

Оригинальная статья

УДК 621.763, 621.791.92, 621. 762

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-63-72

ИССЛЕДОВАНИЕ НАСЛЕДСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ИСХОДНОЙ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ И ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА КАЧЕСТВО НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ СПЛАВА МАРКИ ЭП648

© 2025 г. В. О. Негодяев^{1, 2}, Р. Ю. Селеменев^{1, 2}, С. С. Жаткин², К. В. Никитин²,
В. А. Долинский¹

¹ПАО «ОДК-Кузнецов» (Россия, 443022, Самара, Заводское шоссе, 29)

²Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

Аннотация. Приведены результаты исследований химического и гранулометрического составов металлопорошковых композиций (МПК) марки ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) фракцией 40 – 150 мкм, полученных газовой атомизацией (МПК 1) и центробежным плазменным распылением (МПК 2), определение размера частиц порошков проводили методом сухого просеивания по ГОСТ 18318 – 94, текучесть порошков была проверена в соответствии с ГОСТ 20899 – 98 при помощи калиброванной воронки (прибор Холла), насыпная плотность – в соответствии с ГОСТ 19440 – 94. Согласно исследованиям обе партии композиций по своим параметрам соответствуют нормативной документации ТУ 78-265 – 2023. Проведена прямая лазерная наплавка при погонной энергии 60 и 70 Дж/мм на пластины из материала ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693) на установке технологической лазерного выращивания модели ИЛИСТ-XL с использованием исследуемых металлопорошковых композиций. Режимы наплавки подбирали согласно предыдущим исследованиям. В образцах, наплавленных из композиции 1 обнаружены множественные поры (0,06 – 0,08 мм), горячие кристаллизационные трещины протяженностью 0,3 – 0,6 мм, проходящие по границе столбчатых кристаллов. В образцах, наплавленных из композиции 2, дефектов не обнаружено. Исследованы основные параметры металлопорошковых композиций, влияющие на образование структурных дефектов наплавленного материала. Определены основные дефекты исходных металлопорошковых композиций, оказывающие отрицательное наследственное влияние на качество наплаваемого материала: наличие сателлитов (мелких частиц, соединенных с более крупными) и пор на поверхности частиц порошка, что непосредственно связано с методом их получения. Установлено влияние погонной энергии на остаточную пористость наплавленного материала.

Ключевые слова: прямая лазерная наплавка, металлопорошковая композиция, химический состав, насыпная плотность, микроструктура, поры

Для цитирования: Негодяев В.О., Селеменев Р.Ю., Жаткин С.С., Никитин К.В., Долинский В.А. Исследование основных параметров исходной металлопорошковой композиции и оценка влияния структурной наследственности на формируемую структуру наплавки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):63–72. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-63-72](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-63-72)

INVESTIGATION OF THE HEREDITARY EFFECT OF THE STRUCTURE OF THE INITIAL METAL-POWDER COMPOSITION AND THE PARAMETERS OF LASER SURFACING ON THE QUALITY OF DEPOSITED LAYERS OF EP648 ALLOY

© 2025 V. O. Negodyaev^{1,2}, R. Y. Selemenov^{1,2}, S. S. Zhatkin², K. V. Nikitin², V. A. Dolinskii¹

¹PJSC «UEC-Kuznetsov» (29 Zavodskoe highway, Samara, 443022, Russia)

²Samara State Technical University (244 Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443100, Russia)

Abstract. The results of studies of the chemical and granulometric composition of metal powder compositions of the EP648 brand (CrNi 50W0MoTiAlNb), fraction 40 – 150 microns, obtained by gas atomization (MPC 1) and centrifugal plasma spraying (MPC 2), the particle size of the powders was determined by dry sieving according to GOST 18318 – 94, the fluidity of the powders was checked in accordance with GOST 20899 – 98. using a calibrated funnel (Hall device), the bulk density is in accordance with GOST 19440 – 94. According to research, both batches of compositions comply with the regulatory documentation TU 78-265 – 2023 in their parameters. Direct laser surfacing was carried out at a running energy of 60 J/mm and 70 J/mm on plates made of CrNi68W0MoTiAlCo-VD (EP693) grade material on an ILIST-XL technological laser growing unit using the studied metal-powder compositions, the surfacing modes were selected according to previous studies. In the samples deposited from composition 1, multiple pores (0.06 – 0.08 mm) were found, as well as hot crystallization cracks 0.3 – 0.6 mm long, extending along the boundary of columnar crystals. No defects were found in the samples deposited from composition 2. The main parameters of metal-powder compositions affecting the formation of structural defects in the deposited material are investigated. The main defects of the initial metal-powder compositions that have a negative hereditary effect on the quality of the deposited material have been identified: the presence of satellites (small particles connected to larger ones) and pores on the surface of the powder particles, which is directly related to the method of their preparation. The effect of linear energy on the residual porosity of the deposited material has been established.

