

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52

ПОЛУЧЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ГРАНУЛ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА

А.П. Бобровский¹, И.Ю. Ефимочкин¹, А.Н. Большакова¹, А.А. Худнев¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Рассматривается процесс получения гранул сферической формы металлического композиционного материала (МКМ) на основе молибдена с исходной фракцией размером 40–63 мкм. Результаты, полученные в ходе исследований, показали принципиальную возможность сфероидизации гранул высокотемпературных МКМ на основе тугоплавких металлов, армированных частицами керамических соединений. Однако выявлена необходимость более глубокого изучения и тщательного подбора режимов сфероидизации для минимизации образования сателлитов на гранулах в процессе обработки в плазме электродугового разряда.

Ключевые слова: металлические композиционные материалы, механическое легирование, порошковая металлургия, сфероидизация, агломерация, аддитивные технологии, металлические композиционные материалы

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52.

Scientific article

PRODUCTION OF SPHERICAL GRANULES OF A HIGH-TEMPERATURE METAL COMPOSITE MATERIAL BASED ON MOLYBDENUM

Andrey P. Bobrovskiy¹, Ivan Yu. Efimochkin¹, Alexandra N. Bolshakova¹, Alexey A. Khudnev¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Discusses the process of obtaining spherical granules of a metal composite material based on molybdenum with an initial fraction of 40–63 microns. The results obtained during the research showed the fundamental possibility of spheroidization of granules of high-temperature metal composite materials based on refractory metals reinforced with particles of ceramic compounds. However, the need for a more thorough study and selection of spheroidization modes to minimize the formation of satellites on granules during processing in an electric arc discharge plasma is revealed.

Keywords: metal composite materials, mechanical alloying, powder metallurgy, spheroidization, agglomeration, additive technologies, metal composite materials

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52.

Введение

С развитием научно-технического прогресса повышаются требования к механическим и физическим свойствам деталей и изделий [1, 2]. Развитие всех отраслей промышленности невозможно представить без создания новых уникальных материалов и технологий производства [3, 4].

При создании современных летательных аппаратов требуется замена традиционных материалов на новые, сочетающие высокую сопротивляемость температурному воздействию и относительно низкую плотность. Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными в области никелевых жаропрочных сплавов, показали, что альтернативой могут стать сплавы и композиционные материалы, в основе которых должен быть один из тугоплавких металлов, таких как ниобий, тантал, вольфрам, молибден, хром и гафний, а в качестве армирующей фазы – керамические частицы, например силициды перечисленных металлов [4–9]. Из данного класса материалов перспективным является металлический композиционный материал (МКМ) на основе молибдена, армированный частицами тугоплавких соединений. Путем армирования молибденовой матрицы частицами тугоплавких соединений удастся добиться снижения плотности материала и увеличения высокотемпературного сопротивления ползучести благодаря блокированию дислокаций при механическом воздействии [10]. Следует также отметить способность некоторых МКМ на основе молибдена работать при высоких температурах в окислительной среде без нанесения дополнительных покрытий. Наличие данного свойства можно объяснить образованием силицида молибдена при добавлении кремния в состав композиционного материала, что в свою очередь приводит к формированию защитной силикатной пленки оксида кремния (SiO_2) [11]. Благодаря этому использование МКМ на основе молибдена в летательных аппаратах авиационного и космического назначения позволит уменьшить массу элементов конструкции, а также повысить их конструкционную надежность, жесткость и температурную устойчивость.

Ввиду армирования частицами тугоплавких соединений МКМ на основе молибдена обладают высокой твердостью. По этой причине они плохо поддаются механической обработке, что сказывается на продолжительности изготовления деталей из них и на конечной стоимости материалов из-за необходимости использования дорогостоящего обрабатывающего инструмента и его большого расхода. Одним из перспективных направлений для решения данной проблемы является применение для изготовления деталей из МКМ на основе молибдена аддитивных технологий, которые позволяют получать заготовки с минимальным припуском на механическую обработку [12]. Благодаря возможности получения заготовок, близких по геометрической форме к конечным деталям, удастся сократить продолжительность производственного цикла и увеличить финансовую эффективность, поскольку отсутствует необходимость использования большого количества дорогостоящего обрабатывающего инструмента. Кроме того, применение аддитивных технологий позволяет минимизировать образование поверхностных трещин и дефектов, образующихся при грубой механической обработке, поскольку, как правило, постобработка после использования технологий селективного лазерного спекания (СЛС) и селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС) заключается в газостатировании и шлифовании.

