

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ГЛУБОКОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА Inconel 718 МЕТОДОМ ВЫБОРОЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

С.В. Аджамский¹, А.А. Кононенко^{2,3}

¹Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.

49000, г. Днепр, просп. Гагарина, 72. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, г. Днепр, ул. Рыбинская, 144. E-mail: info@alt-print.com

³Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

49000, г. Днепр, пл. Академика Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Установлена зависимость между параметрами процесса выборочного лазерного плавления (мощность лазера и расстояние между треками) и микроструктурой образцов из сплава Inconel 718 при условии использования относительно малого диаметра луча (0,05 мм). Методом выборочного лазерного плавления на установке ALT Alfa-150 производства LLC «Additive Laser Technology of Ukraine» были изготовлены образцы из сплава Inconel 718. Для первой серии образцов задавали переменную мощность лазера в диапазоне 150...250 Вт, для второй — изменяли расстояние между треками в интервале 0,09...0,13 мм. Исследование микроструктуры проводилось при помощи оптического микроскопа AXIOVERT 200M MAT. Рассмотрены вопросы влияния параметров процесса выборочного лазерного плавления (мощность лазера, расстояние между треками) на структуру материала Inconel 718. По результатам работы определены зависимости между параметрами процесса выборочного лазерного плавления и глубиной и шириной ванны расплава. Определены условия глубокого проплавления с образованием крупных пор. Библиогр. 20, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: аддитивные технологии, выборочное лазерное плавление, порошковые материалы, жаропрочные никелевые сплавы, Inconel 718, ванна расплава, условия глубокого проплавления

Технологии трехмерной печати изделий из металлических порошков появились в середине 1980-х гг. [1] и отличаются от традиционных способов тем, что изготовление изделий происходит путем последовательного наращивания порошкового материала слой за слоем под воздействием источника высокой энергии [2]. Наибольшее распространение в последние годы получила технология Selective Laser Melting (SLM) — выборочного лазерного плавления за счет возможности изготовления сложнопрофильных изделий по компьютерной модели практически из любых металлических порошков (цинк, бронза, сталь, титан и титановые сплавы, алюминий и алюминиевые сплавы, драгоценные металлы и др.).

Эта технология способна заменить классические производственные процессы, позволяет изготовить изделия, превосходящие по физико-механическим свойствам металлопродукцию, созданную по стандартным технологиям. С помощью выборочного лазерного плавления можно создать уникальные сложнопрофильные изделия без использования механической обработки и дорогой оснастки. На сегодняшний день технология SLM нашла применение в оборонной промышленности, медицине, авиа- и ракетостроении. Однако производство каких-либо изделий по этой техно-

логии достаточно затратное из-за высокой сложности процесса.

В производстве авиационной и ракетно-космической техники особое место занимают сложные технологические процессы, применяемые при изготовлении ракетных двигателей и высоконагруженных узлов пневмо-гидравлической системы ракетоносителя из жаропрочных сплавов. Технология выборочного лазерного плавления позволяет в несколько раз сократить время и количество технологических операций, а число необходимого основного оборудования, численность которого измеряется в десятках, уменьшить до нескольких единиц [3].

На сегодняшний день актуальной задачей является создание и совершенствование оборудования для реализации процесса выборочного лазерного плавления и разработка рациональных режимов в зависимости от задач — материал, геометрия, свойства.

Цель исследования. Установить взаимосвязь между параметрами процесса выборочного лазерного плавления (изменение мощности лазера и расстояния между треками при постоянной скорости движения лазера при условии использования относительно малого диаметра луча — 0,05 мм) и микроструктурой изготавливаемых образцов из сплава Inconel 718 при режимах глубокого проплавления.

