system.

**Keywords:** selective laser melting, dynamic focusing, focal length correction, Inconel 718 alloy, mechanical properties.

**Вступ.** Донедавна лазерні технології застосовували для прошивання точних отворів у рубінових годинникових каміннях, алмазних волокнах, діафрагмах і фільерах, для різання листового прокату, крихких матеріалів, підганяння номіналів електронних приладів, зварювання, балансування обертових мас [1, 2]. Останнім

Контактна особа: Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

часом в них все частіше використовують модернізовані оптичні системи. Вибіркове лазерне плавлення (ВЛП-технологія, аналог SLM) відносять до адитивного виробництва – одного зі сучасних методів виготовлення деталей і вузлів складної геометрії, які важко або неможливо відтворити в умовах традиційного виробництва [3]. Компанія ТОВ “АЛТ України” має досвід зі створення 3D-принтерів, що дають можливість виготовляти деталі за ВЛП-технологією [4–6].

Під час фокусування променя лазера на поверхні платформи побудови за допомогою класичного об’єктива на основі асферичних або інших лінз виникає його розфокусування за відхилення від центра платформи. Щоб позбутися цього, в промисловості коректують фокусну відстань, наприклад, застосовуючи F-Theta лінзи, динамічне фокусування по осі Z, коригування по 3–5 осях.

Принцип роботи F-Theta лінз [7, 8] такий. На вході в лінзу промінь, сфокусований у нескінченність, відхиляється на необхідний кут за допомогою дзеркал, далі в середині об’єктива він фокусується на робочу відстань FFL, а відстань сканування змінюється згідно з кутом сканування. Фокус по всьому полю сканування знаходиться в одній площині. Але всі лінзи володіють обмеженими дифракційними характеристиками та мають обмежену площу сканування [9–12].

Іншим складнішим, але одночасно і перспективнішим способом корекції фокусної відстані є технологія динамічного фокусування променя на вході в систему сканування рухомою фокусною лінзою з рушієм на основі високошвидкісного електроприводу. Така схема дає можливість змінювати діаметр фокусної плями під час друку та комбінувати параметри формування ванни розплаву в необхідних ділянках, а отже, суттєво збільшувати швидкість та продуктивність друку [7].

Наразі недостатньо літературних даних про вплив розфокусування в крайньому положенні на платформі на структурний стан та механічні властивості сплавів для виготовлення деталей за ВЛП-технологією [13].

Мета дослідження – вивчити вплив розфокусування в крайньому положенні на платформі зразків та порівняти особливості структурного стану та механічних властивостей жароміцного сплаву Inconel 718 залежно від розташування на ній.

**Матеріал і методика.** Ця праця продовжує дослідження [14], де проаналізовано основні принципи реалізації ВЛП-технології, вплив енергетичних параметрів процесу та діаметра фокусної плями на якість металу. Випробувальна машина Alfa-280 (ТОВ “АЛТ України”) оснащена двома сканувальними системами з одномодовими волоконними ітербієвими лазерами. В експерименті задіяли одну з них, щоб досягнути максимальних відстані та кута падіння променя лазера на віддаленій стороні площі побудови. Діаметр фокусної плями під оптичною системою 0,12 mm. Фокусну відстань корегували високошвидкісним динамічним об’єктивом з електроприводом ScanLab VarioSCAN de40i (рис. 1).

Форму і розміри частинок вихідного матеріалу визначали за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 2). Виготовляли зразки з порошку сплаву Inconel 718 з розміром частинок  $45 + 15 \mu\text{m}$  такого хімічного складу: 52,5 mass% Ni; 19,5 Cr; 3 Mo; 5,1 Nb; 0,7 Co; 0,2 Mn; 0,6 Cu; 0,8 Al; 0,2 Ti; 0,3 Si; 0,018 C; решта – Fe.