Для использования порошка в аддитивных технологиях гранулы должны иметь сферическую форму и обладать определенным спектром технологических свойств. Одним из методов изготовления МКМ на основе молибдена, при котором удастся получить мультифазные гранулы порошка за счет механической диффузии, происходящей между частицами исходных компонентов, является механохимический синтез. Гранулы

порошка после механохимического синтеза имеют осколочную форму и низкий уровень технологических свойств, что не позволяет их использовать в аддитивном производстве. Решением данной проблемы может являться процесс сфероидизации, при котором под воздействием плазмы электродугового разряда, сил поверхностного натяжения и силы тяжести гранулы приобретают сферическую форму.

Однако следует учитывать, что из-за своей высокой хрупкости, а также специфики процесса механохимического синтеза гранулы МКМ на основе молибдена обладают размером <10 мкм, который не подходит для применения в аддитивных технологиях. Согласно данным научно-технической литературы [13, 14], для метода СЛС используют гранулы размером 10–63 мкм, а для метода СЭЛС – размером 40–100 мкм. Получить гранулы необходимого размера возможно с помощью процесса агломерации, при котором порошок после механохимического синтеза спекают в вакуумной печи и происходит укрупнение частиц благодаря высокотемпературной диффузии, и последующего размолла на мельницах-дробилках полученных «спеков».

В данной работе исследован технологический процесс получения гранул сферической формы размером 40–63 мкм из высокотемпературного МКМ на основе молибдена.

Материалы и методы

Исследуемые гранулы представляли собой дисперсноупрочненные частицы на основе системы Mo–Si–B, произведенные из элементарных порошков. Гранулы получали по следующей технологической схеме: навеска исходных порошков, смешивание шихты из исходных порошков, механохимический синтез, сушка полученной смеси в вакуумном шкафу, 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 материала составляло >70 %. Смешивание шихты из исходных порошков проводили на валковой мельнице Daihan BML-6 фирмы Daihan Scientific со скоростью и продолжительностью смешивания, достаточными для получения гомогенизированной однородной смеси. Механохимический синтез проводили в шестикамерной установке высокоэнергетического смешивания фирмы Union Process Inc. в среде этилового спирта с добавлением размольных тел в виде шаров в необходимом количестве. Объем спирта выбирали, исходя из объема загружаемого порошка. Спирт использовали в качестве защитной среды, предотвращающей возможное окисление порошка при локальном разогреве во время проведения механического легирования. Кроме того, добавление спирта минимизирует вероятность оседания частиц порошка на дне камеры под размольным валом. Скорость вращения вала выбирали достаточной для гомогенизации смеси и получения композиционных гранул. Агломерацию гранул МКМ на основе молибдена проводили в высокотемпературной вакуумной печи. Для дробления спеков после агломерации использовали дисковую мельницу DM 400 компании Retsch. Отсев мелкой фракции после дробления проводили на воздушно-центробежном классификаторе ИГ-6УМ. Для последующего разделения на фракции применяли просеивающую машину HAVER EML 200 компании Haver & Boecker и комплект сит с ячейками разного размера. Сфероидизацию гранул МКМ на основе молибдена проводили на установке плазменной сфероидизации металлического порошка. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон.

На каждом этапе технологического процесса исследованы фракционный состав гранул и их форма. Определение размера частиц проводили по дифракции лазерного излучения на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц Analysette 22 в

среде жидкости (дистиллированная вода) по ГОСТ Р 57923–2017. Исследование формы гранул осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi SU8010.

Результаты и обсуждение

Шихтовую смесь из элементарных порошков подвергли механическому легированию в установке высокоэнергетического смешивания для получения композиционных гранул. Легирование выполняли по режиму, обеспечивающему получение композиционных гранул, состоящих из частиц исходных порошков. По результатам процесса провели анализ фракционного состава (рис. 1) и формы гранул (рис. 2).