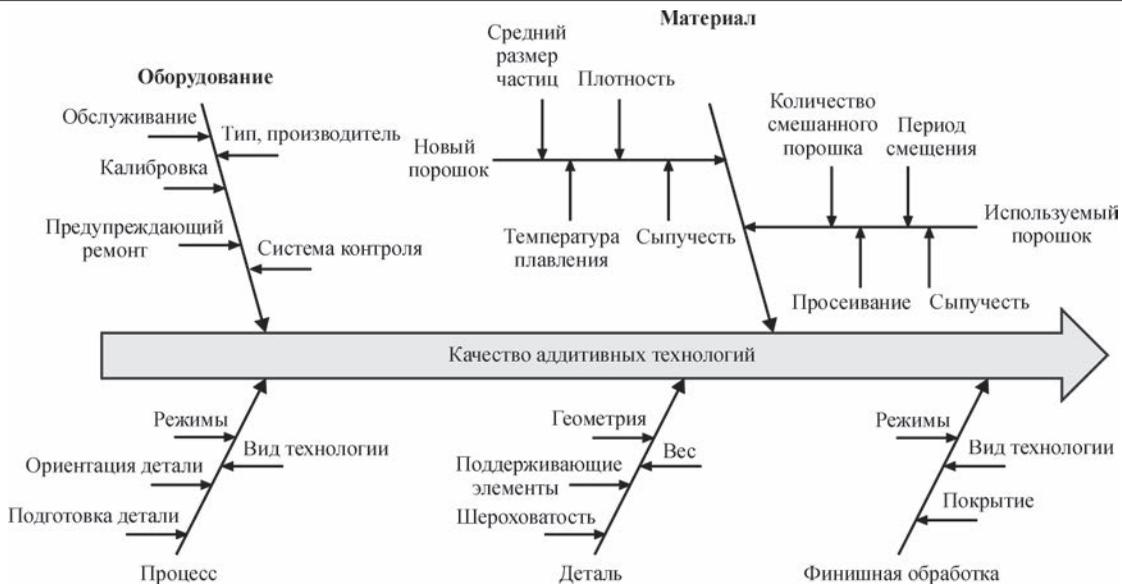


Рис. 1. Факторы, оказывающие влияние на качество металлоизделия при выборочном лазерном плавлении [5]

Состояние вопроса. Кроме технологических свойств порошковых материалов, используемых в технологии SLM, на качество конечных изделий влияет большое число параметров самого процесса лазерного плавления (рис. 1). К ним относятся мощность лазера, распределение энергии в лазерном пятне, скорость и траектория сканирования лазерного луча, расстояние между треками сканирования, толщина слоя порошкового материала, предварительный подогрев платформы, тип защитного газа [4].

Большое число работ посвящено исследованию влияния технологических характеристик порошков [5–11] и режимов изготовления [12–14] на свойства получаемых изделий.

Из анализа результатов указанных исследований следует, что основными факторами, влияющими на формирование сплавленного слоя при реализации технологии SLM, являются мощность лазерного излучения, скорость сканирования и траектория движения луча (закон заливки внутренней площади детали).

Описание условий эксперимента и обсуждение результатов. Изготавливались образцы размером 10×10 мм при толщине слоя смеси порошка 50 мкм, печатали 60 слоев. Образцы сплавлялись в среде аргона. В качестве подложки использовались пластины из нержавеющей стали. Подложка с порошком нагревалась до 80 °С. Аргон подавался в камеру на протяжении всего процесса плавления, количество кислорода в камере не превышало 0,09 %. На рис. 2 изображены общий вид установки, рабочая зона, где происходит построение объекта и общий вид готовых образцов на платформе построения.

Стратегия сканирования лазерным лучом при заливке внутренней площади детали — построчная зигзагом. Построение вы-

полнялось с платформы. Эксперимент проводился на установке ALT Alfa-150 производства LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». Исследование микроструктуры проводилось при помощи оптического микроскопа AXIOVERT 200M MAT.

