

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОСТІ В СПЛАВІ Ti–6Al–4V ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ

С.В. Аджамський¹, Р.В. Подольський², З.В. Сазанішвілі³, Г.А. Кононенко²

¹Інститут транспортних систем та технологій НАН України, 49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 5

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1

³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19

РЕФЕРАТ

Досліджено особливості формування мікроструктури та геометрії пор у зразках із титанового сплаву Ti–6Al–4V, виготовлених методом селективного лазерного плавлення за раціональних технологічних режимів. Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу параметрів SLM-процесу на характер пороутворення та просторове розташування пор відносно траєкторій лазерного сканування. Основними задачами роботи є аналіз мікроструктури матеріалу, кількісна оцінка пористості, визначення розмірів, форми, скупчень і просторового розподілу пор, а також встановлення механізмів їх формування. Дослідження виконано на зразках, отриманих за рекомендованих режимів селективного лазерного плавлення: потужність лазера 195 Вт, швидкість сканування 1000 мм/с, відстань між треками 0,12 мм та товщина шару 40 мкм. Для вивчення мікроструктури використано оптичну мікроскопію, а кількісний аналіз пористості, включно з визначенням площі, еквівалентного діаметра, коефіцієнта сферичності та щільності розподілу пор, проведено з використанням програмного забезпечення ImageJ. Встановлено, що пори характеризуються різною морфологією та утворюють як поодинокі включення, так і локальні скупчення, просторово пов'язані з межами треків та зонами перекриття. Вперше показано наявність кореляції між сферичністю пор та їх розташуванням відносно структури треків: більш сферичні пори локалізуються переважно в центральних зонах ванн розплаву, тоді як витягнуті та неправильної форми пори зосереджені поблизу меж сканування. Отримані результати поглиблюють розуміння механізмів пороутворення в Ti–6Al–4V за SLM та можуть бути використані для подальшої оптимізації технологічних параметрів адитивного виробництва. Бібліогр. 24, табл. 2, рис. 3.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: технологія SLM, Ti–6Al–4V, пори, дискретність, мікроструктура

ВСТУП

Технології адитивного виробництва, зокрема селективне лазерне плавлення (SLM), є провідним методом виготовлення деталей складної геометрії зі сплавів на основі титану, таких як Ti–6Al–4V. Хімічний склад цього сплаву згідно з ASTM B348 представлено в табл. 1.

Цей матеріал широко використовується в авіаційній, аерокосмічній, автомобільній та медичній промисловостях завдяки своїм унікальним властивостям: високій корозійній стійкості, біосумісності, низькій щільності та значній міцності [1–3].

Одним з ключових аспектів, що впливають на функціональність виробів, є пористість матеріалу. У медичних імплантатах контрольована пористість забезпечує кращу остеоінтеграцію, оптимальну циркуляцію біологічних рідин та відповідність механічних властивостей імплантата властивостям кісткової тканини [4–6].

Формування пористої структури під час процесу SLM залежить від технологічних параметрів, таких як потужність лазера, швидкість сканування, товщина шару та відстань між доріжками лазерного променя [7]. Зокрема, раціональні режими забезпечують високу щільність металу, зменшуючи кількість пор та дефектів, спричинених недостатнім плавленням або перегрівом частинок порошку.

Попередні дослідження сплаву Ti–6Al–4V [8, 9] показали, що мікроструктура деталей, виготовлених методом SLM, складається переважно з мартенситу. Така структура забезпечує високу міцність виробів, але водночас може збільшити крихкість матеріалу, особливо за недостатнього контролю пористості [10–13]. Тому визначення раціональних параметрів виготовлення має вирішальне значення для забезпечення формування щільної та однорідної мікроструктури.

Основний напрямок поточних досліджень пов'язаний з вивченням особливостей формування розривів та інших дефектів [11–19]. Дослідники звертають увагу на такі показники, як кількість пор, їх розподіл, розмір та форма, які є критичними для якості виробів, отриманих методом SLM. Пористість впливає не тільки на механічні властивості

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026.