Тридцять зразків для випробувань на розтяг побудували за ВЛП-технологією за ідентичними режимами: потужність лазера 290 W, швидкість сканування (проходження лазерного променя) 100 mm/s, відстань між проходами лазерного променя 0,11 mm, товщина робочого шару 60  $\mu\text{m}$ , стратегія сканування – шахові поля (поділ площини на квадрати з розміром сторони 5 mm, сусідні поля заштриховані треками у перпендикулярних напрямках), порядок сканування Zig-Zag (наступний трек починається поруч з місцем закінчення попереднього), поворот шару до попереднього  $67^\circ$ . Моделі зразків під час виготовлення розташували у вертикальному положенні симетрично по всій платформі побудови та розподіляли

по три на десять груп. Механічні властивості визначали під час випроб на розтяг за стандартною методикою на машині “PHYWE”. Доводили зразки до чистових розмірів токарним верстатом HAAS ST10. Металографічні шліфи виготовляли за стандартними методиками з допомогою алмазних паст. Мікроструктуру досліджували на растровому електронному (РЕМ-106) та оптичному (Axiovert 200M) мікроскопах.

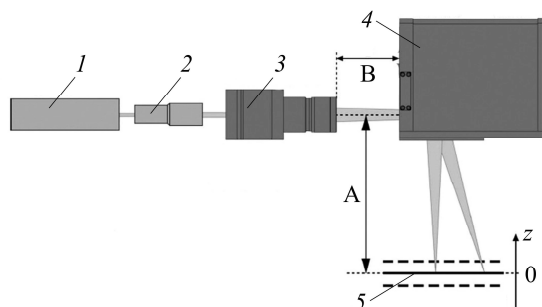


Рис. 1. Оптична схема експериментальної машини Alfa-280 зі системою динамічного фокусування ScanLab vario-SCAN de40i: 1 – лазер; 2 – об’єктив; 3 – varioSCAN de40i; 4 – система сканування; 5 – платформа побудови.

Fig. 1. Optical scheme of the Alfa-280 experimental machine with the ScanLab vario-SCAN de40i dynamic focus system: 1 – laser; 2 – lens; 3 – varioSCAN de40i; 4 – scanning system; 5 – construction platform.

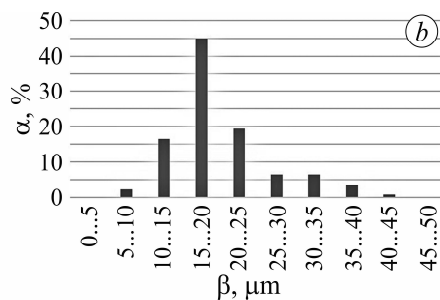
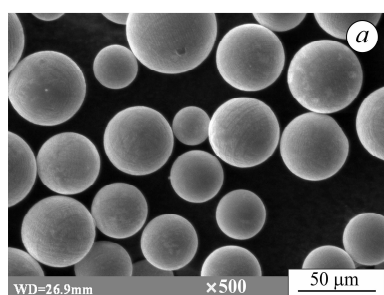


Рис. 2. Частинки вихідного сплаву Inconel 718 за збільшення у 500 разів (а) та результати гранулометричного аналізу (b): α – їх кількість; β – розмір.

Fig. 2. Particles of Inconel 718 alloy raw material at a magnification of 500 (a) and results of particle size analysis (b): α – their number; β – size.

**Результати та обговорення.** Під час інтеграції тривісних систем сканування в процеси 3D-друку сплавами виникає потреба в програмно-математичному керуванні обраними апаратними та оптичними системами. Основна задача – розрахунок та інтеграція корекції фокусної відстані променя по осі Z, відповідно до положення променя в системі координат по осях X та Y та заданого значення апертури променя. Поправку фокусної відстані визначали так:  $L2 = -A$  (рис. 3).

За результатами випробувань встановили (див. таблицю), що середні значення тимчасового опору зразків усіх груп розбігаються несуттєво  $\pm 3\%$  (1027...1137 МПа), відносного видовження знаходяться в діапазоні  $-22,39...+10,81\%$  (33,9...44,6%), відносного звуження – у межах  $-46,73...+27,57\%$  (17,3...23,8 %). Але при цьому всі вони задекларовані провідним виробником обладнання та матеріалів для виготовлення виробів за технологією ВЛП.

