



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-57-62>
УДК 621.373.826: 621.791.92: 621.762

Поступила 20.03.2024
Received 20.03.2024

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО ЖЕЛЕЗОХРОМОНИКЕЛЕВОГО (INCONEL 718) СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОЙ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ

Д. А. БАРАНОВ, Е. Ю. ЩЕДРИН, ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Россия, Заводское шоссе, 29.

E-mail: d.baranov91@mail.ru

С. С. ЖАТКИН, К. В. НИКИТИН, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: kvn-6411@mail.ru

В данной работе проведены исследования структуры, химического анализа и прочностных свойств наплавленного металла двух видов металлопорошковых композиций, а именно исходный порошок (первичный) и остатки порошка (вторичный) жаропрочного железохромоникелевого сплава Inconel 718.

На основании полученных результатов определены причины образования мелкоячеисто-дендритной разнонаправленной структуры игольчатого и дендритного строения; снижения жаростойкости наплавленного материала из вторичного порошка жаропрочного железохромоникелевого сплава Inconel 718 при повышенных температурах.

Ключевые слова. Технология прямого лазерного выращивания, металлопорошковая композиция, порошок, частица, жаропрочные сплавы, структура.

Для цитирования. Баранов, Д. А. Анализ структуры и прочностных свойств жаропрочного железохромоникелевого (Inconel 718) сплава, полученного с использованием вторичной металлопорошковой композиции при прямом лазерном выращивании / Д. А. Баранов, Е. Ю. Щедрин, С. С. Жаткин, К. В. Никитин // Литье и металлургия. 2024. № 2. С. 57–62. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-57-62>.

ANALYSIS OF STRUCTURE AND STRENGTH PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT IRON-CHROMIUM-NICKEL (INCONEL 718) ALLOY OBTAINED USING SECONDARY METAL POWDER COMPOSITION IN DIRECT LASER DEPOSITION

D. A. BARANOV, E. Yu. SHCHEDRIN, PJSC "UEC-Kuznetsov",

Samara, Russia, 29, Zavodskoe Shosse. E-mail: d.baranov91@mail.ru

S. S. ZHATKIN, K. V. NIKITIN, Samara State Technical University,

Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya str. E-mail: kvn-6411@mail.ru

This work presents investigations on the structure, chemical analysis, and strength properties of deposited metal using two types of metal powder compositions, namely the primary powder and the residuals (secondary) of the heat-resistant iron-chromium-nickel alloy Inconel 718.

Based on the obtained results, the causes of the formation of a fine-cellular-dendritic directional structure with needle and dendritic morphology were determined, as well as the decrease in heat resistance of the deposited material from the secondary powder of the heat-resistant iron-chromium-nickel alloy Inconel 718 at elevated temperatures.

Keywords. Direct laser deposition technology, metal powder composition, powder, particle, heat-resistant alloys, structure.

For citation. Baranov D. A., Shchedrin E. Yu., Zhatkin S. S., Nikitin K. V. Analysis of structure and strength properties of heat-resistant iron-chromium-nickel (Inconel 718) alloy obtained using secondary metal powder composition in direct laser deposition. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 2, pp. 57–62. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-57-62>.

Введение

Жаропрочные железохромоникелевые сплавы нашли широкое применение в производстве деталей и узлов, работающих длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок газотурбинных двигателей (установок) [1]. Тенденцией развития конструкции ГТД является повышение

температуры газа и эксплуатационных нагрузок, поэтому в машиностроении широко применяют сложнелегированные сплавы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, а именно жаропрочностью и жаростойкостью [2].

Одной из основных проблем в производстве крупногабаритных корпусных деталей ГТД традиционными способами является разнотекстурность и анизотропия свойств материалов, получаемых в результате применения различных технологий изготовления, например, литья, проката и сварки [3].

В связи с этим все большую актуальность приобретают задачи, связанные с внедрением аддитивных процессов в производство крупногабаритных деталей с обеспечением требуемой структуры и свойств.

Аддитивное производство имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами изготовления, в том числе значительное сокращение сроков освоения, снижение затрат на жизненный цикл и повышение производительности [4].

