

УДК 669.295

А.В. Пескова<sup>1</sup>, Д.И. Сухов<sup>1</sup>, П.Б. Мазалов<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44

*Представлен краткий обзор получения изделий методами аддитивных технологий. Проведены исследования исходной металлопорошковой композиции, при которых определены микроструктура, химический и гранулометрический состав. Выполнены металлографические исследования выращенных образцов из титанового сплава VT6, полученных методами селективного лазерного сплавления (СЛС), прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС). Кроме того, проведено сравнение с традиционными методами получения изделий.*

**Ключевые слова:** титановый сплав, прямое лазерное выращивание, селективное лазерное сплавление, микроструктура, металлопорошковая композиция.

A.V. Peskova<sup>1</sup>, D.I. Sukhov<sup>1</sup>, P.B. Mazalov<sup>1</sup>

## EXAMINATION OF THE FORMATION OF THE TITANIUM ALLOY VT6 STRUCTURE OBTAINED BY ADDITIVE MANUFACTURING

*The review of additive manufacturing is presented. The initial metal powder composition was examined in order to determine the microstructure, chemical composition and particle size distribution. Metallographic research of sintered titanium alloy VT6 samples was carried out. The samples were produced by selective laser melting (SLM), direct laser deposition (DLD) and selective electron-beam melting (SEBM) methods. The results were compared with those obtained by the traditional methods.*

**Keywords:** titanium alloy, direct laser deposition, selective laser melting, microstructure, metal powders.

<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

Развитие аддитивных технологий в отечественной авиационной промышленности является одним из важнейших направлений стратегии развития материалов и технологий на ближайшие полтора десятка лет [1]. В настоящее время на смену традиционным технологиям и последующей механической обработке приходят новые аддитивные технологии, которые позволяют снизить себестоимость получаемой детали, что является одним из важных факторов в авиационной промышленности. При внедрении аддитивных технологий для изготовления деталей можно добиться существенной оптимизации производства – а именно, уменьшения количества этапов технологического цикла получения детали, возможности получения сборочной единицы, что также сокращает технологические этапы, а следовательно, снижает стоимость изготовления всего изделия. Применение аддитивных технологий в современном

производстве также обеспечивает возможность повышения топливной экономичности и надежности двигателей на основе применения оптимизированных конструкций [2].

В настоящее время аддитивные технологии набирают особую популярность в аэрокосмической и авиационной отраслях промышленности. Функциональность, уменьшение отходов материала и сокращение времени изготовления деталей – все это позволяет более широко применять аддитивные технологии [3]. Рассматривая разные методы аддитивных технологий, необходимо учитывать технологические требования к исходному материалу, так как для каждого метода они различны. Рассмотрим каждый метод построения изделия отдельно.

Метод селективного лазерного сплавления (СЛС) в настоящее время является наиболее распространенным методом. Формирование детали происходит на платформе построения, которая представляет собой

плиту, закрепленную к поршневой части установки, которая, в свою очередь, служит для перемещения платформы построения на высоту, равную величине слоя. Металлопорошковая композиция доставляется и распределяется на плите построения при помощи металлического рекоутера или силиконового ножа. После нанесения первого и последующего слоев порошка происходит синтез. Как правило, построение детали осуществляется не на самой платформе построения, а на поддерживающих элементах – и таким образом слой за слоем «вырастает» заданная деталь. Возвращаясь к технологическим требованиям по сырью, необходимо отметить, что основной размер фракции порошка, который применяют для данного метода аддитивной технологии, должен составлять 10–63 мкм; порошок также должен обладать сферической формой и хорошей текучестью.

Повышенный интерес вызывает *технология прямого лазерного выращивания* (ПВЛ), которая представляет собой «управляемое» формирование изделия из присадочного материала, подающегося локально в зону выращивания. При данном методе деталь также изначально синтезируется на подложку, но при этом не используются поддерживающие элементы как при методе СЛС. При использовании металлопорошковой композиции в качестве присадочного материала, формирование детали происходит следующим образом. Согласно указанной в 3D-модели геометрической формы изделия определяют траекторию движения манипулятора. Далее происходит подача порошка в область построения изделия при помощи инертного газа через коаксиальное сопло. Лазерный луч, фокусируясь на подложке, образует зону расплавленного металла и после прохождения луча по заданной траектории формируется наплавленный слой [4]. Таким образом, за счет цикличности процесса, лазерный луч, проходя по этой траектории несколько раз, слой за слоем формирует деталь. Требования к порошку идентичны требованиям, указанным в предыдущем методе построения. Единственным отличием является гранулометрический состав порошка, он должен составлять 40–150 мкм для метода ПЛВ.

