

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШОРСТКОСТІ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ ІЗ НЕРЖАВКОЇ СТАЛІ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА LPBF-ТЕХНОЛОГІЄЮ

С.В. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{1,3,4}, Р.В. Подольський^{1,3}, О.А. Сафронова³

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Сергія Подолинського, 31в. E-mail: as@alt-print.com

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України. 49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 5

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.

⁴НТУ «Дніпровська політехніка». 49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19

У сучасному адитивному виробництві деталей широкого поширення набув метод LPBF-технології лазерного плавлення шару металевих порошків, який дозволяє значно розширити можливості щодо оптимізації геометрії виробів. Для деталей традиційного способу виробництва (лиття, деформація) відомо, що шорсткість поверхні може суттєво впливати на рівень механічних властивостей, оскільки виступи та западини є концентраторами напружень. Деталі, виготовлені за технологіями адитивного виробництва, мають підвищену шорсткість, але їх структурний стан після виготовлення суттєво відрізняється від традиційного металу. Часто виникає необхідність експлуатації без наступної механічної обробки поверхні виробів, виготовлених методом LPBF. У роботі визначали вплив шорсткості, наявності або відсутності механічної обробки робочої зони зразків на механічні властивості за умови статичного розтягу. З аналізу профілометричної кривої та мікроструктури встановлено, що зразки без механічної обробки мають періодичні виступи, що пов'язано з текстурою, яка формується під час виготовлення. Середні значення механічних властивостей значно не відрізняються (менше ніж 6,6 % для різних характеристик) у залежності від наявності чи відсутності механічної обробки, але відхилення від середнього в межах вибірки щодо значень границі міцності та відносного звуження для зразків без механічної обробки кратно більші порівняно з інтервалом коливань значень всередині вибірки для зразків із механічною обробкою. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: LPBF-технологія, шорсткість, нержавка сталь, механічні властивості

Вступ. Виробничі процеси продовжують удосконалюватися та розвиватися, попит на швидкіші та менш коштовні виробничі процеси дозволив розробити ряд процесів швидкого прототипування (RP). З використанням адитивного виробництва практично будь-яка геометрія з варіаціями розміру та складності може бути виготовлена з високим ступенем точності [1, 2]. Основним обмеженням для виготовлення деталей із застосованою до них методологією топологічної оптимізації, що може містити внутрішні канали складної конфігурації, технологічні отвори та видалення непрацюючих елементів з метою зменшення ваги, є складність їх кінцевої механічної обробки через малий розмір (наприклад: отворів, каналів), геометричні особливості конструкції та неможливість підведення інструменту до деталі. Ці ускладнення викликають потребу в конструюванні CAD-моделі з урахуванням і прогнозуванням процесів та особливостей виготовлення для запобігання дефектам геометрії поверхні в готовому виробі (наприклад, сплавлення отворів), що викликають їх непрохідність у процесі виготовлення та ін.

Велика кількість дослідників розглядали питання кінцевої обробки поверхні деталі [2–5], так

звану постобробку деталей шляхом хімічного, електрохімічного та фізичного впливу, що дозволяє досягти необхідної шорсткості або очищення поверхні як альтернативу механічній обробці або як проміжну перед подальшою механічною обробкою. Але слід зазначити, що досягнення необхідної шорсткості поверхні даними способами має ряд недоліків, про які було згадано в [6–10], а саме: втрата геометричних параметрів у зонах деталі з виступаючими краями, що пов'язано з інтенсивнішими процесами електрохімічного полірування в даній області [10–11]; наявність формування міжкристалічної корозії у ділянках Down-skin; недостатність очищення через спікання частинок порошку в процесах плавлення в зоні взаємодії метал–порошок у процесі виготовлення.

