

УДК 669.295

*А.И. Васильев<sup>1</sup>, П.В. Панин<sup>1</sup>, С.В. Путьрский<sup>1</sup>, А.М. Рогалев<sup>1</sup>*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК МАТЕРИАЛА МАРКИ VT6-ПС**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-22-30

*Представлены результаты исследования влияния горячего изостатического прессования (ГИП) и термической обработки на структуру и механические свойства при растяжении синтезированных заготовок, полученных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава марки VT6. Заготовки были подвергнуты термической обработке при различных температурах в состоянии после синтеза, а также после ГИП. Влияние различных режимов термической обработки оценивалось по результатам проведения испытаний на растяжение и исследований микроструктуры.*

**Ключевые слова:** селективное лазерное сплавление, аддитивное производство, горячее изостатическое прессование (ГИП), вакуумный отжиг, механические свойства при растяжении, микроструктура.

*A.I. Vasilev<sup>1</sup>, P.V. Panin<sup>1</sup>, S.V. Putyrskiy<sup>1</sup>, A.M. Rogalev<sup>1</sup>*

**INVESTIGATION OF HOT ISOSTATIC PRESSING AND HEAT TREATMENT EFFECT ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 3D-PRINTED SAMPLES MADE FROM VT6-PS GRADE MATERIAL**

*Presents the results of the investigation of the influence of hot isostatic pressing and heat treatment on the structure and mechanical properties during tension of synthesized workpieces obtained by selective laser alloying from a metal-powder composition of VT6 alloy. The blanks were subjected to heat treatment at various temperatures in the state after synthesis, as well after HIP. The influence of different heat treatment modes was assessed by the results of tensile tests and structural researches.*

**Keywords:** selective laser melting, additive manufacturing, hot isostatic pressing (HIP), vacuum annealing, tensile mechanical properties, microstructure.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

В настоящее время взамен традиционных способов изготовления деталей приходят новые технологии их получения. На ближайшее десятилетие разработка методов аддитивного производства в российской промышленности является одним из важнейших направлений в развитии материалов и технологий. Применение новых технологий позволит снизить себестоимость изделий, что является одним из важных факторов в авиационной промышленности [1]. С внедрением аддитивных технологий для изготовления деталей можно добиться существенной оптимизации производства, а именно уменьшения количества этапов технологического цикла получения детали и возможности получения

сборочной единицы при сокращении количества технологических операций. Применение аддитивных технологий в современной промышленности также обеспечивает возможность повышения топливной экономичности и надежности двигателей за счет применения конструкций, прошедших топологическую оптимизацию [2].

Функциональность, увеличение коэффициента использования материала и сокращение времени изготовления изделий обуславливают интерес разработчиков новой техники к аддитивным технологиям в аэрокосмической и авиационной отраслях [3]. Рассматривая различные методы аддитивного производства, необходимо учитывать технологические требования, предъявляемые к исходному материалу, так как для каждого метода они различны. Метод селективного лазерного сплавления (СЛС) металлопорошковой композиции (МПК) является одним из наиболее распространенных методов аддитивных технологий.

Селективное лазерное сплавление (selective laser melting – SLM) – метод аддитивного производства заготовок деталей, в котором используют лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет сплавления металлических порошков [4]. Технология СЛС позволяет производить детали сложной формы за небольшой промежуток времени практически без использования технологической оснастки, за счет чего существенно сокращается цикл производства изделий [5–8]. В технологии СЛС используется управляемый лазер высокой мощности для избирательного расплавления тонкого слоя порошка в соответствии с 3D-моделью [9]. В последнее время наблюдается значительный рост применения аддитивных технологий при производстве сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых материалов.

