

ВПЛИВ ОБДУВУ ТА ЗАВАНТАЖЕНОСТІ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА SLM-ТЕХНОЛОГІЄЮ

С.В. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{1,3}, Р.В. Подольський^{1,3}, С.І. Бадюк¹

¹ТОВ «Адитивні лазерні технології України». 49000, м. Дніпро, вул. Сергія Подолинського, 31в.
E-mail: info@alt-print.com

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України. 49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 5.
E-mail: itst@westa-inter.com

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.
E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Наразі для вибіркового лазерного плавлення (Selective Laser Melting (SLM)) актуальним завданням є дослідження впливу характеристик обдуву та завантаженості робочого простору на механічні властивості титанового сплаву Ti6Al4V. У роботі досліджували зразки на розтяг, для яких внаслідок різної завантаженості простору побудови була пауза різної тривалості між нанесенням порошку та поверненням променю лазера. У результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що характеристики міцності дослідних зразків в області вхідного сопла обдуву інертним газом мають нижче значення на 3...5 % порівняно з центральною областю платформи з розкидом значень ± 2 %, в області вихідного сопла значення на 3...5 % нижче порівняно з центральною областю, розкид значень ± 10 %. Встановлено, що збільшення паузи від 50 до 65 с призводить до зменшення характеристик міцності та пластичності на 23 та 10 %, до 80 с – 33 та 0,7 % відповідно. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, обдув, завантаженість робочого простору, сплав Ti6Al4V, механічні властивості

Вступ. Технологія вибіркового лазерного плавлення (SLM) полягає в побудові твердого об'єкта шляхом багаточиклового наплавлення тонких шарів матеріалу на раніше зроблені шари. При таких процесах матеріал піддається повному розплавленню, щоб забезпечити його зв'язок з попереднім шаром, та наступному багаторазовому нагріванню до високих температур [1, 2]. Технологія SLM є відносно новим видом обробки металу, яка дозволяє реалізувати точне виготовлення конструкцій складної форми [3, 4].

Слід зазначити, що питанням вибіркового лазерного плавлення та електронно-променевого сплавлення порошкового шару присвячено велику кількість досліджень [5–7]. Також слід урахувати, що кожне обладнання має свої технологічні аспекти, один з яких – це середовище та процеси, що відбуваються під час друку. Наприклад, процес сплавлення шляхом опромінення електронно-променевою гарматою проводять у вакуумному середовищі, а при вибіркового лазерного плавленні застосовують в більшості випадків аргон (Ar) чи азот (N₂), в інших – гелій (He) [8]. Якщо розглянути дане питання детальніше, то можна сказати, що при процесі сплавлення в результаті опромінення електронно-променевою гарматою в середовищі вакууму інтенсивність охолодження ванни

розплаву нижче через те, що впливають лише температурний градієнт і швидкість кристалізації [9]. При застосуванні інертного середовища для захисту порошкового шару ламінарними потоками газу в процесі вибіркового лазерного плавлення на швидкість охолодження ванни розплаву та сусідні шари впливає додатково газ через його відповідні фізичні властивості, швидкість і направлення потоку [10]. Таким чином, застосування раціональних параметрів керування швидкістю та розподілом потоку газу є додатковим методом впливу на механічні властивості виробу.

Наразі питаннями впливу швидкості та направлення потоку на механічні властивості та щільність приділяють велику увагу [11–13]. Цікавість до даного питання викликана таким поширеним явищем в області друку, як викид порошку в область вихідного отвору [14, 15] через випаровування, підхоплення та перенос частинок (рис. 1), які в результаті можуть потрапити в зону дії променю лазера, вплавитися та вплинути на щільність готового виробу. Зміни вхідного потоку (конструкція сопла) призводять до зміни потоку в області друку та швидкості охолодження ванни розплаву, що також відіграють роль у формуванні якості готового виробу (рис. 2). Слід зазначити, що виготовлення деталей за даним методом у

більшості випадків є одиничним або малосерійним виробництвом, що також може мати значний вплив на повторюваність результатів. Це пов'язано з постійною зміною перерізу деталей, їх кількості та інтенсивності дії променя лазера.