Для изучения влияния мощности лазера на геометрию расплавленной ванны пять образцов из сплава Inconel 718 изготовили, поддерживая скорость сканирования 800 мм/с, интервал между треками — 0,1 мм и задавали переменную мощность лазера — 150, 175, 200, 225 и 250 Вт, соответственно. Угол поворота слоев относительно

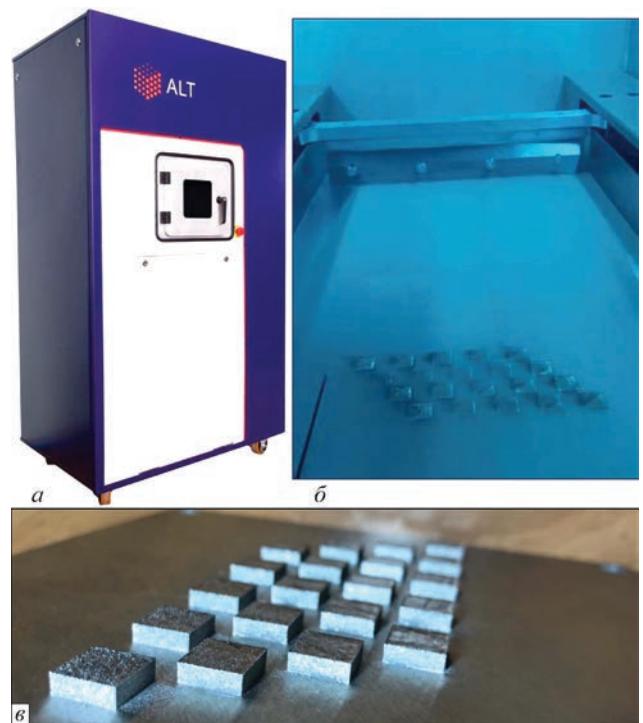


Рис. 2. Общий вид установки ALT Alfa-150 LLC «Additive Laser Technology of Ukraine» (а), рабочая зона (б) и общий вид образцов на платформе построения (в)

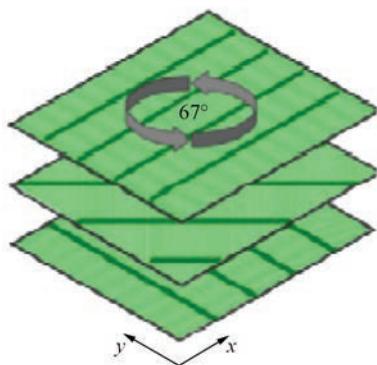


Рис. 3. Схема поворота слоев относительно предыдущего

предыдущего составлял 67° (рис. 3). На рис. 4 показана микроструктура опытных образцов № 1–5.

Были измерены конкретные размеры расплавленных ванн в верхней части каждого образца и определено среднее значение ширины w и глубины h одной ванны расплава для каждой мощности лазера. Результаты измерений показаны в таблице.

Видно, что значения w , h и мощность лазера P коррелируют, что соответствует результатам, полученным для других сплавов [15]. Видно, что значения w и h увеличились с увеличением мощности лазера, но интенсивность изменения постепенно уменьшается. Вероятно, это связано с тем, что увеличенная энергия лазера не может быть полностью поглощена порошком и расплавленной матрицей из-за ограниченной конвекции расплава и теплопередачи. Поэтому, глубина и ширина бассейна показывают взаимосвязь с мощностью лазера P , но они не прямо пропорциональны [16, 17].