Титановые сплавы широко применяются в авиастроении, что обусловлено высоким уровнем механических свойств полуфабрикатов и деталей из этих сплавов [10]. Для получения деталей методами аддитивных технологий необходимо иметь исходное сырье высокого качества, которое отвечало бы технологическим требованиям. Для метода послойного синтеза исходным сырьем является МПК. Наиболее значимым критерием качества МПК является сферичность частиц порошка. Сферическая форма частиц обеспечивает минимальное сопротивление при подаче порошка и более плотную «укладку» материала в необходимый компактный объем, что позволяет получать изделия с требуемой микроструктурой и минимальным количеством дефектов в виде несплавлений [11]. Необходимо также отметить, что неотъемлемым условием процесса выращивания заготовок из титановых сплавов является создание защитной среды из газа аргона в камере построения.

Одним из ключевых условий при изготовлении заготовок деталей методом СЛС является получение необходимого уровня показателей качества синтезированного материала. К ним относятся в первую очередь механические свойства синтезированных заготовок, а также структура, получаемая в результате процесса синтеза материала, в том числе отсутствие пористости в материале. Достижение необходимых значений указанных показателей качества возможно путем подбора режимов термической обработки и(или) горячего изостатического прессования (ГИП) после процесса синтеза заготовок.

В статье [12] приведены результаты исследования влияния ГИП и различных режимов термической обработки на механические свойства при растяжении и микроструктуру синтезированных заготовок.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.4. «Технологии получения металлических и металлокерамических материалов методами селективного лазерного и электронно-лучевого синтеза из металлопорошковых композиций сплавов на основе никеля, кобальта, титана, алюминия, железа и интерметаллидов никеля и титана» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

### Материалы и методы

Для проведения исследований выбран титановый ( $\alpha + \beta$ )-сплав марки ВТ6, который обладает достаточно высокой удельной прочностью и удовлетворительной теплопроводностью, благодаря чему широко востребован для изготовления деталей военных и гражданских самолетов, авиационных двигателей, теплообменников различной производительности, судовых гребных винтов, элементов ракет и космических аппаратов, а также изделий медицинского назначения [14].

С целью проведения исследований методом СЛС изготовлены синтезированные заготовки из сплава марки ВТ6-ПС (сплав ВТ6 с послойным синтезом). Весь технологический цикл изготовления заготовок выполняли во ФГУП «ВИАМ». Сначала изготавливали исходное сырье – МПК из сплава ВТ6 – способом вакуумной индукционной плавки и газового распыления на установке ВИПиГР 50/500. Основными требованиями, предъявляемыми к МПК для синтеза заготовок методом СЛС, являются химический, фракционный и гранулометрический состав материала. Необходимым размером фракции МПК для проведения СЛС принято считать 10–63 мкм, порошок должен обладать сферической формой [14]. Фактический химический состав МПК из сплава марки ВТ6 следующий:

Элемент	Ti	Al	V	Fe	C	O	N	H
Содержание, % (по массе)	Основа	5,38	4,4	0,12	0,014	0,12	0,0090	0,0028

Внешний вид гранул МПК представлен на рис. 1, фракционный состав приведен на рис. 2. Средний размер частиц составляет 38,7 мкм.

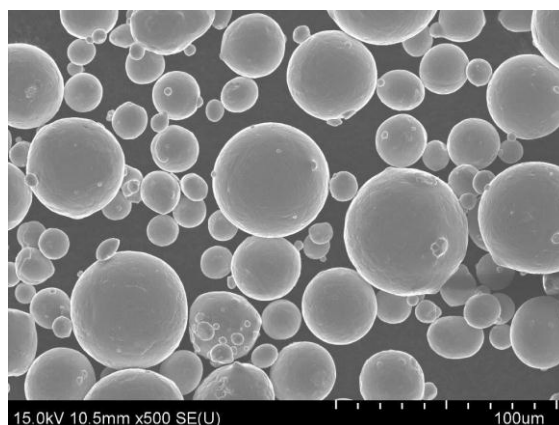


Рис. 1. Внешний вид гранул металлопорошковой композиции из сплава ВТ6 фракции 10–63 мкм (растровая электронная микроскопия в режиме вторичных электронов)

