

ОТ МЕТАЛЛУРГИИ ГРАНУЛ К АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

© 2018 г. А.Н. Тимофеев, А.И. Логачева

ОАО «Композит», г. Королев

Статья поступила в редакцию 15.09.17 г., доработана 27.09.17 г., подписана в печать 29.09.17 г.

ОАО «Композит» ведет свою историю от Центрального научно-исследовательского института материаловедения (ЦНИИМВ) и до сегодняшнего дня успешно выполняет функции головного материаловедческого института в ракетно-космической отрасли. На предприятии используются и совершенствуются самые передовые технологии, создаются различные новые металлические, неметаллические, композиционные и керамические материалы. В представленном обзоре показано развитие порошкового направления от металлургии гранул к аддитивным технологиям, в том числе с участием выпускников МИСиС. Рассмотрен опыт ОАО «Композит» в области изготовления деталей методом селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС) порошков титанового сплава ВТ6С собственного производства. Исходные порошки получены методом плазменного центробежного распыления прутковой заготовки. Показано, что порошки характеризуются идеальной сферической формой, низким уровнем дефектности, высокими технологическими свойствами и полностью соответствуют требованиям процесса. Изучены микроструктура и свойства образцов и деталей, полученных методом СЭЛС.

Ключевые слова: металлургия гранул, горячее изостатическое прессование, газостат, плазменное центробежное распыление, порошок, гранула, сферическая форма, аддитивные технологии, селективное электронно-лучевое сплавление.

Тимофеев А.Н. — докт. техн. наук, 1-й зам. ген. директора ОАО «Композит» (141070, г. Королев, ул. Пионерская, 4). Тел.: (495) 513-22-80. E-mail: info@kompozit-mv.ru.

Логачева А.И. — докт. техн. наук, нач. отделения металлических материалов и металлургических технологий ОАО «Композит». Тел.: (495) 513-21-26. E-mail: info@kompozit-mv.ru.

Для цитирования: Тимофеев А.Н., Логачева А.И. От металлургии гранул к аддитивным технологиям // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 3. С. 84–94. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-3-84-94.

Timofeev A.N., Logacheva A.I.

From metallurgy of granules to additive technologies

OJSC «Kompozit» traces its history back to the Central Research Institute of Materials Science (CRIMS) and successfully acts as a leading material science institute in the rocket and space industry up to the present day. The enterprise uses and improves state-of-the-art technologies, and creates a variety of new metal, non-metallic, composite and ceramic materials. This article provides an overview of powder sector development from the metallurgy of granules to additive technologies and shows the participation of MISIS graduates. The experience of OJSC «Kompozit» in the manufacturing of parts by selective electron beam melting (SEBM) of home-made VT6S titanium alloy powders. Initial powders are obtained by plasma centrifugal spraying of the bar stock. It is shown that the powders feature an ideal spherical shape, low defect rate, high processability and fully meet the process requirements. The microstructure and properties of samples and parts obtained by the SEBM are studied.

Keywords: metallurgy of granules, hot isostatic pressing, hot isostatic press, plasma centrifugal spraying, powder, granule, spherical shape, additive technologies, selective electron beam melting.

Timofeev A.N. — Dr. Sci. (Tech.), vice-director of the OJSC «Kompozit» (141070, Russia, Korolev, Pionerskaya str., 4). E-mail: info@kompozit-mv.ru.

Logacheva A.I. — Dr. Sci. (Tech.), head of the Department of metallic materials and metallurgical technologies of the OJSC «Kompozit». E-mail: info@kompozit-mv.ru.

Citation: *Timofeev A.N., Logacheva A.I. Ot metallurgii granul k additivnym tekhnologiyam. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2018. No. 3. P. 84–94. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-3-84-94.

Развитие современной техники требует создания изделий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками в условиях сложного высокотемпературного нагружения, воздействия агрессивной среды, износа, которые весьма

эффективно могут быть получены методами металлургии гранул [1].

Жаропрочные никелевые сплавы и сегодня остаются основным материалом для производства наиболее ответственных деталей газотурбинных и

ракетных двигателей, а также установок для газо-перекачки, энергетики и др.

Непрерывное повышение жаропрочности и, соответственно, усложнение состава сплавов привели к тому, что получение из них заготовок, крыльчаток, рабочих колес, дисков, валов и других деталей оказалось весьма проблематичным.

Гранульная металлургия явилась той технологией, которая открыла возможности эффективного использования в конструкциях современной техники нового поколения высокожаропрочных деформируемых никелевых сплавов.

Технология гранульной металлургии обеспечивает:

- минимальную дендритную и зональную ликвацию, что, в свою очередь, обуславливает высокий уровень равномерности механических характеристик во всех объемах деталей;

- существенное улучшение деформируемости материалов (при этом в ряде технологических процессов деформировать материал не требуется, поскольку становится возможным получение деталей окончательных размеров — изготовление нетто-деталей весьма сложной конфигурации);

- лучшую обрабатываемость механическим инструментом, что существенно снижает трудозатраты, связанные с производством двигателей;

- возможность получения целиком сложных узлов, которые ранее изготавливали путем производства отдельных деталей и соединения их сваркой или другими способами. При этом различные элементы указанных узлов могут быть выполнены из разных (в наибольшей степени отвечающих их функциональному назначению) материалов [1].

В 80-х годах XX века в Центральном научно-исследовательском институте материаловедения (ЦНИИМВ, г. Калининград, Моск. обл., с 1996 г. г. Королев) было создано подразделение гранульной металлургии, которое имело в своем составе две линии для производства гранул из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, включающие следующее оборудование: индукционно-вакуумная установка ИСВ-016НЦ для получения электродов для распыления из жаропрочных сплавов (ЖС) с центробежной заливкой; вакуумно-дуговая установка 833Д для получения электродов для распыления из титановых сплавов; две установки центробежного распыления УЦР-2, изготовленные Воронежским механическим заводом по документации ВИЛС; газовакуумная станция для хранения гранул; сепаратор для разделения гранул по фрак-

циям; стенд для обработки порошков; установка для наклепа гранул (дезинтегратор УДА-3); смесители для получения состава с оптимальным фракционным составом; вакуумный стенд для заполнения капсул, виброуплотнения и герметизации.

