



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>
УДК 621.373.826: 621.791.92: 621.762

Поступила 15.08.2023
Received 15.08.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ

Д. А. БАРАНОВ, Е. Ю. ЩЕДРИН, ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Россия
С. С. ЖАТКИН, К. В. НИКИТИН, Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Россия. E-mail: kvn-6411@mail.ru

В данной работе проведены исследования структуры исходных материалов (металлопорошковой композиции) жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; сферичности, текучести и насыпной плотности частиц порошков из жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; элементного (химического) состава частиц порошка жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; влияния технологических и энергетических параметров лазерного излучения на дефектообразование (пор) в изготовленных (выращенных) заготовках (образцах); структурообразования изготовленных образцов из жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159.

На основании полученных результатов определены причины образования сателлитов на поверхности частиц металлопорошковой композиции из жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; причины образования «слоистой» и мелкодендритной разнонаправленной структуры в изготовленных (выращенных) заготовках; закономерности влияния скорости кристаллизации ванны расплава на суммарную площадь дефектов (пор) в металле.

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

Для цитирования. Баранов, Д. А. Исследование структуры жаропрочных сплавов при прямом лазерном выращивании / Д. А. Баранов, Е. Ю. Щедрин, С. С. Жаткин, К. В. Никитин // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 16–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS UNDER DIRECT LASER CULTIVATION

D. A. BARANOV, E. Yu. SHCHEDRIN, JSC "UEC-Kuznetsov", Samara, Russia
S. S. ZHATKIN, K. V. NIKITIN, Samara State Technical University, Samara, Russia. E-mail: kvn-6411@mail.ru

In this work, the following studies were carried out: the structure of the starting materials (metal-powder composition) of heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; sphericity, fluidity and bulk density of powder particles from heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; elemental (chemical) composition of powder particles of heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; the effect of technological and energy parameters of laser radiation on defect formation (pore) in manufactured (grown) blanks (samples); structure formation of manufactured samples from heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159.

Based on the results obtained, the following were determined: the causes of the formation of satellites on the particle surface of metal-powder compositions made of heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; the causes of the formation of a "layered" and fine-grained multidirectional structure of manufactured (grown) blanks; the regularities of the effect of the crystallization rate of the melt bath on the total area of defects (pores) in the metal.

Keywords. Technology of direct laser cultivation, metal powder composition, powder, particle, heat-resistant nickel spoaves, defect formation, pore, structure.

For citation. Baranov D. A., Shchedrin E. Yu, Zhatkin S. S., Nikitin K. V. Investigation of the structure of heat-resistant alloys under direct laser cultivation. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 16–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы нашли широкое применение в производстве деталей и узлов, работающих длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок газотурбинных двигателей (установок). Газотурбинный двигатель (ГТД) на сегодняшний день – одно из самых технически сложных изделий современного машиностроения [1]. Тенденцией развития конструкции ГТД является повышение температуры газа и эксплуатационных нагрузок, поэтому в машиностроении широко применяют сложнлегированные сплавы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, а именно жаропрочностью и жаростойкостью [2].

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

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]. Технологии аддитивного производства принципиально изменили процессы проектирования, конструирования и производства изделий [5]. Это направление признано приоритетным в области развития материалов и технологии во всем мире [6]. Во многих отраслях, например в космической отрасли, альтернативы аддитивным технологиям не видно уже сегодня [7].

Одним из основных видов расходных материалов при создании металломатричных изделий аддитивными методами являются порошки на основе различных сплавов. Для понимания сущности процессов формирования изделий из порошков с использованием в качестве источника энергии лазерного излучения необходимо знать их свойства и особенности получения [8, 12]. В методах послойного спекания и 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 [9, 10].

Порошки на основе никеля проявляют высокую коррозионную стойкость, кроме того, при рациональном легировании такими элементами, как Cr, В, Si, сплавы обладают высокой твердостью и износостойкостью [11, 12]. 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 [13, 14].