Толщина слоя покрытия, использованного в этом эксперименте, составляла 50 мкм. Когда мощность лазера была 150 Вт, глубина расплавленной ванны составляла 193,5 мкм, что больше толщины трех слоев, а когда мощность лазера достигла 250 Вт, глубина бассейна расплава составляла 354,8 мкм, превышая толщину слоя в семь раз. В результате эксперимента установлено, что при мощности лазера более 175 Вт, скорости движения лазера 800 мм/с, толщине слоя 50 мкм, диаметре луча 0,05 мм создаются условия глубокого проплавления. При дальнейшем увеличении данного параметра увеличивается глубина ванны,

происходит схлопывание лунки, которое приводит к образованию крупных пор, что для напечатанной детали является неисправимым браком. Такое сечение трека также называют «замочной скважиной». Внешне трек, выполненный в этой области, выглядит стабильно, почти не имеет внешних дефектов. Однако в глубине сечения трека образуются крупные поры, рассеянные вдоль всего трека, вызванные неполным заполнением расплавом объема лунки и развитием процессов усадки в ней. Схема формирования пористости внутри ванны расплава показана на рис. 4.

Номер образца	Мощность лазера, Вт	Скорость движения лазера, мм/с	Пористость, %	Ширина бассейна, мкм	Глубина бассейна, мкм
1	150	800	0,5	58,1	193,5
2	175	800	0,3	70,6	225,8
3	200	800	0,7	83,9	258,1
4	225	800	2,1	90,3	322,6
5	250	800	3,2	96,7	351,8

Кроме того, увеличивается площадь участков с грубой микроструктурой и наблюдаются микротрещины, формирующиеся в результате микронапряжений, возникающих при затвердевании и охлаждении расплава из-за значительного перегрева.

В работе [19] определено, что при определенных значениях интервала сканирования наблюдается снижение пористости при прочих равных параметрах, поэтому для каждого сплава необходимо находить этот оптимум и это является одним из возможных путей улучшения структуры.

Интервал между треками – это расстояние между двумя соседними траекториями сканирования лазера (рис. 5). Это расстояние напрямую влияет на качество формования каждого слоя [20] и на производительность процесса. Кроме того, регулировка межтрекового интервала также влияет на качество внешнего вида детали.

Если шаг сканирования слишком мал, хотя непрерывность материала между соседними тре-

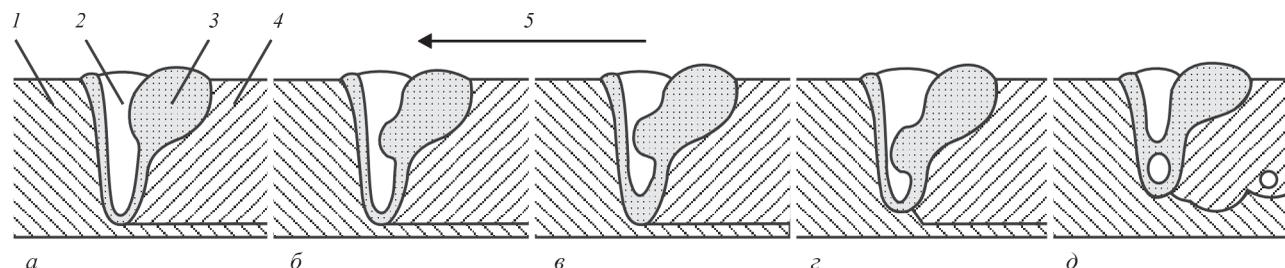


Рис. 4. Схема формирования пористости внутри ванны расплава трека, выполненного с параметрами глубокого проплавления [18] (а–д — соответствуют опытным образцам № 1–5): 1 — подложка; 2 — лунка; 3 — расплав; 4 — сплавленный трек; 5 — направление движения лазера