Одним из основных видов расходных материалов при создании металлматричных изделий аддитивными методами являются порошки на основе различных сплавов [5, 7]. Порошки на основе никеля обладают высокой коррозионной стойкостью, кроме того, при рациональном легировании такими элементами, как Cr, В, Si, сплавы обладают высокой твердостью и износостойкостью [6, 7]. При умеренном легировании карбидообразующими элементами и упрочняющими частицами устойчивость к ударным нагрузкам снижается, однако при сохранении высокой пластичности обеспечивается увеличение твердости. Технологичность материала на основе никеля средняя из-за высокой склонности к трещинообразованию [8, 9]. В процессе прямого лазерного выращивания используют порошки различных металлов, грануляции и формы. Ко всем параметрам предъявляются жесткие технические требования, поскольку качество исходного порошкового материала существенно влияет на процесс формирования заготовки при прямом лазерном выращивании [10–12].

В процессе коаксиальной подачи порошка транспортирующим газом в зону наплавки до 25% частиц не попадают в ванну расплава. Учитывая предъявляемые требования по обеспечению запаса прочности к деталям ГТД, повторное использования порошка не представляется возможным.

Цель данной работы – исследование структурообразования сплава с повторным использованием металлпорошковой композиции из жаропрочного железохромоникелевого сплава Inconel 718 при прямом лазерном выращивании.

Материалы и методика экспериментов

В качестве материала исследования выбран жаропрочный железохромоникелевый (Inconel 718) сплав (табл. 1). Металлопорошковая композиция (МПК) была получена методом газовой атомизации. В экспериментах использовали МПК фракцией 40–150 мкм, с текучестью не более 27,5 с и насыпной плотностью от 3,94 до 5,36 г/см³.

Таблица 1. Химический состав (%) металлопорошковой композиции сплава Inconel 718 (ТУ 78–265–2023)

Основные элементы							Примеси, не более							
Cr	Ni	Fe	Al	Ti	Mo	Nb	C	S	P	Mn	Si	B	Ce	Ze
17–21	Основа	Остаток	0,2–0,8	0,65–1,15	2,8–3,23	4,75–5,5	0,1	0,015	0,015	0,35	0,35	0,006	0,1	0,02

Для сравнения данных проводили анализ двух видов МПК: исходный порошок (первичный) и остатки порошка, образовавшиеся в процессе прямого лазерного выращивания (вторичный), а именно частицы, не попавшие в зону наплавки при коаксиальной подаче порошка транспортирующим газом в струю [12–14].

Вторичная МПК непосредственно перед повторным использованием проходила просеивание через вибросито с ячейкой 40 и 140 мкм.

Выращивание образцов (заготовок) размером 200×10×100 мм (Д×Ш×В) проводили на стальной подложке (Ст3) толщиной 10 мм на установке технологического лазерного выращивания (ИЛиСТ СПбГМТУ, Россия, г. Санкт-Петербург) в соответствии с ранее отработанными режимами [15, 16] (табл. 2).

Определение элементного состава выращенного металла проводили спектральным и химическим методами, а исследование структуры выращенного металла – на растровом электронном микроскопе.

Все исследования выполняли в лабораториях ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара). Полученные результаты являются продуктом деятельности предприятия.

Таблица 2. Режимы выращивания образцов

Параметр выращивания	Режим
Мощность лазерного излучения P , кВт	2,0
Диаметр пятна лазерного излучения, мм	2,5
Скорость наплавки $V_{\text{н}}$, мм/с	25
Ширина валика l_1 , мм	2,5
Шаг слоя h , мм	0,8
Ширина трека l_2 , мм	1,67
Расход порошка, г/мин	7,7
Расход транспортирующего газа, л/мин	5
Расход защитного газа в сопле, л/мин	12

Результаты экспериментов и их обсуждение

Вне зависимости от типа материала (первичная или вторичная МПК) жаропрочного железохромоникелевого сплава в процессе прямого лазерного выращивания (ПЛВ) происходит формирование мелкоячеисто-дендритной разнонаправленной структуры аустенитного состава [14, 17]. При этом в продольном сечении (относительно направления выращивания) наблюдается формирование структуры игольчатого строения с хаотичным направлением роста кристаллов, в то время как в поперечном сечении происходит формирование столбчатых дендритов, что обусловлено направленностью кристаллизации ванны расплава при воздействии лазерного излучения [12, 19].

