

Научная статья

УДК 621.373.826

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-65-77

Оптимизация параметров лазерной наплавки порошка на основе системы никель-алюминий

Михаил Александрович Гулов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

gulovy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2648-6451>

Аннотация

Произведена оптимизация параметров лазерной наплавки для получения качественного единичного трека. В качестве материала наплавки был использован порошок алюминид никеля (Ni_3Al) – ПН85Ю15. В ходе работы было получено 60 образцов, наплавленных при различных параметрах мощности, скорости сканирования, положения фокуса лазерного луча относительно поверхности порошкового слоя. Были измерены геометрические характеристики полученных единичных треков. Обнаружено, что размеры единичных треков уменьшаются с ростом скорости. Повышение мощности лазерного излучения приводит к увеличению ширины и высоты единичного трека, а также к увеличению глубины проплавления подложки. Исследована зависимость геометрических характеристик единичных треков от температуры ванны расплава. Также в работе была измерена микротвердость полученных образцов, найдена зависимость микротвердости образцов от скорости сканирования. Обнаружено, что микротвердость полученных образцов коррелирует с количеством энергии, сообщенной порошковому слою и температурой ванны расплава. Установлено, что совокупность экспериментальных данных описывается в обобщенных пространственных и энергетических координатах линейной зависимостью.

Ключевые слова

лазерная наплавка, селективное лазерное сплавление, ванна расплава, единичный трек, никелид алюминия, ПН85Ю15

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121030900259-0

Для цитирования

Гулов М. А. Оптимизация параметров лазерной наплавки порошка на основе системы никель-алюминий // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 65–77. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-65-77

Optimization of Parameters of Laser Cladding of the Powder Based on Nickel-Aluminium System

Mikhail A. Gulov

Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

gulovy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2648-6451>

Abstract

In this work, the parameters of laser cladding were optimized to obtain a high-quality single track. Nickel aluminide powder (Ni_3Al) – PN85Yu15 was used as the surfacing material. 60 samples were obtained, deposited at various pa-

© Гулов М. А., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 65–77
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 65–77

rameters of power, scanning speed, position of the focus of the laser beam relative to the surface of the powder layer. The geometric characteristics of the obtained single tracks were measured, graphs of their dependence on the scanning speed were plotted. It was found that the sizes of single tracks decrease with increasing speed. An increase in the power of laser radiation leads to an increase in width and height of the track, as well as the depth of penetration of the substrate. The dependence of the geometric characteristics of the tracks on the temperature of the melting pool has been investigated. The microhardness of the obtained samples was also measured, and a weakly expressed dependence of the microhardness on the laser scanning speed was found. It was found that the microhardness of the obtained samples correlates with the amount of energy imparted to the powder layer and the temperature of the melting pool. It was also found that the set of experimental data is described in generalized spatial and energy coordinates by a linear dependence.

Keywords

laser cladding, selective laser melting, single track, aluminum nickelide, PN85YU15

Funding

The work was carried out within the state task № 121030900259-0

For citation

Gulov M. A. Optimization of Parameters of Laser Cladding of the Powder Based on Nickel-Aluminium System. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 65–77. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-65-77

Введение

В настоящее время аддитивные технологии интенсивно развиваются из-за их уникальных возможностей по послойному изготовлению функциональных изделий и покрытий из различных металлов и сплавов. Аддитивные технологии получили широкое распространение во многих областях производства, таких как автомобилестроение, медицина, аэрокосмическая промышленность [1–3].

Формирование ванны расплава – это базовый, первичный этап аддитивного производства. Трек, остающийся после остывания ванны расплава, является элементарным строительным элементом детали, изготавливаемой с помощью послойной лазерной наплавки. Именно поэтому подбор оптимальных параметров наплавки единичного трека, изучение процессов его формирования и его структуры имеет решающее значение в наплавке многослойных объектов и позволяет прогнозировать качество деталей, выращенных из множества слоев.

Традиционный подход к изучению влияния различных параметров процесса аддитивного производства заключается в изучении готовой детали, состоящей из множества слоев. Помимо значительного времени производства таких деталей и его стоимости, наиболее важным ограничением этого метода является то, что исходная форма ванны расплава и начальное состояние затвердевшей структуры в реальном процессе аддитивного производства скрываются последующими проходами, которые частично переплавляют нижележащий слой. Таким образом, эксперименты по наплавке единичных треков, основанные на исследованиях других подобных процессов, таких как лазерная сварка, в работах [4; 5] используются в качестве замены в некоторых исследованиях, направленных на более глубокое понимание процесса формирования ванны расплава и единичного трека. Аналогичные тенденции в характеристиках ванны расплава единичного трека, наплавленного слоя и многослойной наплавки жаропрочного сплава на никелевой основе с использованием технологии SLM исследованы в работе [6]. Это показывает, что эксперименты с единичным треком являются полезным экспериментальным инструментом для понимания влияния параметров процесса на формирование ванны расплава и для создания технологических карт обработки. Также изучалась изменчивость геометрии ванны расплава для никелевого сплава с одним слоем порошка. Морфология ванны расплава в поперечном сечении была связана с дефектами поверхностной пористости и внутренней пористостью, но информация о корреляции между параметрами процесса и характеристиками ванны расплава не была представлена [7]. В работе [8] были проведены эксперименты по наплавке одиночных треков для изучения влияния параметров лазера на геометрию ванны расплава и морфологию поверхности технически чистого титана и Ti-6Al-4V. Результаты показывают, что форма и свойства ванны расплава существенно от-

личаются в зависимости от параметров лазера. Подводя итог, можно сказать, что более подробные и систематические исследования образования ванны расплава в процессе SLM, а именно влияние параметров процесса на формирования единичных треков, продолжаются.

