

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-38-50

## ОСОБЕННОСТИ СФЕРОИДИЗАЦИИ ГРАНУЛ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА

С.С. Гвоздев<sup>1</sup>, Е.И. Курбаткина<sup>1</sup>, Е.М. Щербаков<sup>1</sup>, И.А. Богачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлены исследования и разработки по базовым технологическим параметрам синтеза металлического композиционного материала (МКМ) системы Mo–Si–B методами селективного электронно-лучевого сплавления и селективного лазерного спекания (СЭЛС и СЛС). Исследованы механизмы формирования границ раздела и протекания диффузионных процессов на интерфейсе «матрица–упрочнитель» в процессе синтеза заготовок методами СЭЛС и СЛС. Анализ порошков проводили методом съемки на сканирующем электронном микроскопе, изображения с которого показали, что гранулы порошка имеют осколочную форму.

**Ключевые слова:** агломерация порошков, жаропрочность, материал молибден-кремний-бор, металлический композиционный материал, селективное лазерное спекание, селективное электронно-лучевое сплавление, сфероидизация порошков, турбина ГТД

**Для цитирования:** Гвоздев С.С., Курбаткина Е.И., Щербаков Е.М., Богачев И.А. Особенности сфероидизации гранул различных фракций высокотемпературного композиционного материала на основе молибдена // Труды ВИАМ. 2025. № 5 (147). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-38-50.

Scientific article

## FEATURES OF GRANULES SPHEROIDIZATION OF DIFFERENT FRACTIONS OF MOLYBDENUM-BASED HIGH-TEMPERATURE COMPOSITE MATERIAL

S.S. Gvozdev<sup>1</sup>, E.I. Kurbatkina<sup>1</sup>, E.M. Shcherbakov<sup>1</sup>, I.A. Bogachyov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article presents the results of research and development on basic technological synthesis parameters of Mo–Si–B system metal composite material (MCM) by EBM and SLS methods. Additionally, the paper provides the investigation of the mechanisms of interface formation and diffusion processes at the interface «matrix–strengthening agent» in the process of synthesis of blanks by EBM and SLS. The powders have been analyzed by scanning electron microscope imaging, the images from which show that the powder granules have a splinter shape.

**Keywords:** powder sintering, heat resistance, molybdenum-silicon-boron material, metal composite material, selective laser sintering, selective electron-beam melting, powder spheroidization, GTE turbine

**For citation:** Gvozdev S.S., Kurbatkina E.I., Shcherbakov E.M., Bogachyov I.A. Features of granules spheroidization of different fractions of molybdenum-based high-temperature composite material. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-38-50.

## Введение

Создание современных конкурентоспособных авиационных двигателей невозможно без создания новых материалов с характеристиками, требуемыми конструкторами воздушных судов. Одним из самых нагруженных узлов двигателя является турбина, которая обеспечивает вращение привода компрессора, агрегатов двигателя и летательного аппарата в целом.

Параметр, характеризующий эффективность работы газотурбинного двигателя (ГТД), – коэффициент полезного действия, который теоретически в данном случае может достигать уровня 0,9–0,94. Такие значения можно обеспечить повышением температуры газов перед турбиной ~1900 К.

В настоящее время самыми теплонагруженными являются лопатки турбины, которые работают практически при температуре плавления материала лопаток, что обеспечено созданием жаропрочных металлических сплавов и специализированных теплозащитных покрытий, совершенствованием аэрогазодинамических расчетов трехмерных течений и систем охлаждения, переходом на компьютерные программы конечно-элементного моделирования и проектирования, а также повышением качества конструирования и доводкой двигателей [1].

Направление совершенствования турбин заключается в увеличении теплоперепада, приводящего к увеличению скорости газового потока и повышению температуры газа на входе до 2000 К. Сократить массу и габариты ГТД можно, применяя одноступенчатые турбины с высоким перепадом температур и давления.

Высокая эксплуатационная надежность всех узлов и агрегатов ГТД определяется расчетами при конструировании на основании паспортных характеристик материалов, поддерживается в эксплуатации своевременной диагностикой и проведением ремонта. Кроме ремонтпригодности надежность определяется безотказностью, долговечностью и прочностными показателями материала. Эти показатели обеспечиваются: полным учетом условий работы всех элементов; правильным выбором материалов, покрытий, специальных технологических операций и технологий изготовления.

Снижение весовых характеристик ГТД можно обеспечить легкими алюминиевыми и титановыми сплавами  $\alpha$ - и  $(\alpha + \beta)$ -модификаций. Титановые сплавы чаще используются для изготовления деталей в аэрокосмической отрасли из-за их малой плотности. Однако у них низкие прочность и жаростойкость, что требует тестирования значительного количества металлических композиционных материалов, в которых алюминевую или титановую и даже медную и ниобиевую матрицы армируют оксидными, кремниевыми, углеродными или комбинированными волокнами.