На основании изложенного выше целью данной работы является исследование структурообразования жаропрочных никелевых сплавов при прямом лазерном выращивании.

Материалы и методика экспериментов

В качестве материала исследования выбраны жаропрочные никелевые сплавы ЭП648 и ВЖ159 (табл. 1). Металлопорошковые композиции (МПК) были получены методом газовой атомизации. В экспериментах использовали МПК фракцией 40–150 мкм. Образцы (заготовки) размером 100×20×150 мм получали на установке технологического лазерного выращивания ИЛИСТ-ХЛ в соответствии с режимами, представленными в табл. 2.

Таблица 1. Химический состав материала

Сплав	Основные элементы							Примеси				
	Ni	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	C	S	P	Mn	Si
ЭП648	Основа	32,0–35,0	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	0,5–1,1	Не более					
							4,0	0,1	0,01	0,015	0,5	0,4
ВЖ159	Основа	25,0–27,0	1,25–1,55	–	7,0–7,8	–	Не более					
							3,0	0,08	0,013	0,013	0,5	0,8

Исследование морфологии частиц МПК, структуры материала и определение химического состава проводили на растровом электронном микроскопе.

Таблица 2. Режимы выращивания образцов

Параметр выращивания	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Мощность лазерного излучения P , кВт	1,8	2,0	2,2
Диаметр пятна лазерного излучения $\varnothing_{\text{п}}$, мм	2,5		
Скорость наплавки, $V_{\text{п}}$, 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		

Определение формы частиц МПК проводили в соответствии с ГОСТ 25849-83.

Текучесть и насыпную плотность порошка определяли методом воронки Холла в соответствии с ГОСТ 20899-75 и 19440-94 соответственно.

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

Результаты экспериментов и их обсуждение

Типичный фракционный состав порошков, применяемых в данной работе, приведен на рис. 1. Основной размерный диапазон частиц находится в пределах 40–150 мкм. Количество частиц размером менее 40 мкм не превышает 5%. Как правило, частицы размером <40 мкм в технологии лазерной наплавки не применяются, так как они могут вызвать засорение дюзы, через которую порошок подается в фокальное пятно лазера [15].

