

ВПЛИВ ОБ'ЄМНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ЕНЕРГІЇ (VED) НА ПОРИСТІСТЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ INCONEL 718, ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ В ПОРОШКОВОМУ ШАРІ

Анотація. У роботі досліджено вплив об'ємної щільності енергії (VED) на формування пористості та механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718, виготовленого методом LPBF. Актуальність дослідження зумовлена тим, що в більшості сучасних робіт відносна щільність (пористість) матеріалу розглядається як основний критерій якості адитивно виготовлених виробів, тоді як вплив варіації VED за умови досягнення однакового рівня відносної щільності залишається недостатньо вивченим. Дослідні зразки були виготовлені при двох значеннях VED - 48,7 та 57,6 Дж/мм³ - із забезпеченням однакової високої відносної щільності на рівні 99,8 %. Проведено металографічний аналіз полірованих шліфів із кількісною оцінкою пористості, а також випробування на розтягування. Встановлено, що за однакової відносної щільності характер типу та розміру пор суттєво відрізняється залежно від значення VED. При більш високому значенні VED спостерігається підвищена кількість дрібних пор розміром 2-3 мкм, тоді як при меншому значенні VED фіксується їх менша загальна кількість, проте наявні поодинокі пори більшого розміру (до 17-20 мкм). Показано, що зміна VED практично не впливає на тимчасовий опір. Водночас виявлено суттєвий вплив VED на пластичні характеристики: зразки, виготовлені при VED 57,6 Дж/мм³, характеризуються підвищеними значеннями відносного подовження та звуження порівняно із зразками, отриманими при VED 48,7 Дж/мм³. Отримані результати підтверджують, що оцінка якості LPBF-виробів лише за показником відносної щільності є недостатньою. Варіація VED може зумовлювати відмінну морфологію дефектів та різний рівень пластичних властивостей навіть при однаковій відносній щільності матеріалу. Це вказує на необхідність комплексного підходу до оптимізації режимів LPBF з урахуванням не лише щільності, але й стабільності та відтворюваності механічних характеристик.

Ключові слова: LPBF; Inconel 718; об'ємна щільність енергії; пористість; відносна щільність.

Вступ. Лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF) є доволі відомою технологією в області адитивного виробництва. Дана технологія базується на пошаровому сплавленні порошкового шару під дією лазерного променя про що і вказує її назва. Застосування даної технології з кожним роком набуває все ширшого застосування в авіаційній, енергетичній та медичній галузях.

Наразі в області LPBF-технології спостерігається значна наукова активність [1–4]. Основні дослідження зосереджені на оптимізації технологічних параметрів з метою підвищення продуктивності процесу за одночасного забезпечення високої відносної щільності та структурної однорідності матеріалу (баланс «швидкість–якість», так званий компроміс (час–щільність) [1-2], удосконаленні режимів термічного оброблення, розширенні номенклатури перспективних матеріалів для LPBF [3-4], а також розроблення інтегрованих підходів до виготовлення виробів складної геометрії, що передбачають варіативне керування параметрами процесу залежно від локального перерізу та функціонального призначення деталі.

Аналіз останніх досліджень. Як згадується в більшості робіт по LPBF-технології [5-6], дана технологія має відмінності по мікроструктурі матеріалу порівняно з традиційними способами виробництва [7]. Це пов'язано з формуванням текстурованої структури через високу швидкість охолодження ($10^5 - 10^7$ K/c) під час кристалізації. Слід зазначити, що дана технологія може застосовувати різні технологічні параметри при збереженні високої відносної щільності.

У численних дослідженнях значна увага приділялася впливу основних технологічних параметрів процесу LPBF, зокрема потужності, швидкості сканування, відстані між треками та номінальній товщині шару на відносну щільність виробу [8-9] та механічні властивості. Однак встановлення узагальнених закономірностей з урахуванням одночасної дії всіх зазначених факторів є складним через їх взаємозалежність та багатопараметричний характер процесу. У зв'язку з цим широкого застосування набув показник об'ємної щільності енергії (Volumetric Energy Density, VED) [2, 10], що визначається як відношення потужності лазерного випромінювання до швидкості сканування, відстані між сусідніми треками та номінальної товщини шару порошку, що застосовувалась під час виготовлення (1):

$$VED = P/v \cdot h \cdot t \quad (1)$$

де P - потужність лазера, Вт; v - швидкість сканування, мм/с; h - відстань між треками, мм; t – номінальна товщина шару, мм. Використання цього параметра дозволяє звести декілька змінних до єдиного узагальненого показника та спростити аналіз взаємозв'язку між енергетичними умовами процесу та відносною щільністю матеріалу. Водночас слід враховувати, що різні комбінації технологічних параметрів можуть забезпечувати близькі значення VED і водночас приводити до відмінностей у формуванні ванни розплаву та структурно-фазовому стані матеріалу навіть за однакової досягнутої відносної щільності [11-12].