Для деталей горячего тракта ГТД современных авиационных судов необходимо одновременно повышать температуру и снижать массу двигателя. Жаропрочные металлические сплавы на основе никеля (даже с монокристаллической структурой) не могут обеспечить растущие требования конструкторов, поскольку в современных двигателях эксплуатируются на пределе своих возможностей. Жаростойкие сплавы подвержены воздействию атмосферы, содержащихся в воздухе ионов хлора и сульфат-ионов. Наличие данных соединений приводит к сульфидно-оксидной коррозии сплавов и быстрому выходу их из строя.

В настоящее время ультрасовременные жаропрочные сплавы на основе никеля, используемые в качестве материалов для турбин, достигли пределов своего применения при температуре гомологии ~1200 °С. Для дальнейшего повышения температуры газа на входе в стационарный газовый котел или авиационную турбину в целях снижения потерь при термодинамической неэффективности разрабатывают и исследуют новые высокотемпературные сплавы [2–6].

Одна из категорий таких высокотемпературных материалов разработана на основе Мо, который обладает большим потенциалом благодаря высокой температуре плавления, превышающей 2273 К (2000 °С), превосходной прочностью при высоких температурах, а также отличными свойствами при ползучести [7]. Поведение сплавов на основе Мо при окислении изучено различными исследовательскими группами [2, 8–12]. Чистый Мо обладает низкой стойкостью к окислению из-за образования и испарения  $\text{MoO}_3$  при температурах от 673 до 1073 К (от 400 до 800 °С). При легировании сплава Si и В можно повысить его стойкость к окислению. Например, добавление некоторого количества Si и В приводит к получению трехфазного материала, который состоит из твердого раствора Мо и двух интерметаллидных фаз  $\text{Mo}_3\text{Si}$  и  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$ . В данной работе этот трехфазный материал используется в качестве основы для экспериментов с нанесением покрытий. Интерметаллические фазы, содержащие Si и В, при высоких температурах окисляются до  $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ , образуя стеклообразный слой, защищающий моносплавы от дальнейшего окисления [13]. Высокое содержание оксида  $\text{SiO}_2$  на поверхности обуславливает повышенную устойчивость материала к окислению при температурах  $\sim 1273$  К (1000 °С). Однако сплавы системы Мо–Si–В без покрытия демонстрируют заметную потерю массы при первом нагревании, т. е. пока не образуется сплошной слой стекла, защищающий поверхность материала. При более низких температурах – между 973 и 1173 К (700 и 900 °С) – испарение  $\text{MoO}_3$  приводит к разрушению материалов, что сравнимо с так называемым явлением разложения, которое хорошо известно для соединения  $\text{MoSi}_2$  [10].

Сплавы системы Мо–Si–В являются потенциально устойчивыми к ползучести и могут использоваться в жестких условиях нагружения, помимо еще и жаропрочных никелевых сплавов на их основе, которые отличаются превосходными механическими характеристиками при высоких температурах ( $>1200$  °С) [14]. С помощью лазерного аддитивного производства можно получить дендритный  $\alpha$ -Мо с высоким содержанием сплава Мо–Мо(Si–В). Междендритные области содержат смесь фаз  $\text{Mo}_5\text{Si}_3 + \text{Mo}_5\text{SiB}_2$ , а не ожидаемую равновесную фазу  $\text{Mo}_3\text{Si} + \text{Mo}_5\text{SiB}_2$ . Показано, что такое сочетание фаз обеспечивает повышенное сопротивление ползучести при высоких температурах, но оно доступно только при добавлении Nb, W или Ti, которые заменяют Мо в интерметаллидных фазах. В данном случае это объясняется значительным переохлаждением в небольшой ванне расплава, образующейся при лазерной обработке. Показано, что эта фазовая смесь после отжига остается стабильной при температуре 1200 °С в течение 200 ч. Продемонстрировано также успешное диспергирование оксидных частиц – главным образом в междендритных областях, что приводит при комнатной температуре к высокой вязкости разрушения при нагружении, приблизительно равной  $18 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Упрочнение происходит в результате образования трещин в пластичном  $\alpha$ -Мо и образования микротрещин и прогибов трещин вблизи частиц оксида.

Армирование молибденовых металлических композиционных материалов (МКМ) тугоплавкими соединениями обеспечивает высокую твердость, что затрудняет их механическую обработку. Это увеличивает время производства деталей и повышает стоимость материалов из-за необходимости использования дорогого инструмента и его интенсивного износа. Перспективным решением этой проблемы является использование аддитивных технологий для создания деталей из молибденовых МКМ с минимальным припуском на механическую обработку.

Среди многочисленных технологий аддитивного производства для изготовления металлических деталей часто используются технологии селективного лазерного спекания (СЛС) и селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС), которые обеспечивают

полное уплотнение материала изделия и высокую точность размеров. В данной статье рассматриваются свойства и проблемы, связанные со сплавами на основе титана, изготовленными с использованием добавок. Результаты этого исследования показывают, что сплавы на основе титана, напечатанные на 3D-принтере, имеют огромные перспективы для различных применений в медицинской и аэрокосмической отраслях. Кроме того, установлено, что 3D-технологии с использованием лазера являются наиболее эффективным методом для достижения повышенного или почти полного уплотнения структуры детали [15].