Keywords: direct laser deposition, metal-powder composite, chemical composition, bulk density, microstructure, porosity

For citation: Negodyaev V.O., Selemenov R.Y., Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Dolinskii V.A. Investigation of the main parameters of the initial metal-powder composition and assessment of the effect of structural heredity on the formed structure of the surfacing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):63–72. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-63-72](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-63-72)

Введение

Технологии порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов являются неотъемлемой частью двигателестроительного производства. В изготовлении узлов двигателя все больше находят применение жаропрочные сплавы на основе никеля благодаря отличному сочетанию высокой прочности, устойчивости к ползучести, коррозионной стойкости и стабильности микроstructures при повышенных рабочих температурах [1]. Конструкция современных газотурбинных двигателей состоит на 40 – 50 % из подобных сплавов [2]. Например, заготовки дисков из жаропрочных никелевых сплавов, полученные с использованием методов металлургии гранул, все более широко применяются в современных газотурбинных двигателях (ГТД), вытесняя штамповки, полученные многоступенчатой горячей деформацией слитка [3]. Внедрение порошковых аддитивных технологий дает предприятиям значительные преимущества по сравнению с традиционными методами производ-

ства: гибкость проектирования и производства; сокращение сроков производства и затрат на используемые материалы (увеличение КИМ, рециклинг металлопорошковой композиции (МПК)) [4].

Одним из преимуществ, позволяющих сократить затраты на ремонт изделий, является возможность использования порошковых аддитивных технологий при восстановлении деталей после эксплуатации [5; 6]. Прямая порошковая лазерная наплавка (ПЛН) является одной из разновидностей аддитивных производственных технологий, основанной на принципе прямого подвода энергии и материала (Direct Energy Deposition – DED) [7]. Технология ПЛН по сравнению с традиционными методами обладает преимуществом при восстановлении деталей ГТД из-за меньших остаточных напряжений, минимальных термических воздействий, более высоких повторяемости и точности [8 – 10]. Эти характеристики в значительной степени

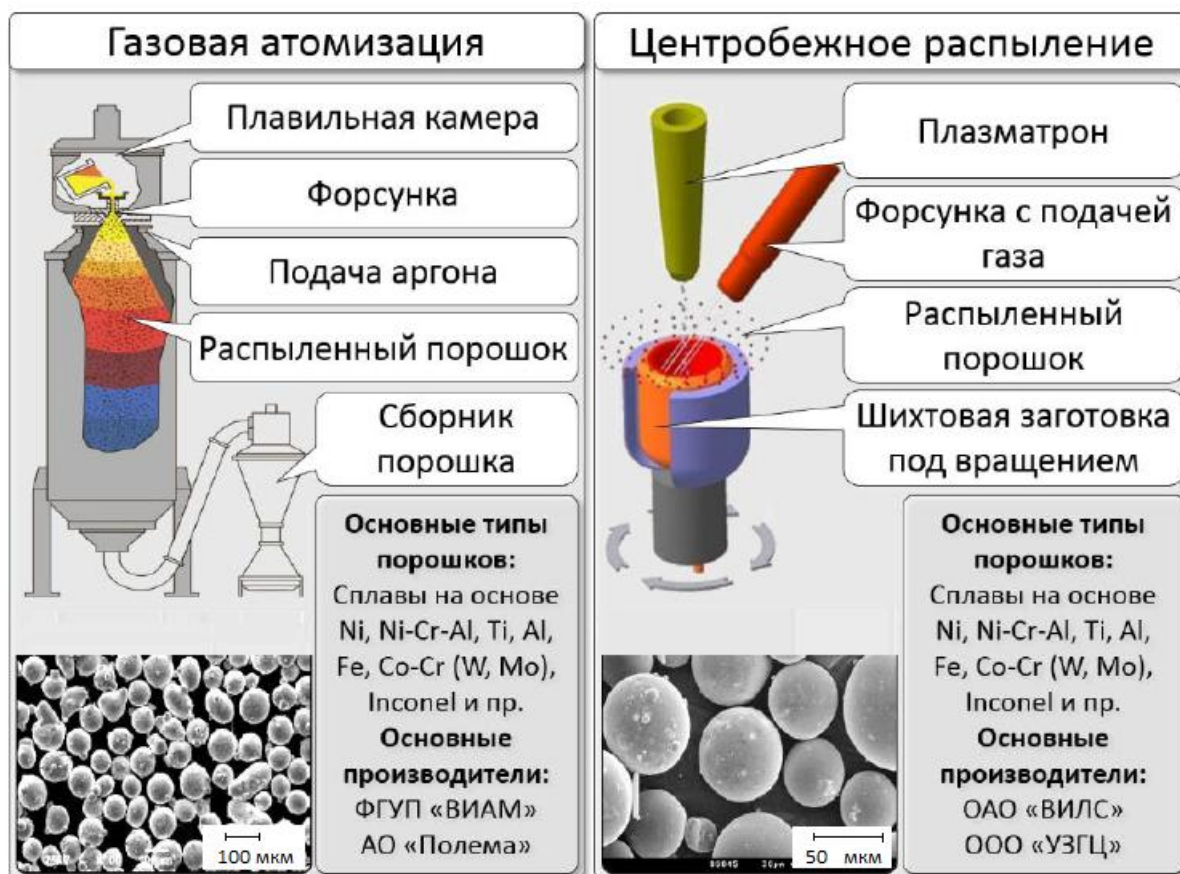


Рис. 1. Основные производители, методы и схемы производства порошковых материалов [14]