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву Ti-6Al-4V, мас. % згідно з ASTM B348

Al	V	Fe	O	C	N	H	Yt	Ti
5,50...6,75	3,50...4,50	≤0,30	≤0,20	≤0,08	≤0,05	≤0,015	≤0,005	Основа

вості, такі як міцність та пластичність, але й на характеристики матеріалу під час використання. Водночас надмірна кількість пор або їх нерівномірний розподіл може стати ключовою точкою концентрації напружень та призвести до руйнування деталі.

Пори у виробках, отриманих методом SLM, зазвичай мають сферичну форму, що пов'язано з такими факторами та явищами, як температура та стабільність розплавленої ванни, ефект Марангоні, ерозія порошку, випаровування, розбризкування та в'язкість розплаву [7, 20].

У титанових сплавах утворення пористості під час лазерного плавлення пояснюється кількома ключовими факторами, властивими адитивному виробництву. Однією з основних причин є поведінка окремих частинок порошку, розташованих на периферії зони розплаву. Локальне підвищення температури, викликане лазерною енергією, може виштовхувати ці частинки із зони обробки [21]. Після їх видалення на поверхні утворюються мікропорожнини. Завдяки поверхневому натягу розплавленого матеріалу ці порожнини поступово набувають округлої форми, що характерно для пористої структури в таких матеріалах.

Цей механізм типовий для процесів адитивного виробництва, оскільки вони супроводжуються високою інтенсивністю локального нагрівання та складною динамікою поведінки розплаву під впливом лазерної енергії. В результаті формується унікальна мікроструктура, яка відображає специфіку технологічного процесу та впливає на експлуатаційні властивості отриманого продукту.

Одним з найважливіших параметрів процесу SLM є потужність лазера. Вона суттєво визначає глибину та ширину треків розплаву, безпосередньо впливаючи на якість сплавлення частинок порошку. Якщо підведеної енергії недостатньо, температура переходу порошку в рідкий стан не досягається, що призводить до утворення таких дефектів, як пори та розриви, неповне сплавлення треків, зварювання частинок агломерату та розшарування вздовж поперечного перерізу. І навпаки, надмірна потужність може спричинити локальний перегрів та випаровування матеріалу, що призводить до змін хімічного складу або утворення дефектів типу замкова щілина через закривання отвору треку розплаву [20].

Але кількість підведеної енергії тісно пов'язана не тільки з потужністю лазерного променя, але й зі швидкістю сканування. Так само це дозволяє контролювати процес та якість продукції. Зі збільшенням швидкості сканування час перебування матеріалу в точці плавлення зменшується,

що знижує ризик перегріву. Це позитивний аспект, оскільки перегрів може призвести до появи нових додаткових дефектів: перерозподілу хімічних елементів вздовж меж треків росту дендритів першого порядку або локалізованого випаровування матеріалу. Однак надмірна швидкість може призвести до неповного плавлення частинок порошку, що є однією з основних причин утворення розривів (відсутності сплавлення) [22].

Аналіз літератури [22] показує, що дослідники зазвичай використовують швидкості сканування від 900 до 1100 мм/с для виробництва компонентів Ti-6Al-4V незалежно від застосованої системи сканування. Таким чином, вони стверджують, що ця швидкість є раціональною для забезпечення умов виробництва без невідповідностей та перегріву попереднього шару з утворенням однорідної мартенситної структури.

На розмір пор та їх розташування також впливають такі параметри, як відстань між доріжками та товщина шару порошку. Наприклад, експериментальні дослідження [20] показують, що при ширині доріжок 0,12 мм та товщині шару 40 мкм забезпечується задовільна однорідність мікроструктури.

Макро- та мікроструктурний аналіз матеріалів є важливим кроком в оцінці їх механічних властивостей, довговічності та надійності в експлуатації. Структурні особливості, такі як межі зерен, дефекти, пори та тріщини, суттєво впливають на поведінку матеріалу під навантаженням [23]. Пори можуть суттєво впливати на механічні властивості, зокрема, знижувати міцність та збільшувати схильність до руйнування.

Підсумовуючи, параметри процесу SLM необхідно коригувати комплексно, враховуючи їх взаємопов'язаний вплив на якість готової продукції. Для досягнення балансу між потужністю лазера, швидкістю сканування, відстанню між доріжками та товщиною шарів важливо створити мікроструктуру, яка забезпечує як високу міцність, так і необхідну щільність матеріалу. Основні дефекти не тільки зменшують щільність матеріалу, але й погіршують його функціональні властивості.

