

Павло Кондрашев¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kondrashev@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. ResearcherID: [AAK-5011-2020](https://orcid.org/AAK-5011-2020)**ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЯКІСТЬ ВНУТРІШНЬОЇ
МІКРОСТРУКТУРИ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ СПЛАВЛЕННІ ПОРОШКУ**

При проєктуванні технологічних процесів перед розробниками завжди стоять завдання, спрямовані на підвищення ефективності реалізації процесу 3D-технологій, а також вдосконалення технологічного оснащення. Основні зусилля спрямовані на пошук підвищення якісних показників внутрішньої структури сплавлених виробів.

Метою статті є покращення якості внутрішньої мікроструктури сплавлених примітивів із порошкової композиції AlSi10Mg, за рахунок додавання в зону лазерної обробки статичного магнітного поля при реалізації технології DMLS.

У цій роботі було досліджено вплив статичного магнітного поля на мікроструктуру порошкової композиції AlSi10Mg. Результати показали, що застосоване магнітне поле призводить до збільшення відносної щільності (зменшення пористості) внутрішньої мікроструктури та зменшення інтервалу між дендритами в обробленому матеріалі.

Ключові слова: статичне магнітне поле; коаксіальне сопло; лазерне сплавлення; порошкова композиція.

Рис.: 3. Табл.: 3. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Останні роки швидко набирає обертів розвиток адитивних технологій у всьому світі. Це легко пояснити тим, що більшість із них використовує як інструмент сфокусований лазерний промінь. Можливості лазерного променя унікальні, а саме: це відсутність контактних явищ у зоні обробки, можливість обробляти будь-який матеріал, який неможливо обробити традиційними способами, наприклад, механічною обробкою, литвом, тиском та ін. Тому пошук різноманітних методів та підходів, спрямованих на вдосконалення технологічних процесів та обладнання для цих технологій, безумовно, є актуальним завданням, яке ставить перед науковою спільнотою сучасна кон'юнктура ринку сучасних технологій.

Постановка проблеми. Для широкого загалу адитивні технології відомі як 3D-друк із різноманітних порошкових матеріалів [1-2]. Існує багато схем реалізації технології 3D-друку, серед найбільш поширених у сучасному виробництві це SLM [2-4] пошарове лазерне сплавлення порошкового матеріалу і DMLS пряме лазерне сплавлення матеріалу [5]. Кожна із цих технологій має свої переваги та недоліки, але з погляду досліджень, спрямованих на підвищення ефективності реалізації процесу лазерного сплавлення порошкових матеріалів, є саме технологія DMLS. Учені всього світу намагаються шукати шляхи та підходи щодо вдосконалення цієї технології. Зокрема, особлива увага приділяється якості внутрішньої структури сплавлених виробів із мінімальною кількістю дефектів, таких як пори, тріщини та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині існує багато інженерних рішень для підвищення якості сплавлених виробів за рахунок удосконалення засобів доставки порошку в зону лазерної обробки – це коаксіальні сопла різної геометричної конфігурації [6]. Але таке інженерне рішення має певні проблеми з налагодженням технічної складової засобу доставки порошку в зону лазерної обробки, що, безумовно, відображається на гнучкості технологічного процесу загалом. Рішення цієї проблеми запропоновано авторами роботи [7-8]: це використання статичного магнітного поля як додаткове джерело енергії. Проте статичне магнітне поле, по-перше, було застосовано для реалізації технології SLM [7-8] пошарового сплавлення порошку і, по-друге, розташування магніту було в нижній частині металевого бункера для порошкової композиції. Таке розташування магніту забезпечує напрямок магнітного поля паралельно напрямку лазерного променя, що значно обмежує вплив магнітних сил на поперечне розподілення порошкової концентрації в зоні лазерної обробки, що має суттєвий вплив на якісні показники виробів при реалізації технології DMLS. Аналіз існуючих інженерних рішень

та підходів показав недостатній акцент досліджень, спрямованих на підвищення концентрації дисперсної фази в зоні лазерної обробки, що дає можливість підвищити якісні показники сплавлених виробів при реалізації технології DMLS.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У цій публікації досліджено та запропоновано вдосконалення використання статичного магнітного поля як додаткового джерела енергії для підвищення ефективності реалізації технології DMLS. Для цього було запропоновано схему розташування 4 магнітів по периметру фокуса газопорошкового струменя, що дає можливість керувати рівнем дисперсної фази порошкової композиції в зоні лазерної обробки. Ця схема є більш простою в реалізації, що значно збільшує гнучкість та ефективність технологічного процесу.

