

7. Способ получения порошка низколегированной стали: пат. Японии 53-6264. С 22 С 38/44/ Нисида Такахико, Ямамия Масао. Ш 51-79871; Заявл. 07.07.76; Оpubл. в БИ 20.01.78.
8. Мокшанцев Г.Ф. Исследование условий получения и свойств железных порошков и материалов на их основе из прокатной окалины природно-легированных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / ИПМ АН УССР. – Киев, 1971. – 23 с.
9. Низколегированная сталь – Урал-Металл [Электронный ресурс]. – URL: [ural-metall.com/nizkolegir](http://ural-metall.com/nizkolegir)
10. Höganäs A.B. Höganäs iron and steel powder for sintered components. – 2002. – 293 p.
11. The possibility of modifying the elements of the bearing assembly with nanoparticles in order to reduce the friction coefficient / P. Stankevich, V. Mironovs, E. Vasileva, A. Breki, O. Tolochko // IMST 2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng. – 2017. – Vol. 251. – P. 012084. DOI:10.1088/1757-899X/251/1/012084/
12. Static-dynamic powder material compaction methods / V. Mironovs, P. Stankevich, I. Beljaeva, V. Glushenkov // Eng. for Rural Development: Proc. 15th Int. Sci. Conf., Latvia, Jelgava, 25–27 May 2016 / University of Agriculture. – 2016. – Vol. 15. – P. 1128–1132.

## ОТ МЕТАЛЛУРГИИ ГРАНУЛ К АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

**А.Н. Тимофеев, А.И. Логачева**

ООО «Композит», Королев, Россия  
e-mail: [info@kompozit-mv.ru](mailto:info@kompozit-mv.ru)

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. Рассмотрен опыт ОАО «Композит» в области изготовления деталей методом селективного электронно-лучевого сплавления 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.

## FROM METALLURGY OF GRANULES TO ADDITIVE TECHNOLOGIES

A.N. Timofeev, A.I. Logacheva

JSC "Kompozit", Korolev, Russian Federation  
e-mail: info@kompozit-mv.ru

JSC "Compozite" conducts its history from the Central Research Institute of Materials Science (CRIMS) and up to the present day successfully performs the functions of the leading material science institute in the rocket and space industry. The enterprise develops a large number of advanced technologies, and creates a variety of new metal, non-metallic, composite and ceramic materials. This article provides an overview of the development of the powder direction from the metallurgy of granules to additive technologies and shows the participation of MISIS graduates. The experience of JSC "Compozite" in the field of manufacturing of details by the method of selective electron beam alloying of powders of the titanium alloy VT6S of own manufacture is presented. The starting powders were obtained by the method of plasma centrifugal spraying of the bar stock. It is shown that the powders are characterized by an ideal spherical shape, low defectiveness level, high technological properties and fully meet the requirements of the process. The microstructure and properties of samples and parts obtained by the SEBA method were studied.

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

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].

Технология гранульной металлургии обеспечивает следующее:

- минимальную дендритную и зональную ликвацию;
- существенное улучшение деформируемости материалов;
- лучшую обрабатываемость механическим инструментом;
- возможность получения целиком сложных узлов. При этом различные элементы узлов могут быть выполнены из разных материалов [1].

В 80-х годах XX века в Центральном научно-исследовательском институте материаловедения было создано подразделение гранульной металлургии, которое имело в своем составе две линии для производства гранул из жаропрочных никелевых и титановых сплавов.

Для реализации метода центробежного распыления разработано семейство специализированного технологического оборудования УЦР. Установка нового поколения УЦРТ-9, позволяющая повысить процентное содержание мелких гранул (<100 мкм), представлена на рис. 1 [2].

Значительная заслуга в становлении и развитии гранульной металлургии России принадлежит Всесоюзному институту легких сплавов и его крупным ученым. В научных лабораториях Конструкторского бюро химав-

томатики (КБХА, г. Воронеж) и ОАО «Композит» (г. Королев) также получен ряд новых интересных решений.



Рис. 1. Установка центробежного распыления нового поколения УЦРТ-9

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].

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. Процесс построения детали проходит в условиях глубокого вакуума ( $10^{-5}$  Па), что создает благоприятные условия для работы с высокоактивными материалами.

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» изготавливаются такие порошки.

Гранулометрический состав целевой фракции приведен на рис. 2, 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. 2, 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. 2, *з*) установлено, что внутренняя структура полученных порошков практически бездефектна с пористостью, не превышающей 1 %.