Fig. 1. Main manufacturers, methods and schemes for the production of powder materials [14]

способствовали широкому использованию ПЛН как при производстве деталей, так и при ремонте [11]. Этот процесс крайне привлекателен для ремонта важнейших деталей в авиастроении, ремонта оснастки, а также для внесения изменений в конфигурацию изделий везде, где применение традиционных технологий может привести к ухудшению свойств основного металла в результате воздействия высоких температур [12].

Процесс прямой лазерной наплавки осуществляется за счет подачи МПК струей транспортирующего газа с помощью наплавочной головки непосредственно в ванну расплава, создаваемую сфокусированным лазерным лучом [13; 14]. При этом качество МПК является критическим фактором, определяющим стабильность процесса, свойства наплавленного материала и итоговое качество детали.

Для оценки влияния МПК на формируемую структуру наплавки было подобрано два типа МПК марки ЭП648, полученных разными способами (рис. 1): газовая атомизация (образец 1); центробежное плазменное распыление (образец 2).

В отличие от газовой атомизации, где частицы формируются в результате столкновения струй газа с расплавом, в центробежном методе формирование происходит за счет контролируе-

мого отрыва капель под действием центробежных сил, что обеспечивает более высокое качество конечного продукта [15]. Метод центробежного распыления для получения жаропрочных никелевых сплавов является альтернативным методом газоструйного распыления, так как позволяет (как правило, для мелких частиц) уменьшить образование газовой (аргонной) пористости [16].

Центробежное плазменное распыление имеет ряд существенных преимуществ перед газовой атомизацией:

- частицы имеют более правильную сферическую форму [17];
- уменьшение газовой пористости;
- более узкий диапазон размеров частиц, что позволяет получать порошки с заданными характеристиками без дополнительной классификации;
- более высокая степень управления параметрами распыления (скорость вращения электрода, мощность плазматрона и др.).

Методика исследований

Были проведены исследования химического и гранулометрического составов исходных МПК марки ЭП648 (ХН50ВМТЮБ, фракция 40 – 150 мкм).

Химический состав МПК является одним из факторов, влияющих на трещинообразование в наплавленном материале [18], который определяется следующими методами:

- содержание никеля, марганца, железа определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре;
- содержание углерода и серы определяли инфракрасно-абсорбционным методом на газоанализаторе;
- содержание фосфора, кремния, алюминия, молибдена, ниобия, титана, вольфрама определяли фотоколориметрическим методом на фотометре;
- содержание хрома определяли титриметрическим методом.

Результаты определения химического состава представлены в табл. 1.

Содержание всех элементов находится в допустимых пределах для никелевого порошка ЭП648 по ТУ 78-265 – 2023.

Определение размера частиц порошков проводили методом сухого просеивания по ГОСТ 18318 – 94. Суть метода заключается в просеивании пробы порошка через набор сит, взвешивании отдельных фракций и расчете их процентного содержания [19] (табл. 2).

Параметр текучести характеризуется скоростью прохождения порошка через отверстие определенного диаметра. Рассматриваемый параметр напрямую влияет на скорость движения и равномерность потока газопорошковой смеси при прямой лазерной наплавке. Низкая текучесть может привести к заклиниванию порошка системе питателя и соответственно к остановке процесса наплавки [20]. Порошки с высокой насыпной плотностью обычно обладают лучшей текучестью, что облегчает их подачу в систему дозирования. Текучесть порошков была проверена в соответствии с ГОСТ 20899 – 98 при помощи калиброванной воронки (прибор Холла), насыпная плотность – в соответствии с ГОСТ 19440 – 94 (табл. 3).

Форма частиц всех порошков в основном сферическая (сферичность более 90 %), размер основной фракции частиц 40 – 150 мкм. Частицы дендритной, губчатой или игольчатой формы не обнаружены. На поверхности частиц МПК 1 присутствуют сателлиты (мелкие частицы, соединенные с более крупными) и «аморфный панцирь», представляющий собой корку толщиной несколько микрометров, наплавленный на сравнительно крупную гранулу [21]. В процессе газовой атомизации конус, образующийся при распылении струи металла, имеет достаточно компактные размеры, капли летят в одном направлении (вниз). В таких условиях мелкие частицы сталкиваются с крупными, что приводит к образованию сателлитов на поверхности частиц. При исследовании среза частиц в МПК 1 обнаружена внутренняя пористость (рис. 2, а), в МПК 2 сателлитов и пор не обнаружено (рис. 2, б).