Проведены исследования по изысканию составов и технологии получения интерметаллидных сплавов на основе систем Ti—Al и Ni—Al, работоспособных при температурах 850 и 1400 °С, а в последнее время — на основе системы Nb—Al с рабочей температурой до 1800 °С для применения в перспективных изделиях ракетно-космической техники (Т.И. Бармина, О.В. Панфилова, Т.Г. Богданова, А.И. Логачева, С.И. Синельников). Совместно с ОАО «НПО «Энергомаш» (г. Химки) была разработана и опробована технология изготовления деталей типа «диск», «крыльчатка», «шнек» и др. из гранулированного никелевого сплава ЭП741НП, а также комбинированных деталей типа «сопловой аппарат» из сплавов АЖК и ЭП741НП (Н.В. Кистэ, И.А. Кормс, Т.И. Бармина, Б.Н. Подгорский, Ю.К. Бармин).

До настоящего времени продолжают работы по модернизации опытно-промышленной базы по производству гранул (порошков) из титановых, никелевых и интерметаллидных сплавов. (А.И. Логачева, Е.П. Степкин, А.Ю. Кривоспицкий). Технологическая линия основного оборудования участка гранульной металлургии ОАО «Комполит» (г. Королев) показана на рис. 1.

Важнейшим звеном в этой технологической цепочке (см. рис. 1) является изготовление порошков сплавов. Для реализации метода центробежного распыления разработано семейство специализированного технологического оборудования УЦР (изготовитель — ОАО «Электромеханика», г. Ржев). К недостаткам существующего оборудования типа УЦР следует отнести: низкое процентное содержание мелких гранул (<100 мкм) вследствие невысокой частоты вращения заготовки; отсутствие подачи газовой смеси в область плавления электрода для задания благоприятных условий кристаллизации и охлаждения частиц в полете, охлаждения и очистки газовой смеси и ряд других. Вот почему одним из главных направлений совершенствования технологии производства порошков металлических и интерметаллидных сплавов указанным методом в первую очередь являлось создание установок нового поколения, не имеющих вышеназванных недостатков. Установка нового поколения УЦРТ-9 представлена на рис. 2 [2].



Рис. 1. Линейка основного оборудования технологического участка порошковой металлургии ОАО «Композит» [2]

Значительная заслуга в становлении и развитии гранульной металлургии России принадлежит Всесоюзному институту легких сплавов (ВИЛС, г. Москва) и его крупным ученым — А.Ф. Белову, Н.Ф. Аношкину, Г.С. Гарибову, В.Н. Самарову, О.Х. Фаткуллину, В.Я. Кошелеву и др.; в научных лабораториях Конструкторского бюро химавтоматики (КБХА, г. Воронеж) и ОАО «Композит» (г. Королев) также получен ряд новых интересных решений (В.И. Холодный, И.М. Алипатов, Ю.И. Пономарев, М.А. Голуб, Т.И. Бармина, Н.В. Кисте, С.Ф. Маринин и др.).

В 1982 г. в ЦНИИМВ (ОАО «Композит») было принято решение о создании газостатического участка под руководством выпускника Московского института стали и сплавов (МИСиС) канд. техн. наук С.Ф. Маринина. В то время технология горячего изостатического прессования (ГИП) была малоизвестной, но, по данным зарубежной печати и ВИЛС, весьма привлекательной для получения изделий нового поколения. Для реализации поставленных задач по освоению ГИП была закуплена, установлена и в 1983 г. введена в эксплуатацию газостатическая установка отечественного



Рис. 2. Установка центробежного распыления нового поколения УЦРТ-9 [2]

производства Я06013. Рабочее пространство этого газостата составляло (диаметр × высота) 340 × 550 мм с рабочей температурой до 1500 °С. Также был закуплен лабораторный пресс Н1РР 10/26-200-2000, предназначенный для отработки режимов ГИП до температуры 2000 °С и давления 200 МПа на образцах диаметром до 100 мм и высотой до 250 мм. На этом прессе интенсивно нарабатывали лабораторные данные по получению оптимальных режимов (температура, давление, время выдержки) для сплавов алюминия, титана, жаропрочных сталей, твердых и быстрорежущих сплавов. Эти разработки явились основой при ГИП-обработке материалов на промышленном газостате Н1РР 70/150-200-1300 (рабочий диаметр 700 мм, высота 1500 мм), введенном в эксплуатацию в 1987 г., когда началась стадия активного промышленного внедрения процесса ГИП.

Одной из первых значимых литейных ГИП-заготовок была деталь «корпус» для космического аппарата «Буран-Энергия» из титанового сплава ВТ5Л, которая удовлетворяла всем конструкторским требованиям и была внедрена в серийное производство на нашем предприятии. Благодаря этим положительным результатам началось активное внедрение в отрасли данного уникального процесса. С 1997 г. и по настоящее время нашими заказчиками являются ПАО «Протон-ПМ» (г. Пермь), РКК «Энергия» (г. Королев), НПО «Энергомаш» (г. Химки), ГКНПЦ им. М.В. Хруничева (г. Москва), КБХМ им. А.М. Исаева (г. Королев) и др. Для этих предприятий серийно производится обработка корпусов и крыльчаток из алюминиевых сплавов для двигательных установок первой ступени ракеты-носителя «Протон-ПМ» и корпуса из жаропрочных сталей для НПО «Энергомаш», а также деталей из титановых сплавов двигателей РД197, РД198 и др. Одновременно проводились работы

по ГИП для изделий нефтегазовой и авиационной отраслей. Интенсивно шли поиски путей использования ГИП, кроме уплотнения литья, в гранульной металлургии, диффузионной сварке и других областях, где возможности газостатической обработки уникальны и практически незаменимы. К 2008 г. загрузка газостатических установок составила более 100 %.

В настоящее время технология ГИП применяется не только как самостоятельный процесс, но и в составе комплексных технологий. На газоставах ОАО «Композит» проводятся научно-исследовательские работы и серийные технологические операции, внедренные в производство на 10 заводах авиакосмической, нефтегазовой и атомной отраслей. Для авиационной промышленности обработка ГИП производится для корпусных отливок, а также лопаток I и II ступеней к двигателям самолетов ТУ-154, ИЛ-62, ИЛ-86, ИЛ-96-300, СУ-37, Миг-29К, Миг-35, Суперджет-100. Ее также используют для газотурбинных установок наземного базирования ГТУ-10, -12, -16, -25, предназначенных для перекачки газа внутри России и зарубежным потребителям. Следует отметить, что ГИП-обработка литых лопаток, с целью увеличения их механических характеристик и выхода годного, производимая в ОАО «Композит», применяется к ~94 % общего количества газостатируемых лопаток в России. В настоящее время области использования ГИП в ОАО «Композит» следующие:

- традиционная металлургия — удаление усадочной пористости в литых заготовках и деталях, в том числе и монокристаллических;
- порошковая (гранульная) металлургия — диски из ЖС, комбинированные узлы типа «ротор» (сталь + ЖС), а также детали из функциональных материалов;
- композиционные материалы;
- уплотнение покрытий на лопатках авиационных двигателей;
- специальные материалы и технологии — обработка оптических систем, диффузионная сварка, азотирование под давлением.