Перспективным материалом для использования в авиастроении является сплав на основе интерметаллида Ni_3Al . Высокая прочность, стойкость к окислению, термическая стабильность позволяют использовать сплавы на основе алюминидов никеля при изготовлении тяжело нагруженных ответственных деталей газотурбинных двигателей авиационного и транспортного назначения, газотурбинных установок энергетического назначения [9–12]. Сплав Ni_3Al выпускается в виде порошка ПН85Ю15, состоящего из сферических гранул. Работы по лазерной наплавке этого порошка имеют единичный характер, в [13] порошок ПН85Ю15 наплавляли на кулачки распределительного вала автомобильного двигателя. Однако удовлетворительной структуры наплавленного слоя достичь не удалось из-за внутренних дефектов. Насколько известно авторам, систематического исследования зависимости характеристик наплавленного слоя от условий лазерной наплавки порошка ПН85Ю15 не проводилось.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния параметров обработки на характеристики единичных треков при лазерной наплавке порошка ПН85Ю15 и поиск условий обработки, позволяющих получить качественные треки.

Экспериментальное оборудование и методики

Наплавка единичных треков производилась в защитной атмосфере аргона на автоматизированном лазерном технологическом комплексе серии «Сибирь», включающем в себя CO_2 -лазер мощностью до 8 кВт [14; 15]. Фокусировка лазерного излучения проводилась с помощью ZnSe линзы с фокусным расстоянием 254 мм.

Фракционный состав порошка ПН85Ю15 составляет 20–63 мкм. Твердость гранул – от 270 до 320 НВ. Порошок наплавлялся на подложку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с размерами $50 \times 50 \times 5$ мм. Толщина наносимого слоя порошка составляла 400 мкм. Химический состав порошка ПН85Ю15 (значения даны в мас.%): Ni – 85–87; Al – 12–15; Fe – 0,2; C – 0,07.

Геометрические характеристики единичных треков измерялись на оптическом конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS 3000.

Микротвердость единичных треков была измерена по методу Виккерса при нагрузке 300 г и экспозиции 5 с на микротвердомере Wilson Hardness Group Tukon1102.

В экспериментах варьировались мощность P лазерного излучения, скорость V сканирования, положение Δf фокуса лазерного луча относительно поверхности порошкового насыпного слоя.

Наплавка единичных треков давно используется для нахождения оптимальных параметров лазерной наплавки, из-за чего понимание того, какие требования нужно предъявлять к валикам, уже сформировано. Было выбрано 4 наиболее важных критерия качества единичного трека [16–18]:

- 1) отсутствие пор, трещин;
- 2) уменьшение перемешивания металла основы и металла наплавки [17];
- 3) минимальная глубина проплава основы [17];
- 4) коэффициент формы валика (отношение высоты трека H к его ширине W) должен быть не более 0,3–0,5, что позволит обеспечить высокую адгезионную прочность межслойного сцепления при наплавке многослойных объектов [17].

Результаты и обсуждение

Было опробовано 60 режимов наплавки, в которых изменялись мощность лазерного излучения от 500 до 1500 Вт, скорость сканирования от 4 до 33 мм/с, положение фокуса лазерного луча относительно поверхности насыпного слоя от –15 до +15 мм.

Для подготовки образцов к исследованию на микроскопе были сделаны шлифы поперечных срезов подложек с наплавленными единичными треками (рис. 1, 2). С использованием программного обеспечения микроскопа Olympus LEXT 3000 измерены геометрические характеристики единичных треков (ширина, высота, глубина).

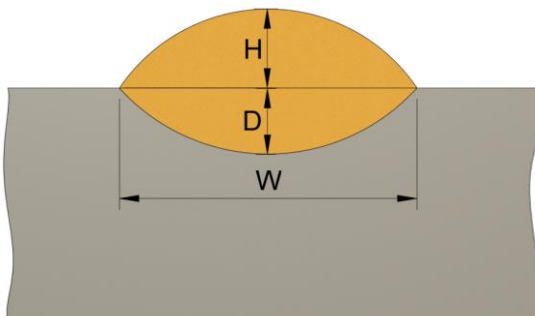


Рис. 1. Схематичное изображение поперечного сечения единичного трека:

H – высота трека; D – глубина трека; W – ширина трека

Fig. 1. Schematic cross-sectional representation of a single track:

H – track height, D – track depth, W – track width



Рис. 2. Фотография шлифа поперечного сечения единичного трека

Fig. 2. Photo of the cross-section cut of the single track

На рис. 3 представлены зависимости геометрических характеристик единичных треков от скорости сканирования. Каждая линия на графике соответствует собственному параметру положения фокуса относительно порошкового слоя.

При повышении скорости сканирования геометрические размеры единичных треков уменьшаются, что связано с уменьшением количества сообщаемой порошковой смеси энергии, что приводит к снижению размеров ванны расплава. Также геометрические размеры увеличиваются при повышении мощности лазерного излучения (см. таблицу). Наглядно изменение размера единичного трека с ростом мощности показано на рис. 4, где приведены

фотографии единичных треков, полученных при мощности излучения 500, 1000, 1500 Вт и значением положения фокуса относительно поверхности порошкового слоя +10 мм.