Поверхность гранул имеет выраженную дендритную структуру без следов окисления или инородных включений (рис. 3).

Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки влияния структуры исходных параметров МПК были наплавлены образцы из вышеуказанных порошков. Наплавку проводили на пластины из материала марки ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693) на установке технологической лазерного выращивания (УТЛВ) модели ИЛИСТ-XL, режимы наплавки представлены в табл. 4.

Режимы наплавки подбирали исходя из результатов экспериментальных исследований.

Металлографическое исследование проводили в поперечном сечении образцов. В исследованных сечениях образцов 1.1, 1.2 обнаружены множественные поры (0,06 – 0,08 мм), а также горячие кристаллизационные трещины протяженностью 0,3 – 0,6 мм, проходящие по границе столбчатых кристаллов (рис. 4). В образцах 2.1, 2.2 дефектов не обнаружено (рис. 5).

Т а б л и ц а 1

Химический состав МПК ЭП648
Table 1. Chemical composition of MPC EP648

Образец	Содержание, мас. %, элементов											
	Ni	C	S	P	Mn	Cr	Si	Fe	Al	Ti	Mo	W
МПК 1	Основа	0,051	0,0014	0,0038	0,0061	33,23	0,122	0,445	0,899	0,973	3,19	4,87
МПК 2	Основа	0,047	0,0047	0,008	0,005	32,79	0,130	0,28	0,89	1,04	3,30	4,94
ТУ 78-265 – 2023	Основа	≤0,1	≤0,01	≤0,015	≤0,5	32,0 – 35,0	≤0,4	≤4,0	0,5 – 1,1	0,5 – 1,1	2,3 – 3,3	4,3 – 5,3

Т а б л и ц а 2

Размер основной фракции
Table 2. Size of the main fraction

Фракция	Фактически		Нормы по ТУ 78-265 – 2023
	МПК 1	МПК 2	
Плюсовая (остаток на сите 50 мкм), %	Отсутствует	Отсутствует	Не более 5
Минусовая (проход через сито 40 мкм), %	8	4	Не более 10

Т а б л и ц а 3

Текучесть и насыпная плотность порошков
Table 3. Flowability and bulk density of powders

Параметр	Значение параметра для		
	МПК 1	МПК 2	Нормы по ТУ 78-265 – 2023
Текучесть, с	18,3	15,1	Не более 27,5
Насыпная плотность, г/см ³	4,77	5,04	3,94 – 5,34

Исследование структуры наплавленных образцов показало, что при одинаковых режимах наплавки в структуре образцов, наплавленных из МПК 1, имеются поры и трещины.

На основании вышеуказанных исследований исходных параметров порошков можно выделить два основных отличия – наличие сателлитов и пор на поверхности частиц МПК 1, что непосредственно связано с методом ее получения.

Согласно исследованиям, наличие сателлитов не оказывает прямого влияния на формирование структуры и образование дефектов на конечных изделиях. Сателлиты могут оказывать косвенное влияние на распределение порошка, потери материала, засорение оборудования. В свою очередь рассматриваемые параметры напрямую влияют на стабильность процесса наплавки, а при неравномерном распределении лазерного излучения или

прерывистой подаче порошка могут образовываться горячие трещины, связанные с перегревом наплаваемого материала [22].

В свою очередь газовые поры в частицах оказывают отрицательное наследственное влияние на структуру наплавленной заготовки. Анализ размера дефектов и их количества на 1 см² показал, что при увеличении погонной энергии происходит уменьшение их суммарной площади, что вероятно обусловлено увеличением времени затвердевания ванны расплава. При увеличении погонной энергии уменьшается градиент температур между наплавленными валиками, соответственно ванна расплава находится более длительное время в жидком состоянии, что позволяет образовавшимся газам внутри расплавленного металла выходить на поверхность за счет эффекта автодегазации [23]. Для повышения качества наплавки