У результаті проведених досліджень авторами [11] було проаналізовано вплив потоку інертного газу на частинки порошку, що викидалися та поверталися на поверхню шару порошку під час процесу друку, що є загальним явищем у технології SLM. У результаті дослідження було встановлено, що на щільність виготовлених за технологією SLM деталей впливала морфологія перенесених частинок. Що ще важливіше, зразки, надруковані за допомогою процесу SLM, не є однорідними за щільністю через вплив потоку газу.

У роботі [12] було встановлено, що однорідність потоку газу в процесі SLM має значний вплив на щільність і міцність на розрив надрукованих деталей. Авторами було встановлено раціональний діапазон швидкості потоку аргону в діапазоні 1,3...2,0 м/с для друку.

Оскільки автори роботи [13] не розглядали питання щільності та механічних властивостей дослідних зразків у реальних умовах друку (з друком деталей різного перерізу та кількості), то дослідження зразків-свідків, виготовлених в одному процесі друку разом з виробами, є безумовно актуальним.

З вище зазначеного випливає, що питання впливу швидкості охолодження, циркуляції потоку газу та завантаженості робочого простору на

щільність дослідних зразків і механічні властивості недостатньо досліджене та має фундаментальне й практичне значення.

Метою даної роботи є дослідження впливу завантаженості робочого простору (тривалості паузи між формуванням шарів), швидкості та особливостей циркуляції потоку на механічні властивості в умовах експлуатації машини Alfa-150D.

Матеріал та методика досліджень. У роботі були досліджені випробувальні зразки на розтягування, виготовлені на машині для 3D друку Alfa-150D виробництва ТОВ «АЛТ Україна» [5] з металевого порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V хімічного складу, ваг. %: Al = 6,21; V = 4,03; Fe = 0,04; C = 0,1; O = 0,7; N = 0,02; Ti – база [16], гранулометричний аналіз представлено на рис. 3.

Машини 3D друку Alfa-150D виробництва ТОВ «АЛТ Україна» з областю друку 150×150 мм оснащена вхідним та вихідним соплом для максимального збирання інертного газу, що поступає через вхідне сопло без його розсіювання по робочій камері. Для того щоб проходило збирання інертного газу та при цьому не відбувалося здування порошку, швидкість потоку над робочою платформою в зоні друку була прийнята 1,5 м/с. Робочим газом є аргон з постійними густиною та температурою. Між основним і допоміжним вхідними соплами потік розподілений таким чином, що на основному соплі 70 % від повної витрати аргону, а на допоміжному – 30 %. Введення допоміжного вхідного сопла в верхній частині робочої камери

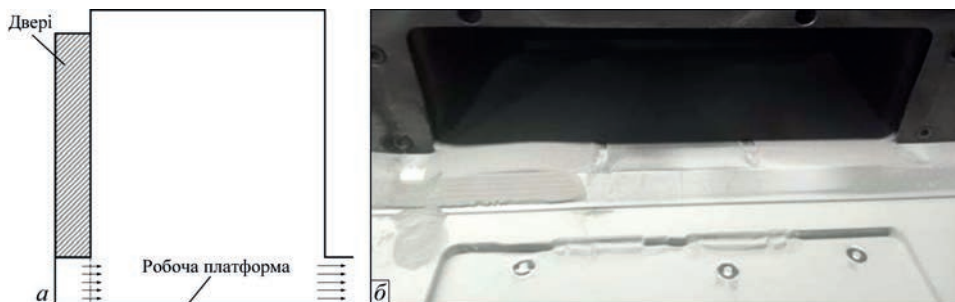


Рис. 1. Схема розташування вхідного та вихідного отвору (а), викид частинок порошку сплаву Ti6Al4V біля області вихідного отвору (б)