Применение технологий послойного синтеза позволяет сократить время на производство и повысить экономическую эффективность, это связано с тем, что заготовки после 3D-печати очень схожи по форме с готовыми изделиями, поэтому уменьшается потребность в дорогом обрабатывающем инструменте. Послойный синтез существенно снижает возможность образования поверхностных трещин и дефектов, так как последующая обработка включает газостатирование и шлифование.

Селективное электронно-лучевое сплавление относится к методам синтеза на подложке и представляет собой процесс, заключающийся в послойном сплавлении порошка электронным лучом в вакууме. Движением электронного луча управляют с помощью электромагнитных катушек. Из-за отсутствия движущихся механических частей системы движения и фокусировки луча скорость его перемещения может достигать нескольких километров в секунду, а шаг перемещения имеет минимальное значение, что обеспечивает высокую скорость печати и точность позиционирования луча [16–18].

Основной отличительной особенностью данного метода является наличие предварительного подогрева платформы построения и каждого слоя порошка до температур порядка 700–1100 °С в зависимости от используемого материала [16]. Эта особенность определяет несколько преимуществ данного метода перед другими аддитивными технологиями, в частности СЛС.

При отсутствии подогрева платформы построения для высокотемпературных (тугоплавких) материалов во время сплавления слоя порошка может возникать ситуация, когда верхний слой переходит в жидкую фазу, в то время как нижние слои синтезированного материала остаются в твердом состоянии. Это может приводить к возникновению кристаллизационных трещин при затвердевании расплава, что усугубляется большим градиентом температур между слоями материала в целом. Для того чтобы использовать порошок в аддитивных технологиях, гранулы должны быть сферическими и иметь определенные технологические характеристики.

В связи с этим проведена разработка технологий получения сферических гранул металлокерамических композиционных материалов на основе молибдена и технологических параметров изготовления заготовок с применением технологии послойного синтеза. Кроме того, проанализированы свойства и структура полученных гранул для выявления закономерностей их формирования.

### Материалы и методы

Исследуемые гранулы представляли собой дисперсно-упрочненные частицы на основе системы Mo–Si–B. Следует отметить, что тема исследования освещена ранее в другом научно-техническом литературном источнике [19]. Алгоритм получения гранул состоял из следующих этапов:

- навеска порошков, входящих в состав;
- смешивание шихты;
- механохимический синтез;
- просушивание полученного состава в вакууме;

- агломерация полученных гранул в вакуумной печи;
- размол полученного спека с последующим рассевом гранул и отбором нужной фракции;
- сфероидизация гранул.

Размер гранул исходных порошков – менее 50 мкм. Содержание молибдена в общей массе составляло >90 % (по массе). Получение композиционных гранул осуществляли путем механохимического синтеза с добавлением спирта. Объем спирта и цель его применения более подробно описаны также в ранее опубликованной статье [19].

В качестве оборудования для проведения процесса механохимического синтеза выбрана шестикамерная лабораторная система, обеспечивающая достаточно большой объем загрузки порошка и высокий коэффициент полезного действия. Скорость вращения вала выбирали достаточной для получения композиционных гранул и гомогенизации смеси. Агломерация проходила в высокотемпературной вакуумной печи. Дробление спеков после агломерации проводили на дисковой мельнице. После дробления осуществляли отсев мелкой фракции на воздушно-центробежном классификаторе. Для последующего разделения на фракции использовали просеивающую машину и сита с ячейками разных размеров. Сфероидизацию гранул производили на установке плазменной сфероидизации металлического порошка. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон.

### Результаты и обсуждение

Для разработки технологии изготовления сфероидизированных композиционных гранул выбран порошок МКМ на основе молибдена.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработаны режимы получения композиционных гранул МКМ, обеспечивающие равномерное распределение упрочняющих компонентов в объеме матричного материала. По выбранным режимам наработана партия композиционных гранул МКМ с целью дальнейшего проведения исследований.

В результате исследований установлено, что гранулы представляют собой композиционный материал системы Mo–Si–B с содержанием молибдена >90 % (по массе).

Для детального анализа проведены исследования по определению морфологии композиционных гранул МКМ. Результаты исследования морфологии гранул после механохимического синтеза представлены на рис. 1.

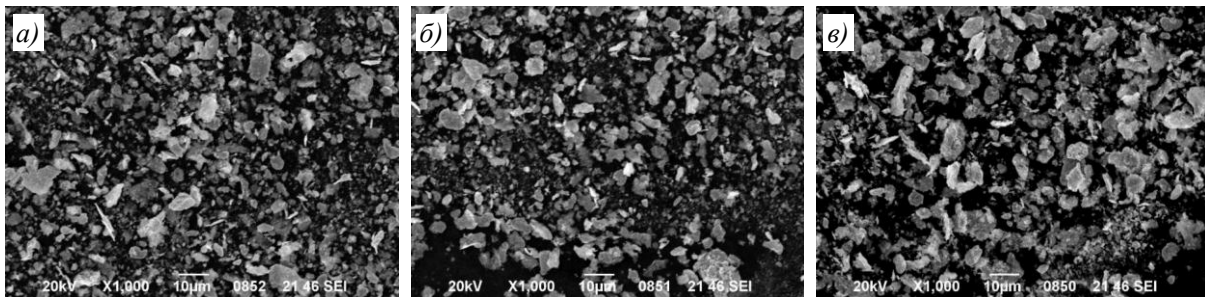


Рис. 1. Микроструктуры ( $\times 1000$ ) композиционных гранул металлического композиционного материала после механохимического синтеза

В результате исследования морфологии композиционных гранул МКМ установлено, что все гранулы имеют осколочную форму, характерную для частиц, полученных методом механохимического синтеза.