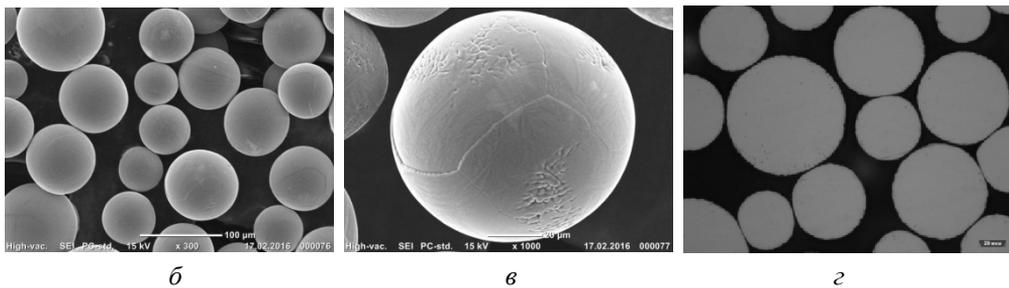
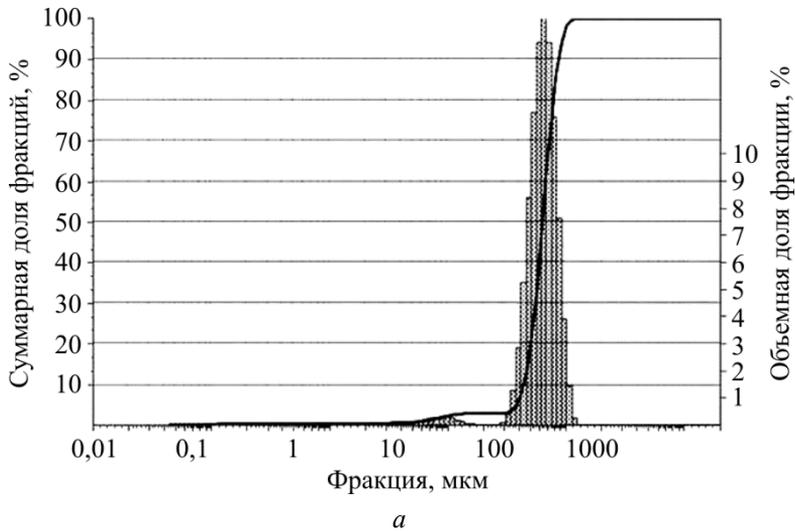


Рис. 2. Порошки из сплава ВТ6С: гранулометрический состав (*а*), морфология (*б, в*) и внутренняя структура (*з*)

Текущность и насыпная плотность порошков из сплава ВТ6С фракции 40–100 мкм составляют соответственно 6,32 с и 2,48 г/см<sup>3</sup>.

Экспериментальные образцы и изделия изготавливали на установке Arcam. 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.

По результатам полуколичественного рентгеноструктурного фазового анализа выявлено, что процентное содержание  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз составляет 93 и 7 % соответственно.

Результаты механических испытаний образцов из сплава ВТ6С, полученных методом СЭЛС, представлены в табл. 1. В табл. 2 приведены механиче-

ские характеристики сплава ВТ6С согласно ГОСТ 26492–85, а в табл. 3 – зарубежного сплава-аналога Grade 5 из сертификата фирмы Arcam AB – производителя оборудования СЭЛС.

Таблица 1

Результаты механических испытаний

Состояние образца	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\varphi$ , %
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

Сортамент	Термообработка	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\varphi$ , %
Пруток	Закалка + старение	755–935	6–9	15–22
Пруток	Отжиг	$\geq 1030$	4	14

Таблица 3

Свойства сплава Grade 5 согласно сертификату фирмы Arcam AB

Состояние образца	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\varphi$ , %
СЭЛС + ТО	1020	950	14	40
Кованый	930	860	$\geq 10$	$\geq 25$

Анализ представленных данных показывает, что образцы, полученные методом СЭЛС из порошков производства ОАО «Композит», сопоставимы по свойствам со сплавом Grade 5, полученным аналогичным методом, и превосходят сплав ВТ6С, полученный по стандартной технологии.

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.

### Выводы

Развитие инновационных технологий, создание новых материалов, развитие порошковых методов от металлургии гранул до аддитивных технологий успешно осуществляется в ОАО «Композит». 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.

## Список литературы

1. Логачева А.И. Разработка технологии гранульной металлургии комбинированных деталей для двигателей ракетно-космической и авиационной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук / МАИ. – М., 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. ... д-р техн. наук / ИМЕТ РАН. – М., 2017.
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2013.

## ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**М.И. Алымов, И.В. Сайков**

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения  
им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия  
e-mail: alymov@ism.ac.ru

Представлены основные научные направления, развивающиеся в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова (ИСМАН). Показаны результаты исследований ударно-волновой обработки материалов, сопровождающейся химическими превращениями. Проведено инициирование синтеза металлом металлического ударника на цилиндрические ампулы. Продемонстрирован новый метод СВС-экструзии получения длинномерных изделий из хрупких и труднодеформируемых порошков тугоплавких неорганических соединений. Описаны структура и свойства полученных в ИСМАН сверхтвёрдых СВС-композитов. Предложена разработанная институтом конвективно-кондуктивная модель горения СВС-смесей.

**Ключевые слова:** порошковые материалы, керметы, керамические композиты, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, химическая энергетика.

## HIGH-ENERGY METHODS FOR THE SYNTHESIS OF POWDER MATERIALS

**M.I. Alymov, I.V. Saykov**

Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science  
named after of A.G. Merzhanova of the RAS, Chernogolovka, Russian Federation  
e-mail: alymov@ism.ac.ru

The paper presents the main scientific directions developing in the institute of structural macrokinetics and problems of materials science to them. A.G. Merzhanova (ISMAN). The results of studies of shock-wave processing of materials, accompanied by chemical transformations