Результати досліджень [7–11] свідчать, що рівень шорсткості стандартних дослідних зразків значно впливає на значення кінцевих механічних властивостей. Це навіть має відображення у нормативно-технічній документації як вимоги щодо максимально припустимої шорсткості дослідних зразків. Але слід зазначити, що даний висновок було зроблено щодо дослідних зразків, виготовле-

Аджамський С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>, Кононенко Г.А. – <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>,

Подольський Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>, Сафронова О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

© С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський, О.А. Сафронова, 2024

Таблиця 1. Фактичний хімічний склад порошку зі сталі 316L, ваг. % [13]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
0,016	0,78	0,64	0,005	0,008	17,79	12,63	0,04	2,35

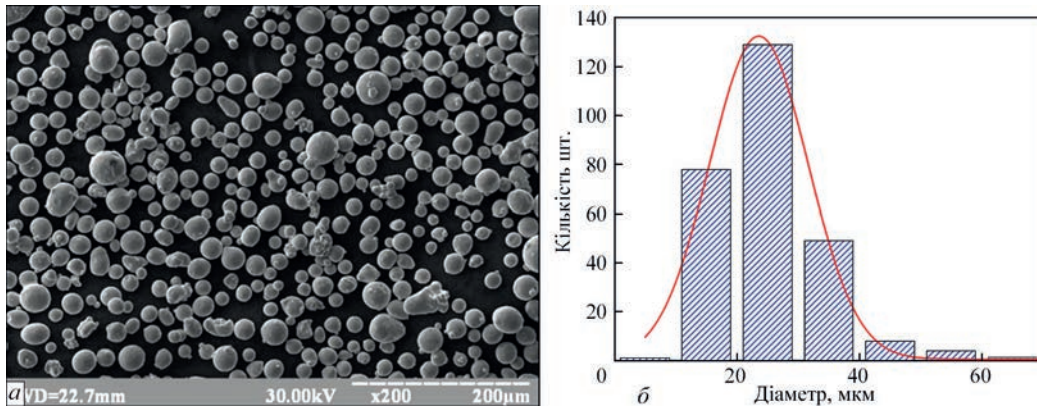


Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу порошку 316L при збільшенні $\times 200$ (а) і результати гранулометричного аналізу (б) [13]

них традиційним способом виробництва. Це переважно пов'язане з тим, що у технологічних процесах виготовлення дослідних зразків традиційним способом виробництва можлива наявність дефектів несучільностей та включень: пор, тріщин, карбідів, нітридів, інтерметалідних фаз, фаз Лавеса та ін., що мають негативний вплив на кінцеві механічні властивості, крім шорсткості поверхні. Але, як відомо з досліджень [12], переважно через достатньо високу щільність зразків, виготовлених за LPBF-технологією, а саме 99,7...99,9 %, та з урахуванням особливостей процесів кристалізації і формування нерівноважного високодисперсного структурного стану за високих швидкостей охолодження, встановлено, що умовами необхідної шорсткості можна нехтувати, оскільки наявність підвищеної шорсткості може не чинити значний вплив на кінцеві механічні властивості без наявної високої дефектності чи відхилень від типової структури для деталей, що виготовлені за LPBF-технологією.

Виходячи з вищезазначеного, дослідження впливу шорсткості на кінцеві механічні властивості є актуальним питанням матеріалознавства в адитивному виробництві, тому що службові властивості можуть визначати кінцеві експлуатаційні властивості та ресурс експлуатації деталі.

Метою даної роботи є дослідження впливу шорсткості зразків із нержавкої сталі 316L, виготовлених за LPBF-технологією, на механічні властивості за умов статичного розтягу.

Матеріал і методика досліджень. У роботі були досліджені випробувальні зразки на розтяг в області робочої зони без і з механічною обробкою, що виготовлені на машині для 3D друку Alfa-150D виробництва ТОВ «АЛТ Україна» з областю друку 150×150 мм, яка оснащена ітербієвим лазе-

ром з довжиною хвилі 1064 нм, захисне середовище – захисний газ аргон, що циркулює робочою камерою.

Зразки були виготовлені у вертикальному напрямі з діаметром робочої зони 5 і 6 мм (з припуском для наступної механічної обробки) і довжиною робочої зони 25 мм. Рациональні параметри друку, що дозволяють отримати щільність готового виробу 99,9 %: товщина нанесеного шару 40 мкм, відстань між треками 0,1 мм, потужність 220 Вт, швидкість проходу променя 1070 мм/с, стратегія сканування – шахові поля $2,5 \times 2,5$ з кутом обертання відносно попереднього шару на 67° [13] із металевого порошку сталі 316L аустенітного класу з фактичним хімічним складом, представленим у табл. 1, гранулометричний аналіз якого наведено на рис. 1. Обраний матеріал переважно складається з аустеніту та не схильний до утворення інтерметалідної фази в результаті короткочасного нагріву та охолодження в процесі термічної обробки.