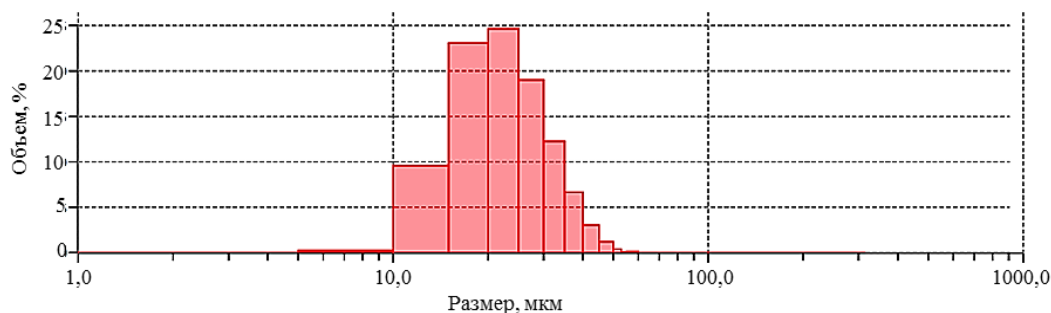


Рис. 2. Фракционный состав металлопорошковой композиции из сплава ВТ6

Методом СЛС изготовлены синтезированные заготовки из сплава ВТ6-ПС в количестве 40 шт. Синтез заготовок проведен на установке 3DSystems DMP 350 Flex (рис. 3) путем выращивания в двух направлениях: в плоскости  $XY$  (180 градусов) и оси  $Z$  (90 градусов), перпендикулярной плоскости  $XY$ .



Рис. 3. Синтезированные заготовки из сплава ВТ6-ПС, полученные на установке 3DSystems DMP 350 Flex



Рис. 4. Установка селективного лазерного сплавления 3DSystems DMP 350 Flex

Технологический процесс изготовления заготовок методом СЛС проводился по следующей схеме:

- конвертация, подготовка и разделение на слои 3D-моделей заготовок;
- подготовка плиты построения методом пескоструйной обработки;
- сушка МПК из сплава ВТ6 в вакуумной среде;
- проведение процесса СЛС в инертной среде;
- отделение заготовок от плиты построения путем отрезки.

Процесс СЛС проходил следующим образом. На предварительно нагретую платформу построения наносили тонкий слой МПК (обычно 30–60 мкм), после чего МПК выборочно (селективно) сплавляли лазерным лучом по электронной модели, предварительно обработанной с помощью специального программного обеспечения. После сплавления слоя на него наносили следующий слой и повторяли процесс до полного построения заготовки детали. Процесс сплавления проходил в инертной атмосфере газа аргона.

Основными параметрами процесса СЛС, влияющими на качество получаемых заготовок, являются мощность лазерного луча, скорость и интервал сканирования. Выбранный оптимальный режим сплавления МПК позволил получить синтезированные заготовки с объемной долей пор, не превышающей 0,1 %.

Горячее изостатическое прессование заготовок после синтеза выполняли на лабораторной линии газостатического прессования при температуре  $T_{п.п} - 30$  °С, где  $T_{п.п}$  – температура полного полиморфного превращения для сплава ВТ6. После проведения ГИП заготовки подвергали вакуумному отжигу при температуре 750 °С для снятия остаточных напряжений.

Термическую обработку синтезированных заготовок (без предварительной ГИП-обработки) проводили в вакуумной термической печи MonoTherm (рис. 5) по трем режимам при температурах 750, 800 и 850 °С.



Рис. 5. Печь для вакуумной термической обработки MonoTherm

Испытания при растяжении по ГОСТ 1497–84 проведены на испытательной машине Zwick/Roell Z 400 на образцах, вырезанных из синтезированных заготовок, полученных после ГИП и вакуумного отжига, а также после термообработки при температурах 750, 800 и 850 °С.

Металлографический анализ синтезированных заготовок проводили с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел (в соответствии с ПИ 1.2.785–2009) на травленых поперечных микрошлифах в четырех различных состояниях.

### Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на определение механических свойств при растяжении образцов из синтезированных заготовок сплава ВТ6-ПС, прошедших четыре различных режима обработки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Механические свойства (средние значения) при растяжении синтезированных заготовок из сплава ВТ6-ПС**

Условный номер режима	Режим термообработки (ТО)	Направление синтеза, градус	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
1	ГИП + ТО при температуре 750 °С	90	935	16,5	45,0
		180	970	16,3	39,4
2	ТО при температуре 750 °С	90	1100	13,3	38,7
		180	1105	12,7	36,5
3	ТО при температуре 800 °С	90	1065	16,0	51,0
		180	1080	13,6	41,5
4	ТО при температуре 850 °С	90	1035	16,7	52,0
		180	1050	16,5	48,5

Результаты металлографического анализа образцов из синтезированных заготовок сплава ВТ6-ПС, прошедших четыре различных режима обработки, приведены на рис. 6.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что четыре различных режима обработки образцов из синтезированных заготовок сплава ВТ6-ПС оказывают влияние на структуру и механические свойства при растяжении.

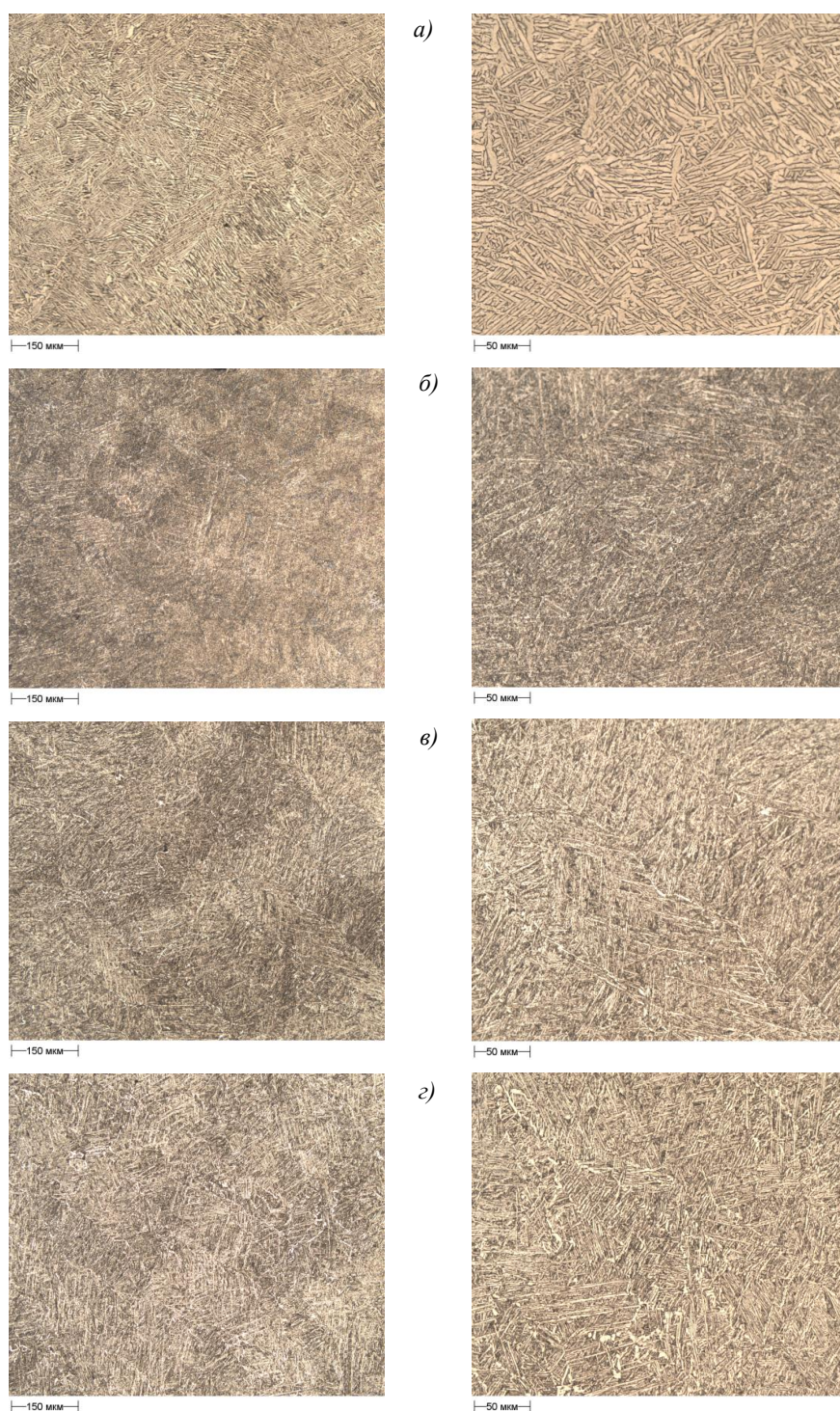


Рис. 6. Микроструктура синтезированных заготовок из сплава ВТ6-ПС после различных режимов обработки: ГИП + термообработка при 750 °С (а), а также при температурах термообработки (без ГИП) 750 (б), 800 (в) и 850 °С

Наибольшую прочность при растяжении ( $\sigma_B > 1100$  МПа) демонстрируют заготовки, прошедшие термическую обработку при температуре 750 °С. Наибольшие значения характеристик пластичности материала показали синтезированные образцы после отжига при 850 °С – температура, наиболее приближенная к температуре  $T_{п.п}$  сплава ВТ6-ПС. При температуре отжига 800 °С для синтезированных заготовок из

материала ВТ6-ПС получены средние сбалансированные значения прочности и пластичности материала –  $\sigma_b = 1070$  МПа,  $\delta_5 = 15$  %,  $\psi = 45$  %.

По результатам исследований образцов, изготовленных из заготовок после проведения ГИП, замечено снижение значений предела прочности и характеристик пластичности материала в сравнении с образцами, прошедшими термическую обработку. Таким образом, проведение операции ГИП перед термической обработкой не является рекомендуемой для повышения механических свойств синтезированного материала. Вместе с тем авторы данной статьи обращают внимание на необходимость проведения дополнительных исследований по влиянию ГИП на полный комплекс механических свойств материала. Так, ряд отечественных и зарубежных авторов отмечают положительное влияние ГИП на усталостные характеристики сплава состава Ti–6Al–4V [15–18].