Сегодня в ОАО «Композит» завершаются пусконаладочные работы по газостату фирмы «Quintus» (г. Вестерос, Швеция): максимальный диаметр изделия — 710 мм, его максимальная высота — 1500 мм, рабочая температура — до 2000 °С, рабочее давление — до 200 МПа, который является уникальным агрегатом, способным работать при температуре до 2000 °С. Его наличие позволит ре-

шить проблемы создания особо высокотемпературных материалов и изделий из них, получаемых в том числе методом аддитивных технологий (АТ).

Известно, что материалы, получаемые АТ-методом, имеют недостаток — низкую многоцикловую усталость (работоспособность). Обработка с помощью ГИП в 1,5—2,0 раза повышает данный показатель. В этом направлении активно работают выпускники МИСИС А.В. Логачев, А.С. Ромашов.

Аддитивное производство (АП) — процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем последовательного добавления материала (обычно слой за слоем), в отличие от так называемого вычитающего производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литье, штамповка) [3]. Технологии АП позволяют сократить сроки и стоимость запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке, обеспечивают возможность и экономическую целесообразность мелкосерийного производства, а также способствуют сокращению отходов производства [4, 5].

За последнее десятилетие аддитивные технологии производства изделий из металлических материалов стали крайне востребованными во всем мире и охватили практически все сферы человеческой деятельности. Активные исследовательские и прикладные работы по развитию и совершенствованию АП-методов, расширению номенклатуры используемых материалов и улучшению качества получаемых изделий ведутся во всех отраслях промышленности, включая ракетно-космическую, авиационную, энергетическую и др. [6—10].

В ОАО «Композит» создано подразделение по освоению АТ-методов для ракетно-космической отрасли под руководством выпускника МИСиС канд. техн. наук И.А. Логачева. В его коллективе работают молодые ученые и специалисты моложе 30 лет, в том числе 3 выпускника МИСиС, канд. техн. наук: Ж.А. Сентюрина, М.С. Гусаков, Е.В. Тармосин. Основная масса сотрудников этого подразделения либо закончила МИСиС, либо повышала в нем квалификацию как магистры (Ю.Л. Рябиков, В.В. Сафронова, Н.А. Трандина, П.А. Потапкин, П.А. Усов, Н.А. Лабутина и др.). Коллектив успешно решает отраслевые задачи, проводит большой комплекс исследований, результаты которых докладываются на российских и

международных конференциях, где их работы получают первые места за лучшие разработки.

Одной из самых современных и перспективных АП-технологий является технология селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС). Ее суть заключается в том, что изготовление деталей осуществляется путем послойного избирательного сплавления металлического порошка мощным электронным лучом, траектория движения которого соответствует поперечному сечению изделия, сгенерированному из цифровой САПР-модели с помощью специального программного обеспечения [11–19]. Технология СЭЛС разработана в 2009 г. шведской компанией «Arcam AB» совместно с техническим университетом Чалмерса (Гетеборг, Швеция) в результате усовершенствования технологии селективного лазерного сплавления и имеет ряд существенных преимуществ перед лазерными аддитивными технологиями [20]. Так, процесс построения детали проходит в условиях глубокого вакуума (10^{-5} Па), что создает благоприятные условия для работы с высокоактивными материалами.

На сегодняшний день за рубежом функционирует серийное производство деталей аэрокосмического назначения из сплава Ti–6Al–4V, а также отработано кастомизированное производство медицинских имплантатов различного назначения.

Внедрение технологии СЭЛС в российскую промышленность целесообразно только при условии использования отечественных порошков, которые не должны уступать зарубежным аналогам по качеству и эксплуатационным характеристикам. В ОАО «Композит» имеется современное оборудование для изготовления гранул (порошков) из отечественного сплава ВТ6С методом плазменного центробежного распыления прутковой заготовки на установке УЦРТ-9. Для выделения целевой фракции порошка крупностью 40–100 мкм применяется вибрационное сито СВ2-0,6-К-377 (Россия). Результаты химического анализа порошковых материалов из сплава ВТ6С (фракция 40–100 мкм) показали, что их состав соответствует ГОСТ 19807-91 [21], мас. %:

Ti — осн.	Fe — 0,25
Al — 6,45	C — 0,10
V — 3,71	O ₂ — 0,16
Zr — 0,30	N ₂ — 0,01
Si — 0,15	H ₂ — 0,015
Примеси — 0,30	

Гранулометрический состав целевой фракции приведен на рис. 3, а. Пик гранулометрического распределения соответствует фракции 60–70 мкм. Средний размер частиц порошка составляет 63,5 мкм. Полученные порошковые материалы характеризуются сферической формой частиц со средним отношением большего радиуса к меньшему $K_p = 1,017 \pm 0,029$, отсутствием сателлитов и крупных газовых пор, выходящих на поверхность (рис. 3, б, в). Каждая порошковая частица, как правило, состоит из нескольких зерен (от 3 до 6 шт.), которые имеют преимущественно мартенситную структуру во всем диапазоне гранулометрического состава. В ходе исследований поперечных шлифов (рис. 3, г) установлено, что внутренняя структура полученных порошков практически бездефектна с пористостью, не превышающей 1 %.

Одними из наиболее технологически значимых характеристик порошковых материалов, определяющими возможность их применения в области аддитивных технологий, являются текучесть и насыпная плотность. Согласно результатам измерений, эти показатели у порошков из сплава ВТ6С фракции 40–100 мкм составляют соответственно 6,32 с и 2,48 г/см³ [22–24].

Таким образом, можно заключить, что полученные порошки сплава ВТ6С имеют удовлетворительный гранулометрический состав, идеальную сферическую форму, низкий уровень дефектности, необходимый уровень эксплуатационных свойств и в целом удовлетворяют требованиям процесса СЭЛС.