Механічна обробка зразків до чистових розмірів (рис. 2) проводилась із застосуванням токарного верстата HAAS ST10, при виконанні чистової обробки було виконано п'ять проходів в області робочої зони з кроком подачі інструменту 0,1 мм та зі швидкістю 400 об/хв.

Механічні властивості визначали при випробуванні на розтяг за стандартною методикою на

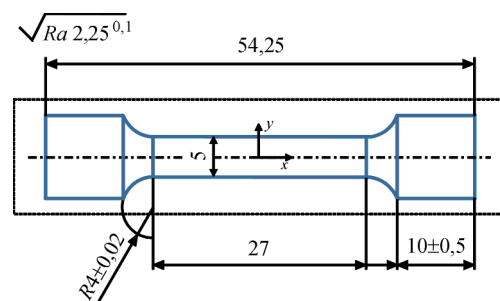


Рис. 2. Геометричні параметри дослідних зразків

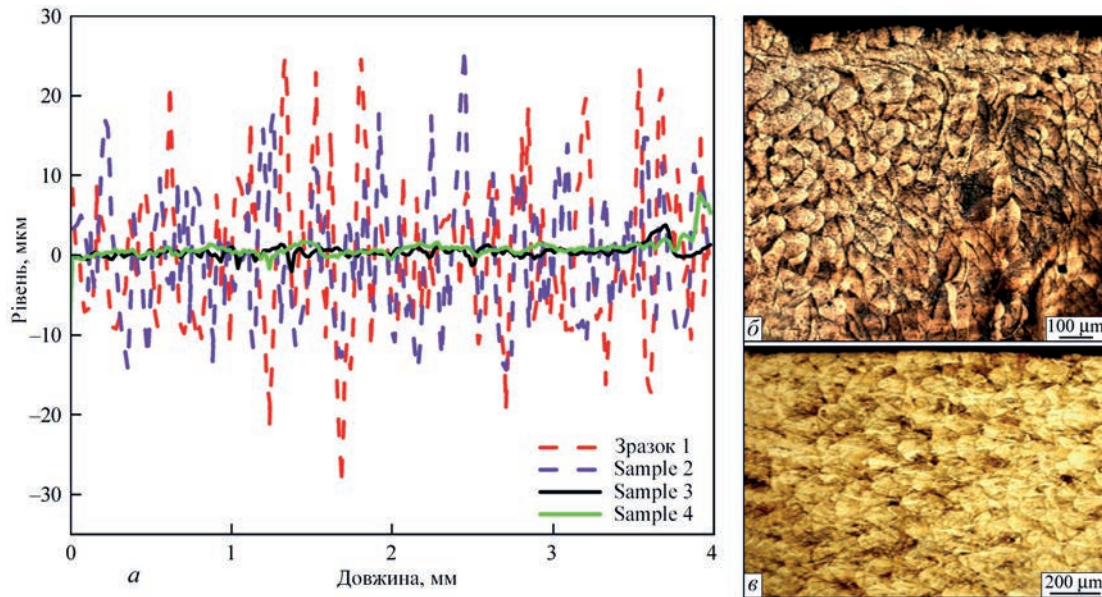


Рис. 3. Профілометричні криві поверхні дослідних зразків (а) і мікроструктура дослідних зразків 1 (б) і 3 (в) перед проведенням випробування на розтяг: 1, 2 – без механічної обробки; 3, 4 – з механічною обробкою

машині INSTRON. Контроль шорсткості було виконано за двома методами: із застосуванням шорсткоміру DANA-260 та мікроструктурного аналізу на оптичному мікроскопі AxioVert 200MMat із використанням спеціалізованого програмного забезпечення ImageJ.