Помимо оценки характера воздействия режимов термической обработки и ГИП на структуру и свойства материала также прослеживается зависимость по влиянию направления синтеза на получаемые свойства заготовок. Значения предела прочности при растяжении образцов, выращенных в направлении плоскости XY, незначительно (на 1–2 %) превышают свойства образцов, выращенных в направлении оси Z. Характеристики пластичности (относительные удлинение и сужение) образцов, изготовленных в направлении оси Z, больше, чем у образцов, выращенных в плоскости XY. Стоит отметить, что в случае образцов, подвергнутых ГИП, разброс значений предела прочности в зависимости от направления выращивания увеличивается. Так, значения свойств для образцов, синтез которых выполнялся в плоскости XY, превышают на 3–4 % значения свойств для образцов, изготовленных в направлении оси Z. Эта разница может быть обусловлена структурными превращениями, происходящими в процессе ГИП, на которых отдельно остановимся в дальнейшем.

Значения показателей характеристик пластичности для образцов после термической обработки и ГИП, изготовленных в направлении оси Z, превышают значения свойств для образцов, выращенных в направлении плоскости XY: относительное удлинение  $\delta_5$  – на 5 %, относительное сужение  $\psi$  – на 10 %.

По результатам проведенного металлографического анализа для исследуемых синтезированных заготовок наблюдается типичная пластинчатая структура, характерная для сплава ВТ6. При использовании метода СЛС наблюдается хаотичное расположение пластин  $\alpha$ -фазы, средняя толщина которых составляет 1–2 мкм. Границы  $\beta$ -зерен не наблюдаются.

Следует отметить, что скорости охлаждения заготовок в процессе СЛС довольно высоки. В свою очередь, быстрая кристаллизация позволяет получить мелкую структуру, что придает материалу высокую прочность. Процесс ГИП, заключающийся в продолжительном нагреве заготовок под воздействием давления, приводит к укрупнению микроструктуры вследствие продолжительного высокотемпературного воздействия. Этим объясняется наличие увеличенной толщины пластин (5–8 мкм) в микроструктуре образца после ГИП-обработки [19].