В процессе кристаллизации рост дендритов протекает сразу в нескольких направлениях: основной фронт кристаллизации движется вслед за фокусным пятном лазера с постоянной скоростью, что обеспечивает теплоотвод вдоль оси движения трека; теплоотвод в предыдущий слой сплавленного металла при сильном изгибе профиля оплавленной лунки провоцирует зарождение и рост субзерен в других направлениях [18–21] перпендикулярно теплоотводящей поверхности, а также от зоны сплавления к центру наплавленного валика [22, 23].

Проведенные исследования элементного состава образцов, полученных из первичной и вторичной МПК, свидетельствуют об их идентичности по составу и объемному содержанию химических элементов и соответствуют техническим условиям МПК (табл. 3). Таким образом, под действием термического воздействия перераспределение легирующих элементов в частицах порошка в процессе первичного его использования не протекает.

Таблица 3. Химический состав (%) сплава Inconel 718, полученного при ПЛВ

Тип порошка	Основные элементы								Примеси, не более				
	Cr	Ni	Fe	Al	Ti	Mo	Nb	W	C	S	P	Mn	Si
Первичный	18,2	48,69	20,31	0,46	0,9	2,95	5,58	0,2	0,06	0,004	0,008	0,14	0,16
Вторичный	18,3	48,43	20,45	0,46	0,9	2,93	5,56	0,2	0,06	0,005	0,013	0,13	0,17
По ТУ	17–21	Основа	Остаток	0,2–0,8	0,65–1,15	2,8–3,23	4,75–5,5	2,5–3,5	0,1	0,015	0,015	0,35	0,35

Полученные при комнатной температуре прочностные свойства материала, выращенного из вторичного порошка Inconel 718, сопоставимы со свойствами материала из первичного (табл. 4), что обусловлено формированием их идентичной структуры (см. рисунок) и химического состава (см. табл. 3).

Таблица 4. Физико-механические свойства сплава Inconel 718 при комнатной температуре

Материал	Тип порошка	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, МПа	HRC
Inconel 718	Первичный	<u>575</u> 592	<u>792</u> 878	<u>22,2</u> 24,8	<u>19,0</u> 20,6	<u>54,5</u> 76,3	<u>26,3</u> 27,9
	Вторичный	<u>570</u> 588	<u>862</u> 881	<u>22,0</u> 24,4	<u>17,0</u> 27,5	<u>53,9</u> 75,5	<u>25,5</u> 27,0

Однако при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность образцы, полученные из вторичной МПК, отстояли в 1,8 раза меньше времени, чем из первичной (см. рисунок). Причиной этого,

вероятно, является растворение γ' -фазы, образовавшейся на предыдущих технологических этапах (газовая атомизация МПК) [24, 25], при нагреве выше сольвуса за счет дополнительного воздействия отраженного лазерного излучения и плазмы на нерасплавленные частицы порошка, находящиеся в струе при транспортировке их непосредственно в зону обработки.

Также следует учесть, что ограниченная стойкость МПК жаропрочных сплавов к переплаву обусловлена особенностями их химического состава и структуры. Высокий уровень легирования элементами с малым коэффициентом распределения (Ti и Al) приводит при кристаллизации к образованию легкоплавких прослоек по зонам срастания дендритов, что обуславливает потенциальную склонность наплавленного металла к образованию дефектов кристаллизационно-ликвационной природы и необратимому снижению жаропрочности [14, 22].

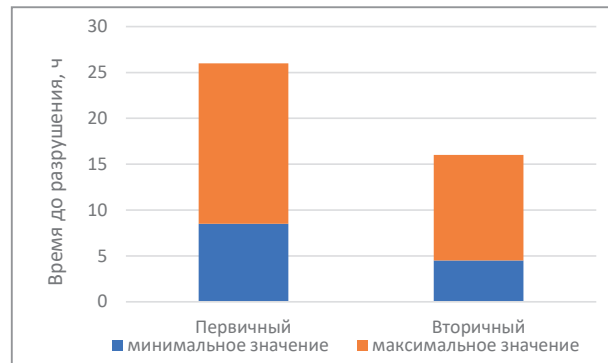


Диаграмма длительной прочности синтезированного сплава Inconel 718 при температуре 800 °C и напряжением 245 МПа

Повышение жаропрочности сплава, т. е. увеличение стойкости при повышенных температурах, обеспечивается в результате термической обработки (старение) с образованием пленки γ' -фазы по границам зерен [14].