Немаловажными для металлических порошков являются текучесть и размеры композиционных гранул. В результате определения текучести образцов после механохимического синтеза установлено, что гранулы порошка МКМ не обладают текучестью, требуемой для аддитивной технологии. Результаты определения размера гранул после механохимического синтеза представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Гранулометрический состав композиционных гранул МКМ  
после механохимического синтеза**

Средний размер частиц (параметр $D$ [4,3], мкм)	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	Содержание частиц, %, по размеру, мкм					
	мкм			<1	<5	<10	<15	<20	>20
6,95	1,67	4,97	12,6	0,15	50,33	82,93	93,50	96,73	3,27

На основании проведенных исследований установлено, что композиционные гранулы МКМ после механохимического синтеза представляют собой частицы системы Mo–Si–B осколочной формы со средним размером 7 мкм, что обуславливает отсутствие текучести порошка. Применение подобного порошка в аддитивном производстве невозможно. Для обеспечения возможности дальнейшего использования порошка в аддитивном производстве необходимо провести его агломерацию с целью получения частиц, обладающих удовлетворительными для аддитивного производства характеристиками. С целью выбора способа агломерации композиционных гранул МКМ проведен анализ научно-технических литературных источников и результатов, полученных в предыдущих работах.

При анализе этих данных в качестве способа агломерации композиционных гранул МКМ выбран метод высокотемпературной диффузии, заключающийся в нагреве порошка в защитной среде для образования диффузионных связей между частицами.

Параметры технологического режима агломерации подбирали эмпирическим путем. Проведена агломерация нескольких партий гранул при различных температурах в вакууме во избежание окисления гранул в процессе высокотемпературного воздействия. Оценку качества полученной спеченной заготовки проводили тактильно и визуально, ориентируясь на ее твердость и целостность. Полученные заготовки подвергали дроблению с последующим рассевом на вибропросеивающей машине через сита с размерами ячеек: 20, 40, 63, 80, 100 мкм. После дробления проводили оценку степени достигнутой диффузии гранул на основании распределения массовых долей частиц каждого размера.

В соответствии с технической документацией на лазерный принтер, для дальнейшей обработки использовали узкие фракционные диапазоны, а именно: 20–40; 40–63; 63–80 мкм, а также проведены исследования технологических свойств агломерированных композиционных гранул МКМ (насыпная плотность, плотность после утряски, текучесть) и других фракций.

В результате определения текучести агломерированных гранул с фракцией 20–40 мкм установлено, что гранулы порошка не обладают текучестью, соответствующей аддитивной технологии. Для гранул с фракцией 40–63 мкм установлено, что среднее значение текучести равно 29,6 с.

Далее проведены исследования морфологии агломерированных композиционных гранул МКМ различных фракций, изображения которых представлены на рис. 2.

В результате исследования морфологии композиционных гранул МКМ установлено, что гранулы с фракцией 20–40 мкм имеют средний диаметр, равный  $29,0 \pm 1,7$  мкм, гранулы с фракцией 40–63 мкм:  $40,4 \pm 1,5$  мкм, гранулы с фракцией 63–80 мкм:

94,1±0,9 мкм. Ввиду агломерации состава в вакуумной печи после механохимического синтеза с последующим дроблением, гранулы обладают неправильной формой с различающимися поперечными размерами в различных направлениях. В связи с этим через сито могут проходить частицы с несколько большей средней фракцией.