Таким чином, вплив варіації VED за умови забезпечення однакового рівня відносної щільності на формування механічних властивостей залишається недостатньо дослідженим. У зв'язку з цим, у даній роботі здійснено оцінку впливу різних значень VED на механічні характеристики зразків, виготовлених методом LPBF, із забезпеченням однакової високої відносної щільності.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення впливу різних значень об'ємної щільності енергії (VED) на характер пористості та механічні властивості зраз-

ків зі сплаву Inconel 718, виготовлених методом LPBF, за умови забезпечення високої відносної щільності матеріалу.

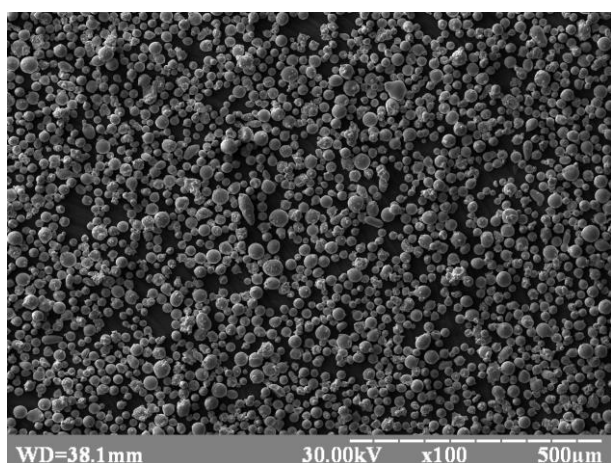
Методика проведення досліджень. В рамках дослідження використано дослідні зразки на розтягування, що виготовлені з застосуванням 3D-принтеру виробництва ТОВ «Адитивні лазерні технології України».

Дослідні зразки були виготовлені з жароміцного сплаву Inconel 718, хімічний склад якого представлено в таблиці 1. Гранулометричний аналіз дослідного порошку показав, що розмір частинок складає 20 ± 15 мкм, результати даного аналізу представлені на рисунку 1.

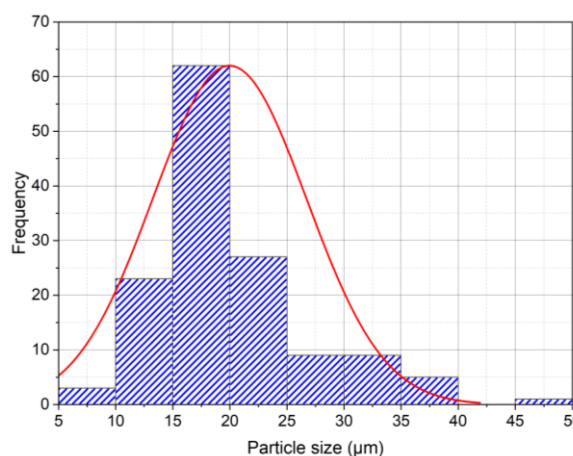
Таблиця 1

Хімічний склад дослідних зразків з Inconel 718, % ваг.

Cr	C	Cu	Nb	Al	Mo	Ti	Co	Si	Mn	Fe	Ni
17,8	0,02	0,06	5,5	0,5	3,0	0,9	0,3	0,07	0,08	18,0	основа