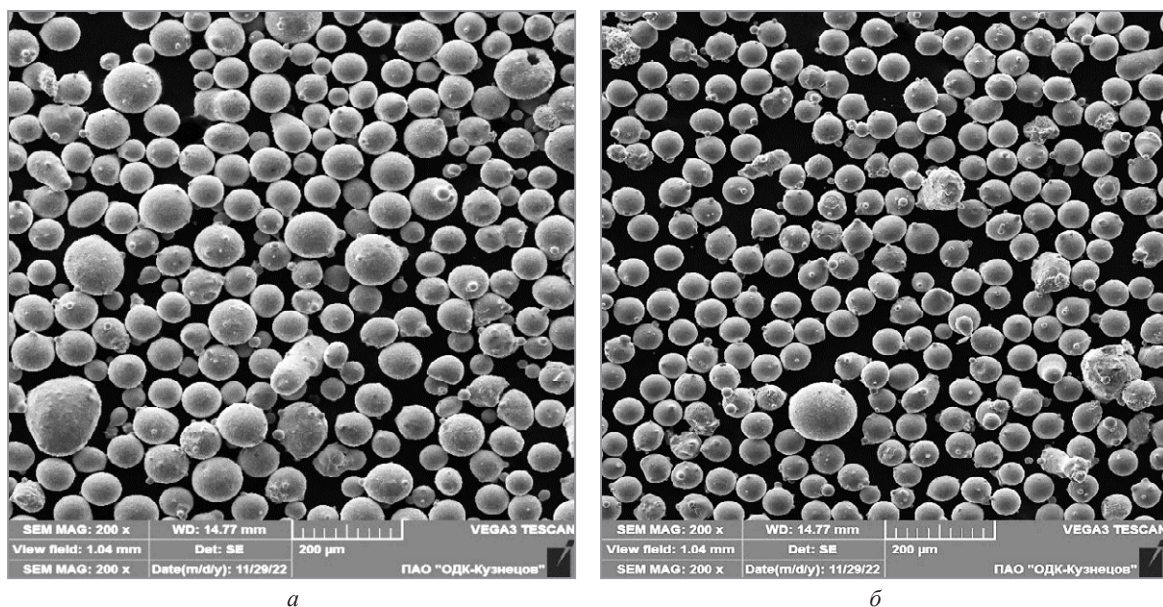


Рис. 1. Форма частиц металлопорошковых композиций ЭП648 (а) и ВЖ159 (б). $\times 200$

Сферичность частиц влияет на текучесть и насыпную плотность порошка, что, в свою очередь, оказывает прямое влияние на технологичность МПК. На основании изложенного выше данные параметры жестко прописываются в технических условиях на поставку МПК.

Форма частиц определяется в соответствии с ГОСТ 25849-83 как отношение максимального линейного размера частицы (l_{\max}) к минимальному размеру (l_{\min}). При отношении линейных размеров частиц от 1,0 до 1,2 их форма является сферической, а при отношении от 1,2 до 2,0 – округлой.

Форма частиц в основном сферическая – сферичность МПК ЭП648 (рис. 1, а) и ВЖ159 (рис. 1, б) составляет более 90% и соответствует требованиям ТУ (не менее 90%).

Исследования текучности и насыпной плотности методом воронки Холла подтвердили соответствие МПК, полученных методом газовой атомизации, требованиям ТУ (табл. 3), и небольшое наличие округлой формы и сателлитов не является критичным для их применения в технологии прямого лазерного выращивания [15].

Таблица 3. Текучесть и насыпная плотность порошка

Свойство	Марка МПК		Нормы по ТУ
	ЭП648	ВЖ159	
Текучесть, с	17,2	17,8	Не более 27,5
Насыпная плотность, г/см ³	4,6	4,48	3,94–5,34

Имеющаяся округлая форма (рис. 2, а) образуется в результате соударения частиц с более крупными в процессе атомизации. Образовавшиеся на поверхности частиц сателлиты наблюдаются в основном в МПК ВЖ159 (рис. 2, б). В процессе газовой атомизации конус, образующийся при распылении струи

металла, имеет достаточно компактные размеры, и капли летят в одном направлении (вниз). В таких условиях мелкие частицы сталкиваются с крупными, что приводит к образованию сателлитов на поверхности частиц [16, 17].

Элементный анализ свидетельствует о том, что МПК, полученные методом газовой атомизации, соответствуют техническим условиям (табл. 4).