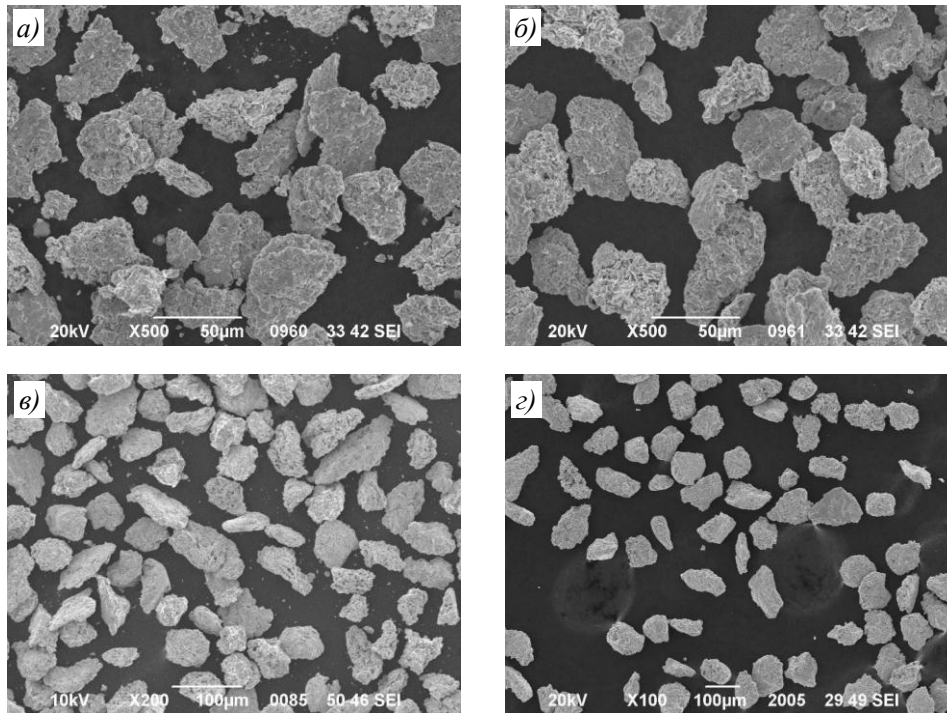


Рис. 2. Структуры композиционных гранул МКМ после агломерации для фракций 20–40 (а, б), 40–63 (в) и 63–80 мкм (г)

Несмотря на значительные улучшения технологических свойств по сравнению с гранулами после механохимического синтеза, установлено, что композиционные гранулы МКМ после агломерации представляют собой частицы угловатой и осколочной форм. За счет увеличения размера гранул удалось добиться появления их текучести, однако гранулы с фракцией 20–40 мкм текучестью все еще не обладают. Применение подобного порошка в аддитивном производстве невозможно по причине очень низких показателей данного свойства. Для обеспечения возможности дальнейшего использования порошка в аддитивном производстве необходимо провести его сфероидизацию с целью получения частиц, обладающих подходящими для этого характеристиками.

Сфероидизацию агломерированных композиционных гранул МКМ проводили в потоке термической плазмы электродугового разряда. При сфероидизации отработаны технологические параметры данного процесса.

Процесс сфероидизации порошков (порошковых композиций) в установке сфероидизации в плазме электродугового разряда основан на интенсивном нагреве исходных частиц, подаваемых в плазменный поток транспортирующим газом, их плавлении и приобретении каплями расплава сферической формы за счет сил поверхностного натяжения [20]. В качестве рабочего (плазмообразующего) и транспортирующего газа для подачи исходного дисперсного сырья в плазменную струю используется аргон.

В результате проведенных исследований определены оптимальные технологические параметры процесса плазменной сфероидизации агломерированных композиционных гранул МКМ в потоке термической плазмы электродугового разряда.

Проведены исследования по определению химического состава сфероидизированных композиционных гранул МКМ различных фракций и их технологических свойств (насыпная плотность, плотность после утряски и текучесть), результаты которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства сфероидизированных гранул МКМ разных фракций

Фракция гранул МКМ, мкм	Текучесть, с	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность после утряски, г/см <sup>3</sup>
20–40	12,74	5,08	5,35
40–63	–	5,06	5,32
63–80	16,4	5,05	5,62

Проведены исследования морфологии сфероидизированных композиционных гранул МКМ различных фракций. Результаты определения морфологии гранул с различными фракциями после сфероидизации представлены на рис. 3.

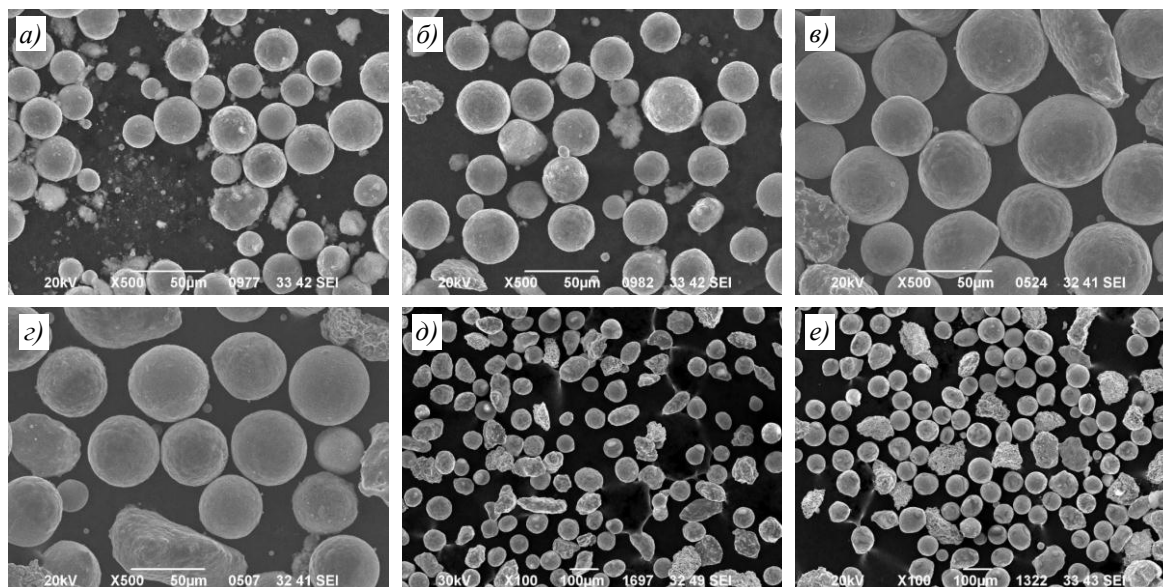


Рис. 3. Структуры композиционных гранул МКМ после сфероидизации для фракций 20–40 (а, б), 40–63 (в, з) и 63–80 мкм (д, е)