Экспериментальные образцы и изделия изготавливали на установке «Arcam» (Швеция). Основные этапы технологического цикла СЭЛС представлены на рис. 4. На первом этапе осуществляется процесс подготовки файла компоновки детали в камере построения (рис. 4, а), на втором — непосредственное выращивание детали в установке СЭЛС (рис. 4, б).

После завершения процессов построения и остывания из установки извлекается куб, состоящий из подспекенного порошка (рис. 4, в), внутри которого находятся плита построения, изготовленная деталь и образцы-свидетели. Следующий этап технологического цикла — извлечение изготовленных изделий из массива спекенного порошка, участвовавшего в процессе сплавления. Данный процесс проводится в системе восстановления порошка (рис. 4, г). На рис. 4, д представлен внешний вид плиты построения с расположенными на

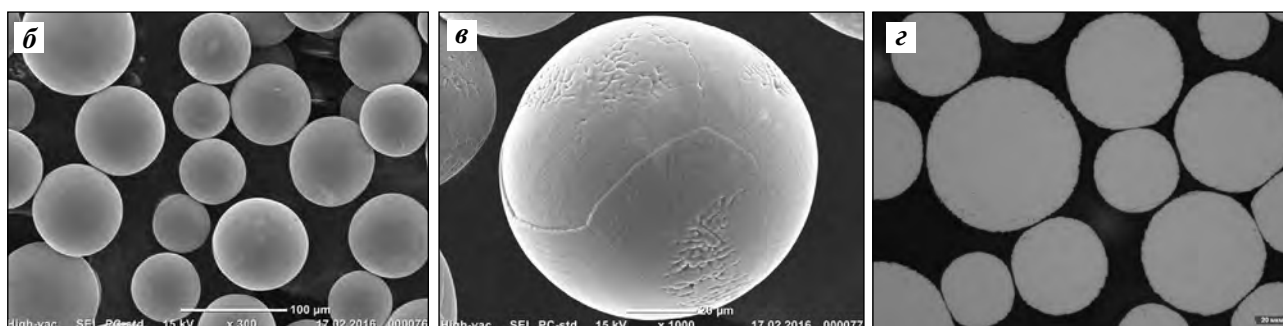
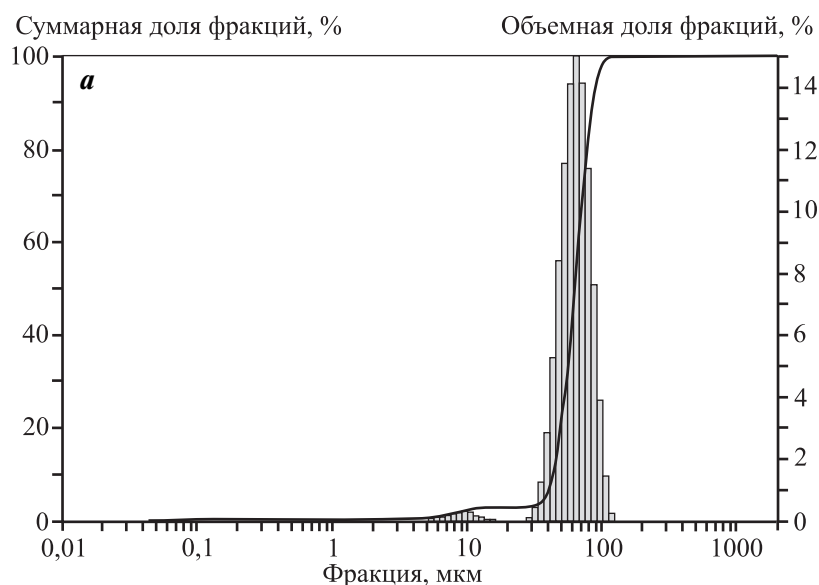


Рис. 3. Гранулометрический состав (а), морфология (б, в) и внутренняя структура (г) порошков из сплава ВТ6С

ней изготовленной детали и образцами-свидетелями после обработки в системе восстановления порошка.

Исследование продольного и поперечного сечений образцов-свидетелей методом оптической микроскопии при увеличении $50\times$ позволило выявить структурную анизотропию материала, полученного методом СЭЛС. На рис. 5, а, б виден столбчатый характер макроструктуры образца-свидетеля. Направление роста столбчатых зерен совпадает с направлением преимущественного теплоотвода в процессе построения образца.

Микроструктура сплава, исследованная методом РЭМ при увеличениях $1000\times$ и $3000\times$, представлена на рис. 5, в—е. Сплав ВТ6С после СЭЛС имеет двухфазную ($\alpha + \beta$)-структуру видманштеттового типа. При этом размер структурных составляющих существенно меньше структурных составляющих сплава ВТ6С в литом и деформированном состояниях, что связано с высокими скоростями охлаждения в процессе кристаллизации

тонкого слоя расплава. Первоначально из расплава кристаллизуются первичные β -зерна, затем по границам первичного зерна выделяются прослойки α -фазы, после чего происходит распад β -фазы на α - и β -кристаллы. По результатам полуквантитативного рентгеноструктурного фазового анализа выявлено, что процентное содержание α - и β -фаз составляет 93 и 7 % соответственно.

Результаты механических испытаний образцов из сплава ВТ6С, полученных методом СЭЛС, представлены в табл. 1. Для всесторонней оценки свойств материала после СЭЛС образцы-свидетели были подвергнуты стандартным видам термической обработки (ТО) для сплава ВТ6С — отжигу и закалке с последующим старением. В табл. 2 приведены механические характеристики сплава ВТ6С согласно ГОСТ 26492-85 [25], а в табл. 3 — зарубежного сплава-аналога Grade 5 из сертификата фирмы «Arcam AB» — производителя оборудования СЭЛС.