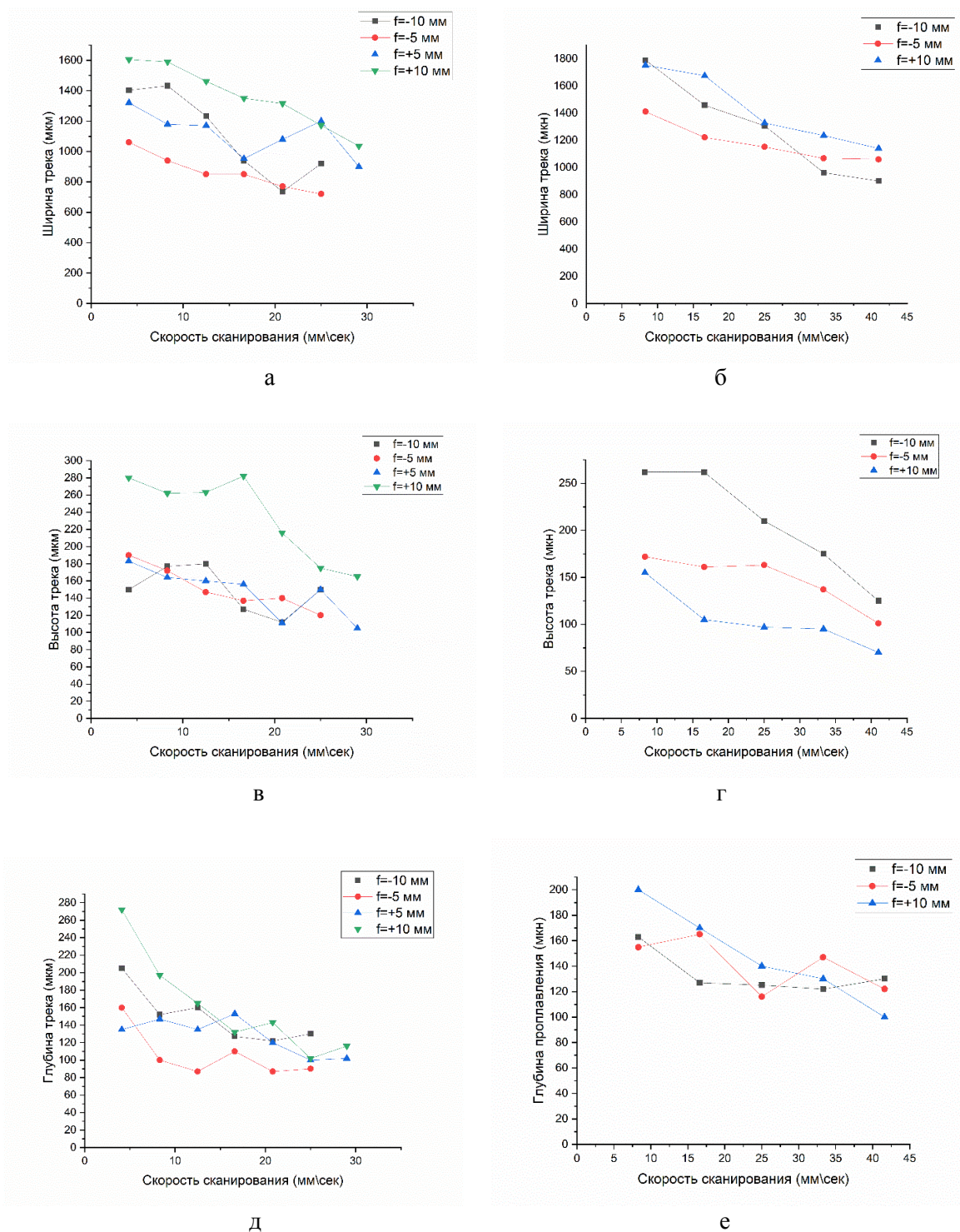


Рис. 3. Зависимость ширины (а, б), высоты (в, г) и глубины (д, е) единичных треков от скорости сканирования. Мощность излучения: а, в, д – 500 Вт; б, г, е – 1000 Вт

Fig. 3. Dependence of the width (a, b), height (c, d) and depth (e, f) of single tracks on the scanning speed. Laser power: a, c, e – 500 W; b, d, f – 1000 W

Геометрические размеры треков,
наплавленных при различных значениях мощности лазерного излучения
Geometrical dimensions of tracks
deposited at different values of laser radiation power