В результате исследования морфологии композиционных гранул МКМ установлено, что гранулы с фракцией 20–40 мкм имеют объемную долю частиц сферической формы более 85 %, гранулы с фракцией 40–63 мкм – более 90 %, гранулы с фракцией 63–80 мкм – более 74 %.

Предварительный выбор энергетического окна для определения режимов СЛС применительно к синтезу МКМ проводили с учетом доступных научно-технических литературных данных. Так, ранее исследованы методы СЛС порошковых материалов, тугоплавких металлов и сплавов: чистого вольфрама и бинарных сплавов W–5Ta и W–10Ta. Для визуальной оценки объемной доли пор в исследуемых материалах сделан панорамный снимок (рис. 4).

Видно, что материал является довольно пористым, однако визуально объемная доля не превышает 40 %. По результатам нескольких первых экспериментов скорректированы параметры опыта.

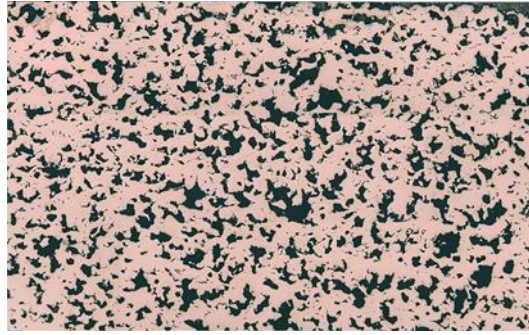


Рис. 4. Панорамный снимок ( $\times 50$ ) МКМ с порами

Третья итерация по выбранным режимам позволила получить полноценные элементарные образцы для исследований. Изображения полученных методом СЛС образцов из МКМ представлены на рис. 5.

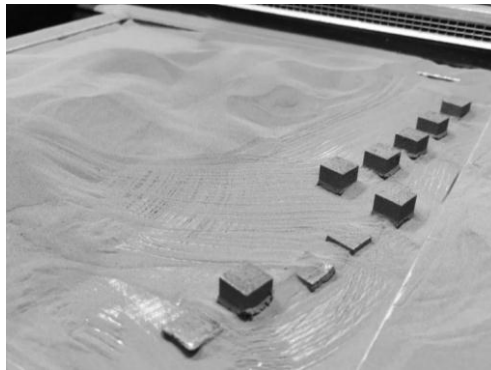


Рис. 5. Образцы из МКМ, полученные методом СЛС

Для разработки базовых технологических режимов сплавления основного металла и контура образцов синтезированного материала выбраны режимы с вариацией основных параметров процесса синтеза – тока электронного луча, скорости сканирования, интервала между треками, количества проходов электронного луча. Проведено три итерации разработки базовых параметров, в ходе которых последовательно определены наилучшие сочетания параметров, приводящих к минимальной пористости синтезированного материала, отсутствию трещин, а также сохранению геометрической формы образцов. Внешний вид образцов на первой и третьей итерациях отработки режимов представлен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид образцов на первой (а) и третьей (б) итерациях отработки режимов синтеза

Проведенные микроструктурные исследования показали, что в синтезированном материале в зависимости от плотности энергии электронного луча формируется три типа структуры матрицы:

– на основе молибдена с включениями коагулированных оксидных частиц размером 5–20 мкм, являющаяся, по-видимому, наследственной структурой сфероидизированных гранул, которая формируется при недостаточной энергии сплавления;

– с наличием крупных скоплений упрочняющей керамической фазы размером до 200–300 мкм, сформированной при избыточной плотности энергии;

– с равномерно распределенными оксидными включениями размером до 1 мкм при оптимальном энерговлжении электронного луча, поэтому в структуре такого материала отсутствуют трещины, а остаточная пористость составляет не более 0,2 %.

Формируемые структуры при разном энерговлжении представлены на рис. 7.