Получение изделий *методом селективного электронно-лучевого сплавления* (СЭЛС) несколько отличается от метода СЛС. Формирование изделия осуществляется в вакууме. Электронный луч управляется с помощью электромагнитных катушек, которые обеспечивают высокую скорость и наибольшую точность позиционирования луча, что позволяет поддерживать одновременно несколько ванн расплава. Отличие от метода СЛС за-

ключается в наиболее высоких скоростях построения и наличии подогрева камеры построения до 900 °С. Это необходимо для обеспечения полного снятия термических напряжений, которые неизбежно возникают при работе с низкопластичными несвариваемыми материалами. Единственным минусом при получении изделий данным методом является повышенная шероховатость поверхности. Качество порошка определяется гранулометрическим составом (фракция 45–150 мкм) и сферичной формой частиц.

Детали из титановых сплавов пользуются большим спросом в области авиастроения [5]. Такая потребность обусловлена высоким уровнем механических свойств изделий из титана [6]. Преимущество новейших технологических решений при изготовлении деталей сложной конфигурации из сложнолегируемых титановых сплавов заключается в том, что в данном случае отсутствуют большие потери сырья при обработке деталей из полученных заготовок, в отличие от традиционных способов изготовления изделий.

Для получения деталей методами аддитивных технологий из таких сплавов необходимо иметь качественное сырье, отвечающее высоким технологическим требованиям. Около 30% порошков получают из «коммерчески чистого» титана (СР–Ti), а остальное количество порошков производят из достаточно известного в мире сплава Ti–6Al–4V (российский аналог – сплав ВТ6).

Для получения высококачественного порошка из сложнолегированных титановых сплавов используют метод бестигельной газовой атомизации. Этот метод имеет отличительную особенность – полное отсутствие контакта расплавленного металла с керамическими или металлическими частями установки, что исключает загрязнение расплава продуктами взаимодействия титана и посторонними включениями – например, от керамической формы [1].

Наиболее значительным критерием для определения качества металлопорошковых композиций является сферичность. Сферическая форма частиц обеспечивает наименьшее сопротивление подачи порошка и, соответственно, более плотную «укладку» материала в требуемый компактный объем, что позволяет получать изделия с заданной микроструктурой и меньшей долей несплавления [7]. Следует отметить, что неотъемлемым параметром процесса выращивания титановых деталей является защитная среда аргона в камере построения для исключения процесса окисления материала при выращивании детали.

В данной статье приведен обзор микроструктуры и механических свойств образцов

Химический состав металлопорошковой композиции (МПК) титанового сплава ВТ6

Наименование МПК	Содержание легирующих элементов, % (по массе)		Содержание примесей, % (по массе)						
	Al	V	Zr	Si	C	Fe	N	O	H
ВТ6	6,14	4,16	0,034	0,033	0,017	0,105	0,040	0,147	0,0036
Нормы по ОСТ1 90013–81	5,3–6,8	3,5–5,3	≤0,3	≤0,1	≤0,1	≤0,3	≤0,05	≤0,2	≤0,2

из титанового сплава ВТ6, полученных вышеперечисленными методами аддитивных технологий, в сравнении с традиционными технологиями.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

#### Материалы и методы

Для исследования выбрана металлопорошковая композиция титанового сплава ВТ6, полученная методом бестигельной плавки и газовой атомизации во ФГУП «ВИАМ» на установке ВИПиГР. В табл. 1 представлены результаты исследований химического состава металлопорошковой композиции.

Химический состав металлопорошковой композиции соответствует требованиям ОСТ1 90013–81.