P , Вт	W , мкм	H , мкм	D , мкм
500	697	75	70
1000	1653	183	205
1500	1962	202	247

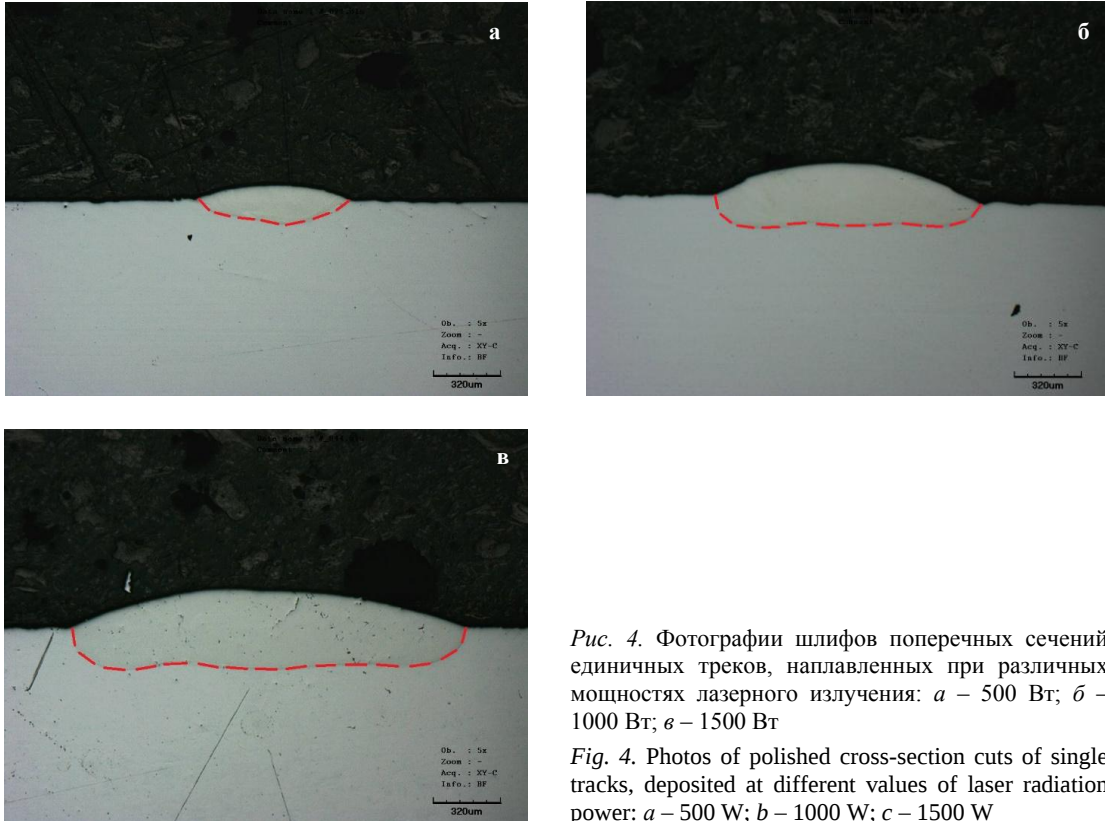


Рис. 4. Фотографии шлифов поперечных сечений единичных треков, наплавленных при различных мощностях лазерного излучения: а – 500 Вт; б – 1000 Вт; в – 1500 Вт

Fig. 4. Photos of polished cross-section cuts of single tracks, deposited at different values of laser radiation power: а – 500 W; б – 1000 W; в – 1500 W

Для более глубокого понимания процесса формирования единичного трека необходимо изучить процессы, происходящие в ванне расплава при лазерной наплавке. Для этого было решено исследовать зависимость геометрических параметров треков от температуры в зоне воздействия лазерного излучения. Удобно использовать формулу, определяющую максимальную температуру тела на его поверхности при нагреве его лазерным излучением (в центре облучаемой области в виде круга радиусом r_0 в момент окончания воздействия) [19; 20]:

$$T = \frac{2AP\sqrt{a\tau}}{\pi r_0^2 k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_0,$$

где A – коэффициент поглощения поверхности; P [Вт] – мощность излучения; r_0 – радиус пятна лазерного излучения на поверхности; τ – длительность воздействия: $\tau = \frac{2r_0}{V}$; a [м/с²] –

температуропроводность материала; k [Вт/(м·°C)] – теплопроводность материала; T_0 – начальная температура.

При слабом влиянии теплопроводности $\frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} > 1$ функцией $\text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}}$ можно пренебречь, а так как в разных сериях экспериментов большинство параметров не изменялось (кроме мощности лазерного излучения и скорости сканирования), то уравнение можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{P}{\sqrt{V}} \text{const} + \text{const}.$$

Таким образом, вместо параметра температуры можно использовать комбинационный параметр $P/\sqrt{V}$. Графики на рис. 5, а, б подтверждают предположение о росте геометрических размеров ванны расплава при повышении температуры в зоне наплавки. На рис. 5, в представлены зависимости коэффициентов формы полученных единичных треков от параметра $P/\sqrt{V}$. При определенных значениях параметра происходит рост коэффициента формы с его последующим убыванием. Стоит отметить то, как зависит коэффициент формы от параметра при значениях положения фокуса $f = +5, +10$ мм при мощности лазерного излучения 500 Вт.

Известно, что для таких процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, как резка, сварка и наплавка одним из определяющих безразмерных параметров является безразмерная энергия [18; 19; 21]. В литературе описано, что данный параметр может определять геометрические характеристики трека при наплавке металлического порошка. Был построен график зависимости безразмерной ширины трека W/D от обобщенного параметра энергии

$\frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$, где d (мм) – диаметр лазерного луча на поверхности порошкового слоя [22] (рис. 6).

Также была проведена линейная аппроксимация полученных данных. Полученная линейная зависимость имеет вид $W/D = 1,08904 + 0,00605 \frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$.

Кроме того была исследована зависимость коэффициента формы единичного трека от энергетического параметра $\frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$. Данные представлены на рис. 7. Можно заметить, что паттерны поведения линий на этих графиках и на графиках зависимости коэффициента формы от комбинационного параметра $P/\sqrt{V}$ одинаковы, что экспериментально подтверждает зависимость температуры ванны расплава от сообщенной ей энергии.

Микротвердость

Была измерена микротвердость полученных образцов, построены графики зависимости микротвердости единичных треков от скорости сканирования при мощностях 500 и 1000 Вт (см. рис. 6, 7). Измеренная твердость подложки из стали 12Х18Н10Т составила 180 МПа. В зависимости от скорости микротвердость единичных треков колеблется от 220 до 300 МПа по Виккерсу. Такой диапазон значений может объясняться образованием менее твердых вторичных фаз, возникающих при расплаве порошковой смеси в процессе лазерной обработки.