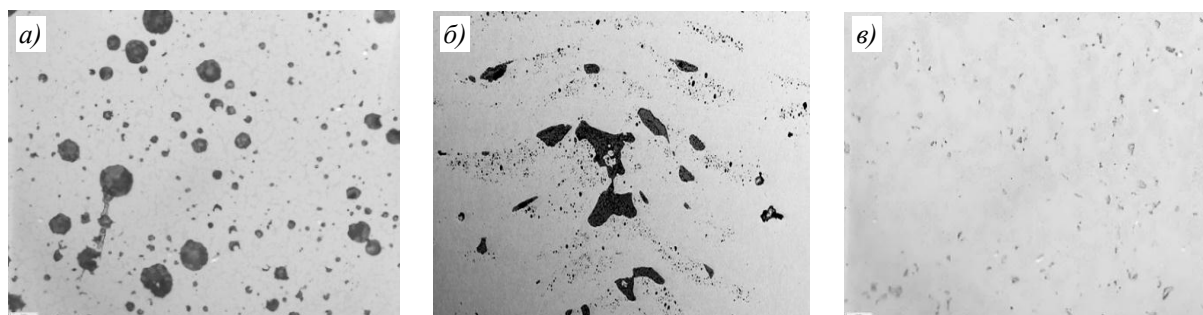


Рис. 7. Вид структуры синтезированного материала при недостаточном (а), избыточном (б) и оптимальном (в) энерговлжении электронного луча

### Заключения

Определены перспективы применения МКМ на основе молибдена для изготовления жаростойких деталей ГТД. По научно-техническим литературным данным определены перспективные составы МКМ.

Исследованы и разработаны базовые технологические параметры синтеза МКМ системы Mo–Si–W методами СЭЛС и СЛС. Исследованы механизмы формирования границ раздела и протекания диффузионных процессов на интерфейсе «матрица–упрочнитель» в процессе синтеза заготовок методами СЭЛС и СЛС.

Полученные результаты могут использоваться для создания высоконагруженных турбин ГТД, обеспечивающих максимальный коэффициент полезного действия, так как структура полученных материалов не имеет трещин, а остаточная пористость составляет не более 0,2 %.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
2. Старцев Н.И., Фалалеев С.В. Конструкция узлов авиационных двигателей: турбина и камера сгорания: курс лекций. Самара: Изд-во СГАУ, 2007. 102 с.
3. Tansug G. Synergistic inhibition effect between 4-amino-5-methyl-4H-1,2,4-triazole-3-thiol, citrate ions and polycarboxylate for corrosion protection of C1010 steel in cooling water system // Journal of Adhesion Science and Technology. 2017. Vol. 31. Is. 18. P. 2053–2070.

4. Серпова В.М., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе меди (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87.
5. Серпова В.М., Сидоров Д.В., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77.
6. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Большакова А.Н., Ефимочкин И.Ю., Щербаков Е.М. Ниобий, армированный волокнами  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Часть 1. Двухкомпонентные композиции // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 06. URL: <http://www.viam-journal.ru> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-58-77.
7. Laptev A.B., Akhiyarov R.J., Lapteva A.A., Puzanov A.I., Zagorskikh O.A. Distribution of chloride ions along the flight path of aircraft (Overview) // Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022). Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 2373. P. 22008. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022008.
8. Movenko D.A., Laptev A.B., Zagorskikh O.A. Composition and Morphology of Hot-Salt Corrosion in Heat-Resistant Nickel Alloys // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 6. P. 1652–1657. DOI: 10.1134/s207511332206017x.
9. Yukhvid V.I., Andreev D., Sanin V.N., Sachkova N. SHS Metallurgy of Composite Materials Based on the Nb–Si System // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2018. Vol. 59. No. 1. P. 42–49. DOI: 10.3103/S1067821218010169.
10. Getsov L.B., Shelyapina N.M., Laptev A.B., Puzanov A.I. Sulfide Oxide Corrosion of Modern Heat-Resistant Alloys // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62. No. 4. P. 689–695. DOI: 10.3103/S1068799819040214.
11. Гецов Л.Б., Баландина М.Ю., Лаптев А.Б., Мовенко Д.А., Пузанов А.И., Пивоварова М.В. Исследование металлопорошкового сплава ХН56КВМТЮБ для дисков ГТД в условиях агрессивного действия смеси хлоридов и сульфатов натрия // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 7 (793). С. 19–25. DOI: 10.30906/mitom.2021.7.19-25.
12. Гецов Л.Б., Баландина М.Ю., Грищенко А.И., Лаптев А.Б., Пузанов А.И. Эффект Ребиндера при испытаниях жаропрочных сплавов в контакте с расплавами солей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 10. С. 54–62. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-10-54-62.
13. Getsov L.B., Balandina M.Y., Laptev A.B., Movenko D.A. A Study of Metal-Powder Alloy KhN56KVMTYuB for GTE Disks Under Aggressive Impact of Sodium Chlorides and Sulfates // Metal Science and Heat Treatment. 2021. Vol. 63. No. 7–8. P. 363–368. DOI: 10.1007/s11041-021-00696-4.
14. Iveković A., Omidvari N., Vrancken B. et al. Selective laser melting of tungsten and tungsten alloys // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2018. No. 72. P. 27–32. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.12.005.
15. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
16. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
17. Бенариев И., Антипов В.В., Хасиков Д.В., Оглодков М.С., Савичев И.Д., Кузнецова П.Е. Исследование структуры и свойств экономнолегированного алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc–Zr, изготовленного методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 03. URL: <http://www.viam-journal.ru> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.