Метою статті є покращення якості внутрішньої мікроструктури сплавлених примітивів із порошкової композиції AlSi10Mg, за рахунок додавання в зону лазерної обробки статичного магнітного поля при реалізації технології DMLS.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи високу складність протікання фізичних процесів при реалізації технології DMLS, а також спираючись на досвід апріорної інформації, було використано активну стратегію проведення експерименту [9], яка дозволяє ефективно оцінити вплив одразу декількох технологічних факторів на реалізацію цієї технології. Як матеріал для досліджень було обрано порошкову композицію на основі алюмінію AlSi10Mg [10] дисперсністю 60 мкм. Вибір цього матеріалу ґрунтується на його чудових фізико-механічних властивостях (табл. 1). Це один із найпоширеніших порошків для технологій 3D-прототипування. Його широко використовують у таких галузях сучасної промисловості: аерокосмічна, авіабудівна, автомобілебудівна, енергетична тощо.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості порошкової композиції AlSi10Mg

Тип випробування	Напрямок ХУ	Напрямок Z
Границя міцності	325-350 МПа	330-360 МПа
Границя текучості	210-245 МПа	175-225 МПа
Модуль Юнга	67-77 ГПа	62-72 ГПа
Подовження	9-14 %	5-12 %
Твердість	114-124 HV	
Густина	2,66 г/см ³	

Такі показники досягають за рахунок оптимально збалансованого підбору хімічного складу, а також технології виготовлення цього порошку (табл. 2).

Таблиця 2 – Хімічний сплав порошкової композиції AlSi10Mg

Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Pb+Sn	O	Zn	N	Ni	Cu	Al
≤9,11%	≤0,55%	≤0,45%	0,45%	≤0,15%	≤0,1%	≤0,1%	≤0,1%	≤0,05%	≤0,05%	≤0,05%	основа

Основні об'єкти виробництва: кронштейни, трубопровідна арматура, хвилеводи, повітропровід, теплообмінники. Схема експериментального обладнання наведена на рис. 1.

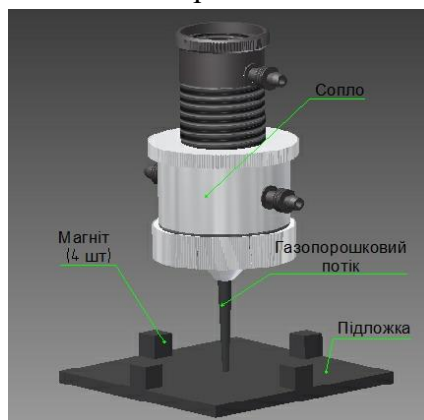


Рис. 1. Схема експериментального обладнання

На підставі апріорної інформації, а також проведених раніше експериментальних досліджень, з урахуванням кореляції [1-6] було виділено низку ключових технологічних факторів, які мають найбільш вагомий вплив на процес реалізації технології DMLS, а саме: величина статичного магнітного поля забезпечувалася чотирма розташованими по периметру підложки магнітами кубічної форми різних габаритних розмірів (80...120 мм)×(80...120 мм)×(80...120 мм), масова витрата порошкового матеріалу, швидкість переміщення підложки, положення підложки щодо вихідного отвору сопла. Решта технологічних факторів таких як: потужність лазерного випромінювання, модовий склад (апертура лазерного пучка), діаметр лазерного променя, геометрія твірних зовнішнього та внутрішнього сопла, робочий тиск та тип транспортуючого газу були зафіксовані у стабільному стані.

Результати проведених досліджень. Одним з основних показників якості внутрішньої мікроструктури сплавлених зразків було обрано дослідження пористості внутрішньої мікроструктури (тобто наявності таких дефектів, як пор, тріщин та інших порожнин) при реалізації процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу AlSi10Mg, як зазначалось вище, були застосовані методи математичної статистики. Для практичної реалізації активної стратегії проведення експерименту було застосовано не композиційний план Бокса-Бенкена для чотирьох технологічних факторів, у вигляді полінома (1) другого порядку [8].