Анализ представленных данных показывает, что образцы, полученные методом СЭЛС из по-

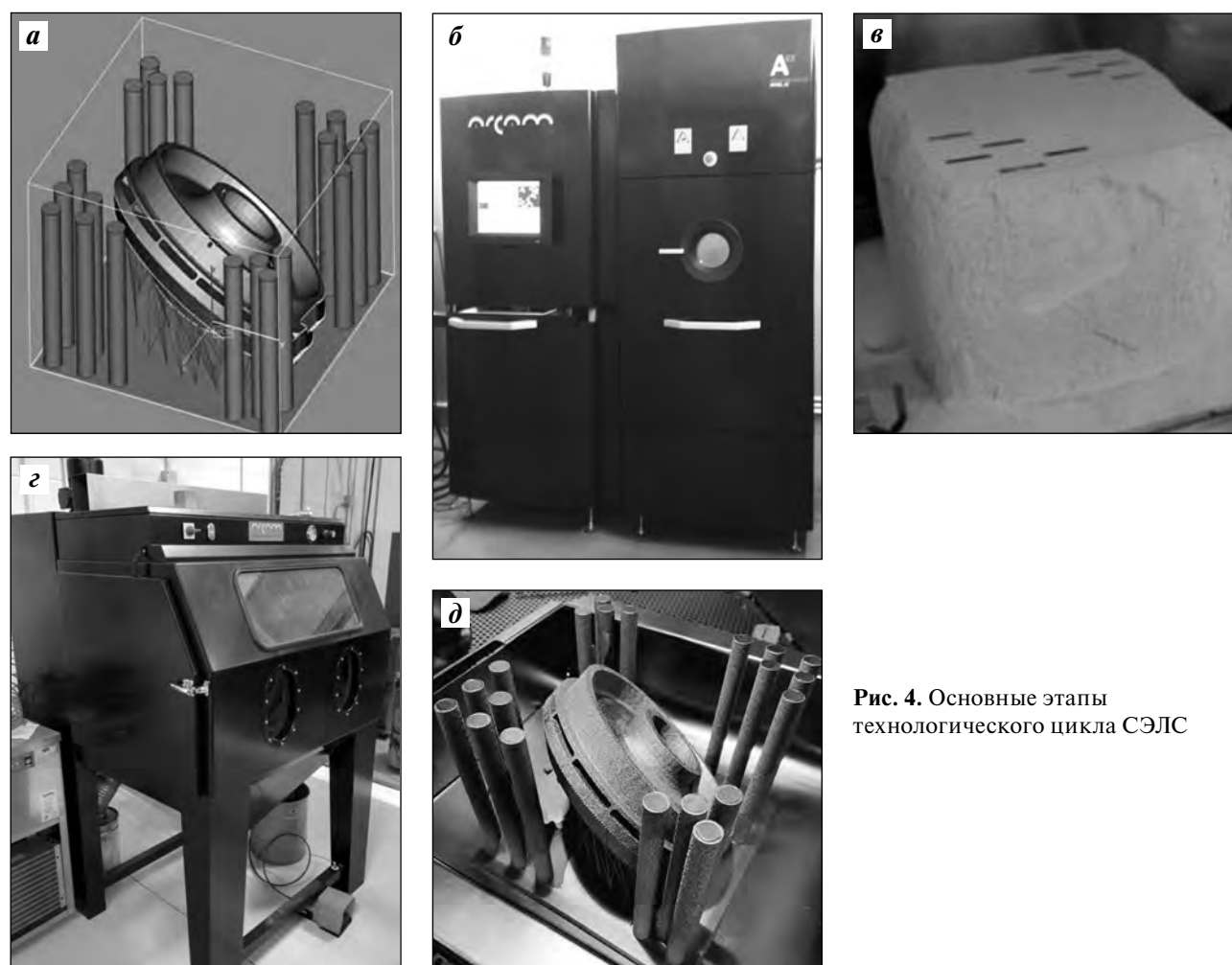


Рис. 4. Основные этапы технологического цикла СЭЛС

Таблица 1

Результаты механических испытаний образцов из сплава ВТ6С, полученных методом СЭЛС

Состояние образца	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Отн. удлинение δ , %	Отн. сужение φ , %
СЭЛС	1063	1003	7,16	5,26
СЭЛС + закалка + старение	1234	1066	9,02	19,9
СЭЛС + отжиг	1042	992	9,11	43,5

Таблица 2

Свойства сплава ВТ6С по ГОСТ 26492-85 [25]

Сортамент	Термообработка	Предел прочности σ_B , МПа	Отн. удлинение δ , %	Отн. сужение φ , %
Пруток	Закалка + старение	755–935	6–9	15–22
Пруток	Отжиг	≥ 1030	4	14

Таблица 3

Свойства сплава Grade 5 согласно сертификату фирмы «Arcam AB»

Состояние образца	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Отн. удлинение δ , %	Отн. сужение φ , %
СЭЛС + ТО	1020	950	14	40
Кованый	930	860	≥ 10	≥ 25