Метою роботи є виявлення та обґрунтування взаємозв'язків між ключовими технологічними параметрами процесу селективного лазерного плавлення та механізмами, що регулюють формування пористості в Ti-6Al-4V, а також аналіз

Таблиця 2. Фактичний хімічний склад сплаву Ti-6Al-4V, мас. %

Al	V	Fe	O	C	N	Ti
6,21	4,03	0,04	0,7	0,1	0,02	Основа

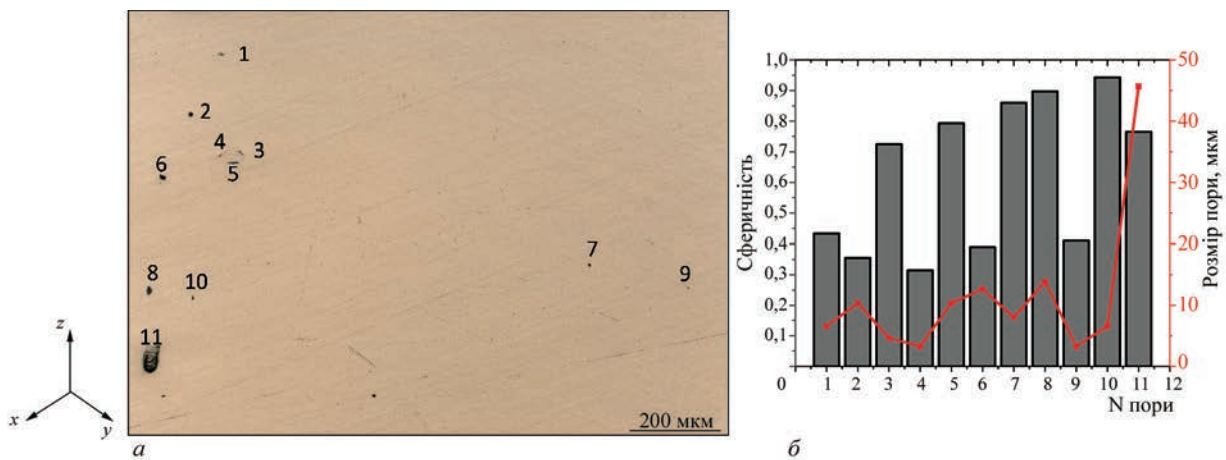


Рис. 1. Мікроструктура сплаву Ti-6Al-4V у площині x - y , виготовленого за оптимальних умов SLM (а); аналіз розмірів пор та сферичності мікроструктури сплаву (б)

просторового розподілу, морфології та локалізації пор залежно від стратегії лазерного сканування та структури доріжок розплавленої ванни.

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження зразки сплаву Ti-6Al-4V були виготовлені за допомогою 3D принтера Alfa-150D, наданого ТОВ «АЛТ Україна». Параметри друку були обрані на основі рекомендованих параметрів [24]: потужність лазера — 195 Вт; швидкість сканування — 1000 мм/с; відстань між доріжками — 0,12 мм; товщина шару — 40 мкм.

Експериментальний зразок мав розміри $10 \times 10 \times 10$ мм і був підготовлений до мікроструктурного аналізу за допомогою ультразвукового очищення, а потім механічної обробки за допомогою шліфувальних дисків та оксидного полірування на спеціалізованому обладнанні Laborol-5. Електрохімічне полірування та травлення проводили з використанням плавикової кислоти під напругою 5 та 3 В відповідно.

Фактичний хімічний склад сплаву наведено в табл. 2.