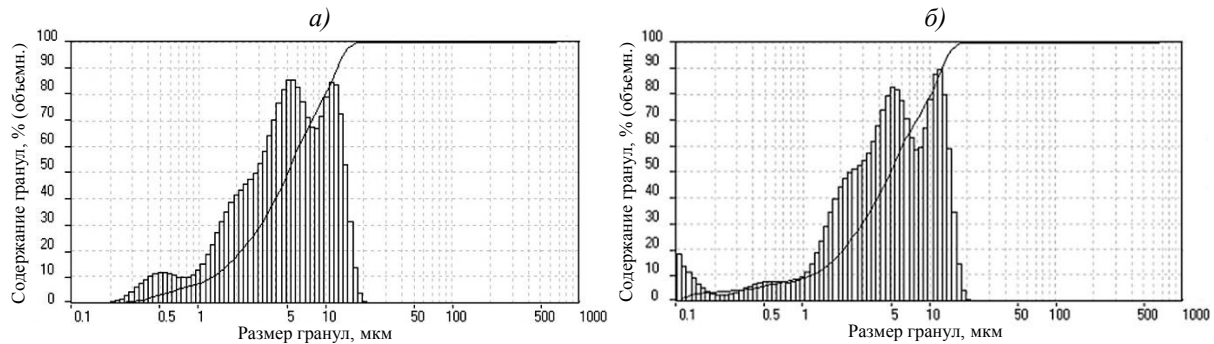


Рис. 1. Дифференциальная (а) и интегральная кривые (б) распределения гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования

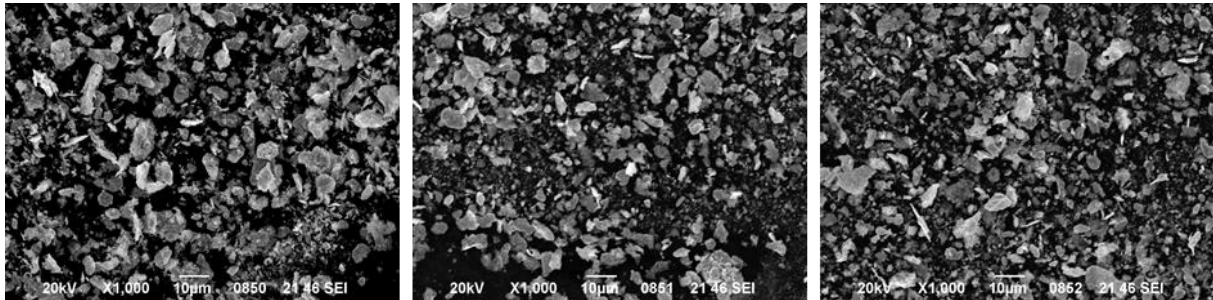


Рис. 2. Фотографии (РЭМ, $\times 1000$) гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования

На рис. 1 представлены дифференциальная и интегральная кривые распределения гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования. Видно, что 85 % гранул имеют размер не более 10 мкм, который по меркам аддитивных технологий является непригодным для дальнейшего применения. Такой размер обусловлен как размерами частиц исходных компонентов, не превышающих 50 мкм, так и добавлением этилового спирта к порошку во время проведения механохимического синтеза для минимизации вероятности его окисления, что в свою очередь способствует более интенсивному измельчению гранул.

На рис. 2 представлены фотографии гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования. Видно, что гранулы имеют осколочную форму. Исходя из размера, который не превышает 10 мкм, и осколочной формы частиц, можно сделать вывод, что порошок МКМ на основе молибдена не обладает необходимыми для дальнейшего использования в аддитивном производстве свойствами.

Для получения гранул необходимого размера (10–63 мкм – для метода СЛС и 40–100 мкм – для метода СЭЛС) можно прибегнуть к процессу агломерации, в результате которого из исходных мелкодисперсных частиц удастся получить гранулы большего размера. Решением проблемы осколочной формы частиц может служить процесс плазменной сфероидизации, при котором в результате воздействия плазмы электродугового разряда частицы приобретают сферическую форму.