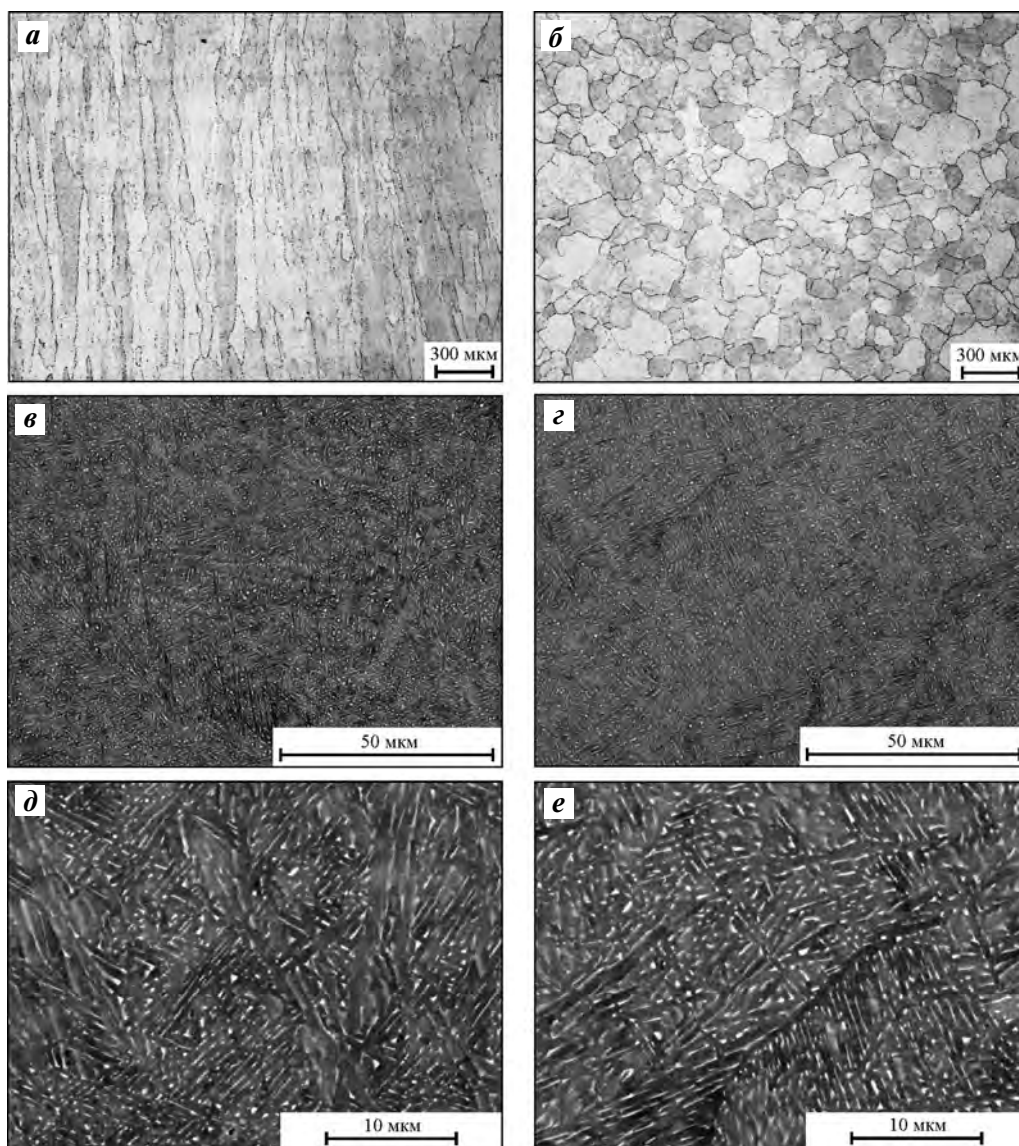


Рис. 5. Макро- и микроструктура продольного (*a, в, д*) и поперечного (*б, з, е*) сечений образцов из сплава ВТ6С, полученных методом СЭЛС

Увеличение – 50 \times (*a, б*), 1000 \times (*в, з*) и 3000 \times (*д, е*)

рошков производства ОАО «Композит», сопоставимы по свойствам со сплавом Grade 5 (см. табл. 3), полученным аналогичным методом, и превосходят сплав ВТ6С, полученный по стандартной технологии (см. табл. 2) [26]. Оптимальные характеристики имеет образец сплава ВТ6С, полученный методом СЭЛС с последующим отжигом.

На рис. 6 приведен ряд изделий различного назначения из порошков сплава ВТ6С производства ОАО «Композит», для которых отработана технология СЭЛС.

Изготовление сложнопрофильных деталей методом СЭЛС является весьма сложной задачей,

которая требует индивидуального подхода для каждой отдельной детали. Как правило, для отработки процесса получения конкретного изделия требуется от 2 до 4 итераций. После определения оптимального расположения и ориентации детали зачастую требуется введение размерных поправочных коэффициентов. Для этого производится полный контроль геометрии и размеров изготавливаемой детали. В ОАО «Композит» для этого используется лазерный координатно-измерительный манипулятор (рис. 7). По результатам измерений определяются отклонения от первоначальной САПР-модели и в случае необходимости

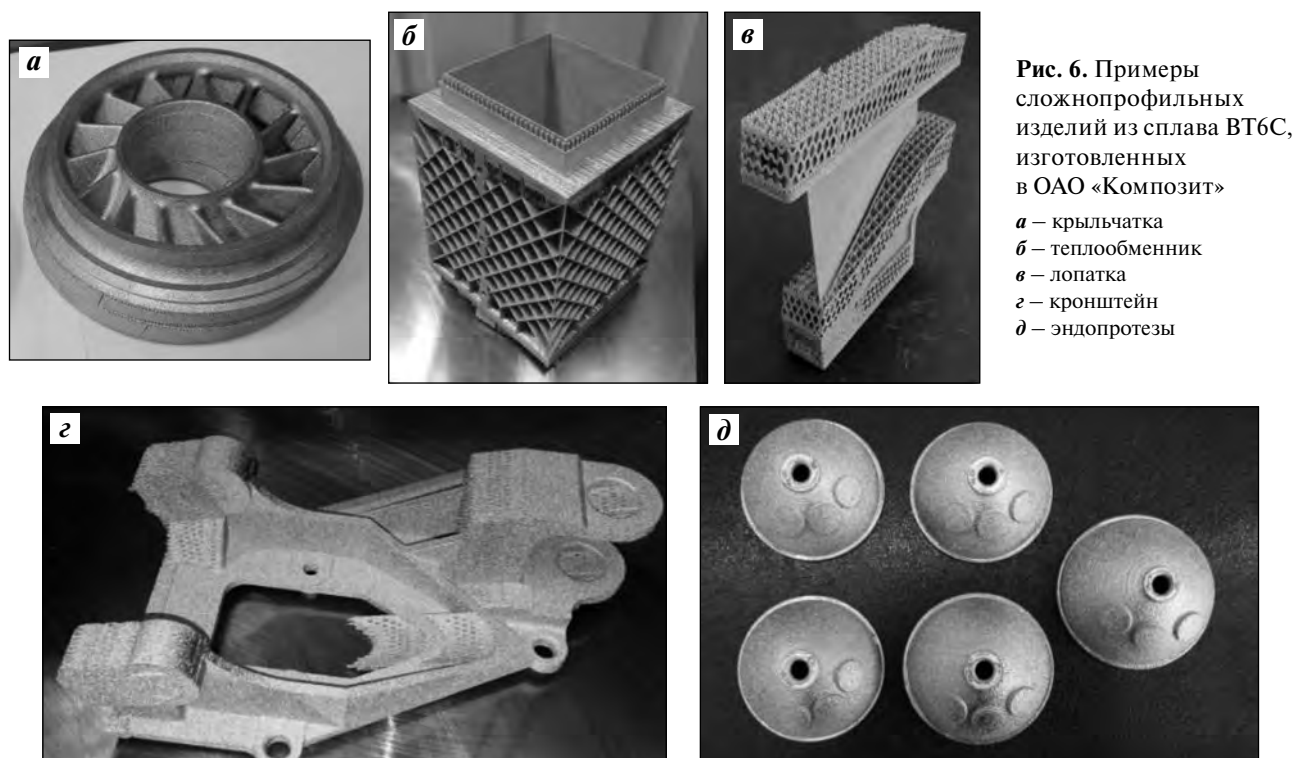


Рис. 6. Примеры сложнопрофильных изделий из сплава ВТ6С, изготовленных в ОАО «Композит»
а – крыльчатка
б – теплообменник
в – лопатка
г – кронштейн
д – эндопртезы

рассчитываются поправочные коэффициенты для следующего процесса.