Порівнюючи механічні характеристики груп зразків 1; 3; 7 та 9, встановили розбіжність для зразків, які знаходяться в кутах платформи побудови: група 1 –  $(-1,74...+1,55\%; -6,76...+10,4\%; -7,95...+1,95\%$ , відповідно), група 3 –  $(-0,42...+0,59\%; -3,03...+4,58\%; -4,57...+8,04\%$ , відповідно), група 7 –  $(-14,55...+7,03\%$ ;

-5,31...+7,16%; -10,63...+7,69%, відповідно) та група 9 – (-4,55...+2,89%; -25,98...+9,63%; -23,56... +15,07%, відповідно). Це вказує на зміщення корегованої фокусної відстані в областях груп зразків 7 та 9 за межі області друку осей  $Y$  та  $X$ . Порівнюючи групи зразків 2; 4; 6 та 8 в області розфокусування в крайньому положенні, встановили розбіжності значень: група зразків 2 – (-6,4...+4,5%; -22,39...+8,45%; -5,67... +5,04%), група 4 – (-0,42...+0,47%; -16,84...+9,21%; -7,98... +10,54%), група 6 – (-0,84...+0,7%; -3,35...+1,83%; -7,33...+4,68%), група 8 – (-2,31...+1,57%; -2,28...+2,6%; -10,79... +12,4%). Це свідчить, що пластичні характеристики зменшуються, а тимчасовий опір (збільшення діапазону) підвищується, що підтверджує зміщення корегованої фокусної відстані в координатах осей  $X$  та  $Y$  на (-225;75) mm.

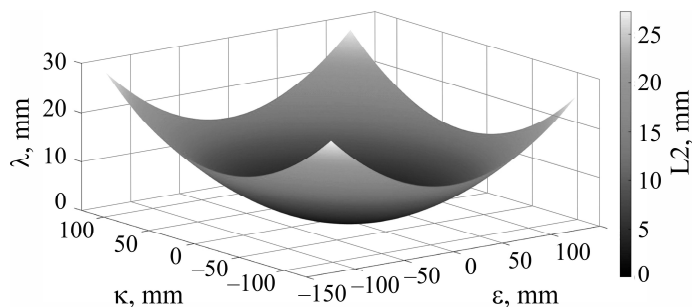


Рис. 3. Графік корекції фокусної відстані під час використання системи динамічного фокусування:  $\epsilon$ ,  $\kappa$  – координати по осях  $X$  та  $Y$  платформи побудови, mm;  $\lambda$  – фокусна кореляція, mm;  $L2$  – зміна фокусування по перерізу платформи, mm.

Fig. 3. Plots of the focal length correction when using the dynamic focusing system:  $\epsilon$ ,  $\kappa$  – coordinates along  $X$  and  $Y$  axis of construction platform, mm;  $\lambda$  – focus correlation, mm;  $L2$  – change of focusing across the cross-section of the platform, mm.

#### Результати механічних випробувань зразків до місця розташування на платформі

Група зразків	$\sigma_{UTS}$ , MPa	$\delta_5$	$\Psi$
		%	
1	1057,83	41,53	19,85
2	1027,6	35,6	18,1
3	1094,9	43,18	22,49
4	1099,3	40,2	21,9
5	1117,8	39,92	17,34
6	1137,4	43,6	19,99
7	1064,9	44,64	23,79
8	1112,8	43,35	22,58
9	1113,54	38,06	18,38
10	1065,5	33,9	19,09
Concept laser SLM [15]	970	33	–

За результатами досліджень побудували залежність механічних властивостей від розташування на платформі відносно однієї сканувальної системи. Виявили, що властивості зразків, виготовлених у різних місцях платформи, дещо різняться. Можна виділити певну область (групи 2; 3; 5), де зразки, поблизу осі ак-

тивної оптичної системи володіли поліпшеними механічними властивостями (рис. 4).