Выводы

1. Исследования структуры и химического состава образцов из вторичной металлопорошковой композиции сплава Inconel 718 показали, что термическое воздействие не влияет на перераспределение легирующих элементов в частицах порошка в процессе первичного использования МПК.

2. В первичной структуре выращенных образцов независимо от типа МПК (первичная или вторичная) формируется мелкочастистая дендритная разнонаправленная структура аустенитного состава. При этом в поперечном сечении наблюдается формирование игольчатого строения с хаотичным направлением роста кристаллов, а в продольном сечении – формирование столбчатых дендритов.

3. Прочностной анализ образцов из вторичной металлопорошковой композиции свидетельствует о том, что термическое воздействие при первичном использовании порошка не оказывает последующего влияния на механические свойства материала из вторичной МПК при комнатных температурах. Однако при этом стойкость жаропрочного железохромоникелевого сплава Inconel 718 при повышенных температурах уменьшается, что, вероятно, обусловлено растворением γ' -фазы при нагреве выше сольвуса, образовавшейся на предыдущих технологических этапах (газовая атомизация МПК). Выявленную особенность необходимо учитывать при использовании вторичной МПК в процессах прямого лазерного плавления для деталей ответственного назначения, работающих при повышенных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов, Д. А. Структура и свойства жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ХН68ВМТЮК при лазерной сварке деталей ГТД: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.17 / Д. А. Баранов. – Самара, 2021. – 150 с.
2. Ломбер, Б. С. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД / Б. С. Ломбер, С. А. Моисеев // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2007. – № 6. – С. 2–5.
3. Kovchik, A. Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 316L stainless product / A. Kovchik, K. Babkin, A. Vildanov // Journal of Physics: Conference Series (10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications”) (BTLA 2021), St. Petersburg, 20–22 September, 2021). – St. Petersburg, 2021. – P. 1–7.
4. Computer simulation of hydrodynamic and thermal processes in DLD technology / G. A. Turichin [et al.]. – Materials. – 2021. – № 14. – P. 2–9.
5. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие для вузов / М. А. Зленко. – СПб.: Политехн. ун-т, 2013. – С. 120–143.

6. Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloy / H. M. Moosavy [et al.] // *Optics and Laser Technology*. – 2014. – № 57. – P. 9–12.
7. **Щербakov, А. В.** Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций / А. В. Щербakov. – М.: МЭИ, 2022. – 676 с.
8. Characterization of Ni-Cr-Mo Alloy phase structures under DLD process / R. M. Rashkovets [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2077 (10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021) St. Peterburg, Russia, 20–22 September 2021). – St. Peterburg, 2021. – P. 5–7.
9. Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welding Ni-based superalloy / G. Ma [et al.] // *Optics and Laser in Engineering*. – 2015. – № 72. – P. 39–46.
10. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small trial sample / A. Vildanov [et al.] // *Procedia CIRP* 94. (11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7–10, 2020). – 2020. – P. 310–313.
11. Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition / V. Promakhov [et al.] // *Metals*. – 2019. – № 9. – P. 141–143.
12. **Khakimov, A. M.** 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 / A. M. Khakimov, S. S. Zhatkin, K. V. Nikitin // *Journal of Physics: Conference Series (Engineering and Materials Science)*. – 2021. – P. 305–310.
13. Research of effect of the power material quality in the structure formation of the DLD Inconel 718 samples / S. S. Silchonok [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2019. – № 822. – P. 404–409.
14. **Григорьянц, А. Г.** Лазерные аддитивные технологии в машиностроении / А. Г. Григорьянц. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2018. – С. 135–140.
15. **Балякин, А. В.** Влияние термической обработки на структуру и свойства заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, полученных по аддитивным технологиям / А. В. Балякин, Е. А. Носова, М. А. Олейник // *Вестник Московского авиационного института*. – 2023. – № 3. – С. 209–219.
16. Исследование структуры жаропрочных сплавов при прямом лазерном выращивании / Д. А. Баранов [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 3. – С. 16–23.
17. **Мисюров, А. И.** Формирование структуры при восстановлении деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе лазерным импульсно-периодическим излучением / А. И. Мисюров // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 1. – С. 22–26.
18. **Григорьянц, А. Г.** Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. – 662 с.
19. **Baranov, D. A.** Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMTYuBR / D. A. Baranov, S. S. Zhatkin, A. A. Parkin // *Defect and Diffusion Forum*. – 2021. – Vol. 410. – P. 108–114.
20. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками / Е. Н. Каблов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2016. – № 9. – С. 62–75.
21. Study on the influence of different energy sources on the structure and mechanical properties of a welded joint from an EP693 nickel alloy / D. A. Baranov [et al.] // *Russian Journal of Non-Ferrous Metal*. – 2022. – Vol. 63. – P. 7–62.
22. HN45VMTYuBR alloy: impact beam welding modes on microstructure and distribution of alloying elements in the seam / D. A. Baranov [et al.] // *Solid State Phenomena*. – 2018. – P. 530–535.
23. The strength of Inconel 625, manufactured by the method of direct laser deposition under sub-microsecond load duration / V. Promakhov [et al.] // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 5–13.
24. **Волков, А. М.** Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного сплава / А. М. Волков, Г. С. Гарибов // *Технология легких сплавов*. – 2013. – № 2. – С. 51–55.
25. Исследование структуры сварных швов, сформированных лазерной сваркой жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД) при производстве деталей и узлов ГТД / Д. А. Баранов [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2016. – № 18. – С. 148–151.