Помимо геометрических размеров при изготовлении деталей сложной формы необходимо контролировать их дефектность. Для этого, как правило, применяются методы неразрушающего контроля — такие, как ультразвуковая дефектоскопия, томография и др.

В случае обнаружения в материале детали незначительного количества дефектов (пор) возможно их устранение посредством горячего изостатического прессования (ГИП). Следует учитывать, что для особо ответственных деталей операция

ГИП рекомендована вне зависимости от дефектности структуры (даже если она незначительна).

Таким образом, гранулы (порошки) сплава ВТ6С производства ОАО «Композит» характеризуются сферической формой, низким содержанием газовых примесей, отсутствием дефектов в виде сателлитов и крупных газовых пор, высокой насыпной плотностью и текучестью на уровне 6 с. Они апробированы для изготовления деталей методом селективного электронно-лучевого сплавления. Механические свойства образцов, полученных методом СЭЛС ($\sigma_b = 1040$ МПа, $\delta = 9,11$ %), соответствуют лучшим зарубежным аналогам и

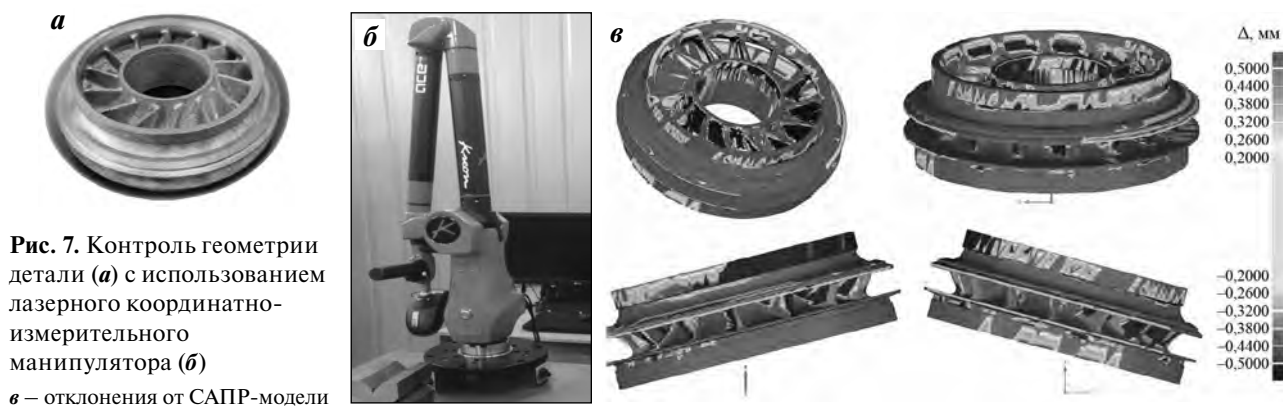


Рис. 7. Контроль геометрии детали (*а*) с использованием лазерного координатно-измерительного манипулятора (*б*)
в – отклонения от САПР-модели

превышают свойства сплава ВТ6С, полученного по стандартным технологиям.

Заключение

Развитие инновационных технологий, создание новых материалов, развитие порошковых методов от металлургии гранул до аддитивных технологий в ОАО «Композит» успешно осуществляются с участием ученых и специалистов, подготовленных в МИСиС.

Организация в 80-90-х годах прошлого столетия на базе ОАО «Композит» производства металлических гранул сыграла большую роль в развитии и использовании аддитивных технологий для различных изделий ракетно-космической техники. Немалая заслуга в этой важной области принадлежит выпускникам Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Литература

1. *Логачева А.И.* Разработка технологии гранульной металлургии комбинированных деталей для двигателей ракетно-космической и авиационной техники: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 2008.
2. *Логачева А.И.* Комплексная технология изготовления тонкостенных элементов методом порошковой металлургии для производства деталей из конструкционных и функциональных сплавов на основе титана и никеля для изделий ракетно-космической техники: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: ИМЕТ РАН, 2017.
3. *Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н.* Аддитивные технологии в машиностроении. СПб: Изд-во СПбГУ, 2013.
4. *Baumers M., Dickens P., Tuck Ch., Hague R.* The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push // *Technol. Forecast. Social Change.* 2016. Vol. 102. P. 193–201.
5. Аддитивное производство: на пике завышенных ожиданий. URL: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=610&group_id_4=110 (дата обращения: 05.06.2017).
6. *Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.* Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2009.
7. *Portolés L., Jordá O., Jordá L., Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S.* A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting // *J. Manuf. Systems.* 2016. Vol. 41. P. 65–75.
8. *Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S.* The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *Int. Mater. Rev.* 2016. Vol. 61. Iss. 5. P. 315–360.
9. *Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Wicker R.B.* Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies // *J. Mater. Sci. Technol.* 2012. Vol. 28 (1). P. 1–14.
10. *Baudana G., Biamino S., Ugues D., Lombardi M., Fino P., Pavese M., Badini C.* Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by electron beam melting: Contribution of politecnico di torino // *Met. Powder Rep.* 2016. Vol. 71 (3). P. 193–199.
11. *Логачева А.И., Сентюрин Ж.А., Логачев И.А.* Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) // *Персп. материалы.* 2015. No. 4. С. 5–16.
12. *Murr L.E., Gaytan S.M.* Electron beam melting // *Compr. Mater. Process.* 2014. Vol. 10. P. 135–161.
13. *Gong X., Anderson T., Chou K.* Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology // *Manufact. Rev.* 2014. No. 1 (2). P. 11–23.
14. *Gaytan S.M., Murr L.E., Martinez E., Martinez J.L., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B.* Comparison of microstructures and mechanical properties for solid and mesh cobalt-base alloy prototypes fabricated by electron beam melting // *Metall. Mater. Trans. A.* 2010. Vol. 41. P. 3216–3227.
15. *Deng D., Moverare J., Peng R.L., Söderberg H.* Microstructure and anisotropic mechanical properties of EBM manufactured Inconel 718 and effects of post heat treatments // *Mater. Sci. Eng. A.* 2017. Vol. 693. P. 151–163.
16. *Kirka M.M., Medina F., Dehoff R., Okello A.* Mechanical behavior of post-processed Inconel 718 manufactured through the electron beam melting process // *Mater. Sci. Eng. A.* 2017. Vol. 680. P. 338–346.
17. *Yu P., Qian M., Tomus D., Brice C.A., Schaffer G.B., Muddle B.C.* Electron beam processing of aluminium alloys // *Mater. Sci. Forum.* 2009. Vol. 618–619. P. 621–626.
18. *Loeber L., Biamino S., Ackelid U., Sabbadini S., Epicoco P., Fino P., Eckert J.* Comparison of selective laser and electron beam melted titanium aluminides // *Solid freeform fabrication proceedings: 22nd Intern. Symp. Austin: Univ. of Texas,* 2011. P. 547–556.
19. *Attar E.* Simulation of selective electron beam melting processes. Sarabrucca: VDM Publ., 2011.
20. *Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А.* Аддитивные технологии и изделия из металла // Библиотечка литейщика. 2014. No. 8–9. С. 14–71.
21. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки.
22. International Standardisation Organisation: ISO 13320 : 2009. Particle size analysis — Laser diffraction methods.
23. ГОСТ 19440-94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Ч. 1. Метод с использованием воронок.
24. ГОСТ 20899-98. Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла).
25. ГОСТ 26492-85. Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия.
26. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