Важным параметром для определения годности сырья является фракционный или гранулометрический состав порошка [8]. Причем для каждого метода аддитивной технологии технологические требования к порошку различны. Для СЛС фракционный состав порошка должен быть 10–63 мкм и 45–150 мкм – для ПЛВ и СЭЛС [9].

Исследование гранулометрического состава полученного порошка из сплава ВТ6 проводили двумя методами. Первый – это метод оптической микроскопии, позволяющий также проанализировать микроструктуру частиц, проводили на оптическом микроскопе Olympus с применением цифровой камеры VEC-335 и растровом электронном микроскопе JSM 840. Второй – это метод лазерной дифракции, который проведен на лазерном анализаторе Analizette 22.

Экспериментальные образцы для изучения микроструктуры после синтеза получены на установках селективного лазерного сплавления, прямого лазерного выращивания и селективного электронно-лучевого сплавления. Для сравнения полученных результатов так-

же приведена микроструктура образцов, полученных по традиционным технологиям. Оценку микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus с применением цифровой камеры VEC-335 при увеличении  $\times 200$  и  $\times 500$  после химического травления поверхности шлифов в разбавленном растворе плавиковой кислоты. Определение механических свойств проводили по стандартным методикам.

#### Результаты и обсуждение

Исследование исходной металлопорошковой композиции сплава ВТ6, полученного во ФГУП «ВИАМ» на установке ВИПиГР, показало, что все требования по качеству порошка соответствуют технологическим требованиям. По результатам анализа гранулометрический состав соответствует заданным фракциям: 10–63 мкм – для метода СЛС (рис. 1, а); 40–150 мкм – для ПЛВ и СЭЛС (рис. 1, б). Это подтверждают гистограммы, представленные на рис. 2. В составе МПК есть незначительное количество частиц неправильной формы и сателлитов. На поверхности частиц наблюдается слабовыраженная дендритная структура [10]. Следов окисления не обнаружено (рис. 3).

Металлографический анализ проводили на экспериментальных образцах без предварительной термической обработки. Образцы, представляющие собой параллелепипеды квадратного сечения, исследовали вдоль оси выращивания. Микроструктура образцов, полученных методами СЛС, ПЛВ и СЭЛС, представлена на рис. 4 и 5.

Результаты металлографического анализа показали, что остаточная пористость в образцах минимальна. На поверхности микрошлифов ближе к периферии наблюдаются единичные поры размером до 40 мкм, количество которых не превышает 3 шт. на поле зрения шлифа. Макроструктура образцов имеет столбчатое строение с направлением роста, параллельным оси выращивания.

При больших увеличениях для всех методов формирования материала наблюдается типичная пластинчатая структура, характерная для сплава ВТ6. При использовании

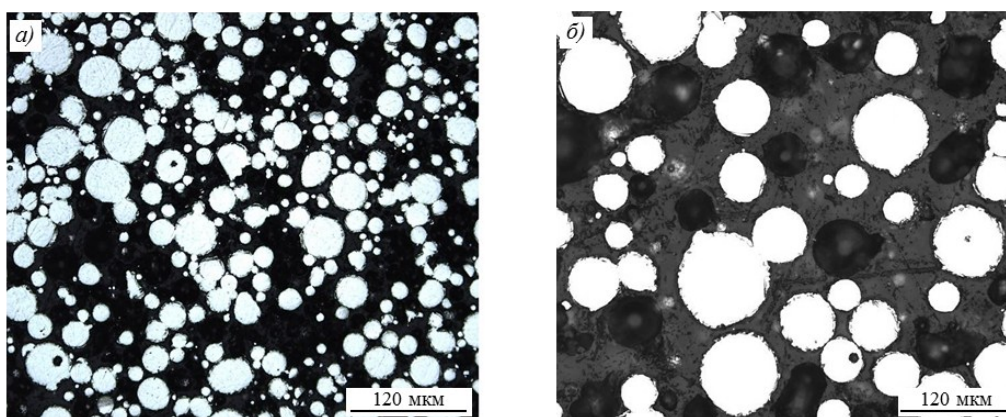


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 200$ ) гранул металлопорошковой композиции из сплава ВТ6: а – фракция 10–63 мкм (метод СЛС); б – фракция 40–150 мкм (методы ПЛВ и СЭЛС)