Результати досліджень. У результаті оцінювання стану поверхні дослідних зразків було встановлено, що шорсткість зразків без механічної обробки 1 і 2 в області робочої зони складає 24,41 мкм (R_z) – 6,76 мкм (R_a) і 24,56 мкм (R_z) – 6,78 мкм (R_a) відповідно, шорсткість зразків 3 і 4 після механічної обробки складає 2,28 мкм (R_z) – 0,50 мкм (R_a) і 2,26 мкм (R_z) – 0,56 мкм (R_a) відповідно. На рис. 3 представлено профілометричні криві контрольованої поверхні дослідних зразків завдовжки 4 мм і мікроструктуру поверхні дослідних зразків перед випробуванням.

З аналізу профілометричної кривої та мікроструктури (рис. 3, а, б) встановлено, що зразки 1 і 2 без механічної обробки мають піки приблизно на рівних відстанях один від одного, що пов'язано

з текстурою, яка формується під час кристалізації основного металу, та локальним циклічним нагрівом на поверхні. Ці піки та області є основними концентраторами напружень під час навантаження, що може спричинити передчасне руйнування. За результатами аналізу кривих дослідних зразків 3 і 4 (рис. 3, а, в) встановлено, що шорсткість даних зразків незначна, діапазон коливання не перевищує значення 4 мкм. Можна стверджувати, що механічна обробка належним чином вирівняла поверхню дослідного зразка без наявності областей, які можуть бути концентраторами напружень під час навантаження.

У результаті проведених випробувань на розтяг були отримані криві напруження–деформації та визначено основні механічні властивості, які наведено в табл. 2 і на рис. 4.

З аналізу визначених механічних властивостей встановлено, що за середніми показниками зразки 1 і 2, які були випробувані без проведення попередньої механічної обробки робочої зони, мають нижчі значення характеристик міцності, а саме:

Таблиця 2. Результати визначення механічних властивостей зразків, виготовлених із нержавкої сталі 316 L за LPBF-технологією з різним станом поверхні робочої зони

Номер зразка	Стан	σ_b , МПа	$\Delta Cr. \sigma_b$, %*	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\Delta Cr. \sigma_{0,2}$, %*	δ , %	$\Delta Cr. \delta$, %*	ψ , %	$\Delta Cr. \psi$, %*
1	Без механічної обробки	626,9	-2,3	561,6	-2,8	46,0	-1	66,3	+4,52
2	Без механічної обробки	657,0	+2,29	594,0	+2,72	47,0	+1	60,4	-4,5
Середнє		641,9	-	577,8	-	46,5	-	63,3	-
3	Механічна обробка	677,9	+1,26	587,6	-1,56	43,9	+0,9	65,1	-0,07
4	Механічна обробка	660,7	-1,28	569,3	+1,57	43,0	-0,9	65,2	+0,07
Середнє		669,3	-	578,4	-	43,4	-	65,15	-

*Примітка. $\Delta Cr. \sigma_b / \sigma_{0,2} / \delta / \psi$ – відхилення (%) від середнього значення за вибіркою.

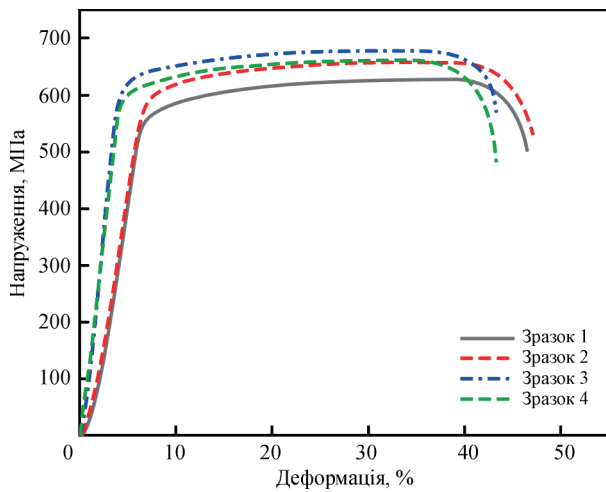


Рис. 4. Криві напруження–деформація дослідних зразків нежаркої сталі 316 L, виготовлених за LPBF-технологією, з різним станом поверхні робочої зони: 1, 2 – без механічної обробки; 3, 4 – з механічною обробкою

границю міцності 641,9 МПа і границю плинності 577,8 МПа, тобто на 4,09 і 0,1 % відповідно, порівняно зі зразками з механічною обробкою робочої зони, а саме: 669,3 і 578,4 МПа відповідно. Але слід зазначити, що середні значення показників пластичності змінювались у різних напрямках: середні значення відносного подовження (46,5 %) дослідних зразків 1 і 2 вищі на 6,6 %, а середні значення відносного звуження (63,3 %) менші на 2,8 % відносно середніх значень для зразків 3 і 4, а саме: відносне подовження – 43,4 % і відносне звуження – 65,15 %. Дані результати щодо характеристик пластичності, а саме: відносного подовження та відносного звуження, переважно пов'язані з розкриттям та витягуванням зон високої шорсткості, як було зазначено в [14–16].