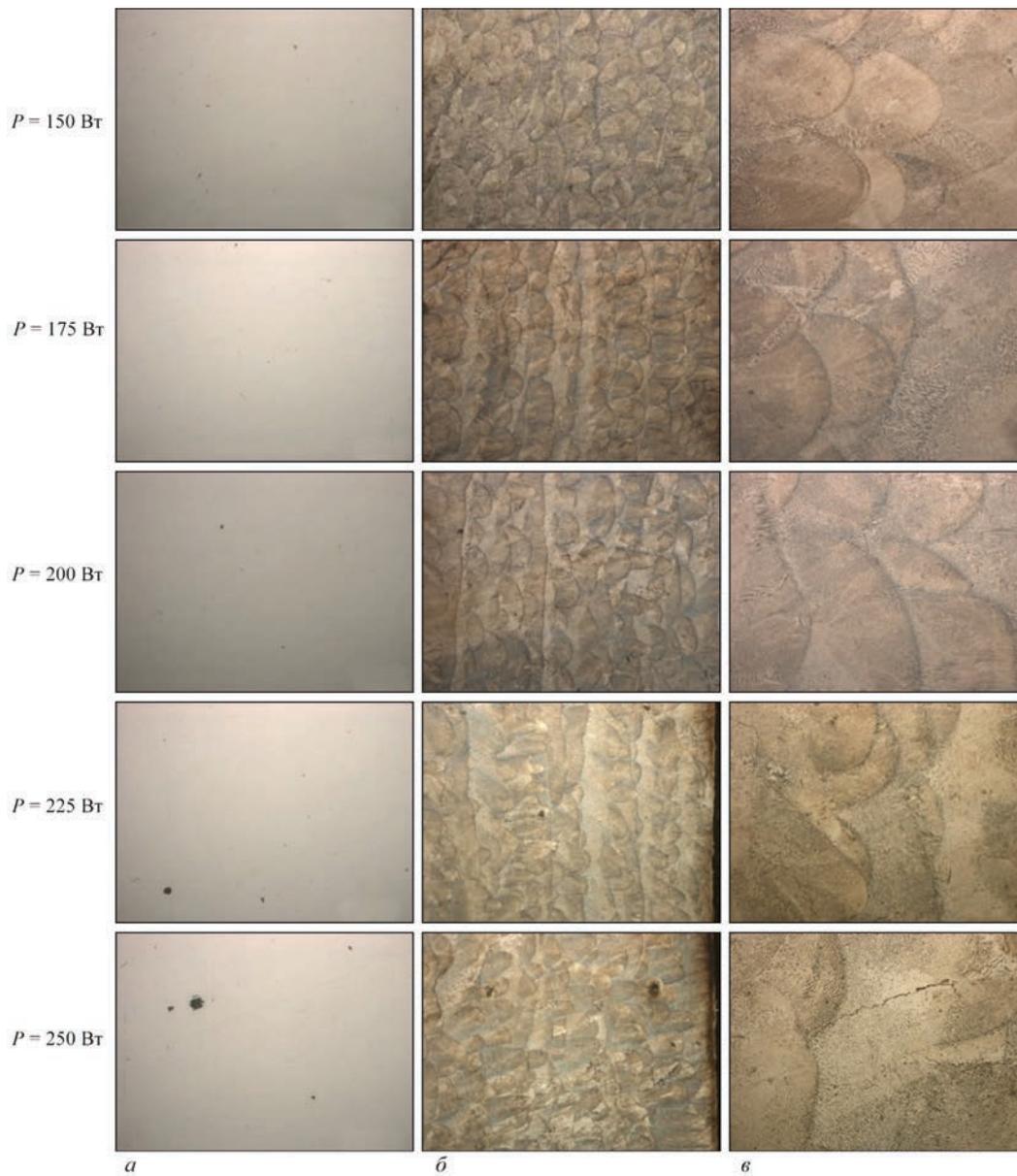


Рис. 5. Пористость (*а* — $\times 100$) и микроструктура (*б* — $\times 100$, *в* — $\times 500$) опытных образцов № 1–5 при различных мощностях лазера

ками будет увеличена, и образование пор будет меньше, вторичный переплав увеличивает тенденцию к образованию крупнозернистой структуры. Если шаг сканирования слишком велик, перекрытие между двумя треками будет недостаточным, не будет связи между соседними треками. Это генерирует большое количество пор, тем самым уменьшая плотность. Но увеличение межтрекового интервала увеличивает площадь переплава, тем самым увеличивая коэффициент использования лазера и скорость производства.