Были исследованы зависимости микротвердости от количества энергии, сообщенной порошковому слою. На рис. 8, а, б построены графики зависимости микротвердости от скорости сканирования. Из них видно, что для разных мощностей лазерного излучения существу-

ют оптимальные значения скорости сканирования, при которых микротвердость полученных образцов максимальна вне зависимости от параметров фокусировки пучка.

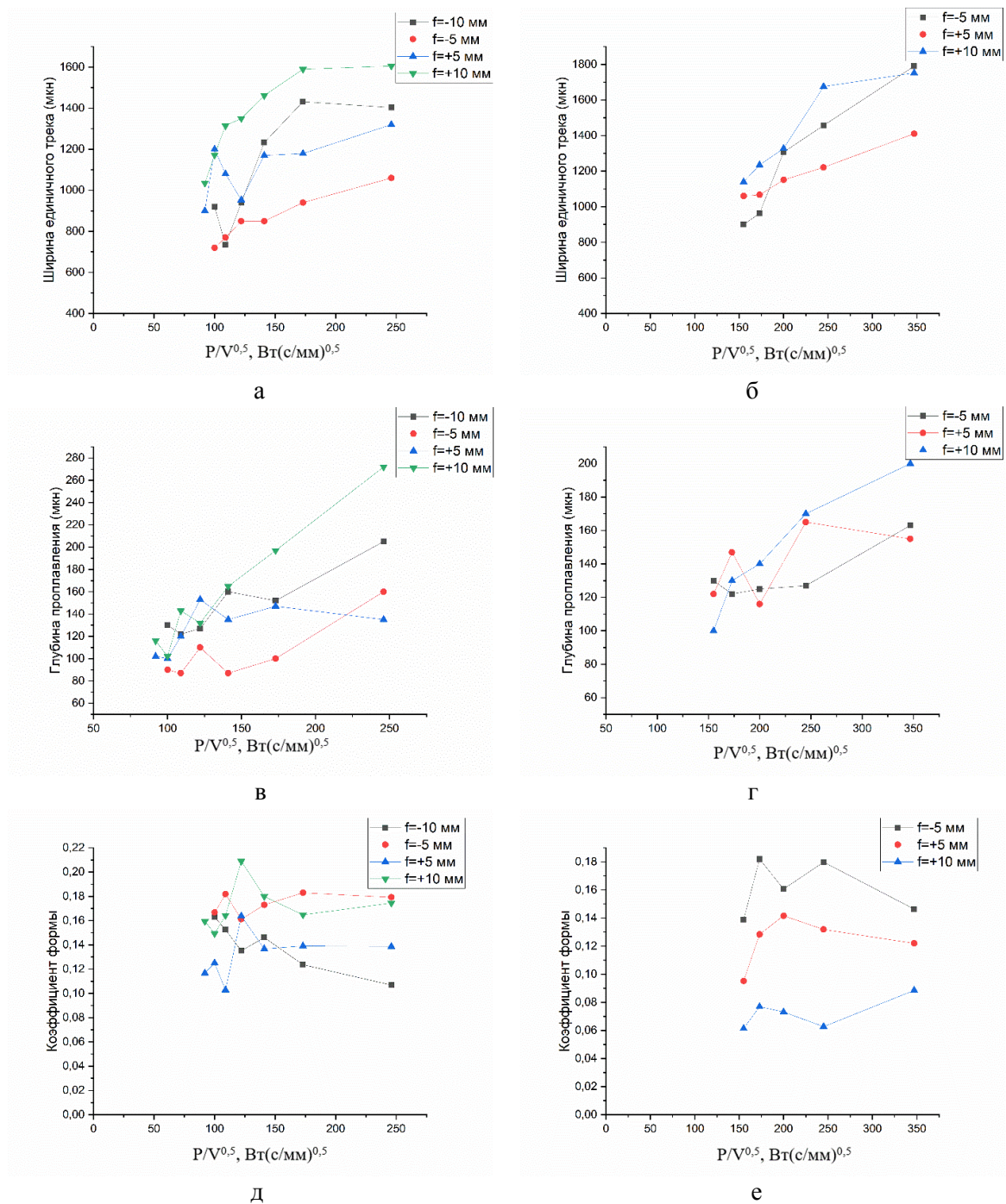


Рис. 5. Зависимость ширины единичного трека (а, б), глубины проплавления (в, г)

и коэффициента формы единичного трека (д, е) от параметра $P/\sqrt{V}$

Мощность лазерного излучения: а, в, д – 500 Вт; б, г, е – 1000 Вт

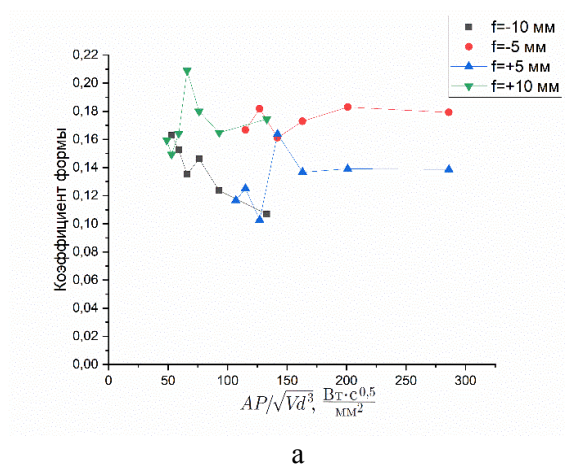
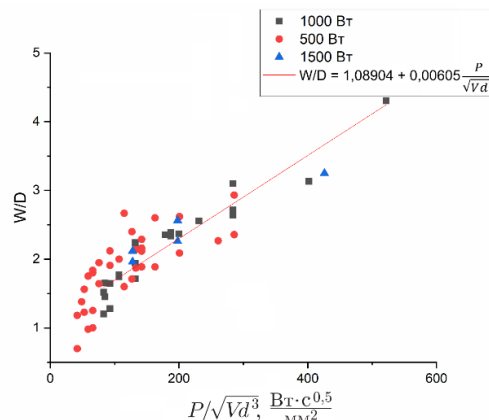
Fig. 5. Dependence of the width of a single track (a, b), substrate penetration depth (c, d)