Порівняльний аналіз механічних властивостей дослідних зразків 1 і 2 показав, що зразки, які не проходили етап механічної обробки після виготовлення, мають відхилення від середнього значення $\pm 2,5$ % границі міцності та границі плинності в рамках вибірки, а дослідні зразки 3 і 4 мають відхилення від середнього значення $\pm 1,4$ %. З аналізу відхилень характеристик пластичності, а саме відносного подовження від середнього за групами, встановлено, що дослідні зразки 1 і 2 без механічної обробки мають розкид значень у діапазоні ± 1 %, у той же час як дослідні зразки 3 і 4 – $\pm 0,9$ %. Щодо відносного звуження встановлено, що зразки 1 і 2 мають діапазон відхилень від середнього $\pm 4,51$ %, а зразки 3 і 4 – $\pm 0,07$ %. Таким чином, можна зробити висновок, що середні значення механічних властивостей не зазнають значних змін у залежності від наявності чи відсутності механічної обробки, але слід врахувати, що відхилення від середніх значень границі міцності та відносного

звуження для зразків без механічної обробки (1 і 2) у середині вибірки значно більші порівняно з інтервалом коливань значень всередині вибірки для зразків з механічною обробкою (3 і 4).

Висновки

1. Встановлено, що зразки зі сталі 316 L, виготовлені за LPBF-технологією із застосуванням раціональних технологічних параметрів за товщини робочого шару порошку 40 мкм, мають шорсткість 24,41...24,56 мкм (R_z); 6,76...6,78 мкм (R_a); профіль поверхні має піки приблизно на рівних відстанях один від одного, що пов'язано з текстурою, яка формується в процесі кристалізації, та локальним циклічним нагрівом поверхні.

2. При порівняльному аналізі механічних властивостей, визначених на зразках зі сталі 316 L, які були виготовлені за LPBF-технологією, встановлено, що характеристики міцності зразків з робочою зоною без механічної обробки в стані після виготовлення мають нижчі середні значення (границя міцності та границя плинності менші на 4,09 % і 0,1 % відповідно) порівняно з середніми значеннями цих характеристик, визначених на аналогічних зразках з механічною обробкою робочої зони. Середні значення показників пластичності змінювались у протилежних напрямках: значення відносного подовження зразків без механічної обробки більші на 6,6 %, а значення відносного звуження – менші на 2,8 % відносно середніх значень для аналогічних зразків з механічною обробкою.

3. У результаті аналізу механічних властивостей зразків зі сталі 316 L, визначених після випробувань на розтяг, які були виготовлені за LPBF-технологією, встановлено, що розкид значень у межах вибірки відносно середнього значення границі плинності та відносного звуження незначний (1...2,5 %) незалежно від наявності чи відсутності механічної обробки. Однак відхилення від середніх значень границі міцності та відносного звуження для зразків без механічної обробки в межах вибірки кратно більші порівняно з інтервалом коливань значень всередині вибірки для зразків з механічною обробкою.

Список літератури/References

1. Khakbiz, M., Simchi, A. (2019) Optimization of powder injection molding process parameter for production SS316/TiC composite for biomedical application. *J. of Advanced Materials and Technologies*, 7(4), 1–10. DOI: <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.84282>
2. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. (2022) *Implementation of selective laser melting technology in Ukraine*. Kyiv, Naukova Dumka. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>