Мікроструктурний аналіз проводили за допомогою оптичного мікроскопа Axiovert 200M Mat. Оцінка розміру, форми, розподілу та накопичення

пор у матеріалі базувалася на візуальному аналізі мікроструктурних зображень зразків за допомогою програмного забезпечення ImageJ. Сферичність пори вимірювали у відносних одиницях і визначали як частку ідеального кола, вписаного в фактичну пору. Ідеально кругла пора має значення сферичності, близьке до нуля.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроструктурний аналіз показав, що середня щільність матеріалу перевищувала 99,9 %, що підтверджує ефективність обраних параметрів виробництва. У ділянках між доріжками спостерігалися газові пори та окремі дефекти, що потенційно свідчить про недостатнє локалізоване плавлення (рис. 1). Розмір пор коливався від 5 до 15 мкм, при цьому була виявлена одна пора розміром 46 мкм.

В результаті досліджень було показано, що формування накопичення пор відбувається на відстанях від 92 до 163 мкм вздовж осі z , що вказує на стабільне формування пор кожні 3...5 шарів відносно попередніх. Цей висновок підтверджує, що вплив параметрів сканування, а саме концепції заповнення доріжки, відіграє значну роль у формуванні пор вздовж поперечного перерізу досліджуваного зразка, що може бути предметом подальших досліджень.

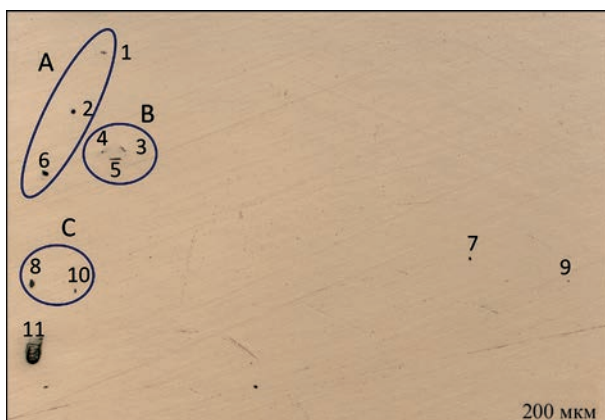


Рис. 2. Аналіз кластеризації пор у мікроструктурі сплаву Ti-6Al-4V



Рис. 3. Мікроструктура сплаву Ti-6Al-4V у площині x - y

На рис. 2 показано групи скупчень пор. Група А, що складається з пор 1, 2 та 6, розташована переважно на однаковій відстані одна від одної вздовж осі z зі зміщенням одна від одної вздовж осі x , що може бути пов'язано з обертанням наступного шару відносно попереднього. Група В являє собою скупчення дефектів lack of fusion, які можуть бути пов'язані з неповним плавленням порошкового агломерату. Група С містить пори в межах одного шару та можуть бути пов'язані з розшаровуванням матеріалу відносно попереднього шару.

На основі сферичності спостережувані пори були розділені на дефекти lack of fusion зі сферичністю від 0,5 до 1,0 та газові пори зі сферичністю від 0,1 до 0,5. Слід зазначити, що ізольовані пори 2, 4, 6 та 9 переважно мають сферичність в області 0,35, що вказує на майже круглу форму, типову для дефекту газових пор, а пори 3, 5, 7, 8 та 10 класифікуються як дефекти lack of fusion.

Електрохімічне травлення було проведено для виявлення мікроструктури та визначення положення цих пор відносно доріжок. У напрямку формування продукту (напрямок z) спостерігалася характерна хвиляста текстура, яка утворюється в результаті пошарового процесу виготовлення з використанням технології селективного лазерного плавлення (рис. 3).

Аналіз пор виявив залежність розміру та сферичності від розташування. Порівняльний аналіз рис. 2 з рис. 3 дозволив встановити, що сферичні газові пори розташовані переважно в тілі доріжок, тоді як витягнуті дефекти lack of fusion розташовані в міждоріжкових областях.

Результати аналізу підтвердили, що рекомендовані параметри забезпечують високу щільність з мінімальною кількістю дефектів.

Загальна концентрація пор низька, що свідчить про високоякісний процес плавлення та мінімальний ризик утворення дефектів через поглинання газу (газові пори) або недостатнє плавлення (відсутність сплавлення).

ВИСНОВКИ

1. Розроблено критерій оцінки форми пор, що дозволяє класифікувати їх за ознаками формування та типом. Встановлено закономірність формування та сферичність пор під час виготовлення Ti-6Al-4V за технологією SLM. Визначено, що сферичність у діапазоні 0,1...0,5 відповідає ідеальній формі, що свідчить про формування газових пор, тоді як 0,5...1,0 вказує на відсутність дефектів сплавлення.