and shape factor of a single track (e, f) on the $P/\sqrt{V}$ parameter

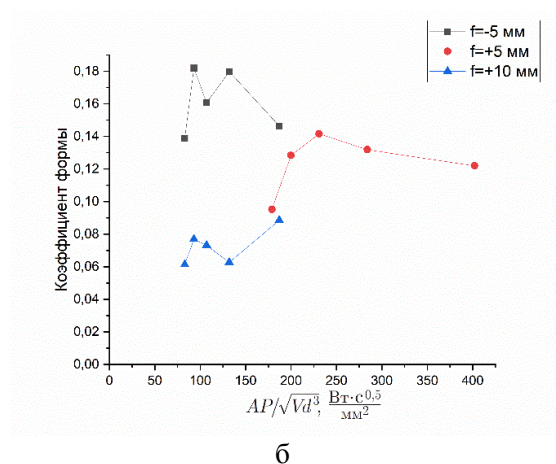
Laser power: a, c, e – 500 W; b, d, f – 1000 W

Рис. 6. Зависимость безразмерной ширины единичных треков от безразмерной энергии при мощности излучения 500, 1000 и 1500 Вт

Fig. 6. Dependence of the dimensionless width of single tracks on the generalized energy at radiation powers of 500, 1000, and 1500 W



а



б

Рис. 7. Зависимость коэффициента формы от обобщенной энергии. Мощность лазерного излучения: а – 500 Вт; б – 1000 Вт

Fig. 7. Dependence of the shape factor on the generalized energy. Laser power: а – 500 W; б – 1000 W

Итак, для мощности лазерного излучения 500 Вт оптимальная скорость сканирования находится в диапазоне 15–20 мм/с. Для мощности лазерного излучения 1000 Вт границы оптимальной скорости не столь очевидны, поэтому было решено исследовать зависимость микротвердости от энергетического параметра $\frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$. Именно количество и плотность со-

общенной порошковому слою энергии определяют степень его расплава, глубину проплавления и температуру ванны расплава и, как следствие, количество образуемых в процессе наплавки вторичных фаз.

На рис. 8, в, г изображена зависимость микротвердости единичных треков от обобщенной энергии для мощности излучения 500, 1000 Вт. Отчетливо видны значения энергии, при которых микротвердость достигает максимального значения. Это может свидетельствовать о подборе оптимальных параметров лазерной обработки для данной толщины насыпного слоя. Также стоит обратить внимание на то, что зависимость микротвердости и зависимость коэффициента формы от сообщенной энергии, зависимость коэффициента формы от параметра $P/\sqrt{V}$ имеют одинаковый вид, из чего можно сделать следующий вывод: увеличение количества сообщенной порошковому слою энергии приводит к созданию более широких

и низких треков с низкой микротвердостью. Снижение количества энергии, наоборот, приводит к созданию более узких и высоких валиков с большей твердостью. Это позволяет в зависимости выбора режимов наплавки либо создавать покрытия, либо выращивать объемные детали с заранее известными механическими свойствами.