а



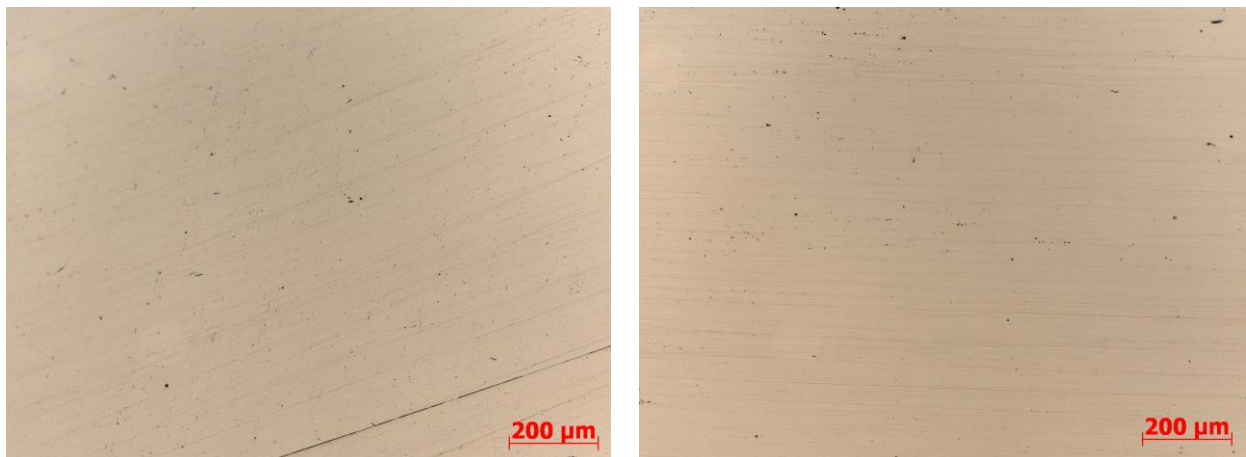
б

Рисунок 1 – Аналіз частинок порошку (а), гранулометричний аналіз (б)

Дослідні зразки для визначення границі міцності, відносного подовження та звуження виготовлялись у вертикальному напрямленні, мали циліндричну форму з діаметром робочої зони 6 мм та відстанню між базисами 25 мм. Виготовлені зразки відповідали різним розрахованим VED, а саме $48,7 \text{ Дж/мм}^3$ та $57,6 \text{ Дж/мм}^3$ (по 3 зразка на кожену серію), та мали відносну щільність на рівні 99,8%. Перед випробуванням дослідні зразки були попередньо механічно оброблені на токарному верстаті HAAS до чистових розмірів з діаметром в робочій зоні 5 мм. Визначення механічних властивостей виконувалося за допомогою випробувальної машини RHYWE, з максимальним навантаженням 3т та швидкістю переміщення траверси 1мм/с.

Аналіз відносної щільності було виконано металографічним способом на дослідних зразках, що попередньо були підготовлені механічним способом (за стандартною методикою шліфування та полірування), з застосуванням оптичного мікроскопа Axiovert 200 Mmat як відношення площі пор до загальної площі поля зору.

Результати досліджень. В результаті аналізу мікроструктури дослідних зразків (рис. 2) було встановлено, що відносна щільність обох зразків складає 99,8%.



48,7Дж/мм³

57,6Дж/мм³

Рисунок 2 – Дослідні зразки в полірованому стані

При більш детальному аналізі дослідних зразків в полірованому стані було встановлено, що при однаковій відносній щільності 99,8% кількість виявлених пор в дослідному зразку, що був виготовлений з VED 48,7 Дж/мм³, менше, ніж в зразку, що був виготовлений з VED 57,6 Дж/мм³. Проведений аналіз (рис. 3) показав, що кількість пор в дослідному зразку з VED 57,6 Дж/мм³ має відносно велику кількість пор розміром в діапазоні 2-3 мкм, а максимальний розмір виявленої пори склав 11 мкм. В той же час в дослідному зразку з VED 48,7 Дж/мм³ присутня менша кількість пор в діапазоні 2-4 мкм, але було виявлено поодинокі пори розміром 17 мкм та 20 мкм. Це вказує, що досягнення відносної щільності на близькому рівні 99,8% при застосуванні різних VED можлива, але досягнення даної щільності може мати варіативний характер через утворення пор різного розміру в залежності від застосованих технологічних параметрів.

Було виконано випробування на розтягування з визначенням границі міцності, відносного подовження та відносного звуження (табл. 2). З врахуванням близької відносної щільності дослідних зразків для аналізу отриманих даних після випробувань на розтягування було проведено аналіз відхилень від середніх отриманих значень кожної серії зразків. Це дозволить зробити спробу в визначенні впливу різних VED при близькій відносній щільності.