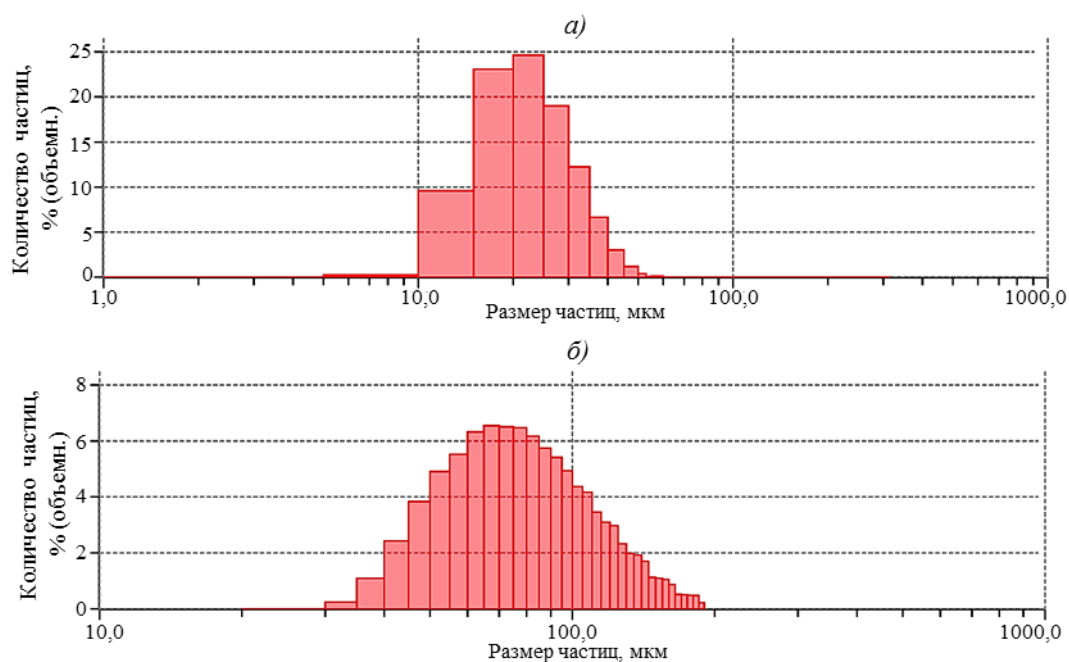


Рис. 2. Фракционный состав порошка из сплава ВТ6 для методов СЛС (а), ПЛВ и СЭЛС (б)

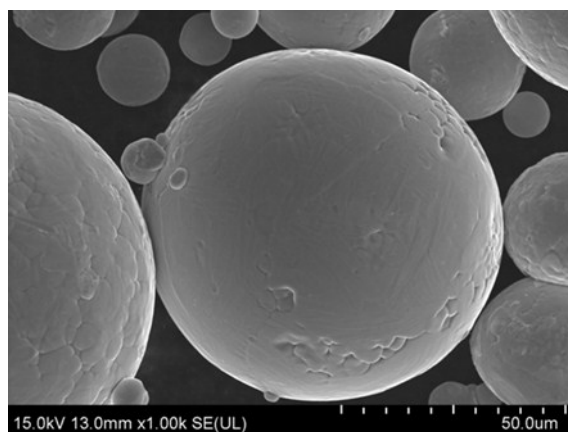


Рис. 3. Микроструктура гранул металлопорошковой композиции из сплава ВТ6 (РЭМ)