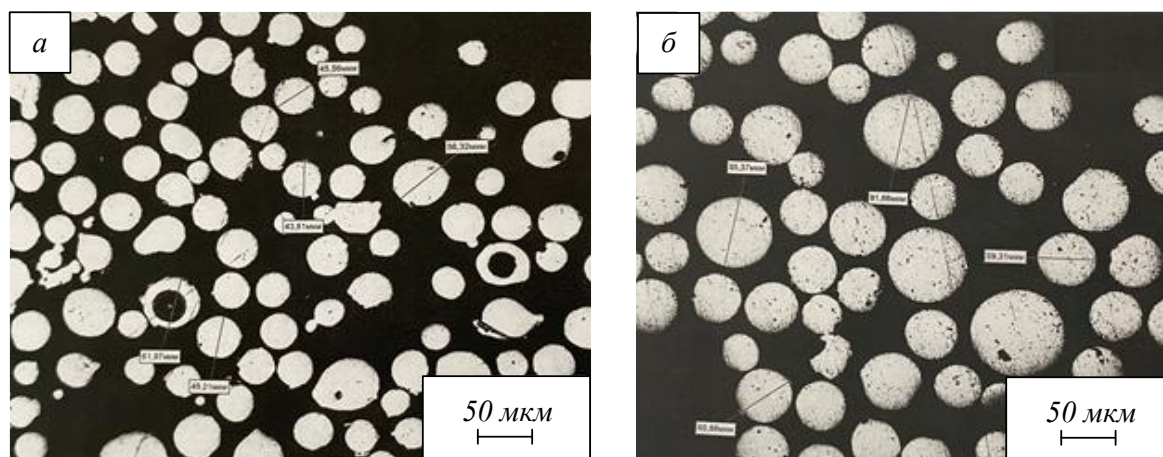


Рис. 2. Микроструктура поперечных срезов частиц порошков МПК 1 (а), МПК 2 (б)

Fig. 2. Microstructure of cross-sections of powder particles MPC 1 (a), MPC 2 (b)

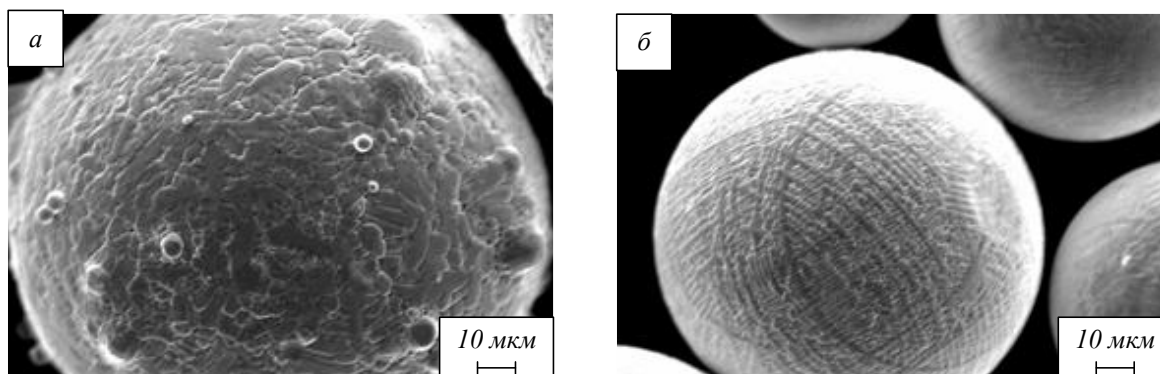


Рис. 3. Внешний вид частиц порошков МПК 1 (а), МПК 2 (б)
Fig. 3. Appearance of powder particles MPC 1 (a), MPC 2 (b)

необходима корректировка нормативных документов на получение МПК в части регламентирования пористости в структуре частиц порошка.

Выводы

Получение МПК методом газовой атомизации обуславливает формирование дефектов в виде сателлитов на поверхности и газовых поры в структуре частиц. В МПК, полученной методом центробежно-го распыления, указанные дефекты отсутствуют.

Сателлиты на поверхности частиц МПК, в основном, оказывают косвенное влияние на эффективность процесса наплавки в виде снижения стабильности подачи порошка.

Газовые поры в исходном материале отрицательно влияют на структуру наплавляемого материала. Установлено, что увеличение погонной энергии при наплавке способствует устранению указанного наследственного влияния. Указанный эффект объясняется повышением температуры и временем стояния жидкой ванны, что позволяет растворенным в расплаве газам экстрагироваться в окружающую атмосферу за счет эффекта автодегазации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jinguo Li, Lin Zhou, Nannan Lu, Wei Song, Jingjing Liang, Yizhou Zhou, Liming Lei, Lei Shi. Advances and challenges in energy field

assisted additive manufacturing nickel-based superalloys: Printability, microstructure, and performance. *Journal of Materials Science & Technology*. 2025;239:124–152.

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.03.010>

2. Dong Hang, Liu Yonghong, Shen Y., Wang X. Optimizing Machining Parameters of Compound Machining of Inconel718. *Procedia CIRP*. 2016;42:51–56.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.185>.
3. Мазалов И.С., Волков А.М., Ломберг Б.С., Чабина Е.Б. Микроструктура и механические свойства никелевого высокопрочного сплава ВЖ172, полученного методом горячего изостатического прессования гранул. *Труды ВИАМ*. 2022; (9(115)):15–27.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-9-15-27>
4. Yang Yongqiang, Jiang Renwu, Han Changjun, Chen Jiaqi, Li Haoran, Wang Yan, Tang Jinrong, Zhou Heng, Hu Weinan, Zheng Boyuan, Liu Zixin, Song Changhui, Wang Di. Frontiers in Laser Additive Manufacturing Technology. *Additive Manufacturing Frontiers*. 2024;3:200160.
<https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200160>