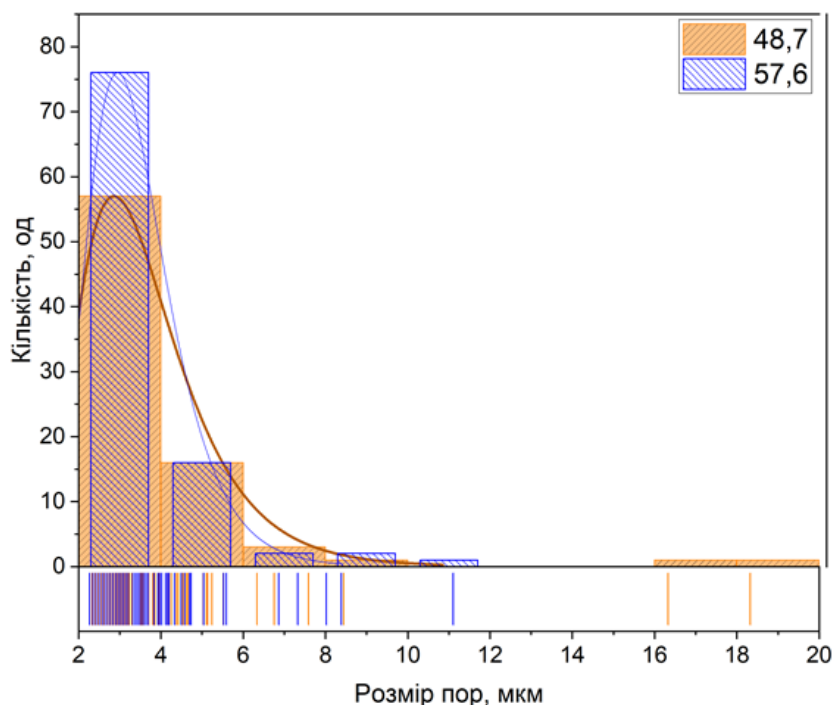


Рисунок 3 – Аналіз пористості дослідних зразків виготовлених при VED 48,7 Дж/мм³ та VED 57,6 Дж/мм³

Таблиця 2

Механічні властивості дослідних зразків

№ зразка	VED, Дж/мм ³	σ_b , МПа	Δ^* , %	δ , %	Δ^* , %	ψ	Δ^* , %
1	48,7	952,9	+0,03	24,5	-1,06	24,3	-4,5
2	48,7	945,9	-0,69	20,6	-16,55	24,3	-4,5
3	48,7	958,9	+0,65	29,1	+14,97	27,7	+8,26
Середнє		952,5		24,7		25,45	
1	57,6	952,4	+0,01	33,0	-0,68	30,7	-4,65
2	57,6	954,4	+0,22	32,8	-1,29	29,1	-9,83
3	57,6	949,9	-0,24	33,9	+1,92	36,9	+14,49
Середнє		952,2		33,2		32,2	

* Δ – відхилення від середнього значення, %

В результаті проведених досліджень з визначення механічних властивостей встановлено, що середні значення по границі міцності мають близькі значення і не продемонстрували статистично значущих відмінностей характеристики. При аналізі пластичних характеристик встановлено, що дослідні зразки, які виготовленні при VED 57,6 Дж/мм³, мають на 8,5% середні значення вище, ніж середні значення відносного подовження зразків, які виготовлені при VED 48,7 Дж/мм³, та на 6,75% вище, ніж середні значення відносного звуження в зразку з VED 48,7 Дж/мм³. Отримані попередні результати свідчать про наявність залежності механічних властивостей від варіації

об'ємної щільності енергії (VED) навіть за умови однакової високої відносної щільності матеріалу.

При аналізі величини відхилень від середніх значень кожної з груп зразків, було виявлено, що дослідні зразки, виготовлені при VED 48,7 Дж/мм³, мають більші коливання по значенням відносно один одного порівняно зі зразками, виготовленими при VED 57,6 Дж/мм³.

У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні поглиблених досліджень із залученням розширеної статистичної вибірки, мікроструктурного аналізу та оцінки характеру дефектності з метою встановлення кількісних залежностей у ланцюгу «технологічні параметри (VED) - відносна щільність - механічні властивості». Такий підхід дозволить сформуванню науково обґрунтованих критеріїв оптимізації режимів LPBF-процесу не лише за показником відносної щільності, але й з урахуванням стабільності та відтворюваності механічних характеристик, що визначає подальший напрямок досліджень.