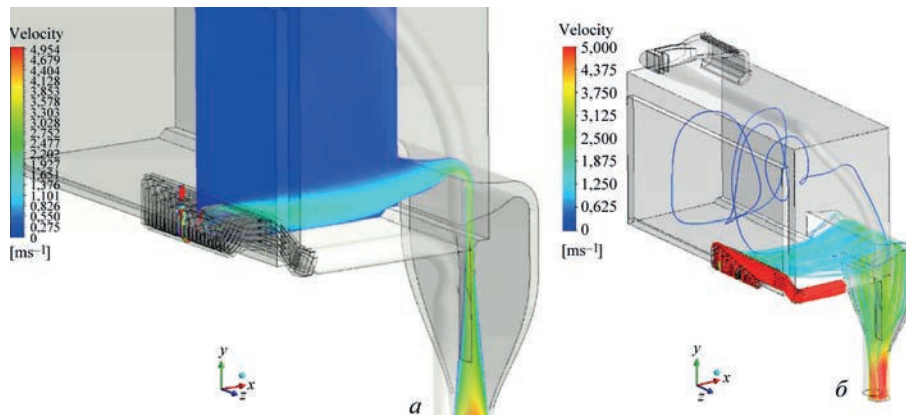


Рис. 2. Відображення руху газу в робочій камері машини Alfa-150D: а – епюра швидкості; б – лінії потоку

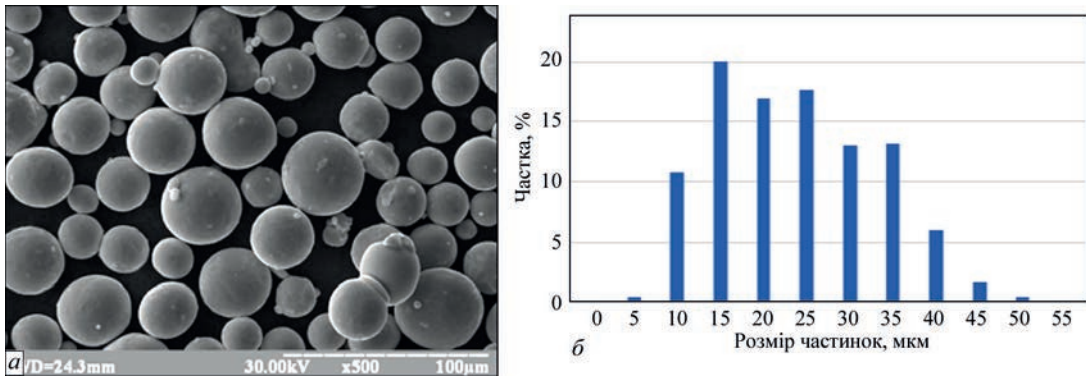


Рис. 3. Частинки вихідного матеріалу Ti-6Al-4V при збільшенні 500 (а) та результати гранулометричного аналізу (б) [16]

призвело до того, що відбувається зменшення розсіювання потоку під час його руху від основного вхідного сопла до вихідного. У даному випадку потік має ламінарний режим протікання.

Були виготовлені у вертикальному напрямі дослідні циліндричні зразки для випробування на розтягування з діаметром робочої зони 3 мм та довжиною робочої зони 20 мм (рис. 4). Рациональні параметри друку було встановлено в [16] при товщині нанесеного шару 40 мкм: відстань між треками 0,03 мм, потужність 195 Вт, швидкість проходження променя 1050 мм/с. Механічна обробка зразків до чистових розмірів проводилась із засто-

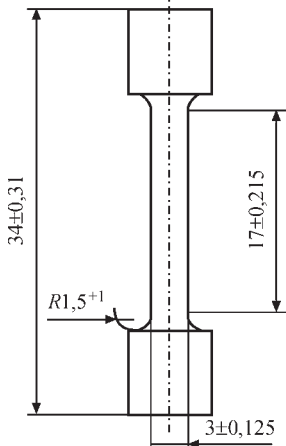


Рис. 4. Схема розташування місця контрольованої зупинки друку випробувального зразка

суванням токарного верстата HAAS ST10. Механічні властивості визначали при випробуванні на розтягування за стандартною методикою на машині INSTRON.

Результати досліджень. Дослідні зразки виготовлялись з повнотілою деталлю з метою імітації процесу друку при експлуатації машини Alfa-150D. У залежності від площі повнотілої деталі була пауза різної тривалості між нанесенням порошку та поверненням променя лазера, а саме: платформа 1 – 65 с, платформа 2 – 50 с, платформа 3 – 80 с, платформа 4 – 20 с. На основі даної імітації отримано графіки розподілу часу друку шару робочої зони зразків (рис. 5).