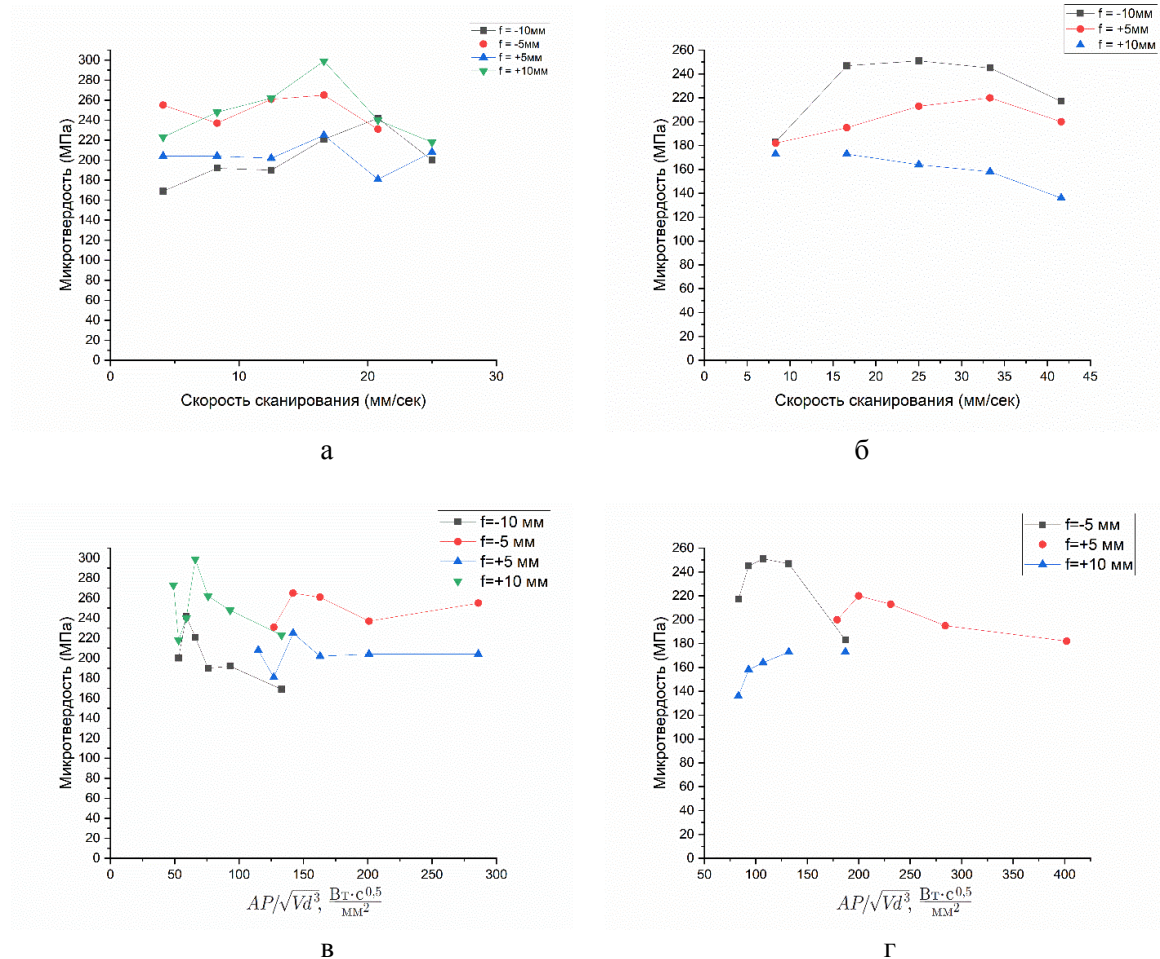


Рис. 8. Зависимость микротвердости единичных треков от скорости сканирования (а, б) и обобщенной энергии (в, г). Мощность излучения: а, в – 500 Вт; б, г – 1000 Вт

Fig. 8. Dependence of the microhardness of single tracks on the scanning speed (a, b) and generalized energy (c, d). Radiation power: a, c – 500 W; b, d – 1000 W

Таким образом, появляется возможность напрямую управлять свойствами многослойных наплавляемых покрытий с помощью изменения количества энергии, сообщаемой порошкo-вому слою.

Выводы

В работе были проведены поиск и исследование оптимальных режимов лазерной наплавки порошка ПН85Ю15. Получены экспериментальные данные о зависимости геометрических характеристик треков от параметров лазерной наплавки.

Ширина, высота трека и глубина проплавления растут с ростом мощности и уменьшаются с ростом скорости.

Исследовано влияние температуры ванны расплава на геометрические характеристики единичных треков.

Исследована зависимость микротвердости полученных образцов от скорости сканирования и энергетических параметров.

Установлено, что совокупность экспериментальных данных описывается в обобщенных пространственных и энергетических координатах линейной зависимостью.

Список литературы

1. **Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R.** Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mater. Rev.*, 2012, no. 57, pp. 133–164. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000014
2. **Евгенов А. Г., Лукина Е. А., Королев В. А.** Особенности процесса селективного лазерного синтеза применительно к литейным сплавам на основе никеля и интерметаллида Ni₃Al // Новости материаловедения. Наука и Техника. 2016. № 5. С. 3–11.
3. **Dutta Majumdar J., Manna I.** Laser material processing. *Int. Mater. Rev.*, 2011, no. 56, pp. 341–388. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000003
4. **Fabbro R.** Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, no. 43. DOI 10.1088/0022-3727/43/44/445501
5. **Fotovvati B., Wayne S. F., Lewis G., Asadi E.** A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018. DOI 10.1155/2018/4920718
6. **Kumar P., Farah J.** Influence of processing parameters on properties of Inconel 718. *Mater. Lett.*, 2019, no. 252, pp. 256–259.
7. **Scime L., Beuth J.** Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Addit. Manuf.*, 2019, no. 29, p. 100830. DOI 10.1016/j.addma.2019.100830
8. **Kusuma C., Ahmed S. H., Mian A., Srinivasan R.** Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Commercially Pure Titanium (CP-Ti). *J. Mater. Eng. Perform.*, 2017, no. 26, pp. 3560–3568. DOI 10.1007/s11665-017-2768-6
9. **Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Поварова К. Б., Базылева О. А., Морозова Г. И., Казанская Н. К.** Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni₃Al // Металлы. 1999. № 1.
10. **Каблов Е. Н., Ломберг Б. С., Бунтушкин В. П., Голубовский Е. Р., Мубояджян С. А.** Сплав на основе интерметаллида Ni₃Al – перспективный материал для лопаток турбин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7.
11. **Kumar K. G., Anand T. J. S.** A Novel Intermetallic Nickel Aluminide (Ni₃Al) as an Alternative Automotive Body Material. *Int. J. Eng. Technol.*, 2011, pp. 274–282.
12. **Гринберг Б., Иванов М.** Интерметаллиды Ni₃Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург, 2002.
13. **Скобло Т., Петренчук В.** Выбор порошковой композиции и оптимальных параметров обработки при нанесении покрытий лазерным методом на кулачки распределительного вала // Распределение химических элементов по сечению детали. 1992. № 4. С. 57–71. URL: <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
14. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatyev V. B.** Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 970–974. DOI 10.1070/qe2014v044n10abeh015412
15. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatev V. B.** High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 233–238. DOI 10.1070/qe2014v044n03abeh015320