REFERENCES

1. **Baranov D. A.** *Struktura i svojstva zharoprochnogo dispersionno-tverdeyushchego nikelovogo splava HN68VMTYUK pri lazernoj svarke detalej GTD* [Structure and properties of heat-resistant-dispersion-hardening nickel alloy HN68VMTYUK for laser welding of parts GTE]: dis. candidate of Technical Sciences 2.6.17. Samara, 2021, 150 p.
2. **Lomber B. S., Moiseev S. A.** Zharoprochnye i deformiruemye splavy dlya sovremennyh i perspektivnyh GTD [Heat-resistant and deformable alloys for modern and promising gas turbine engines]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik = All materials. Encyclopedic reference book*, 2007, no. 6, pp. 2–5.
3. **Kovchik A., Babkin K., Vildanov A.** Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 316L stainless product. *Journal of Physics: Conference Series* (10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021), St. Petersburg, 20–22 September, 2021). St. Petersburg, 2021, pp. 1–7.
4. **Turichin G. A., Valdaytseva E. A., Stankevich S. L., Udin I. N.** Computer simulation of hydrodynamic and thermal processes in DLD technology. *Materials*, 2021, 14, pp. 2–9.
5. **Zlenko M. A.** *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: ucheb. posobie dlya vuzov* [Additive technologies in mechanical engineering: textbook for universities]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2013, pp. 120–143.
6. **Moosavy H. M., Aboutaleb M. R., Seyedein S. H., Goodarzi M., Khodabakhshi M., Mapelli C., Barella S.** Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloy. *Optics and Laser Technology*, 2014, no. 57, pp. 9–12.
7. **Shcherbakov A. V.** *Additivnye tekhnologii v proizvodstve metallicheskih konstrukcij* [Additive technologies in the production of metal structures]. Moscow, MEI Publ., 2022, 676 p.
8. **Rashkovets R. M., Nikulina A. A., Klimova-Korsmik O. G., Smirnov A. I., Veselov S. V., Kislov N. G.** Characterization of Ni-Cr-Mo Alloy phase structures under DLD process. *Journal of Physics: Conference Series*. 2077 (10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021) St. Peterburg, 20–22 September 2021). St. Peterburg, 2021, pp. 5–7.