Чтобы исследовать влияние расстояния между треками на морфологию структуры металла из жаропрочного сплава Inconel 718 изготовили образцы с изменением указанного параметра от 0,09 до 0,13 мм. На рис. 6 показана микроструктура при различных режимах сканирования. В рамках

этого эксперимента установлено, что при расстоянии между треками 0,09 и 0,1 происходит локальный перегрев, вследствие которого увеличивается пористость, формируются участки с крупной микроструктурой. С увеличением данного параметра до 0,11 мм количество пор уменьшилось. Однако при увеличении интервала между треками до 0,13 мм формировались зазоры между ваннами плавления, повторная перекристаллизация, благотворно влияющая на конечную микроструктуру, не происходила. В результате эксперимента установлено, что оптимальные значения интервала между треками при условии тонкого луча лазера (порядка 0,05 мм) является 0,11...0,12 мм.

Дальнейшие исследования будут направлены на установление оптимальных режимов при изменении скорости сканирования и лучшего сочетания

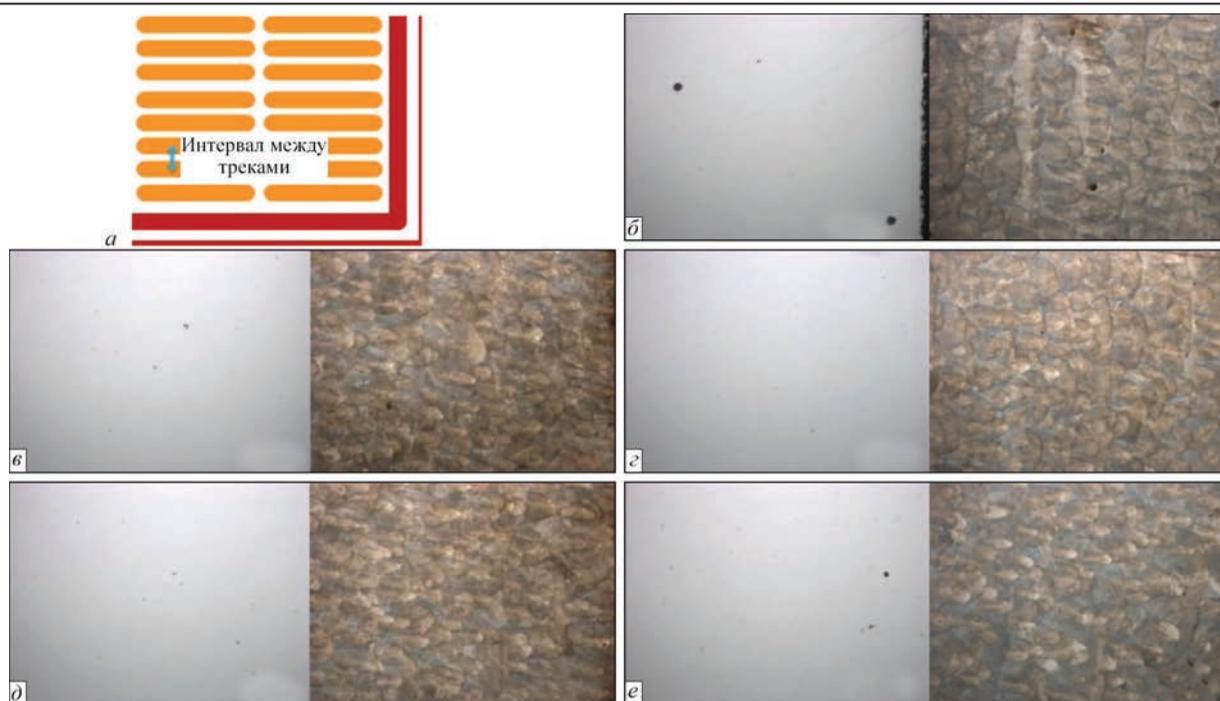


Рис. 6. Схема определения интервала между треками (a — $\times 100$), микроструктура ($\times 100$) образцов № 6–10 при различных расстояниях между треками: b – 0,09 мм; c – 0,10; d – 0,11; e – 0,12; e – 0,13

ния скорости и мощности лазера с учетом плотности излучения для достижения высокого качества металла и производительности установки.