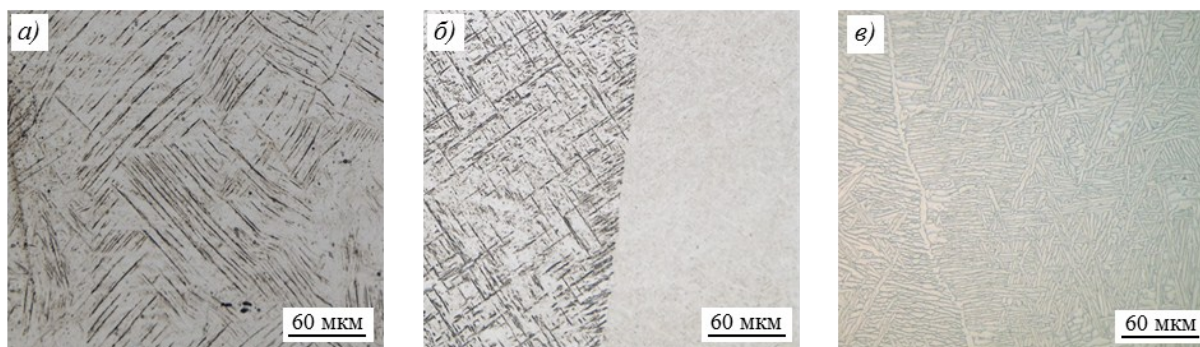


Рис. 4. Микроструктура образцов ( $\times 200$ ), полученная методами СЛС (а), ПЛВ (б), СЭЛС (в)



Рис. 5. Микроструктура образцов ( $\times 500$ ), полученная методами СЛС (а), ПЛВ (б), СЭЛС (в)

метода СЛС наблюдается разупорядоченное расположение пластин  $\alpha$ -фазы, «неокантованных»  $\beta$ -зерном. Размер колоний пластин – от 80 до 120 мкм, толщина пластин – от 1 до 3 мкм (рис. 4, а и 5, а). В микроструктуре, полученной методом ПЛВ, наоборот, проявляется «структура корзиночного плетения» (рис. 4, б и 5, б). К подобному описанию подходит структура, имеющая крупные  $\beta$ -зерна и мелкие  $\alpha$ -колонии [11–16], размер которых составляет от 30 до 60 мкм, толщина пластин  $\alpha$ -фазы – от 1 до 3 мкм. Размер пластин, формирующихся в структурах материала, полученного методами СЛС и ПЛВ, обусловлен высокими скоростями кристаллизации, достигающими  $10^6$  К/с, однако для метода СЛС эти скорости выше, о чем свидетельствует наличие мартенситной фазы. В случае, когда образец формируется методом СЭЛС, наблюдается типичная пластинчатая структура, но уже с разориентированным строением  $\alpha$ -колоний (рис. 4, в и 5, в). Скорости кристаллизации в методе СЭЛС ниже, чем при СЛС, что объясняет отсутствие мартенситной фазы в ее структуре. Размер колоний составляет от 40 до 120 мкм, толщина пластин от 3 до 6 мкм.

Для сравнения далее приведена микроструктура материала сплава ВТ6, полученная объемной штамповкой (рис. 6). Микроструктура образца представлена после деформации и термической обработки по режиму: отжиг

при температуре 800 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе.

После деформации и термической обработки в структуре образуется разориентированное распределение мартенситной фазы. Структура, полученная методом СЭЛС, имеет некоторую идентичность со структурой, полученной традиционным методом деформации (штамповкой).

Как известно, структура тесно связана с уровнем механических свойств материала. Таким образом, оптимизировав структуру

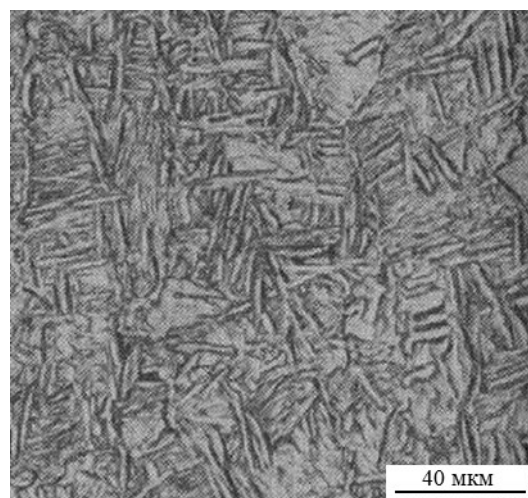


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 500$ ) образца из сплава ВТ6, полученного объемной штамповкой

Таблица 2

## Механические свойства образцов, полученных разными методами

Технология получения	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5$	$\psi$
	Н/мм <sup>2</sup>		%	
Прямое лазерное выращивание	1030	950	14,0	48,0
Селективное лазерное сплавление	1060	960	13,0	50,0
Селективное электронно-лучевое сплавление	990	910	14,0	33,0
Штамповка (ОСТ 1 90000–70)	990	–	10,0	–

материала, например термической обработкой, можно повысить резервный уровень механических свойств титанового сплава ВТ6 [17].