Висновки:

1. Встановлено, що при близькому рівні відносної щільності характер пористості суттєво відрізняється залежно від значення VED: при VED 57,6 Дж/мм³ спостерігається більша кількість дрібних пор (2–3 мкм), тоді як при VED 48,7 Дж/мм³ виявлено меншу загальну кількість дефектів, проте наявні поодинокі пори більшого розміру (до 17–20 мкм). Це свідчить про відмінності у механізмах формування дефектів при різних енергетичних режимах.

2. Встановлено, що зміна VED за умови збереження високої відносної щільності практично не впливає на тимчасовий опір, середні значення якого для обох серій зразків є близькими та не демонструють статистично значущих відмінностей. Водночас виявлено суттєвий вплив VED на пластичні характеристики матеріалу: зразки, виготовлені при VED 57,6 Дж/мм³, характеризуються підвищеними значеннями відносного подовження та звуження (на 8,5 % та 6,75 % відповідно) порівняно із зразками, отриманими при VED 48,7 Дж/мм³.

3. Отримані результати підтверджують, що оцінка якості LPBF-виробів лише за показником відносної щільності є недостатньою, оскільки різні енергетичні режими можуть формувати відмінну морфологію дефектів і, відповідно, різний рівень пластичних властивостей навіть при однаковій щільності.

4. Встановлена залежність механічних властивостей від варіації VED за однакової відносної щільності вказує на необхідність подальших комплексних досліджень із розширеною статистичною вибіркою та детальним аналізом мікроструктурних особливостей з метою формування науково обґрунтованих критеріїв оптимізації режимів LPBF-процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Letenneur M., Kreitchberg A., Brailovski V. Optimization of Laser Powder Bed Fusion Processing Using a Combination of Melt Pool Modeling and Design of Experiment Approaches: Density Control. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 21.
<https://doi.org/10.3390/jmmp3010021>

2. Letenneur M., Brailovski V., Kreitchberg A., Paserin V., Bailon-Poujol I. Laser powder bed fusion of water-atomized iron-based powders: Process optimization. *J. Manuf. Mater. Process.* 2017, 1, 23. <https://doi.org/10.3390/jmmp1020023>
3. Seede R., Shoukr D., Zhang B., Whitt A., Gibbons S., Flater P., Elwany A., Arróyave R., Karaman I. An Ultra-High Strength Martensitic Steel Fabricated using Selective Laser Melting Additive Manufacturing: Densification, Microstructure, and Mechanical Properties. *Acta Materialia*. 2020. 186. 199-214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.037>
4. Rae C. Alloys by Design: Modelling next generation superalloys. *Materials Science and Technology*. 2009. 25(4). 479-487. <https://doi.org/10.1179/174328408X372056>
5. Chernyshikhin S.V., Firsov D.G., Shishkovsky I.V. Selective Laser Melting of Pre-Alloyed NiTi Powder: Single-Track Study and FE Modeling with Heat Source Calibration. *Materials*. 2021, 14, 7486. <https://doi.org/10.3390/ma14237486>
6. 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>
7. Реалізація технології селективного лазерного плавлення в Україні. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Бадюк С. І. Київ, Наукова думка, 2022, 120 с. (ISBN 978-966-00-1856-3) <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
8. Hebert R.J. Viewpoint: Metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science*. 2016. 51(3). 1165–1175.
9. Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I, Smurov I. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. 210(12). 1624–1631.
10. Wang S., Wang L., Liu J., Yang R., Li J., Wang G. Effects of laser energy density on morphology features and microstructures of the single molten track in selective laser melting. *Front. Mater.* 2023. 10. 1110844. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1110844>
11. Dilip J.J.S., Anam M. A., Pal D., Stucker B. A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. P. 1644-1659.
12. Teng C., Gong H., Szabo A., Dilip J. J. S., Ashby K., Zhang S., Patil N., Pal D., Stucker B. Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017. 139. P. 011009-1 -011009-11. <https://doi.org/10.1115/1.4034137>

REFERENCES

1. Letenneur M., Kreitchberg 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. Manuf. Mater. Process*, 3, 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp3010021>