Выводы

В результате исследований показано, что морфология расплавленной ванны связана с мощностью лазера и расстоянием между линиями сканирования. Определены значения параметров сканирования для сплава Inconel 718 с точки зрения снижения пористости и создания дисперсной микроструктуры: расстояние между треками 0,1 мм, мощность лазера 175 Вт при скорости движения лазера 800 мм/с, толщине слоя 50 мкм, диаметре луча 0,05 мм. Установлено, что при мощности лазера более 175 Вт создаются условия глубокого проплавления с формированием крупных пор.

Список литературы/References

- Zlenko M.A., Nagajcev M.V., Dovbysh V.M. (2015). *Аддитивные технологии в машиностроении*. Москва ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».
- Zlenko, M.A., Nagajtsev, M.V., Dovbysh, V.M. (2015) *Additive technologies in mechanical engineering*. Moscow, NAMI [in Russian].
- Campanelli, S.L., Contuzzi, N., Angelastro, A., Ludovico, A.D. (2010) Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting 279. *Process: New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, pp. 233–252.
- Huzel, D.K., Huang, D.H. (1967). *Design of Liquid Propellant Rocket Engines*. Huston, National Aerospace and Space Administration.
- Бабакова Е.В., Химич М.А., Сапрыкин А.А., Ибрагимов Е.А. (2016). Применение селективного лазерного сплавления для получения низкомолекулярного сплава системы титан-ниобий. *Вестник ПНИПУ*, 18, 1, 117–131.
- Babakova, E.V., Khimich, M.A., Saprykin, A.A., Ibragimov, E.A. (2016) Application of selective laser melting for producing of low modulus alloy of Ti-Nb system. *Vestnik PNIPU*, 18, 1, 117–131 [in Russian].
- Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., Kruth, J.-P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by SLM. *Physics Procedia*, 39, 439–446.
- Olakanmi, E.O. (2013). Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1387–1405.
- (1983) ГОСТ 25849-83. *Порошки металлические. Метод определения формы частиц*. Москва, Издательство стандартов.
- (1983) GOST 25849-83: *Metallic powders. Method for determination of particle shape*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].
- Louis, E., Fox, P., Sutcliffe, Ch.J. (2011). Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 275–284.
- Olakanmi, E.O., Dalgarno, K.W., Cochrane, R.F. (2012). Laser sintering of blended AlSi powders. *Rapid Prototyping Journal*, 8 (2), 109–119.
- Aboulkhair, N.T., Everitt, N.M., Ashcroft I., Tuck Ch. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing Journal*, 4, 77–86.
- Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I. et al. (2013). Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 606–613.
- Maamoun, A.H., Xue, Yi F., Elbestawi M.A., Veldhuis S.C. (2018). Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. *Materials*, 11, 2343, doi:10.3390/ma1122343.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P. et al. (2013). Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67, 2743–2751.
- Koutiri, I., Pessard, E., Peyre, P. et al. (2018). Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 536–546.