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i \leq j}^{i=k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ii=1}^{i=k} b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де k – кількість технологічних факторів;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} -коефіцієнти полінома;

i, j -індекси.

Трансформування технологічних факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкової композиції AlSi10Mg з натурального масштабу X_i до кодованого здійснювалося за допомогою залежностей (2).

$$X_i = X_{i0} + \Delta X_i x_i, \quad (2)$$

де X_{i0} – центр експерименту i -го технологічного фактору впливу в натуральному масштабі;

X_i – i -ий технологічний фактор впливу в натуральному масштабі;

ΔX_i – інтервал варіювання для i -го фактору впливу;

x_i – i -ий фактор впливу.

Як функція відгуку була використана величина пористості внутрішньої мікроструктури сплавлених примітивів (P). Як технологічні фактори впливу на функцію відгуку при реалізації технології DMLS (визначених раніше), за умови стабілізації факторів діаметра лазерного променя, щільності та потужності лазерного випромінювання були використані величина статичного магнітного поля (x_1), масова витрата порошку (x_2), швидкість переміщення підложки (x_3), положення підложки відносно вихідного отвору сопла (x_4). Коефіцієнти полінома b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} -моделі (1) розраховувалися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з використанням математичного апарату лінійної алгебри [9], залежність (3). Матриця умов експерименту X була згенерована за допомогою збалансованої блок-схеми для чотирьох незалежних змінних (x_1, x_2, x_3, x_4), яка складається з шести блоків (повно факторний експеримент 2^2) [9], варіювання технологічних факторів проводилося на трьох рівнях (мінімум, центр, максимум).

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (3)$$

Гіпотеза стосовно адекватності отриманої математичної моделі пористості внутрішньої мікроструктури, проводилася за критерієм Фішера F [9]. Достовірність результатів експерименту за цим критерієм відповідає 5%-й похибці (4).

$$F^{розр.} \leq F^{табл.}, \tag{4}$$

де $F^{розр.}$ – розрахункове значення критерію Фішера [9];

$F^{табл.}$ – табличне значення критерію Фішера [9].

Серія проведених раніше попередніх досліджень [9] дозволила визначити реперні точки для основного технологічного рівня в центрі експерименту та відповідно границі досліджуваного простору (табл. 3).

Таблиця 3 – Рівні варіювання технологічних факторів

Рівні варіювання технологічних факторів	Незалежні змінні			
	x_1	x_2	x_3	x_4
Розмірність	Тл.	г/с	мм/с	мм
Основний рівень	0,12	0,3	2,0	5
Інтервал варіювання	0,06	0,1	1,0	2
Верхній рівень	0,18	0,4	3,0	7
Нижній рівень	0,60	0,2	1,0	3

Після розрахунку коефіцієнтів полінома залежність (1) була отримана математична модель функції відгуку пористості P сплавлених примітивів. Графічна інтерпретація математичної моделі функції відгуку наведена на рис. 2.