18. Мазалов И.С., Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сульянова Е.А. Влияние параметров горячего изостатического прессования на структуру и свойства сплавов на основе кобальта, получаемых методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 01. URL: <http://www.viam-journal.ru> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
19. Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н., Худнев А.А. Получение сферических гранул высокотемпературного металлического композиционного материала на основе молибдена // *Труды ВИАМ*. 2022. № 1 (107). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52.
20. Березин Е.П., Никифоров С.А., Гильмутдинов А.Х. Численное моделирование газопорошковых потоков установки для плазменной сфероидизации металлических порошков // *Математические методы в технологиях и технике*. 2024. № 3. С. 55–60.

### References

1. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
2. Startsev N.I., Falaleev S.V. *Design of aircraft engine units: turbine and combustion chamber: course of lectures*. Samara: SSAU Publ. house, 2007, 102 p.
3. Tansug G. Synergistic inhibition effect between 4-amino-5-methyl-4H-1,2,4-triazole-3-thiol, citrate ions and polycarboxylate for corrosion protection of C1010 steel in cooling water system. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, vol. 31, is. 18, pp. 2053–2070.
4. Serpova V.M., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on copper (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87.
5. Serpova V.M., Sidorov D.V., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77.
6. Kablov E.N., Shchetanov B.V., Bolshakova A.N., Efimochkin I.Yu., Shcherbakov E.M. Niobium reinforced by  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers. Part 1. Two-Component Compositions. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-58-77.
7. Laptev A.B., Akhiyarov R.J., Lapteva A.A., Puzanov A.I., Zagorskikh O.A. Distribution of chloride ions along the flight path of aircraft (Overview). *Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022)*. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022, vol. 2373, p. 22008. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022008.
8. Movenko D.A., Laptev A.B., Zagorskikh O.A. Composition and Morphology of Hot-Salt Corrosion in Heat-Resistant Nickel Alloys. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2022, vol. 13, no. 6, pp. 1652–1657. DOI: 10.1134/s207511332206017x.
9. Yukhvid V.I., Andreev D., Sanin V.N., Sachkova N. SHS Metallurgy of Composite Materials Based on the Nb–Si System. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2018, vol. 59, no. 1, pp. 42–49. DOI: 10.3103/S1067821218010169.
10. Getsov L.B., Shelyapina N.M., Laptev A.B., Puzanov A.I. Sulfide Oxide Corrosion of Modern Heat-Resistant Alloys. *Russian Aeronautics*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 689–695. DOI: 10.3103/S1068799819040214.
11. Getsov L.B., Balandina M.Y., Laptev A.B., Movenko D.A., Puzanov A.I., Pivovarova M.V. Study of metal powder alloy KhN56KVMTYuB for gas turbine engine disks under aggressive action of a mixture of sodium chlorides and sulfates. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2021, no. 7 (793), pp. 19–25. DOI: 10.30906/mitom.2021.7.19-25.

12. Getsov L.B., Balandina M.Y., Grishchenko A.I., Laptev A.B., Puzanov A.I. Rehbinder effect in testing heat-resistant alloys in contact with molten salts. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2021, vol. 87, no. 10, pp. 54–62. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-10-54-62.
13. Getsov L.B., Balandina M.Y., Laptev A.B., Movenko D.A. A Study of Metal-Powder Alloy KhN56KVMTYuB for GTE Disks Under Aggressive Impact of Sodium Chlorides and Sulfates. *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, vol. 63, no. 7–8, pp. 363–368. DOI: 10.1007/s11041-021-00696-4.
14. Iveković A., Omidvari N., Vrancken B. et al. Selective laser melting of tungsten and tungsten alloys. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2018, no. 72, pp. 27–32. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.12.005.
15. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
16. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Prager S.M., Malinin R.Yu. On the development of a universal calculation method for assessing the degradation of recycled metal powder materials, depending on the cyclicity of use in the selective laser melting process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
17. Benarieb I., Antipov V.V., Khasikov D.V., Oglodkov M.S., Savichev I.D., Kuznetsova P.E. Study of structure and properties of sparsely alloyed aluminum alloy of Al–Mg–Sc–Zr system, produced by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
18. Mazalov I.S., Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A. Influence of hot isostatic pressing parameters on structure and properties of cobalt-based alloys obtained by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
19. Bobrovskiy A.P., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N., Khudnev A.A. Production of spherical granules of a high-temperature metal composite material based on molybdenum. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52.
20. Berezina E.P., Nikiforov S.A., Gilmutdinov A.Kh. Numerical modeling of gas-powder flows of an installation for plasma spheroidization of metal powders. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*, 2024, no. 3, pp. 55–60.

**Информация об авторах**

**Гвоздев Святослав Сергеевич**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Курбаткина Елена Игоревна**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Щербakov Евгений Михайлович**, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Богачев Игорь Александрович**, начальник сектора, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Svyatoslav S. Gvozdev**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Elena I. Kurbatkina**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Evgeny M. Scherbakov**, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Igor A. Bogachev**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; получена после доработки 24.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.01.2025.  
The article was submitted 02.12.2024; received in revised form 24.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 24.01.2025