З аналізу процесу виготовлення зразків в області робочої зони зразків (криві по осі Y – 10...20 с, по осі X – номер шару 670–787, платформи 3, 4) встановлено, що зі змінною перерізу деталей час повернення лазера до етапу плавлення робочої зони зразків зменшується на 33 %. Слід зазначити, що під час процесу виготовлення деталей на платформі 3 було завершення друку деталі, а на платформі 4 друк продовжувався без зміни перерізу. З аналізу залежності час–номер шару було встановлено, що завершення друку основного тіла не відіграє роль у зменшенні часу повернення променя лазера. Таким чином встановлено, що в процесі плавлення дослідних зразків-свідків значний вплив відіграє змінний переріз деталі.

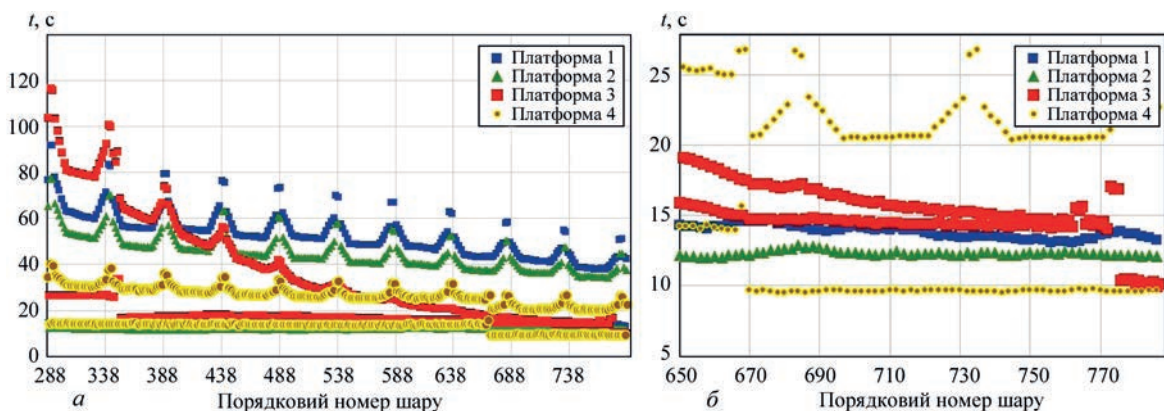


Рис. 5. Розподілу часу друку шару порошку в області робочої зони зразка на розтягування: а – робоча зона дослідного зразку від 288 до 787 шару; б – робоча зона дослідного зразку від 650 до 787 шару; 1 – платформа 1; 2 – платформа 2; 3 – платформа 3; 4 – платформа 4

Механічні властивості дослідних зразків

Маркування	Номер платформи	Тривалість паузи, с	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1	1	65	1209,7	1093,1	3,3	12,8
2			1168,9	1027,7	3,1	17,6
3			1061,6	997,2	2,0	9,0
4	2	50	1316,1	1178,7	7,0	34,2
5			1313,3	1209,7	7	26,0
6			1305,5	1242,3	9,9	22,3
7	3	80	1237,6	1155,9	4,2	25,0
8			1319,1	1278,8	9,0	28,3
9			1287,5	1201,6	3,2	23,0
10			1316,3	1223,6	5,1	33,9
11			1247,4	1173,0	4,5	28,2
12			1273,3	1188,3	2,1	28,1
13	4	20	1342,7	1272,6	7,5	27,3
14			1380,1	1287,3	2,5	24,3
15			1347,9	1255,7	4,2	23,7
16			1298,9	1178,7	3,6	30,4
17			1345,3	1217,8	4,7	24,3