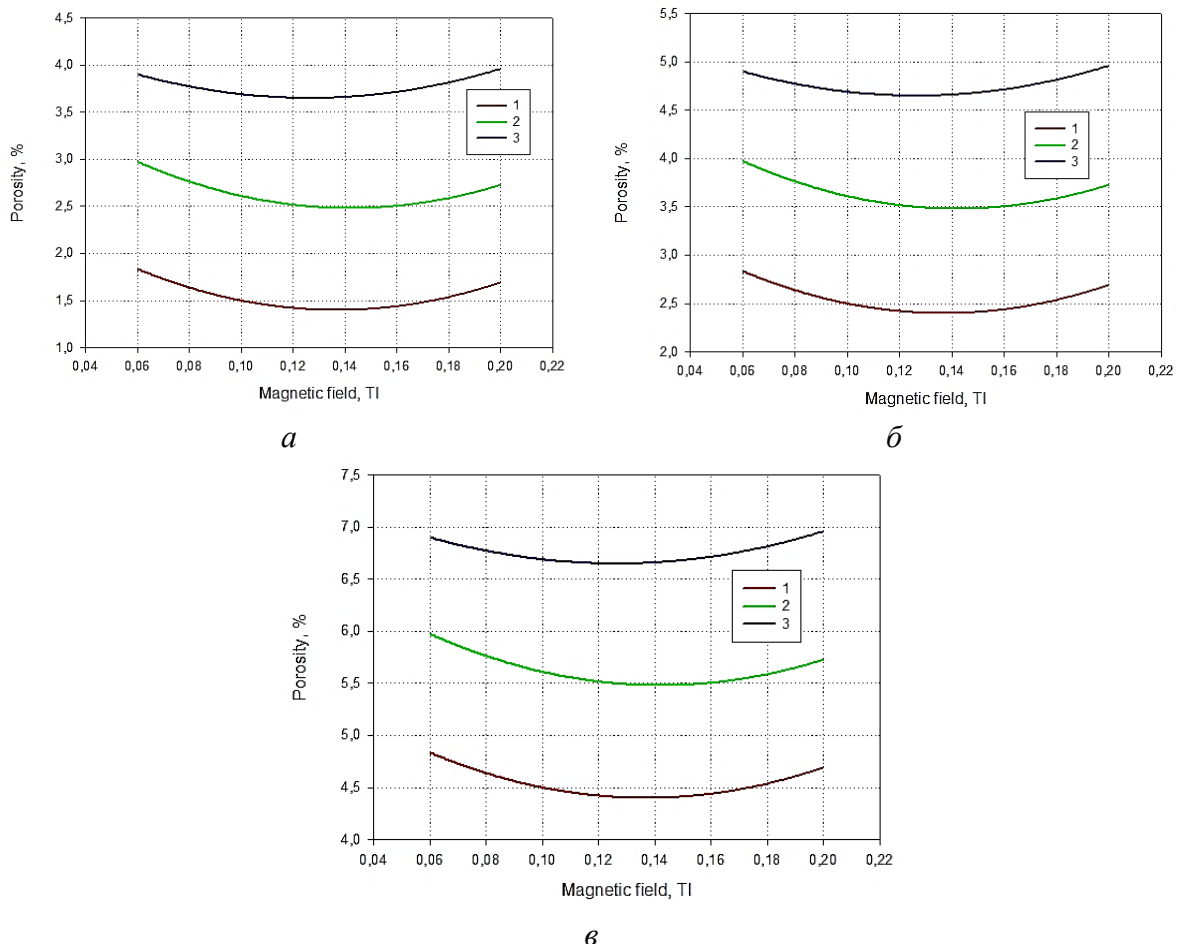


Рис. 2. Залежність пористості від величини інтенсивності магнітного поля: а – масова витрата порошкової композиції 0,2 г/с, швидкість переміщення підложки 1 мм/с; б – масова витрата порошкової композиції 0,3 г/с, швидкість переміщення підложки 2 мм/с; в – масова витрата порошкової композиції 0,4 г/с, швидкість переміщення підложки 3 мм/с

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що найкращі показники якості, тобто найнижча пористість була досягнута при інтенсивності магнітного поля 0,12 Тл, масовій витраті порошкової композиції 0,2 г/с, швидкості переміщення підложки 1 мм/с (рис. 2, а). Це пояснюється ефективністю дії статичного магнітного поля в зоні лазерної обробки, а саме збільшується кількість дисперсної складової у фокальній площі газопорошкового струменя. Водночас найгірші показники якості внутрішньої структури сплавлених примітивних зразків спостерігаються при таких параметрах керування це: масова витрата порошку 0,4 г/с, швидкість переміщення підложки 3 мм/с це пояснюється передусім великою швидкістю переміщення підложки, що своєю чергою продукує невеликий час дії лазерного опромінення на порошкову композицію (рис. 2, в). Дещо кращі результати спостерігаються на рис. 2, б при масовій витраті 0,3 г/с та швидкості переміщення підложки 2 мм/с.

Дослідження мікроструктури сплавлених зразків підтвердили адекватність математичної моделі функції відгуку (рис. 3).