По результатам анализа микроструктур образцов после термической обработки по различным режимам существенного влияния режимов на структуру образцов не обнаружено. Микроструктура синтезированных образцов характеризуется пластинчатой морфологией  $\alpha$ -фазы с разориентированными пластинчатыми колониями. Следует также отметить, что микроструктура образцов, полученных методом СЛС, имеет некоторую идентичность со структурой, получаемой при выполнении традиционных методов горячей деформации (ковка, штамповка, прокатка) [20].

### Заключения

Приведены результаты сравнительных исследований по влиянию режимов термической обработки и ГИП на структуру и механические свойства при растяжении синтезированных заготовок из сплава ВТ6-ПС. Показаны оптимальные температурные интервалы для проведения вакуумного отжига с целью достижения необходимых показателей механических свойств.

В зависимости от режимов термообработки свойства синтезированного материала изменяются: предел прочности  $\sigma_b$  – от 935 до 1100 МПа, относительное удлинение  $\delta_5$  – от 12,7 до 16,7 %, относительное сужение  $\psi$  – от 36,5 до 51,0 %.

Проведенные исследования влияния режимов термообработки и ГИП заготовок на структуру и механические свойства синтезированного материала из сплава ВТ6-ПС позволят в дальнейшем получать качественную структуру и необходимый уровень свойств, что, в свою очередь, даст возможность применять данный материал для изготовления сложнопрофильных деталей в различных сферах промышленности.

### Библиографический список

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms // *International Materials Reviews*. 2012. No. 57 (3). P. 133–164.
4. Граф Б., Гок С.Э., Гуменюк А.В., Ретмайер М. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы // *Глобальная ядерная безопасность*. 2016. № 3 (20). С. 34–42.
5. Гарибов Г.С. Металлургия гранул – основа создания новых материалов для перспективных авиадвигателей // *Пермские авиационные двигатели*. 2012. № 26. С. 58–63.
6. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2016. 400 с.
7. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. 210 с.
8. Суфияров В.Ш., Попович А.А., Борисов Е.В., Полозов И.А. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава // *Цветные металлы*. 2015. № 1. С. 79–84.
9. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // *Труды ВИАМ*. 2015. № 2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
10. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
11. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий // *Masters Journal*. 2016. № 1. С. 51–55.
12. Дзунович Д.А., Лукина Е.А., Яковлев А.Л. Влияние режимов термической обработки на технологичность и механические свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23 // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 3–10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2021). DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
13. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
14. Гельчинский Б.Р., Меркушев А.Г., Долматов А.В. Нанесение защитных покрытий методом плазменного напыления на изделия из сплава ВТ6, полученные селективным лазерным сплавлением // *IV Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее»*. М., 2018. С. 18–28.

15. Васильев А.И., Путырский С.В., Коротченко А.Ю., Анисимова А.Ю. МИМ-технология как способ изготовления точных деталей из металлопорошковых композиций, в том числе титановых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-16-27.
16. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
17. Ahlfors M., Bahbou F., Eklund A. HIP for AM – Optimized Material Properties by HIP // Proceedings of 12th International Conference on Hot Isostatic Pressing. Sydney, 2017. P. 1–10.
18. Yamamoto Y., Fujikawa T. Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Materials Prepared by Additive Manufacturing. Technology and HIP Process // Proceedings of 11th International Conference on Hot Isostatic Pressing. Stockholm, 2014. P. 398–404.
19. Hjärne J., Ahlfors M. Hot Isostatic Pressing for AM parts // Quintus Technologies. Västerås, 2016. P. 1–5.
20. Лукина Е.А., Филонова Е.В., Тренинков И.А. Микроструктура и преимущественные кристаллографические ориентировки жаропрочного никелевого сплава, синтезированного методом СЛС, в зависимости от энергетического воздействия и термообработки // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 1 (46). С. 38–44. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2021). DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-38-44.