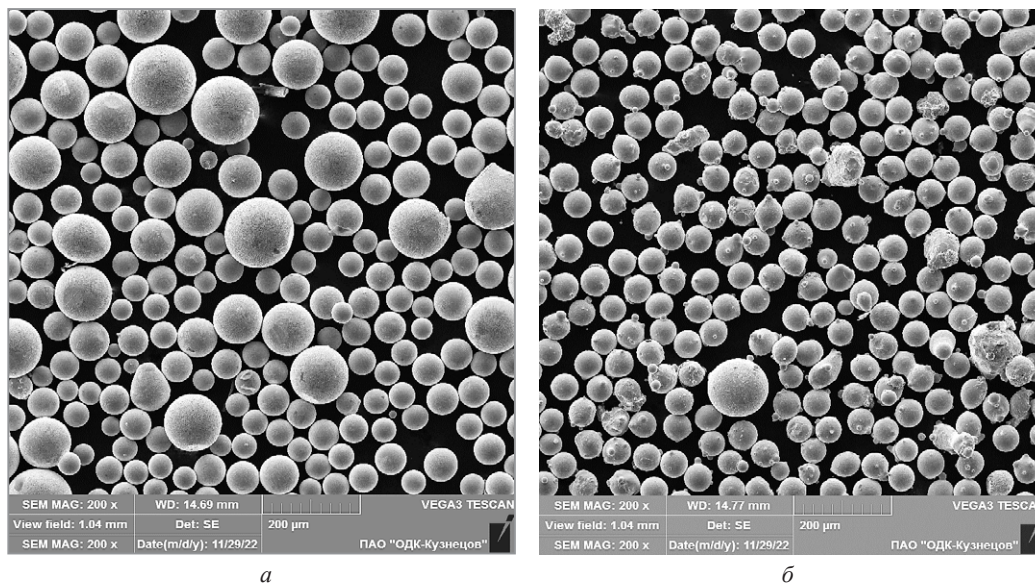


Рис. 2. Структура частиц металлопорошковых композиций ЭП648 (а) и ВЖ159 (б). $\times 500$

Т а б л и ц а 4. Химический состав порошка, %

Сплав	Легирующие элементы					Примеси, не более	
	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	Сумма
ЭП648	34,2	0,89	0,97	2,9	0,85	0,43	0,13
ТУ136-225-2022	32,0–35,0	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	0,5–1,1	$\leq 4,0$	Остаток
ВЖ159	27,0	1,52	–	7,21	3,08	0,45	0,26
ТУ136-223-2019	25,0–27,0	1,25–1,55	–	7,0–7,8	–	$\leq 3,0$	Остаток

Вне зависимости от технологического режима или используемой МПК при прямом лазерном выращивании образуется «слоистая» структура материала (рис. 3, 4) [18, 19]. Формирование «слоистой» структуры обусловлено технологической особенностью прямого лазерного выращивания за счет наложения валиков друг на друга [12, 20].

Одним из важных показателей качества структуры выращенной является пористость. Процесс порообразования представляет собой сложное физико-химическое явление. Его развитие может быть вызвано рядом независимых друг от друга факторов: растворимостью газов в расплавленном металле, неполной смачиваемостью металла предыдущих слоев наплавленным материалом, а также способом получения порошка [10, 12].

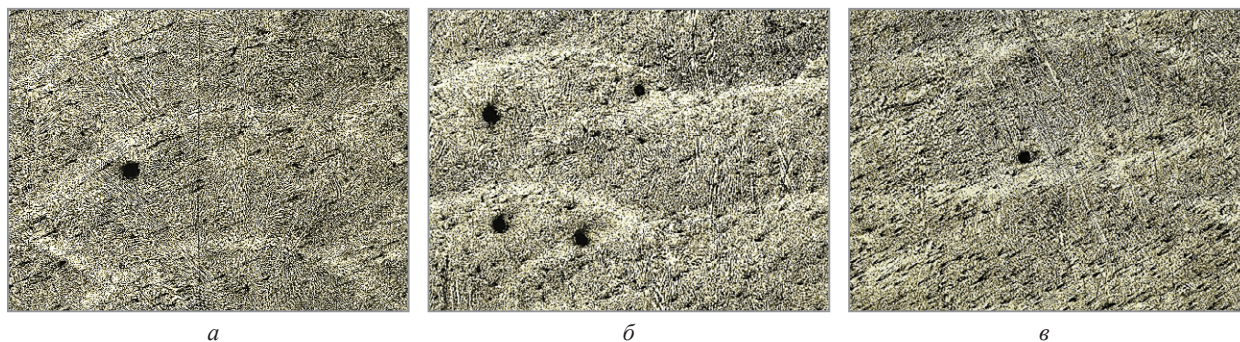


Рис. 3. Структура образцов из металлопорошковой композиции ЭП648 при мощности лазерного излучения 1,8 кВт (а), 2,0 кВт (б), 2,2 кВт (в). $\times 50$