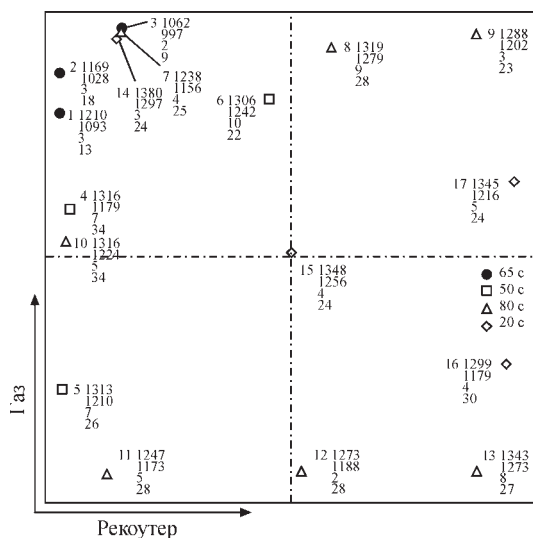


Рис. 6. Схема розташування зразків на платформі в процесі побудови: \blacklozenge – 65 с; \bullet – 50 с; \blacktriangle – 80 с; \blacklozenge – 20 с

З результатів аналізу залежності час–номер шару було встановлено, що дослідні зразки-свідки платформ 1 і 2 у залежності від перерізу деталі зазнають впливу на час повернення променя лазера. Область друку робочої зони зразка-свідка має лінійний характер, а в залежності від зменшення перерізу деталі (платформа 2) зміна часу повернення зменшується на 18 % для зразків-свідків порівняно з платформою 1.

На рис. 6 представлено схему розташування, а в таблиці – значення механічних властивостей дослідних зразків. Слід зазначити, що зразки № 3, 7, 14 були виготовленні в однаковій області робочої платформи та відрізняються лише часом нанесення шару та сканування, а саме 65, 50 і 20 с відповідно. З результатів досліджень встановлено, що зі збільшенням часу між нанесеними шаром та часом сканування від 50 с відбувається зменшення характеристик міцності та пластичності на 23 та 10 %, 33 та 0,7 % відповідно.

У результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що характеристики міцності дослідних зразків в області вхідного сопла обдуву інертним газом мають нижче значення на 3...5 % порівняно з центральною областю платформи з розкидом значень ± 2 %, в області вихідного сопла значення на 3...5 % нижче порівняно з центральною областю та мають розкид значень ± 10 %. Це вказує на вплив системи обдуву та завантаженості робочого простору на механічні властивості. Таким чином, встановлено, що швидкість і циркуляція потоку відповідно до схеми на рис. 2, а саме в області вихідного сопла (рис 1, б) впливає на отримання стабільних показників механічних властивостей в даній області.

Висновки

1. У результаті аналізу значень механічних властивостей дослідних зразків встановлено, що їх характеристики міцності в області вхідного сопла мають нижче значення на 3...5 % порівняно з центральною областю платформи з розкидом значень ± 2 %, в області вихідного сопла значення на 3...5 % нижче порівняно з центральною областю та мають розкид значень ± 10 %.

2. Встановлено, що завантаженість робочого простору та пауза між нанесенням шару та скануванням відіграє роль зі збільшенням часу від 50 с, а саме зменшення характеристик міцності та пластичності на 65 с – 23 та 10 %, 80 с – 33 та 0,7 % відповідно.

3. У результаті досліджень було встановлено, що завантаженість робочого простору має значущий вплив на механічні властивості порівняно зі швидкістю потоку, але циркуляція потоку відіграє найбільшу роль в області вихідного сопла.