References

1. Logacheva A.I. Razrabotka tekhnologii granul'noi metallurgii kombinirovannykh detalei dlya dvigatelei raketno-kosmicheskoi i aviatsionnoi tekhniki [Development of technology of granular metallurgy of combined parts for engines of rocket and space and aviation equipment]: Abstract of the dissertation of PhD. Moscow: MAI, 2008.
2. Logacheva A.I. Kompleksnaya tekhnologiya izgotovleniya tonkostennykh elementov metodom poroshkovoi metallurgii dlya proizvodstva detalei iz konstruksionnykh i funktsional'nykh splavov na osnove titana i nikelya dlya izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki [Complex technology of manufacturing thin-walled elements by powder metallurgy for the production of parts from structural and functional alloys based on titanium and nickel for products of rocket and space technology]: Abstract of the dissertation of Dr. Sci. (Tech.). Moscow: IMET RAN, 2017.
3. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technologies in mechanical engineering]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2013.
4. Baumers M., Dickens P., Tuck Ch., Hague R. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technol. Forecast. Social Change*. 2016. Vol. 102. P. 193–201.
5. Additivnoe proizvodstvo: na pike zavysennykh ozhidaniy [Additive production: at the peak of inflated expectations]. URL: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=610&group_id_4=110 (accessed: 05.06.2017).
6. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2009.
7. Portolés L., Jordá O., Jordá L., Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting. *J. Manuf. Systems*. 2016. Vol. 41. P. 65–75.
8. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *Int. Mater. Rev.* 2016. Vol. 61. Iss. 5. P. 315–360.
9. Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Wicker R.B. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *J. Mater. Sci. Technol.* 2012. Vol. 28 (1). P. 1–14.
10. Baudana G., Biamino S., Ugues D., Lombardi M., Fino P., Pavese M., Badini C. Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by electron beam melting: Contribution of politecnico di torino. *Met. Powder Rep.* 2016. Vol. 71 (3). P. 193–199.
11. Logacheva A.I., Sentyurina Zh.A., Logachev I.A. Additivnye tekhnologii proizvodstva otvetstvennykh izdelii iz metallov i splavov (obzor) [Additive technologies for production of critical products from metals and alloys (review)]. *Perspektivnye materialy*. 2015. No. 4. P. 5–16.
12. Murr L.E., Gaytan S.M. Electron beam melting. *Compr. Mater. Process.* 2014. Vol. 10. P. 135–161.
13. Gong X., Anderson T., Chou K. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology. *Manufact. Rev.* 2014. No. 1 (2). P. 11–23.
14. Gaytan S.M., Murr L.E., Martinez E., Martinez J.L., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B. Comparison of microstructures and mechanical properties for solid and mesh cobalt-base alloy prototypes fabricated by electron beam melting. *Metall. Mater. Trans. A*. 2010. Vol. 41. P. 3216–3227.
15. Deng D., Moverare J., Peng R.L., Söderberg H. Microstructure and anisotropic mechanical properties of EBM manufactured Inconel 718 and effects of post heat treatments. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017. Vol. 693. P. 151–163.
16. Kirka M.M., Medina F., Dehoff R., Okello A. Mechanical behavior of post-processed Inconel 718 manufactured through the electron beam melting process. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017. Vol. 680. P. 338–346.
17. Yu P., Qian M., Tomus D., Brice C.A., Schaffer G.B., Muddle B.C. Electron beam processing of aluminium alloys. *Mater. Sci. Forum*. 2009. Vol. 618–619. P. 621–626.
18. Loeber L., Biamino S., Ackelid U., Sabbadini S., Epicoco P., Fino P., Eckert J. Comparison of selective laser and electron beam melted titanium aluminides. In: *Solid freeform fabrication proceedings: 22nd Intern. Symp.* Austin: Univ. of Texas, 2011. P. 547–556.
19. Attar E. Simulation of selective electron beam melting processes. Sarabrucca: VDM Publ., 2011.
20. Dovbysh V.M., Zbednov P.V., Zlenko M.A. Additivnye tekhnologii i izdeliya iz metalla [Additive technologies and metal products]. *Bibliotekha liteishchika*. 2014. No. 8–9. P. 14–71.
21. GOST 19807-91. Titan i splavy titanovye deformiruyemye. Marki [Titanium and titanium alloys deformable. Stamps].
22. International Standardisation Organisation: ISO 13320 : 2009. Particle size analysis — Laser diffraction methods.
23. GOST 19440-94. Poroshki metallicheskie. Opredelenie nasyppnoi plotnosti. 1. Metod s ispol'zovaniem voronki [Metallic powders. Determination of bulk density. Pt. 1. Method using a funnel].
24. GOST 20899-98. Poroshki metallicheskie. Opredelenie tekuchesti s pomoshch'yu kalibrovannoi voronki (pribora Khollo) [Metallic powders. Determination of fluidity with a calibrated funnel (Hall device)].
25. GOST 26492-85. Prutki katanye iz titana i titanovykh splavov. Tekhnicheskie usloviya [Rolled rods made of titanium and titanium alloys. Technical specifications].
26. GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie [Metals. Methods of tensile testing].