15. Tucho, W.M., Lysne, V.H., Austbø, H. et al. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *J. Alloys Compd.*, **7**, 910–925.
16. Kurzynowski, T., Gruber, K., Stopyra, W. et al. (2018). Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A*, **8**, 64–73.
17. Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., Fortunato, A. (2017). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.*, **9**, 255–263.
18. Amara, E.H., Fabbro, R. (2008). Modelling of gas jet effect on the melt pool movements during deep penetration laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **4**, 10. doi: 10.1088/0022-3727/41/5/055503.
19. Сухов Д.И., Мазалов П.Б., Неруш С.В., Ходырев Н.А. (2017). Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионноустойчивой стали. *Труды ВИАМ*, **8**, 34–44.
20. Sukhov, D.I., Mazalov, P.B., Nerush, S.V., Khodyrev, N.A. (2017). Effect of parameters of selective laser melting on pore formation in synthesized material of corrosion-resistant steel. *Trudy VIAM*, **8**, 34-44 [in Russian].
20. Gu, D.D., Shi, Q.M., Lin, K.J., Xia, L.X. (2018). Microstructure and performance evolution and underlying thermal mechanisms of Ni-based parts fabricated by selective laser melting. *Addit. Manuf.*, **2**, 265–278.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ГЛИБОКОГО ПРОПЛАВЛЕННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЗРАЗКІВ З ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ Inconel 718 МЕТОДОМ ВИБІРКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ

С.В. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{2,3}

¹Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара.
49000, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 72. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Рибінська, 144. E-mail: info@alt-print.com

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

Встановлена залежність між параметрами процесу вибіркового лазерного плавлення (потужність лазера та відстань між треками) і мікроструктурою зразків зі сплаву Inconel 718 за умови використання відносно малого діаметра променя (0,05 мм). Методом вибіркового лазерного плавлення на установці ALT Alfa-150 виробництва LLC «Additive Laser Technology of Ukraine» було виготовлено зразки зі сплаву Inconel 718. Для першої серії зразків задавали змінну потужність лазера в діапазоні 150...250 Вт, для другої — змінювали відстань між треками в інтервалі 0,09...0,13 мм. Дослідження мікроструктури проводилося за допомогою оптичного мікроскопа AXIOVERT 200M MAT. Розглянуто питання впливу параметрів процесу вибіркового лазерного плавлення (потужність лазера, відстань між треками) на структуру матеріалу Inconel 718. За результатами роботи визначено залежності між параметрами процесу вибіркового лазерного плавлення і глибиною та шириною ванни розплаву. Визначено умови глибокого проплавлення з утворенням великих пір. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: адитивні технології, вибіркоче лазерне плавлення, порошкові матеріали, жароміцні нікелеві сплави, Inconel 718, ванна розплаву, умови глибокого проплавлення

INVESTIGATION OF DEEP PENETRATION CONDITIONS WHEN MAKING SAMPLES FROM HIGH-TEMPERATURE ALLOY Inconel 718 BY THE METHOD OF SELECTIVE LASER MELTING

S.V. Adzhamskii^{1,2}, A.A. Kononenko^{2,3}

¹O. Honchar Dniepr National University. 72 Gagarin Ave., 49000, Dniepr, Ukraine. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 144 Rybinskaya Str., 49000, Dniepr, Ukraine. E-mail: infor@alt-print.com

³Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine. 1 Starodubov Sq., 49000, Dniepr, Ukraine.
E-mail: office@isi@nas.ua

A dependence was established between selective laser melting parameters (laser power and distance between the tracks) and microstructure of samples from Inconel 718 alloy, provided a beam of a rather small diameter (0.05 mm) is used. The method of selective laser melting in ALT Alfa-150 unit manufactured by LLC «Additive Laser Technology of Ukraine» was used to make samples from Inconel 718 alloy. For the first sample series variable laser power was assigned in the range of 150 – 250 W, for the second series the distance between the tracks was varied in the range of 0.09 – 0.13 mm. Microstructural studies were conducted using optical microscope AXIOVERT 200M MAT. The effects of selective laser melting parameters (laser power, distance between tracks) on the structure of Inconel 718 material are considered. The results of the work were used to establish the dependencies between selective laser melting parameters and melt pool depth and width. Conditions of deep penetration with coarse porosity formation were determined. 20 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, powder materials, high-temperature nickel alloys, Inconel 718, melt pool, deep penetration conditions

Поступила в редакцію 26.04.2019