2. В результаті було встановлено особливості формування накопичення пор та характер їх формування: група А — пори, пов'язані з технологічним процесом пошарового наплавлення (0,45 %); група Б — пори, пов'язані з явищами у ванні розплаву (0,27 %); група В — пори, на які впливають геометричні параметри підкладки (0,18 %).

3. Показано кореляцію між сферичністю пор та їх розташуванням відносно структури доріжки: сферичні пори розташовані в тілі доріжок, а витягнуті дефекти несплавлення — у міждоріжкових областях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Tshephe, T.S., Akinwamide, S.O., Olevsky, E., Olubambi, P.A. (2022) Additive manufacturing of titanium-based alloys: A review of methods, properties, challenges, and prospects. *Heliyon*, 8(3), e09041.
2. Saurabh, A., Meghana, C.M., Singh, P.K., Verma, P.C. (2022) Titanium-based materials: Synthesis, properties, and applications. *Materials Today: Proceedings*, 56, 412–419.
3. Suresh, G., Ramesh, M.R., Srinath, M.S. (2022) Surface engineered titanium alloys for biomedical, automotive, and aerospace applications. In: *Advances in processing of lightweight metal alloys and composites: Microstructural characterization and property correlation*. Eds by R.V. Vignesh, R. Padmanaban, M. Govindaraju. Singapore, Springer, 89–102.
4. Abd-Elaziem, W., Mohammed, M.M., Yehia, H.M. et al. (2024) Porous titanium for medical implants. *Multidisciplinary Materials Chronicles*, 1(1), 1–18.
5. Bose, S., Sarkar, N., Jo, Y. (2024) Natural medicine delivery from 3D printed bone substitutes. *J. of Controlled Release*, 365, 848–875.
6. Li, J., Zhong, H., Cao, B. et al. (2024) Comparative study of 3D-printed porous titanium alloy with rod designs of three different geometric structures for orthopaedic implantation. *Acta Metallurgica Sinica*, 37, 54–66.
7. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. (2022) *Implementation of selective laser melting technology in Ukraine*. Kyiv, Naukova Dumka.
8. Li, H., Chen, Z.W., Fiedler, H., Ramezani, M. (2021) Wear behaviour of N ion implanted Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metals*, 11(10), 1639.
9. Leo, J.R.O., Zabeen, S., Fitzpatrick, M.E. et al. (2023) A study on the effects of laser shock peening on the microstructure and substructure of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. *J. of Materials Processing Technology*, 316.
10. Pal, S., Lojen, G., Kokol, V., Drstvensek, I. (2018) Evolution of metallurgical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated in different energy densities in the selective laser melting technique. *J. of Manufacturing Processes*, 35, 538–546.
11. Hu, Zh., Nagarajan, B., Song, X. et al. (2019) Formation of SS316L single tracks in micro selective laser melting: surface, geometry, and defects. *Advances in Materials Sci. and Eng.*, Article ID 9451406, 1–9.
12. Letenneur, M., Kreitzberg, A., Brailovski, V. (2019) Optimization of laser powder bed fusion processing using a combination of melt pool modeling and design of experiment approaches: Density control. *J. of Manufacturing and Materials Processing*, 3, 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp3010021>
13. Roehling, J.D., Perron, A., Fattebert, J.L. et al. (2018) Rapid solidification in bulk Ti-Nb alloys by single-track laser melting. *JOM*, 70, 1589–1597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2920-2>
14. Chen, S., Huang, J., Pan, C. et al. (2017) Microstructure and mechanical properties of open-cell porous Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting. *J. of Alloys and Compounds*, 713, 248–254.
15. Seede, R., Shoukr, D., Zhang, B. et al. (2019) An ultra-high strength martensitic steel fabricated using selective laser melting additive manufacturing: densification, microstructure, and mechanical properties. *Acta Materialia*, 186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.037>
16. Kitano, H., Kusano, M., Tsujii, M. et al. (2021) Process parameter optimization framework for the selective laser melt-