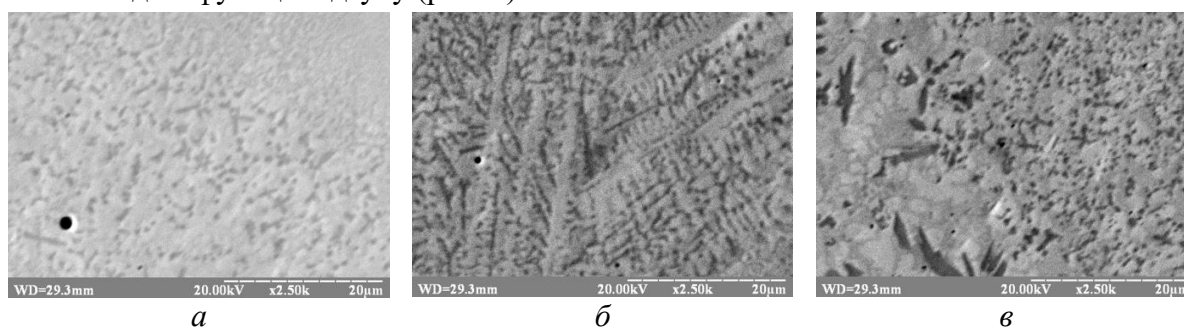


Рис. 3. Мікроаналіз структури сплавлених зразків:

а – масова витрата порошкової композиції 0,2 г/с, швидкість переміщення підложки 1 мм/с; б – масова витрата порошкової композиції 0,3 г/с, швидкість переміщення підложки 2 мм/с; в – масова витрата порошкової композиції 0,4 г/с, швидкість переміщення підложки 3 мм/с

Мікроструктурний аналіз проводився на електронному растровому мікроскопі «РЭМ106-И». Досліджувана площа мікروشліфа становила $1 \times 0,75$ мм (Ш \times В) при оптичному збільшенні 2000 крат. Як видно з фотографічного матеріалу, найкращі показники якості внутрішньої мікроструктури зображено на рис. 3, що відповідає графічній залежності (рис. 2, а). Саме при таких параметрах керування технологічним процесом експериментально доведено ефективність використання статичного магнітного поля як додаткового джерела енергії в зоні лазерної обробки при реалізації технології DMLS. Статичне магнітне поле дозволяє підвищити рівень дисперсної фази у фокусі газопорошкового струменя під час лазерного впливу на порошок тим самим збільшити щільність сплавлення.

Висновки. Дослідження представлені в даній роботі дозволили встановити оптимальні режими процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу AlSi10Mg, які забезпечують максимальну якість внутрішньої мікроструктури сплавлених зразків з показниками пористості $P \approx 1,2$ % (відсоткове значення порожніх фрагментів).

Було отримано математичну модель функції відгуку пористості внутрішньої мікроструктури сплавлених примітивів, яка в подальшому може бути використана як визначення оптимальних параметрів режиму обробки, спрямованих на підтримку постійного рівня якості майбутніх виробів.

Підтверджена адекватність теоретичних розрахунків о можливості використання математичних моделей процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу для подальшого використання їх при реалізації технології DMLS.

Список використаних джерел

1. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties / M. Qian, W. Xu, M. Brandt, H. Tang. // MRS Bulletin. – 2016. – Vol. 41(10). – Pp. 775-783.

2. Selective laser melting 3D printing of Ni-based superalloy: understanding thermodynamic mechanisms / M. Xia, D. Gu, G. Yu, D. Dai, H. Chen, Q. Shi // *Sci. Bull.* – 2016. – Vol. 61. – Pp. 1013-1022.
3. Brandl E. Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior / Erhard Brandl, Ulrike Heckenberger, Vitus Holzinger, Damien Buchbinder // *Materials and design.* – 2012. – Vol. 34. – Pp. 159-169.
4. Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy / B. Chen, S. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, K. Kondoh // *Scripta Materialia.* – 2017 – Vol. 141. – Pp. 45-49.
5. Waheed Ul Haq Syed. Combined wire and powder feeding laser direct metal deposition for rapid prototyping / Waheed Ul Haq Syed, A.J. Pinkerton, Lin Li. – San Francisco : Proceedings of International Congress “ICALEO'2004”, 2004.
6. Кондрашев П. В. Моделирование газодинамики порошковой струи при реализации технологии «RAPID PROTOTYPING» / П. В. Кондрашев // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2013. – № 65. – С. 4-10.
7. Experimental evidence for liquid/solid interface instability caused by the stress in the solid during directional solidification under a strong magnetic field / X. Li, Y. Zhang, Y. Fautrelle, Z. Ren, C. Esling // *Scripta Materialia.* – 2009. – Vol. 60. – Pp. 489-492.
8. Effect of an axial high magnetic field on Sn dendrite morphology of Pb-Sn alloys during directional solidification / D. Du, L. Hou, A. Gagnoud, Z. Ren, Y. Fautrelle, G. Cao, X. Li // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2014. – Vol. 588. – Pp. 190-198.
9. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Наука, 1980. – 304 с.
10. Du Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder / P. Wei, Z. Wei, Z. Chen, J. Li, S. Zhang, J. // *Applied Physics A: Materials Science & Processing.* – 2017. – Vol. 123. – Pp. 540.