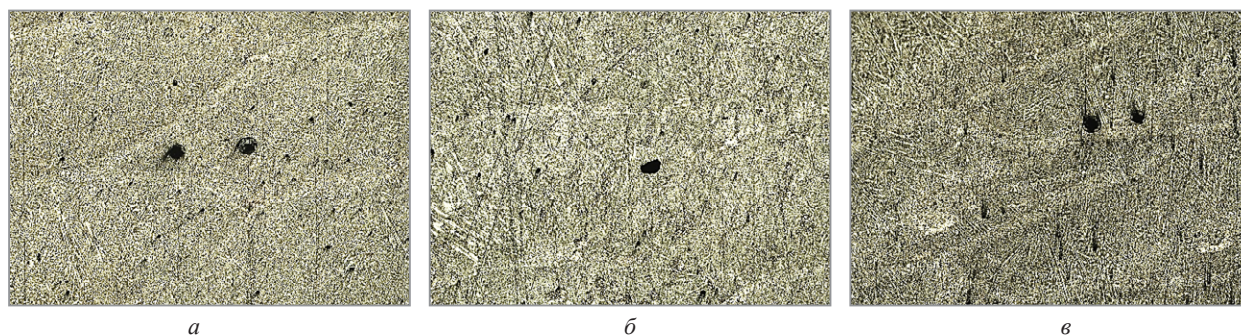


Рис. 4. Структура образцов из металлопорошковой композиции ВЖ159 при мощности лазерного излучения 1,8 кВт (а), 2,0 кВт (б), 2,2 кВт (в). $\times 50$

Т а б л и ц а 5. Внутренние дефекты (поры) в материале

Материал	Номер режима (по табл. 2)	Максимальный диаметр единичной поры, мм	Количество пор N_p , шт/см ²	Средний диаметр поры, мм	Суммарная площадь пор $\sum S_p$, мм ² /см ²
ЭП648	1	0,12	5	0,094	0,035
	2	0,12	5	0,094	0,035
	3	0,12	5	0,091	0,033
ВЖ159	1	0,10	7	0,072	0,029
	2	0,14	5	0,082	0,027
	3	0,12	3	0,084	0,017

Исследование структуры (рис. 3, 4) выращенных образцов свидетельствует о том, что образование пор в основном происходит внутри наплавленного валика. Анализ размера дефектов (пор) и их количества на 1 см² (табл. 5) показал, что при увеличении мощности лазерного излучения происходит уменьшение их суммарной площади, что, вероятно, обусловлено временем затвердевания ванны расплава [20], т. е. при повышении мощности лазерного излучения 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 [21].