- ing of Hastelloy X alloy considering defects and solidification crack occurrence. *Crystals*, **11**, 578. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11060578>
17. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S. et al. (2018) Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties. *Progress in Materials Sci.*, **92**, 112–224.
 18. Yang, J., Han, J., Yu, H. et al. (2016) Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti–6Al–4V alloy. *Materials & Design*, **110**, 558–570.
 19. Dilip, J.J.S., Zhang, S., Teng, C. (2017) Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti–6Al–4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, **2**, 157–167. DOI: <https://doi.org/10.11007/s40964-017-0030-2>
 20. Gibson, I. et al. (2020) *Additive manufacturing technologies*. Springer.
 21. Gong, H., Rafi, K., Gu, H. et al. (2014) Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, **1–4**, 87–98.
 22. Ghio, E., Cerri, E. (2022) Additive manufacturing of AlSi10Mg and Ti–6Al–4V lightweight alloys via laser powder bed fusion: A review of heat treatments effects. *Materials*, **15**, 2047.
 23. Wentian, S., Yude, L., Xuezhi, S. et al. (2018) Beam diameter dependence of performance in thick-layer and high-power selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Materials*, **11**(7), 1237.
 24. Adjamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V. (2021) Application of SLM-technology for manufacture of dental implants from Ti–6Al–4V alloy. *Avtomaticeskaya Svarka*, **11**, 21–27.

PECULIARITIES OF POROSITY FORMATION IN Ti–6Al–4V ALLOY DURING MANUFACTURING BY SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

S.V. Adzhamsky¹, R.V. Podolskiy², Z.V. Sazanishvili³, G.A. Kononenko²

¹Institute of Transport Systems and Technologies of the NASU. 5 Pysarzhevskoho Str., 49000, Dnipro, Ukraine

²Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NASU. 1 Akademika Starodubova Sq., 49000, Dnipro, Ukraine

³National Technical University “Dnipro Polytechnic”. 19 Prosp. Dmytra Yavornytskoho, 49005, Dnipro, Ukraine

ABSTRACT

This study investigates the microstructural features and pore geometry in Ti–6Al–4V alloy specimens produced by selective laser melting under rational processing conditions. The aim of the work is to identify the relationships between key SLM technological parameters and the mechanisms of porosity formation, as well as the spatial distribution of pores relative to the laser track structure. The main research tasks include characterization of the materials microstructure, quantitative evaluation of porosity, analysis of pore size, shape, clustering behavior and spatial distribution, and determination of their formation nature. Investigations were performed on specimens produced using the recommended SLM regimes: laser power of 195 W, scanning speed of 1000 mm/s, track spacing of 0.12 mm, and layer thickness of 40 μm. Microstructural observations were carried out by optical microscopy, while quantitative porosity analysis, including determination of pore area, equivalent diameter, sphericity, and distribution density, was performed using ImageJ software. It was established that pores are characterized by a heterogeneous morphology and form both isolated inclusions and localized pore clusters spatially associated with track boundaries and overlap zones. A clear correlation between pore sphericity and their location relative to the track structure was established for the first time: pores with higher sphericity are mainly located within the central regions of melt pools, whereas elongated and irregularly shaped pores tend to concentrate near track borders. These findings provide insight into pore formation mechanisms in SLM-processed Ti–6Al–4V and can be used for further optimization of the technological parameters of additively manufacturing. 24 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

KEYWORDS: SLM technology, Ti–6Al–4V, pore, discontinuity, microstructure

ORCID

С.В. Аджамський — <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>, Р.В. Подольський — <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>, З.В. Сазанішвілі — <https://orcid.org/0000-0003-4138-9238>, Г.А. Кононенко — <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

С.В. Аджамський

Інститут транспортних систем та технологій НАН України. м. Дніпро. E-mail: as@alt-print.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.В. Аджамський, Р.В. Подольський, З.В. Сазанішвілі, Г.А. Кононенко (2026) Особливості формування пористості в сплаві Ti–6Al–4V під час виготовлення за технологією селективного лазерного плавлення.

Сучасна електрометалургія, **02**, 52–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.02.06>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 26.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 28.04.2026

Затверджено до друку 20.05.2026

Оприлюднено 27.05.2026