С целью получения гранул необходимого размера порошок из МКМ на основе молибдена агломерировали в вакуумной печи. В данном процессе укрупнения гранул достигают благодаря их взаимной диффузии, происходящей при воздействии высокой температуры. Мелкие гранулы порошка, взаимодействуя друг с другом, образуют более крупные гранулы, которые в свою очередь взаимодействуют с другими аналогичными гранулами. В результате этого процесса получают твердый спек порошка, состоящий из гранул, «склепленных» между собой.

После агломерации полученный спек раздробили на дисковой мельнице. Получившийся порошок просеяли на воздушно-центробежном классификаторе для удаления «пыльной» фракции, затем разделили на фракции на вибропросеивающей машине. Для дальнейших исследований выбрали гранулы с фракцией размером 40–63 мкм как подходящие для обоих методов (СЭЛС, СЛС) аддитивного производства.

Как видно из результатов фракционного анализа, представленных на рис. 3, несмотря на отсев сторонней фракции на классификаторе и вибропросеивающей машине, в порошке присутствуют гранулы с фракцией размером как <40 мкм, так и >63 мкм. Причем количество гранул с фракциями размером <40 мкм в предоставленной пробе находится на уровне 7 %, а количество гранул с фракциями размером >63 мкм – на уровне ~30 %. Если обратить внимание на фотографии гранул, представленных на рис. 4, то можно увидеть, что их поверхность неровная, поскольку облеплена «пылью». Исходя из этих двух факторов, можно предположить, что в процессе деления на фракции на вибропросеивающей машине оставшаяся после просева на воздушно-центробежном классификаторе «пыльная» фракция оседает на гранулах «годного» размера, затем в процессе фракционного анализа отделяется и всплывает. Именно этим обусловлено наличие фракции размером <40 мкм в пробе порошка. Гранулы МКМ на основе молибдена после агломерации, так же как и после механического легирования, имеют осколочную форму и, как следствие, разные размеры в различных направлениях, один из которых превышает 63 мкм. Это можно объяснить наличием в пробе порошка фракций размером >63 мкм.

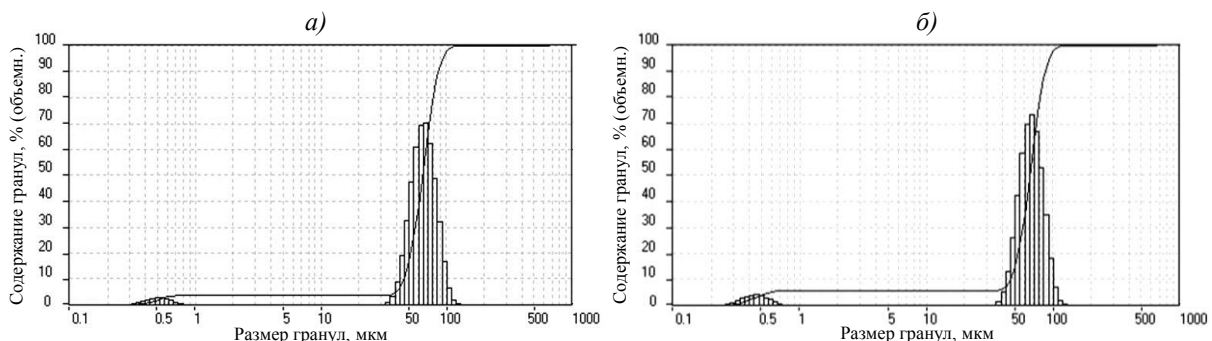


Рис. 3. Дифференциальная (а) и интегральная кривые (б) распределения гранул МКМ на основе молибдена после агломерации с последующим дроблением и просевом через сита с ячейками размером 40 и 63 мкм