Т а б л и ц а 4

Режимы наплавки
Table 4. Surfacing modes

Параметр	Значение параметра для			
	МПК 1		МПК 2	
	Образец 1.1	Образец 1.2	Образец 2.1	Образец 2.2
Погонная энергия, Дж/мм	60	70	60	70
Диаметр лазерного пятна, мм	1,58			
Количество слоев, шт	3			
Расход транспортирующего газа, л/мин	7			
Расход газа в сопле, л/мин	16			
Расход порошка, г/мин	8,6			

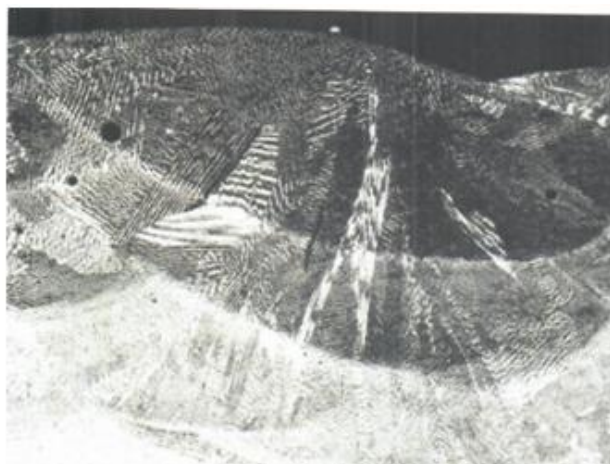
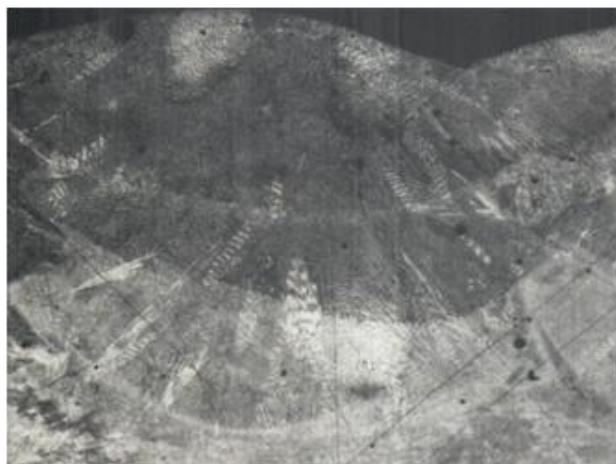


Рис. 4. Микроструктура образцов 1.1 (а) и 1.2 (б)
Fig. 4. Microstructure of samples 1.1 (a) and 1.2 (b)

5. Mateichyk Vasyl, Ahieiev Maksym, Mościszewski Jakub, Ustincev Serhii, Volodarets Mykyta, Kovbasenko Serhii. The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means. *Transportation Research Procedia*. 2023;74:592–599.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.186>.
6. Алишин М.И., Князев А.Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий. *Труды ВИАМ*. 2017;11(59): 37–45.
7. Gullipalli Ch., Thawari N., Gupta T.V.K. Humping defects in laser based direct metal deposition. *Materials Today: Proceedings*. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.169>
8. Jiang Pengfei, Zhang C.H., Zhang S., Zhang J.B., Chen J., Liu Y. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9:1702–11716.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074>.
9. Букаева А.З. Лазерная наплавка, как перспективный метод упрочнения и восстановления деталей современного машиностроения. *Вопросы науки и образования*. 2023;(3(168)):6–9.
10. Ribeiro Kandice, Mariani Fábio, Idogava Henrique, Silva Gustavo, Silveira Zilda, Lima Milton, Coelho Reginaldo. Evaluation of laser polishing as post-processing of Inconel 625 produced by Directed Energy Deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53:368–374.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.040>
11. Bingli Hua, Jiawei Yin, Bingzheng Wang, Yu Lu, Wenbin Zhan, Ke Huang a, Bin Han, Bo He, Qi Zhang. Microstructure evolution and performance improvement of 42CrMo steel repaired by an ultrasonic rolling assisted laser directed energy deposition IN718 superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1026:180385.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180385>

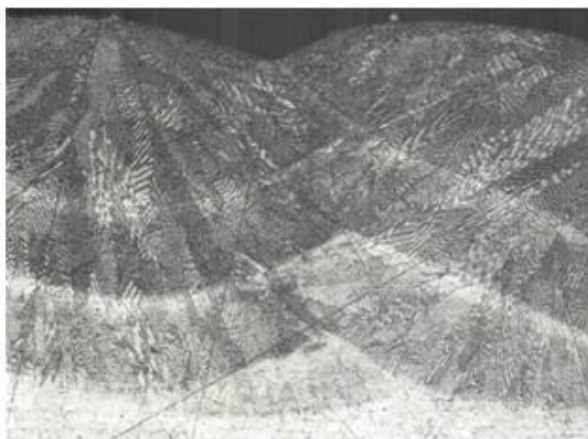


Рис. 5. Микроструктура образцов 2.1 (а) и 2.2 (б)
Fig. 5. Microstructure of samples 2.1 (a) and 2.2 (b)

12. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной lmd-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД. *Труды ВИАМ*. 2014;(3):20.
13. Piscopo Gabriele, Atzeni Eleonora, Biamino Sara, Iuliano Luca, Mazzucato Federico, Saboori Abdollah, Salmi Alessandro, Valente Anna. Analysis of single tracks of IN718 produced by laser powder directed energy deposition process. *Procedia CIRP*. 2022;112:340–345.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.006>
14. Vundru Chaitanya, Singh Ramesh, Yan Wenyi, Karagadde Shyamprasad. Effect of spreading of the melt pool on the deposition characteristics in laser directed energy deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53:407–416.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.043>.
15. Сапрыкин А.А., Кузьмин В.И., Сергачев Д.В., Дудихин Д.В. Применение плазменной обработки для сфероидизации металлических порошков. *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2017;4(2):16–20.
16. Ягодин М.Г. Исследование процесса и разработка технологии производства мелкодисперсных гранул жаропрочных никелевых сплавов для производства дисков газотурбинных двигателей: автореф. дис. канд. техн. наук. 2020:19.
17. Ильющенко А.Ф. Лецко А.И., Талако Т.Л. Получение металлических порошков для аддитивных технологий. *Порошковая металлургия: сборник научных трудов*. Минск; 2017;40:48–53.
18. Иванов А.С. Анализ порошков для лазерной наплавки при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021;(5(91)):125–129.
19. ГОСТ 18318-94. Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием. Москва: ИПК Изд-во стандартов. 1996:8.
20. Гропянов А.В., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. *Порошковые материалы: учебное пособие*. СПб: ВШТЭ СПбГУПТД; 2017:74.
21. Волков А.М., Шестакова А.А., Бакрадзе М.М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов. *Труды ВИАМ*. 2018;(11(71)):12–19.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19>
22. Морунов И.В., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Оценка дефектов реализации процесса лазерной наплавки в промышленных условиях. В кн.: *Уральская школа молодых металлургов: материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. Екатеринбург. 2017:21–26.
23. Khakimov A.M., Zhatkin S.S., Nikitin K.V. Investigation of the parameters of direct laser growing and subsequent processing to obtain a defect-free structure of a material made of a heat-resistant EP648 alloy. In: *Journal of Physics: Conference Series (Engineering and Materials Science)*. 2021:305–310.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042037>

REFERENCES

1. Li C., Zhou L., Lu N., Song V., Liang C., Zhou I., Lei L., Shi L. Achievements and problems in the field of energy, additive production of nickel-based superalloys: printability, microstructure and operational characteristics. *Journal of Materials Science & Technology*. 2025;(239):124–152.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.03.010>
2. Dong Hang, Liu Yonghong, Shen Y., Wang X. Optimizing Machining Parameters of Compound Machining of Inconel718. *Procedia CIRP*. 2016;42:51–56.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.185>.
3. Mazalov I.S., Volkov A.M., Lomberg B.S., Chabina E.B. Microstructure and mechanical properties of high-strength nickel alloy VZH172 obtained by hot isostatic pressing of granules. *Trudy VIAM*. 2022;(9(115)):15–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-9-15-27>
4. Yang Yongqiang, Jiang Renwu, Han Changjun, Chen Jiaqi, Li Haoran, Wang Yan, Tang Jinrong, Zhou Heng, Hu Weinan, Zheng Boyuan, Liu Zixin, Song Changhui, Wang Di. Frontiers in Laser Additive Manufacturing Technology. *Additive Manufacturing Frontiers*. 2024;3:200160.
<https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200160>
5. Mateichyk Vasyi, Ahieiev Maksym, Mościszewski Jakub, Ustincev Serhii, Volodarets Mykyta, Kovbasenko Serhii. The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means. *Transportation Research Procedia*. 2023;74:592–599.
6. Alishin M.I., Knyazev A.E. Production of metal powder compositions of high purity titanium