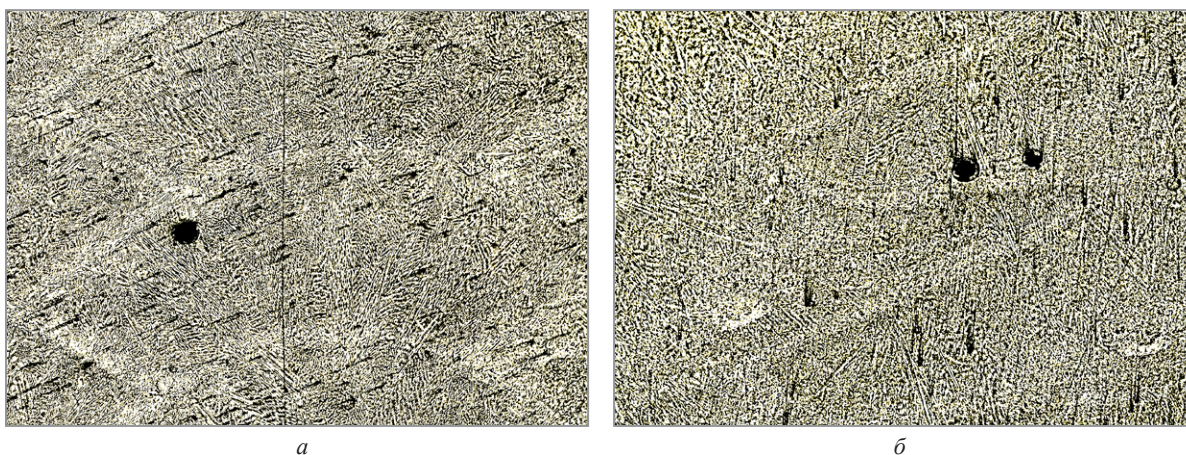


Рис. 5. Структура образцов из металлопорошковых композиций ЭП648 (а) и ВЖ159 (б) при мощности лазерного излучения 2,0 кВт. $\times 200$

Исследование микроструктуры наплавленного металла ЭП648 и ВЖ159 (рис. 5) свидетельствует о том, что вне зависимости от мощности лазерного излучения и марки МПК в «слоистой» структуре валиков формируется мелкодендритная разнонаправленная структура [23, 24]. 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 перпендикулярно теплоотводящей поверхности, а также от зоны сплавления к центру наплавленного валика [24, 25].

Выводы

1. Комплексные исследования металлопорошковых композиций ЭП648 и ВЖ159 на ПАО «ОДК-Кузнецов» показали, что их фракционный состав находится в пределах 40–150 мкм с минимальной долей частиц размером менее 40 мкм. При этом форма частиц в основном сферическая, доля которых составляет более 90%. Текучесть и насыпная плотность исследованных МПК также соответствуют требованиям ТУ. Образования сателлитов на поверхности частиц наблюдаются в основном в МПК ВЖ159, которые возникают в процессе газовой атомизации при столкновении мелких частиц с крупными.

2. В структуре выращенных образцов независимо от режимов прямого лазерного выращивания и марки МПК формируется «слоистая» структура за счет наложения валиков друг на друга. При этом в каждом слое образуется мелкодендритная структура, что обусловлено высоким теплоотводом в глубь материала.

3. Анализ структуры выращенных образцов показал, что образование пор в основном происходит внутри наплавленного валика. При увеличении мощности лазерного излучения происходит уменьшение их суммарной площади, что может быть обусловлено снижением градиента температур между наплавленными валиками. В этом случае ванна расплава находится более длительное время в жидком состоянии, что позволяет образовавшимся газам внутри расплавленного металла выходить на поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов, Д. А. и др. Исследование влияния различных источников энергии на структуру и механические свойства сварного соединения из никелевого сплава ЭП693 // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2021. № 27 (6). С. 22–30.
2. Ломбер Б. С., Моисеев С. А. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД. Все материалы // энциклопед. справ. М., 2007. № 6. С. 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. 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Petersburg, 20–22 September, 2021. 2021. P. 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(15). P. 2–9.
5. Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю., Никитин К. В. и др. Оценка дефектности структуры сплавов ПР-08Х15Н5ДТ и ПР-ХН55В5МБТЮ после прямого лазерного выращивания // Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении. Междунар. науч.-техн. конф. 24–26 мая 2022 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 193–196.
6. Прагер С. М., Солодова Т. В., Татаренко О. Ю. Исследование механических свойств и структуры образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из сплава ВЖ159 // Тр. ВИАМ. 2017. № 11(59). С. 3–11.
7. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.
8. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособ. для вузов. СПб.: Изд-во Политехнический университет, 2013. С. 120–143.
9. 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 // 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020]. 2020. P. 310–313.
10. Promakhov V., Zhukov A., Ziatdinov M. et al. Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition // Metals. 2019. № 9(2). P. 141–143.
11. Moosavy H. M., Aboutaleb M. R., Seyedein S. H. et al. Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloy // Optics and Laser Technology. 2014. No. 57. P. 9–12.
12. Щербаков А. В. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций. М.: Изд-во МЭИ, 2022. 676 с.
13. Rashkovets R. M., Nikulina A. A., Klimova-Korsmik O. G. et al. Characterization of Ni-Cr-Mo Alloy phase structures under DLD process // Journal of Physics: 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Petersburg, 20–22 September 2021. 2021. P. 5–7.
14. 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. No. 72, P. 39–46.
15. Евгенов А. Г., Щербаков С. В., Рогалев А. М. Опробование порошков жаропрочных сплавов ЭП718 и ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» для ремонта деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 51 (43). С. 16–22.
16. Хакимов А. М., Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю. Исследование структуры и свойств деталей из жаропрочных и нержавеющей сплавов, полученных технологией прямого лазерного выращивания // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. 2022. № 22 (2). С. 60–70.
17. Евгенов А. Г., Рогалев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических // Тр. ВИАМ. 2015. № 2. С. 8–15.
18. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. 662 с.
19. Григорьянц А. Г. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2018. С. 135–140.
20. Baranov D.A., Zarkin S.S., Parkin A.A. Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMTYuBR // Materials engineering and Technologies for Production and Processing. 2021. P. 108–114.