16. **Фернандо Г. Л.** Методики оптимизации процесса лазерного нанесения износостойких покрытий на валы газотурбинных установок: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 148 с.
17. **Григорьянц А., Шиганов И., Мисюров А.** Технологические процессы лазерной обработки. М., 2008. 663 с.
18. **Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., Formanoir C. de, Witvrouw A., Van Hooreweder B.** On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Addit. Manuf.*, 2018, no. 23, pp. 161–169. DOI 10.1016/j.addma.2018.08.006
19. **Golyshev A., Orishich A.** Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks. *Met. Work. Mater. Sci.*, 2019, no. 21, pp. 82–92. DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92
20. **Солоненко О. П., Алхимов А. П., Марусин В. В., Рахимьянов Х. М., Оришич А. М., Салимов Р. А., Щукин В. Г., Косарев В. Ф.** Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука, 2000. Т. 18: Высокоэнергетические процессы обработки материалов. 425 с. ISBN 5-02-031528-1
21. **Rubenchik A. M., King W. E., Wu S. S.** Scaling laws for the additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, no. 257, pp. 234–243. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.034
22. **Golyshev A. A., Orishich A. M., Filippov A. A.** Similarity Laws in Laser Cladding of Cermet Coatings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 4, pp. 758–767. DOI 10.15372/pmtf20190421

References

1. **Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R.** Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mater. Rev.*, 2012, no. 57, pp. 133–164. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000014
2. **Evgenov A. G., Lukin E. A., Korolev V. A.** Features of the selective laser synthesis process as applied to casting alloys based on nickel and Ni₃Al intermetallic compound. *News of Materials Science. Science and Technology*, 2016, no. 5, pp. 3–11. (in Russ.)
3. **Dutta Majumdar J., Manna I.** Laser material processing. *Int. Mater. Rev.*, 2011, no. 56, pp. 341–388. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000003
4. **Fabbro R.** Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, no. 43. DOI 10.1088/0022-3727/43/44/445501
5. **Fotovvati B., Wayne S. F., Lewis G., Asadi E.** A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018. DOI 10.1155/2018/4920718
6. **Kumar P., Farah J.** Influence of processing parameters on properties of Inconel 718. *Mater. Lett.*, 2019, no. 252, pp. 256–259.
7. **Scime L., Beuth J.** Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Addit. Manuf.*, 2019, no. 29, p. 100830. DOI 10.1016/j.addma.2019.100830
8. **Kusuma C., Ahmed S. H., Mian A., Srinivasan R.** Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Commercially Pure Titanium (CP-Ti). *J. Mater. Eng. Perform.*, 2017, no. 26, pp. 3560–3568. DOI 10.1007/s11665-017-2768-6
9. **Kablov E. N., Buntushkin V. P., Povarova K. B., Bazyleva O. A., Morozov G. I., Kazanskaya N. K.** Low-alloy light heat-resistant high-temperature materials based on the intermetallic compound Ni₃Al. *Metals*, 1999, no. 1. (in Russ.)
10. **Kablov E. N., Lomberg B. S., Buntushkin V. P., Golubovsky E. R., Muboyadzhyan S. A.** Alloy based on Ni₃Al intermetallic compound – promising material for turbine blades. *Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2002, no. 7. (in Russ.)
11. **Kumar K. G., Anand T. J. S.** A Novel Intermetallic Nickel Aluminide (Ni₃Al) as an Alternative Automotive Body Material. *Int. J. Eng. Technol.*, 2011, pp. 274–282.
12. **Grinberg B., Ivanov M.** Intermetallic compounds Ni₃Al and TiAl: microstructure, deformation behavior. Ekaterinburg, 2002. (in Russ.)

13. **Skoblo T., Petrenchyuk V.** Choice of powder composition and optimal processing parameters for laser coating on camshaft cams. *Distribution of chemical elements over the section of the part*, 1992, no. 4, pp. 57–71. (in Russ.) URL: <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
14. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatyev V. B.** Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 970–974. DOI 10.1070/qe2014v044n10abeh015412
15. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatev V. B.** High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 233–238. DOI 10.1070/qe2014v044n03abeh015320
16. **Fernando G. L.** Techniques for optimizing the process of laser deposition of wear-resistant coatings on the shafts of gas turbine plants. Cand. Tech. Sci. Diss. Moscow, 2017, 148 p. (in Russ.)
17. **Grigoryants A., Shiganov I., Misyurov A.** Technological processes of laser processing. Moscow, 2008, 663 p. (in Russ.)
18. **Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., Formanoir C. de, Witvrouw A., Van Hooreweder B.** On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Addit. Manuf.*, 2018, no. 23, pp. 161–169. DOI 10.1016/j.addma.2018.08.006
19. **Golyshev A., Orishich A.** Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks. *Met. Work. Mater. Sci.*, 2019, no. 21, pp. 82–92. DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92
20. **Solonenko O. P., Alkhimov A. P., Marusin V. V., Rakhimyanov H. M., Orishich A. M., Salimov R. A., Shchukin V. G., Kosarev V. F.** Low-temperature plasma. Novosibirsk, Nauka, 2000, vol. 18: High-energy processes of materials processing, 425 p. (in Russ.) ISBN 5-02-031528-1
21. **Rubenchik A. M., King W. E., Wu S. S.** Scaling laws for the additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, no. 257, pp. 234–243. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.034
22. **Golyshev A. A., Orishich A. M., Filippov A. A.** Similarity Laws in Laser Cladding of Cermet Coatings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 4, pp. 758–767. DOI 10.15372/pmtf20190421

Информация об авторе

Михаил Александрович Гулов, старший лаборант

Information about the Author

Mikhail A. Gulov, Senior Laboratory Assistant

Статья поступила в редакцию 13.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 13.05.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021