Список літератури/References

- Williams, R.J., Piglione, A., Rønneberg, T. et al. (2019) In situ thermography for laser powder bed fusion: Effects of layer temperature on porosity, microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, **30**, 100880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100880>
- Grasso, M., Colosimo, B.M. (2017) Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Science and Technology*, **28**, 044005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5c4f>
- Aage, N., Andreassen, E., Lazarov, B.S., Sigmund, O. (2017) Giga-voxel computational morphogenesis for structural design. *Nature*, **550**, 84–86. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature23911>
- Wang, P., Song, J., Nai, M.L.S., Wei, J. (2020) Experimental analysis of additively manufactured component and design guidelines for lightweight structures: A case study using electron beam melting. *Addit. Manuf.*, **33**, 101088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101088>
- Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. (2022) *Implementation of selective laser melting technology in Ukraine*. Kyiv, Naukova Dumka. [Впровадження технології селективного лазерного плавлення в Україні]. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
- Fu, D., Li, X., Zhang, M. et al. (2020) Influence of effective laser energy on the structure and mechanical properties of laser melting deposited Ti6Al4V alloy. *Materials (Basel)*, **13**(4), 962. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040962>
- Gong, H., Gu, H., Zeng, K. et al. (2014) Melt pool characterization for selective laser melting of Ti–6Al–4V pre-alloyed powder. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin Texas, pp. 256–267. DOI: <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/15682>
- Amano, H., Ishimoto, T., Suganuma, R. et al. (2021) Effect of a helium gas atmosphere on the mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy built with laser powder bed fusion: A comparative study with argon gas. *Additive Manufacturing*, **48**(B), 102444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102444>
- Xiao, L., Song, W., Hu, M., Li, P. (2019) Compressive properties and micro-structural characteristics of Ti–6Al–4V fabricated by electron beam melting and selective laser melting. *Mater. Sci. Eng.:A*, **764**, 138204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138204>
- 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>
- Nguyen, D.S., Park, H.S., Lee, C.M. (2018) Effect of cleaning gas stream on products in selective laser melting. *Materials and Manufacturing Processes*, **34**(4), 455–461. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512132>
- Liu, Z., Yang, Y., Wang, D. et al. (2022) Flow field analysis for multilayer powder bed fusion and the influence of gas flow distribution on parts quality. *Rapid Prototyping J.*, **28**(9), 1706–1716. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2021-0351>
- Ferrar, L. Mullen, E. Jones, R. Stamp, C.J. Sutcliffe (2012) Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *J. of Materials Processing Technology*, **212**(2), 355–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.020>
- Zhao, C., Fezzaa, K., Cunningham, R.-W. et al. (2017) Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction. *Sci. Rep.*, **7**, 3602. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03761-2>
- Hiroshi, N., Yousuke, K., Koji, N., Seiji, K. (2015) Elucidation of melt flows and spatter formation mechanisms during high power laser welding or pure titanium. *J. Laser Appl.*, **27**, 032012. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4922383>
- Adjamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V. (2022) Influence of heat treatment of specimens from Ti6Al4V manufactured by the technology of selective laser melting on structure and mechanical properties. *The Paton Welding J.*, **9**, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.09.04>

INFLUENCE OF BLOWING AND LOADING OF WORKING SPACE ON MECHANICAL PROPERTIES OF SAMPLES MANUFACTURED USING SLM TECHNOLOGY

S.V. Adzhamskiy^{1,2}, G.A. Kononenko^{1,3}, R.V. Podolskiy^{1,3}, S.I. Badyuk¹¹ LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, Serhiy Podolynskiy, 31 v str., Dnipro, E-mail: info@alt-print.com² Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, 49000, Pysarzhevsky 5 str., Dnipro
E-mail: itst@westa-inter.com³ Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute. National Academy of Sciences of Ukraine. 1 Academician Starodubov Sq., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

At present for selective laser melting (SLM, Selective Laser Melting (SLM)), studying the influence of the characteristics of blowing and loading of the working space on mechanical properties of titanium Ti6Al4V alloy is an urgent task. In the work, tensile samples were studied, for which as a result of different loading of the building space, there was a pause of different duration between the application of powder and return of the laser beam. Based on the analysis of the values of mechanical properties, it was found that characteristics of strength of test samples in the area of the inlet nozzle of inert gas blowing have a value lower by 3...5% compared to the central area of the platform with a range of values of $\pm 2\%$, in the area of the outlet nozzle, the value is lower by 3...5% compared to the central area, a range of values is $\pm 10\%$. It was found that an increase in the pause from 50 to 65 s leads to a decrease in strength and ductility characteristics by 23 and 10%, up to 80 s by 33 and 0.7%, respectively. Ref. 16, Tabl. 1, Fig. 6.

Key words: selective laser melting, blowing, loading of the working space, Ti6Al4V alloy, mechanical properties

Надійшла до редакції 23.10.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електromеталургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».