References

1. Qian, M., Xu, W., Brandt, M., Tang, H. (2016). Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin*, 41, 775-784.
2. Xia, M., Gu, D., Yu, G., Dai, D., Chen, H., Shi, Q. (2016). Selective laser melting 3D printing of Ni-based superalloy: understanding thermodynamic mechanisms. *Sci. Bull.*, 61, 1013-1022.
3. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and design*, 34, 159-169.
4. Chen, B., Moon, S., Yao, X., Bi, G., Shen, J., Umeda, J., Kondoh, K. (2017). Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Scripta Materialia*, 141, pp. 45-49.
5. Waheed Ul Haq Syed, Pinkerton, A.J., Lin, Li. (2004). *Combined wire and powder feeding laser direct metal deposition for rapid prototyping.* San Francisco: Proceedings of International Congress “ICALEO'2004”.
6. Kondrashev, P.V. (2013). Modelirovanie gazodinamiki poroshkovoi strui pri realizatsyi tekhnologii «RAPID PROTOTYPING» [Simulation of powder jet gas dynamics in the implementation of the RAPID PROTOTYPING technology]. *Vostochno-Evropeskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (65), 4-10.
7. Li, X., Zhang, Y., Fautrelle, Y., Ren, Z., Esling, C. (2009). Experimental evidence for liquid/solid interface instability caused by the stress in the solid during directional solidification under a strong magnetic field. *Scripta Materialia*, 60, 489-492.
8. Du, D., Hou, L., Gagnoud, A., Ren, Z., Fautrelle, Y., Cao, G., Li, X. (2014). Effect of an axial high magnetic field on Sn dendrite morphology of Pb-Sn alloys during directional solidification. *Journal of Alloys and Compounds*, 588, 190-198.
9. Novik, F.S., Arsov, Ya. (1980). *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniia eksperimentov [Optimization of metal technology processes by methods of planning experiments]*. Nauka.
10. Wei, P., Wei, Z., Chen, Z., Li, J., Zhang, S., Du, J. (2017). Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 123, 540.

Отримано 14.03.2023

Pavlo Kondrashev

PhD, Assistant Professor of the department Laser System and Advanced Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kondrashev@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. ResearcherID: [AAK-5011-2020](https://orcid.org/AAK-5011-2020)

INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON THE QUALITY OF INTERNAL MICROSTRUCTURE DURING LASER FUSION OF POWDER

The fast development of scientific and technical progress pushes the scientific community to search for alternative solutions and approaches for obtaining details using non-traditional technologies. One of the most common nowadays are additive technologies, better known as 3D printing from various powdered materials.

When planning technological processes, in front of the developers always have relevant tasks which aimed to increasing the efficiency of the implementation of the 3D technology process, also improving the technological equipment. The main efforts are aimed at improving the quality indicators of the internal structure of alloyed products.

The aim of this work is to improve the quality of the internal microstructure of fused primitives from the AlSi10Mg powder composition, due to the addition of a static magnetic field to the laser processing zone when implementing the DMLS technology.

Taking into account the high complexity of physical processes and the large number of technological factors that affect the implementation of DMLS technology, the methods of mathematical statistics that have proven themselves well for solving this kind of tasks. When studying the effect of a static magnetic field on the focal area of a gas-powder flow, the optimal control parameters for the process of laser fusion of experimental samples from the AlSi10Mg powder composition were established.

In this work, the effect of a static magnetic field on the microstructure of the AlSi10Mg powder composition was investigated. The results showed that the applied magnetic field leads to an increase in the relative density (a decrease in the porosity of the internal microstructure and a decrease in the spacing between dendrites in the treated material. In addition, with an increase in the intensity of the magnetic field, the share of grains with a columnar morphology decreases, and the share of equiaxed grains increases.

Key words: static magnetic field; coaxial nozzle; laser fusion; powder composition.

Fig.: 3. Table: 3. References: 10.