9. **Ma G., Wu D., Niu F., Zou H.** Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welding Ni-based superalloy. *Optics and Laser in Engineering*, 2015, iss. 72, pp. 39–46.
10. **Vildanov A., Babkin K., Kovchik A., Arkhipov A., Gushchina M.** Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small trial sample. *Procedia CIRP 94* (11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7–10, 2020), 2020, pp. 310–313.
11. **Promakhov V., Zhukov A., Ziatdinov M., Zhukov I., Schulz N., Kovalchuk S., Dubkova Y., Korsmik R., Klimova-Korsmik O., Turichin G., Perminov A.** Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition. *Metals*, 2019, vol. 9, iss. 2, pp. 141–143.
12. **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. *Journal of Physics: Conference Series (Engineering and Materials Science)*, 2021, pp. 305–310.
13. **Silchonok S. S., Zadykyam G. G., Zotov O. G., Morozova I.** Research of effect of the power material quality in the structure formation of the DLD Inconel 718 samples. *Key Engineering Materials*, 2019, no. 822, pp. 404–409.
14. **Grigoryants A. G.** *Lazernye additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, MGTU im. Baumana Publ., 2018, pp. 135–140.
15. **Balyakin A. V., Nosova E. A., Oleinik M. A.** Vliyanie termicheskoy obrabotki na strukturu i svojstva zagotovok iz zharoprochnykh nikelovykh splavov, poluchennykh po additivnym tekhnologiyam [The effect of heat treatment on the structure and properties of workpieces made of heat-resistant nickel alloys obtained by additive technology]. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta = Bulletin of the Moscow Aviation Institute*, 2023, no. 3, pp. 209–219.
16. **Baranov D. A., Shchedrin E. Yu., Zhatkin S. S., Nikitin K. V.** Issledovanie struktury zharoprochnykh splavov pri pryamom lazernom vyrashchivanii [Investigation of the structure of heat-resistant alloys under direct laser cultivation]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 16–23.
17. **Misyurov A. I.** Formirovanie struktury pri vosstanovlenii detalej iz zharoprochnykh splavov na nikelovoy osnove lazernym impul'sno-periodicheskom izluchenii [Structure formation during the restoration of parts from heat-resistant nickel-based alloys by laser pulse-periodic training]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Mechanical Engineering Technology*, 2011, no. 14, pp. 22–26.
18. **Grigoryants A. G.** *Tekhnologicheskie processy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MGTU im. Baumana Publ., 2008, 662 p.
19. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** Analysis of defects at laser welding of heat-resistant alloy KhN45VMTYuBR. *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 410, pp. 108–114.
20. **Kablov E. N., Yevgenov E. N., Ospennikova O. G., Semenov B. I., Semenov A. B., Korolev V. A.** Metal-powder composites of heat-resistant alloy EP648 manufactured by FSUE "VIAM" SSC RF in technologies of selective laser fusion, laser gas-powder surfacing and high-precision casting of polymers coated with metal powders. *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2016, no. 9 (678), pp. 62–75.
21. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Nikitin K. V. [et al.]**. Study on the influence of different energy sources on the structure and mechanical properties of a welded joint from an EP693 nickel alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metal*, 2022, vol. 63, pp. 7–62.
22. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A. [et al.]**. HN45VMTYuBR alloy: impact beam welding modes on microstructure and distribution of alloying elements in the seam. *Solid State Phenomena*, 2018, pp. 530–535.
23. **Promakhov V., Schulz M., Vorozhtsov A. [et al.]**. The strength of Inconel 625, manufactured by the method of direct laser deposition under sub-microsecond load duration. *Metals*, 2021, vol. 11, pp. 5–13.
24. **Volkov A. M., Garibov G. S.** Vliyanie temperaturnykh rezhimov zakalki na strukturu i mekhanicheskie svojstva diskovogo granuliruemogo zharoprochnogo splava [The effect of temperature regimes quenching on the structure and mechanical properties of a disk granulated heat-resistant alloy]. *Light Alloys Technology*, 2013, no. 2, pp. 51–55.
25. **Baranov D. A., Klimov V. G., Parkin A. A., Zhatkin S. S., Popov A. S.** Issledovanie struktury svarnykh shvov, sformirovannykh lazernoj svarkoj zharoprochnogo splava HN68VMTYuK-VD (EP693-ED) pri proizvodstve detalej i uzlov GTD [Investigation of the structure of welds formed by laser welding of heat-resistant alloy HN68VMTYuK-VD (EP693-VD) in the production of parts and assemblies of the GTE]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 18, pp. 148–151.