В табл. 2 представлены значения механических свойств материала титанового сплава ВТ6, не прошедших термическую обработку. Уровень механических свойств указан для порошковых методов аддитивных технологий изготовления деталей.

Из представленных данных следует, что значения механических свойств материала, полученного методами аддитивных технологий, больше значений для материала, полученного штамповкой.

#### Заключения

В данной статье проведены сравнительные исследования микроструктуры материала титанового сплава ВТ6, полученного разными методами аддитивных технологий и штамповкой. Микроструктура образцов, полученных методами СЛС, ПЛВ и СЭЛС, различна. В первом случае микроструктура син-

тезированного образца имеет разориентированную  $\alpha$ -фазу с нечетко выраженным  $\beta$ -зерном, что типично для термообработанного состояния. В микроструктуре образцов, полученных методом ПЛВ, наблюдается выделение мартенситной фазы, что характерно для закаленного состояния материала. Образцы, полученные методом СЭЛС, имеют микроструктуру с разупорядоченными колониями  $\alpha$ -фазы.

Сравнивая полученные микроструктуры и свойства, можно сделать вывод, что в процессе синтеза материал претерпевает фазовые превращения, идентичные превращениям, происходящим при термической обработке и деформации. Соответственно, уровень значений механических свойств для синтезированного материала больше, чем значения механических свойств для штампованного материала.

Планируется проведение ряда работ для оценки микроструктуры и механических свойств после воздействия термической обработки на синтезированный материал сплава ВТ6.

#### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. №31. С. 43–47.
3. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes, and Mechanisms // International Materials Reviews. 2012. Vol. 57. P. 137–164.
4. Соломонов В.В., Туричин Г.А., Земляков Е.В., Бабкин К.Д., Климова-Косрмик О.Г. Прямое лазерное выращивание изделий из порошковых материалов: принцип, оборудование и материалы // Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. (Москва, нояб. 2016 г.). М.: Буки-Веди, 2016. С. 34–37.
5. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // Эксперт. 2015. №15 (941). С. 49–53.
6. Соломонов В.В. Прямое лазерное выращивание из титановых сплавов: сравнение методов получения изделий из порошка и проволоки // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы VI Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, июль 2018 г.). СПб.: Свое издательство, 2018. С. 44–49.
7. 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.
8. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий // Masters Journal. 2016. №1. С. 51–55.

9. ASTM B213. Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel. URL: <https://www.astm.org/Standards/B213.htm> (дата обращения: 13.09.2019).
10. Попов А.С., Баранов Д.А., Дяговцов И.А., Мурзин С.П., Щедрин Е.Ю. Сравнительные металлографические исследования образцов, полученных технологией прямого лазерного выращивания // Машиностроение и машиноведение. 2017. №1. С. 1101–1105.
11. Панин П.В., Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б. Способы описания фазового состава титановых сплавов, дополнительно легированных водородом (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №3. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-3-3.
12. Панин П.В., Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б. Фазовый состав и структура титанового сплава BT6, дополнительно легированного водородом, после вакуумного отжига // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №2 (38). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-5-5.
13. Baufeld B., Biest O., Gault R., Ridgway K. Manufacturing Ti–6Al–4V components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and mechanical properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2011. Vol. 26. P. 9–13. Article No. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/26/1/012001.
14. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла. М.: НАМИ, 2015. С. 29–31.
15. Cotteleer M., Joyce J. 3D Opportunity Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth // Deloitte review issue. 2014. Vol. 14. P. 9–12.
16. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития // Авиационные материалы и технологии. 2002. Вып.: Перспективные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы для авиакосмической техники. С. 11–32.
17. Ночовная Н.А., Панин П.В. Формирование фазового состава и структуры в титановых сплавах BT5, BT20 и BT6 при термоводородной обработке и пластической деформации // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №9 (57). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-1-1.