2. Letenneur M., Brailovski V., Kreitchberg A., Paserin V., Bailon-Poujol I. (2017). Laser powder bed fusion of water-atomized iron-based powders: Process optimization. *J. Manuf. Mater. Process*, 1, 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp1020023>
3. Seede R., Shoukr D., Zhang B., Whitt A., Gibbons S., Flater P., Elwany A., Arróyave R., Karaman I. (2020). An Ultra-High Strength Martensitic Steel Fabricated using Selective Laser Melting Additive Manufacturing: Densification, Microstructure, and Mechanical Properties. *Acta Materialia*, 186. 199-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.037>
4. Rae C. (2009). Alloys by Design: Modelling next generation superalloys. *Materials Science and Technology*, 25(4). 479-487. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328408X372056>
5. Chernyshikhin S.V., Firsov D.G., Shishkovsky I.V. (2021). Selective Laser Melting of Pre-Alloyed NiTi Powder: Single-Track Study and FE Modeling with Heat Source Calibration. *Materials*, 14, 7486. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14237486>
6. Antikainen A., Reijonen J., Lagerbom J., Lindroos M., Pinomaa T., Lindroos T. (2022). 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*, 31. 8418–8432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06826-0>
7. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Badyuk, S. (2022) Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
8. Hebert R.J. (2016). Viewpoint: Metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science*, 51(3). 1165–1175.
9. Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I, Smurov I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12). 1624–1631.
10. Wang S., Wang L., Liu J., Yang R., Li J., Wang G. (2023). Effects of laser energy density on morphology features and microstructures of the single molten track in selective laser melting. *Front. Mater.*, 10. 1110844. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1110844>
11. Dilip J.J.S., Anam M. A., Pal D., Stucker B. (2016). A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. P. 1644-1659.
12. Teng C., Gong H., Szabo A., Dilip J. J. S., Ashby K., Zhang S., Patil N., Pal D., Stucker B. (2017). Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139. P. 011009-1 -011009-11. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034137>

Received 23.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

Effect of volume energy density (VED) on the porosity and mechanical properties of Inconel 718 alloy manufactured by laser powder bed fusion

The work investigates the effect of volumetric energy density (VED) on the formation of porosity and mechanical properties of the heat-resistant nickel alloy Inconel 718 manufactured by the LPBF method. The relevance of the study is due to the fact that in most

modern works, the relative density (porosity) of the material is considered as the main criterion for the quality of additively manufactured products, while the effect of VED variation under the condition of achieving the same level of relative density remains insufficiently studied. The test specimens were manufactured at two VED values - 48.7 and 57.6 J/mm³ - ensuring the same high relative density at the level of 99.8%. Metallographic analysis of polished sections with a quantitative assessment of porosity, as well as tensile tests, was carried out. It was established that at the same relative density, the nature of the type and size of pores differs significantly depending on the VED value. At a higher VED value, an increased number of small pores with a size of 2-3 μm is observed, while at a lower VED value, their total number is smaller, but there are single pores of larger size (up to 17-20 μm). It is shown that the change in VED has practically no effect on the temporary resistance. At the same time, a significant effect of VED on plastic characteristics was found: samples manufactured at a VED of 57.6 J/mm³ are characterized by increased values of relative elongation and narrowing compared to samples obtained at a VED of 48.7 J/mm³. The obtained results confirm that assessing the quality of LPBF products only by the relative density indicator is insufficient. Variation in VED can cause different defect morphology and different levels of plastic properties even with the same relative density of the material. This indicates the need for a comprehensive approach to optimizing LPBF modes, taking into account not only density, but also stability and reproducibility of mechanical characteristics.

Keywords: LPBF; Inconel 718; volumetric energy density; porosity; relative density.

Аджамський Сергій Вікторович – PhD, технічний директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>

Кононенко Анна Андріївна - докт. техн. наук, ст. досл., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, професор НТУ «Дніпровська Політехніка», інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

Подольський Ростислав Вячеславович – докт. філ., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

Бадюк Сергій Іванович – канд.техн.наук, інженер-технолог LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>

Подольська Олена Анатоліївна – науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

Adjamskiy Sergey – PhD, Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>

Kononenko Ganna - Doct. technical science, sen. researcher, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Professor of NTU "Dnipro Polytechnic", materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

Podolskiy Rostyslav – PhD, senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Senior Researcher at the Institute of Applied Control Systems NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

Baduk Sergey – Cand. technical science, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Process engineer LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", senior researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>

Podolska Olena – researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>