- alloys by induction gas atomization for additive technologies. *Trudy VIAM*. 2017;11(59):37–45. (In Russ.).
7. Gullipalli Ch. Thawari N., Gupta T.V.K. Humping defects in laser based direct metal deposition. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.169>
 8. Jiang Pengfei, Zhang C.H., Zhang S., Zhang J.B., Chen J., Liu Y. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9:1702–1716. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074>.
 9. Bukaeva, A.Z. Laser cladding as a promising method for strengthening and restoring modern mechanical engineering parts. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2023;(3(168)):6–9. (In Russ.).
 10. Ribeiro Kandice, Mariani Fábio, Idogava Henrique, Silva Gustavo, Silveira Zilda, Lima Milton, Coelho Reginaldo. Evaluation of laser polishing as post-processing of Inconel 625 produced by Directed Energy Deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53:368–374. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.040>
 11. Hua B., Yin J., Wang B., Lu Y., Zhan W., Huang K., Han B., He B., Zhang Q. Microstructure evolution and performance improvement of 42CrMo steel repaired by an ultrasonic rolling assisted laser directed energy deposition IN718 superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1026:180385. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180385>
 12. Nerush S.V., Evgenov A.G. Study of finely dispersed metal powder of heat-resistant alloy grade EP648-VI as applied to laser LMD surfacing, as well as assessment of the quality of surfacing of nickel-based powder material on turboprop working blades. *Trudy VIAM*. 2014;(3):20. (In Russ.).
 13. Piscopo Gabriele, Atzeni Eleonora, Biamino Sara, Iuliano Luca, Mazzucato Federico, Saboori Abdollah, Salmi Alessandro, Valente Anna. Analysis of single tracks of IN718 produced by laser powder directed energy deposition process. *Procedia CIRP*. 2022;112:340–345. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.006>
 14. Vundru Chaitanya, Singh Ramesh, Yan Wenyi, Karagadde Shyamprasad. Effect of spreading of the melt pool on the deposition characteristics in laser directed energy deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53:407–416. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.043>.
 15. Saprykin A.A., Kuzmin V.I., Sergachev D.V., Dudikhin D.V. Application of plasma treatment for spheroidization of metal powders. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*. 2017;4(2):16–20. (In Russ.).
 16. Yagodin M.G. Research of the process and development of technology for the production of finely dispersed granules of heat-resistant nickel alloys for the production of gas turbine engine disks: Abstract of Cand. Sci. (Eng.) thesis. 2020:19. (In Russ.).
 17. Ilyushchenko A.F. Letsko A.I., Talako T.L. Production of metal powders for additive technologies. In: *Powder metallurgy: collection of scientific papers*. Minsk; 2017;40:48–53. (In Russ.).
 18. Ivanov A.S. Analysis of powders for laser cladding in the restoration of agricultural machinery parts. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(5(91)):125–129. (In Russ.).
 19. GOST 18318 – 94. Metallic powders. Determination of particle size by dry sieving. Moscow: IPK Publishing House of Standards. 1996:8. (In Russ.).
 20. Gropyanyov A.V., Sitov N.N., Zhukova M.N. *Powder materials: a tutorial*. St. Petersburg: VShTE SPbGUPTD; 2017:74. (In Russ.).
 21. Volkov A.M. Comparison of granules obtained by gas atomization and centrifugal spraying of cast blanks from the point of view of their application for the manufacture of gas turbine engine disks from heat-resistant nickel alloys. *Trudy VIAM*. 2018;(11(71)):12–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19>
 22. Морунов И.В., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Оценка дефектов реализации процесса лазерной наплавки в промышленных условиях. В кн.: *Уральская школа молодых металлургов: материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. Екатеринбург. 2017:21–26.
 23. Khakimov A.M., Zhatkin S.S., Nikitin K.V. Investigation of the parameters of direct laser growing and subsequent processing to obtain a defect-free structure of a material made of a heat-resistant EP648 alloy. In: *Journal of Physics: Conference Series (Engineering and Materials Science)*. 2021:305–310. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042037>

Сведения об авторах

Вадим Олегович Негодяев, аспирант кафедры литейных и высокоэффективных технологий, Самарский государственный технический университет, начальник бюро сварки и пайки, ПАО «ОДК-Кузнецов»

E-mail: vadim031198@gmail.com

ORCID: 0009-0007-6537-0079

Роман Юрьевич Селеменев, аспирант кафедры литейных и высокоэффективных технологий, Самарский государственный технический университет, инженер-технолог 2 категории, ПАО «ОДК-Кузнецов»

E-mail: romanchev98@gmail.com

ORCID: 0009-0001-0155-350X

Сергей Сергеевич Жаткин, к.т.н., профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий, Самарский государственный технический университет

E-mail: sergejat@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5625-848X

Константин Владимирович Никитин, д.т.н., профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта, Самарский государственный технический университет

E-mail: kvn-6411@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7061-0144

Владимир Александрович Долинский, к.т.н., начальник управления перспективного развития, ПАО «ОДК-Кузнецов»

E-mail: dolinskiy.vladimir@gmail.com

Information about the authors:

Vadim O. Negodyaev, Postgraduate student of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies, Samara State Technical University, Head of the Welding and Soldering Bureau, PJSC UEC-Kuznetsov

E-mail: vadim031198@gmail.com

ORCID: 0009-0007-6537-0079

Roman Y. Selemenov, postgraduate student of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies,

Samara State Technical University, *Technological Engineer of the 2nd category*, PJSC UEC-Kuznetsov

E-mail: romanchev98@gmail.com

ORCID: 0009-0001-0155-350X

Sergey S. Zhatkin, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Foundry and High-Performance Technologies, Samara State Technical University.

E-mail: sergejat@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5625-848X

Konstantin V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Metallurgy and Transport, Samara State Technical University.

E-mail: kvn-6411@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7061-0144

Vladimir A. Dolinskiy, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Advanced Development, PJSC UEC-Kuznetsov

E-mail: dolinskiy.vladimir@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.07.2025

После доработки 18.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

Received 10.07.2025

Revised 18.08.2025

Accepted 25.08.2025