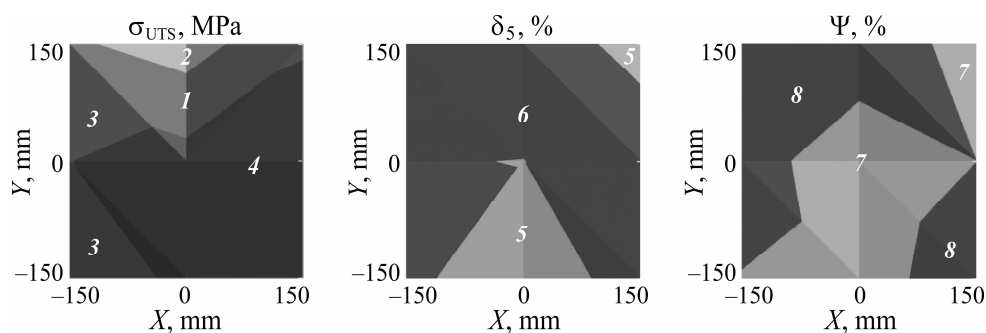


Рис. 4. Залежність зміни параметрів  $\sigma_{UTS}$ ,  $\delta_5$  та  $\Psi$  від області розфокусування в крайньому положенні: 1 –  $\sigma_{UTS} = 950 \dots 1000$  МПа; 2 – 1000...1050; 3 – 1050...1100; 4 – 1100...1150 МПа; 5 – 30...40; 6 – 40...50; 7 – 15...20; 8 – 20...25 МПа.

Fig. 4. Dependence of changes in mechanical parameters  $\sigma_{UTS}$ ,  $\delta_5$  and  $\Psi$  on the area of defocusing in the extreme position: 1 –  $\sigma_{UTS} = 950 \dots 1000$  МПа; 2 – 1000...1050; 3 – 1050...1100; 4 – 1100...1150 МПа; 5 – 30...40; 6 – 40...50; 7 – 15...20; 8 – 20...25 МПа..

Порівнюючи отримані значення з гарантованим рівнем характеристик під час виготовлення на обладнанні Concept laser (див. таблицю), можна зробити висновок, що навіть за деякого розкиду значень під час реалізації ВЛП-технології на обладнанні українського виробництва вони повністю відповідають нормованим європейським.

Зразки 1; 2; 3 та 6 мають характерну мікроструктуру з чіткою геометрією ванн розплаву, що перекриваються. Групам 4; 5; 8 та 10 властива структура з висхідними стовпчастими і видовженими зернами, що ростуть в напрямку побудови, перетинаючи кілька шарів. Групам 7 та 9 притаманна чітка структура зі стовпчастими зернами та внутрішня субструктура [16–19].

У крайових ділянках платформи, крім розфокусування оптичної системи на значній відстані від точки перпендикулярного падіння променя на платформу, на механічні властивості та мікроструктуру може впливати овальність та деформація фокусної плями, а також втрата енергії, яка передається порошку, за великого кута падіння через значне відбивання від його поверхні. Це призводить до того, що за однакової швидкості переміщення променя лазера та його потужності на різних ділянках платформи по-різному формуються мікроструктура та механічні властивості через різні температури плавлення та швидкості охолодження.

### ВИСНОВКИ

Щоб застосувати 3D-принтер з двома сканувальними системи, необхідно виготовити деталі в раціональній області розфокусування в крайньому положенні. Виявлено, що під час використання однієї системи механічні характеристики дещо різняться залежно від розташування зразка на платформі, тобто розфокусування сканування. Значення механічних характеристик (тимчасовий опір, відносні видовження та звуження) груп зразків 1; 3; 7 та 9, розташованих у кутах платформи побудови, розбігаються: групи 1 – на 3; 16; 9%, відповідно, групи 3 – на 1; 7; 12%, відповідно, групи 7 – на 21; 12; 17%, відповідно та групи 9 – на 6; 34; 38%, відповідно) через зміщення області розфокусування.