21. **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 // *Engineering and Materials Science*. 2021. P. 305–310.
22. **Баранов Д. А., Жаткин С. С., Никитин В. И. и др.** Обеспечение прочности сварных соединений при лазерной сварке жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693 // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2021. № 27 (3). С. 57–65.
23. **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. P. 404–409.
24. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** HN45VMTYUBR Alloy: Impact Beam Welding Modes on Microstructure and Distribution of Alloying Elements in the Seam // *Materials Engineering and Technologies for Production and Processing*. 2018. P. 530–535.
25. **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. No. 11(11). P. 5–13.

REFERENCES

1. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Nikitin K. V., Parkin A. A., Shhedrin E. Ju., Deev V. B.** Issledovanie vlijanija razlichnyh istochnikov jenerгии na strukturu i mehanicheskie svojstva svrnogo soedinenija iz nikelovogo splava JeP693 [Investigation of the influence of various energy sources on the structure and mechanical properties of a welded joint made of EP693 nickel alloy]. *Izvestija vuzov: cvetnaja metallurgija = Proceedings of universities: non-ferrous metallurgy*, 2021, no. 27 (6), pp. 22–30.
2. **Lomber B. S., Moiseev S. A.** Zharoprochnye i deformiruemye splavy dlja sovremennyh i perspektivnyh GTD. Vse materialy [Heat-resistant and wrought alloys for modern and advanced gas turbine engines. All materials]. *Jenciklopedicheskij spravocnik = Encyclopedic reference*, 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), 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, no. 14 (15), pp.2–9.
5. **Zhatkin S. S., Shhedrin E. Ju., Nikitin K. V., Baranov D. A., Hakimov A. M.** Ocenka defektnosti struktury splavov PR-08H15N5DT i PR-HN55V5MBTJu posle prjamoogo lazernogo vyrashhivanija [Estimation of defect structure of PR-08Kh15N5DT and PR-KhN55V5MBTYu alloys after direct laser growth]. *Innovacionnye tehnologii, oborudovanie i materialy zagotovitel'nyh proizvodstv v mashinostroenii = Innovative technologies, equipment and materials for blank production in mechanical engineering. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija (24–26 maja 2022g.)* [International Scientific and Technical Conference (May 24–26, 2022)]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Baumana Publ., 2022, pp.193–196.
6. **Prager S. M., Solodova T. V., Tatarenko O. Ju.** Issledovanie mehanicheskikh svojstv i struktury obrazcov, poluchennyh metodom selektivnogo lazernogo splavljenija (SLS) iz splava VZh159 [Investigation of the mechanical properties and structure of samples obtained by selective laser melting (SLM) from alloy VZh159]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2017, no. 11(59), pp. 3–11.
7. **Valetov V. A.** *Additivnye tehnologii (sostojanie i perspektivy)* [Additive technologies (state and prospects)]. Sankt-Peterburg. Universitet ITMO Publ., 2015, 63 p.
8. **Zlenko M. A.** *Additivnye tehnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Sankt-Peterburg, Izdvo Politehnicheskij universitet Publ., 2013, pp.120–143.
9. **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. *11th CIRP Conference on Photonic Technologies* [LANE 2020], 2020, pp. 310–313.
10. **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, no. 9(2), pp. 141–143.