3. Gu, D., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R. (2012) Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mat. Rev.*, **57**, 133–164. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
4. Wong, K.V., Hernandez, A. (2012) A review of additive manufacturing. *ISRN Mech. Eng.*, **4**, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
5. Brackett, D., Ashcroft, I., Hague, R. (2011) Topology optimization for additive manufacturing racket. <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-27-Brackett.pdf>.
6. Gong, H., Rafi, K., Gu, H. et al. (2015) Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4V components produced by selective laser melting and electron beam melting. *Mater. Des.*, **86**, 545–554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.147>
7. Ashby, M., Mehl Medalist, R.F. (1983) Mechanical properties of cellular solids. *Metal. Trans. A*, **14**, 1755–1769. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02645546>
8. Lu, T.J., Stone, H., Ashby, M. (1998) Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Mater.*, **46**(10), 3619–3635. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00031-7)
9. Evans, A.G., Hutchinson, J., Ashby, M. (1998) Multifunctionality of cellular metal systems. *Progr. Mater. Sci.*, **43**(3), 171–121. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00004-8)
10. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Бадюк С.І. (2023) Перспективи застосування електрохімічного полірування зразків скеффорд, виготовлених за адитивною технологією. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, **4sp2**, 76–81. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4sup2.10>
11. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Бадюк С.І. (2021) Дослідження ефективності електрохімічного полірування зразків змінного перерізу з різною шорсткістю зі сталі AISI 316L, виготовлених за технологією SLM. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, **2**, 66–73. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.2.08>
12. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. (2016) Additive manufacturing of metals, *Acta Mater.*, **117**, 371–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
13. Adjamskyi, S.V., Kononenko, G.A., Podolskyi, R.V. et al. (2023) Mechanical properties and microstructure of the 316L steel produced by different methods. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **62**(7-8), 436–444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00405-9>
14. Ronneberg, T., Davies, C.M., Hooper, P.A. (2020) Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment. *Mater. Des.*, **189**, 108481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108481>
15. Yu, C.-H. (2022) *Anisotropic mechanical behaviours and thin-wall effects of additively manufactured austenitic alloys*. Linköping: Linköping University Electronic Press. DOI: <https://doi.org/10.3384/9789179293154>
16. Yu, C.-H., Peng, R.L., Lee, T.L. et al. (2022) Anisotropic behaviours of LPBF Hastelloy X under slow strain rate tensile testing at elevated temperature. *Materials Science and Engineering: A*, **844**, 143174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143174>

STUDY OF THE INFLUENCE OF ROUGHNESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL SAMPLES MADE BY LPBF-TECHNOLOGY

S.V. Adjamskiy^{1,2}, G.A. Kononenko^{1,3,4}, R.V. Podolskiy^{1,3}, O.A. Safronova³

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, 31 v Serhiy Podolynskiy Str., Dnipro, Ukraine. E-mail: as@alt-print.com

²Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine. 49000, 5 Pysarzhevsky Str., Dnipro, Ukraine

³Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the NAS of Ukraine. 1 Acad. Starodubov Sq., 49000, Dnipro, Ukraine

⁴Dnipro University of Technology. 19 D. Yavornytskyi Ave., 49005, Dnipro, Ukraine

In the modern additive manufacturing of parts, the LPBF method has become widespread, which implies the technology of laser melting of a metal powder layer, that significantly expands the possibilities for optimizing the geometry of products. For parts manufactured using the traditional method (casting, deformation), it is known that the surface roughness can significantly affect the level of mechanical properties, since protrusions and depressions are stress concentrators. Parts manufactured using additive manufacturing technologies have an increased roughness, but their structural state after manufacturing is significantly different from traditional metal. It is often necessary to operate without subsequent mechanical surface treatment of products manufactured by the LPBF method. In the work the effect of roughness, the presence or absence of mechanical treatment of the working area of the samples on the mechanical properties under static tension conditions was determined. From the analysis of the profilometric curve and microstructure, it was found that the samples without mechanical treatment have periodic protrusions, which is related to the texture formed during the manufacture. The average values of the mechanical properties do not differ significantly (less than 6.6 % for various characteristics) depending on the presence or absence of mechanical treatment, but deviations from the average within the sample regarding the values of tensile strength and reduction in area for samples without mechanical treatment are many times larger compared to the interval of value fluctuations within the sample for samples with mechanical treatment. 16 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: LPBF – technology, roughness, stainless steel, mechanical properties

Отримано 31.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 19.11.2024

Прийнято 03.02.202