1. Kruth J.-P., Leu M.-C., and Nakagawa T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping // CIRP Annals Manuf. Techn. – 1998. – 47, № 2. – P. 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)

2. Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головки, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак. – К.: Техника, 1981. – 132 с.
3. *Аджемський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В.* Дослідження впливу шорсткості на властивості зразків зі сталі AISI 316L методом реєстрації макролокалізаційних полів // Системні технології. – 2021. – **4**, № 135. – С. 3–11.  
DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.001
4. *Kamath C.* Data mining and statistical inference in selective laser melting // *Int J. Adv. Manuf. Techn.* – 2016. – **86**. – P. 1659–1677. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8289-2>
5. *Adjamskiy S. V., Kononenko G. A., and Podolskiy R. V.* Application of SLM-technology for manufacture of dental implants from Ti–6Al–4V alloy // *The Paton Weld. J.* – 2021. – № 11. – P. 15–21. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.11.03>
6. *Аджемський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В.* Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 // *Космічна наука і технологія*. – 2021. – **27**, № 6 (133). – С. 105–114.  
DOI: 10.15407/knit2021.06.105
7. *SCANLAB LTD.* Режим доступу до ресурсу: <https://www.scanlab.de/en/products/scan-systems>
8. *The effect of laser focus and process parameters on microstructure and mechanical properties of SLM Inconel 718 / G. E. Bean, D. B. Witkin, T. D. McLouth, and R. J. Zaldivar // Int. Soc. Optics Photonics.* – 2018. – Article number: 10523. DOI: 10.1117/12.2299615
9. *QILOPTIQ LTD.* Режим доступу до ресурсу: [https://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/en/00129267\\_0.pdf](https://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/en/00129267_0.pdf)
10. *Sharman A. R. C., Amarasinghe A., and Ridgway K.* Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718 // *J. Mat. Proc. Techn.* – 2008. – **200**, № 1–3. – P. 424–432. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.080>
11. *QILOPTIQ LTD.* Режим доступу до ресурсу: <https://www.qioptiq-shop.com/en/Precision-Optics/LINOS-Laseroptics-Lenses/LINOS-F-Theta-Ronar-Lenses/Technical-annotations-F-Theta-Ronar/>
12. *Wang X., Gong X., and Chou K.* Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manufact.* – 2017. – **231**, № 1. – P. 1890–1903. DOI:10.1177/0954405415619883
13. *Factorial design analytics on effects of material parameter uncertainties in multiphysics modeling of additive manufacturing / A. Giam, F. Chen, J. Cai, and W. Yan // npj Comput. Mat.* – 2023. – **9**. – Article number: 51. DOI:10.1038/s41524-023-01004-9
14. *Adzhamskiy S. V., Kononenko H. A., and Podolskiy R. V.* Analysis of structure after heat treatment of Inconel 718 heat-resistant alloys made by SLM-technology // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2021. – **43**, № 7. – P. 909–924. DOI:10.15407/mfint.43.07.0909.
15. *Nickel 718 Parameters for Concept Laser M2 Series 5.* Режим доступу до ресурсу: [https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2021-02/M2SERIES5\\_ALLOY718\\_CMD5\\_20210209.pdf](https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2021-02/M2SERIES5_ALLOY718_CMD5_20210209.pdf)
16. *Microstructure and mechanical properties relationship of additively manufactured 316L stainless steel by selective laser melting / T. Kurzynowski, K. Gruber, W. Stopyra, B. Kúznicka, and E. Chlebus // Mat. Sci. Eng. A.* – 2018. – **718**. – P. 64–73.
17. *Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel / A. Yadollahi, N. Shamsaei, S. M. Thompson, and D. W. Seely // Mat. Sci. Eng.: A.* – 2015. – **644**. – P. 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.056>
18. *Jia Q. and Gu D.* Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties // *J. Alloys and Compounds.* – 2014. – **585**. – P. 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.171>
19. *An ultra-high strength martensitic steel fabricated using selective laser melting additive manufacturing: densification, microstructure, and mechanical properties / R. Seede, D. Shoukr, B. Zhang, A. Whitt, S. Gibbons, P. Flater, A. Elwany, R. Arróyave, and I. Karaman // Acta Materialia.* – 2019. – **186**. – P. 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.037>

Одержано 17.08.2022