11. **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.
12. **Shherbakov A. V.** *Additivnye tehnologii v proizvodstve metallicheskih konstrukcij* [Additive technologies in the production of metal structures]. Moscow, Izdatel'stvo MJeI Publ., 2022, 676 p.
13. **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*, 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Peterburg, 20–22 September 2021, pp. 5–7.
14. **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, no. 72, pp. 39–46.
15. **Evgenov A. G., Shherbakov C. B., Rogalev A. M.** Oprobovanie poroshkov zharoprochnyh splavov JeP718 i JeP648 proizvodstva FGUP «VIAM» dlja remonta detalej GTD metodom lazernoj gazoporoshkovoj naplavki [Testing of powders of heat-resistant alloys EP718 and EP648 produced by FSUE “VIAM” for the repair of GTE parts by laser gas-powder surfacing]. *Aviacionnye materiala i tehnologii = Aviation materials and technologies*, 2016, no. 51 (43), pp. 16–22.
16. **Hakimov A. M., Zhatkin S. S., Shhedrin E. Ju.** Issledovanie struktury i svojstv detalej iz zharoprochnyh i nerzhaveshhih splavov, poluchennyh tehnologiej prjamoogo lazernogo vyrashhivanija [Investigation of the structure and properties of parts made of heat-resistant and stainless alloys obtained by direct laser growth technology]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2022, no. 22 (2), pp. 60–70.
17. **Evgenov A. G., Rogalev A. M., Nerush S. V., Mazalov I. S.** Issledovanie svojstv splava JeP648, poluchennogo metodom selektivnogo lazernogo splavljenija metallicheskih [Investigation of the properties of the EP648 alloy obtained by the method of selective laser alloying of metals]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2015, no. 2, pp. 8–15.
18. **Grigor'janc A. G.** *Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, Izdvo MGTU im. Baumana Publ., 2008, 662 p.

19. **Grigor'janc A. G.** *Lazernye additivnye tehnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana Publ., 2018, pp. 135–140.
20. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMTYuBR. Defect and Diffusion Forum. Materials engineering and technologies for Production and Processing VII, Switzerland, 17 august 2021, 2021, pp. 108–114.
21. **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.
22. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Nikitin V. I., Deev V. B., Nikitin K. V., Barnov A. Ju., Judin D. M.** Obespechenie prochnosti svarnyh soedinenij pri lazernoj svarke zharoprochnogo dispersionno-tverdezhushhego nikelovogo splava JeP693 [Ensuring the Strength of Welded Joints in Laser Welding of Heat-Resistant Precipitation-Hardening Nickel Alloy EP693.]. *Izvestija vuzov: cvetnaja metallurgija = Proceedings of universities: non-ferrous metallurgy*, 2021, no. 27 (3), pp.57–65.
23. **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.
24. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** HN45VMTYUBR Alloy: Impact Beam Welding Modes on Microstructure and Distribution of Alloying Elements in the Seam. *Materials Engineering and Technologies for Production and Processing IV*, Switzerland, 01 October 2018, 2018, pp. 530–535.
25. **Promakhov V., Schulz M., Vorozhtsov A., Savinykh A., Garkushin G. et al.** The strength of Inconel 625, manufactured by the method of direct laser deposition under sub-microsecond load duration. *Metals*, 2021, no. 11(11), pp. 5–13.