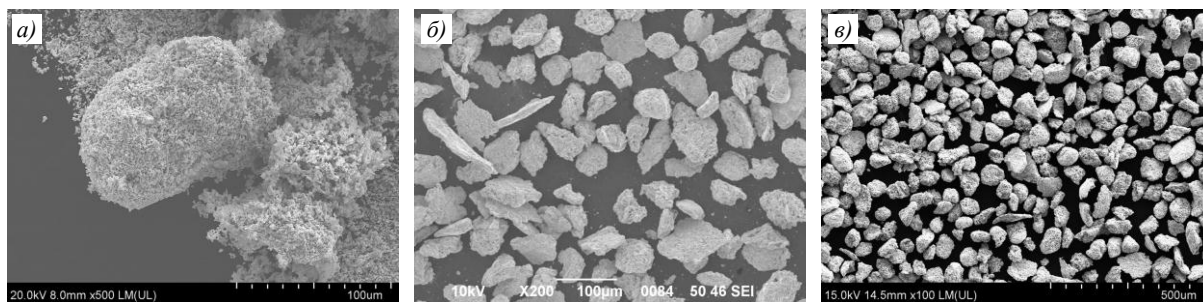


Рис. 4. Фотографии (РЭМ, *a* – $\times 500$; *б* – $\times 200$; *в* – $\times 100$) гранул МКМ на основе молибдена после агломерации с последующим дроблением и просевом через сита с ячейками размером 40 и 63 мкм

Сфероидизацию гранул на основе молибдена проводили при воздействии плазмы электродугового разряда по нескольким режимам (меняя расход транспортирующего и дополнительного газов) на установке плазменной сфероидизации металлического порошка. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон.

На рис. 5 представлены дифференциальная и интегральная кривые распределения агломерированных гранул МКМ на основе молибдена после сфероидизации. Следует отметить, что интегральная кривая распределения гранул после сфероидизации по сравнению с интегральной кривой распределения гранул после агломерации сдвинута ближе к началу координат и берет начало ближе к оси абсцисс. Высота пиков дифференциальной кривой распределения гранул после сфероидизации меньше высоты пиков дифференциальной кривой распределения гранул после агломерации. По итогам исследований гранул зафиксирован их максимальный размер: 107 мкм – после агломерации и 88 мкм – после сфероидизации. Кроме того, в пробе порошка после агломерации присутствовали гранулы с фракциями размером от 0,05 до 1 мкм в количестве 3,74 %, а в пробе порошка после сфероидизации количество гранул с фракциями такого размера уменьшилось и составило 0,19 %. Все это обусловлено выгоранием мелких и частичным испарением более крупных гранул в процессе их обработки при воздействии плазмы электродугового разряда [15]. Указанную особенность необходимо учитывать при подборе размера исходных гранул для получения сфероидизированных частиц с заданным фракционным составом.

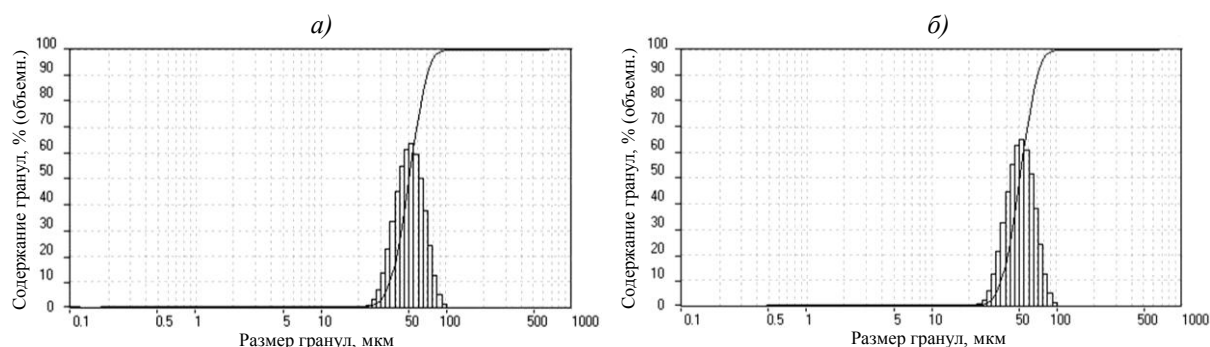


Рис. 5. Дифференциальная (*a*) и интегральная кривые (*б*) распределения агломерированных гранул МКМ на основе молибдена после сфероидизации

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что гранулы после сфероидизации имеют преимущественно округлую форму. На некоторых гранулах находятся наросты – так называемые сателлиты. В данном случае сателлиты представляют собой керамические

частицы, «сплавленные» с матричным материалом. Образование сателлитов обусловлено тем, что керамические частицы, введенные в матричный сплав путем механического легирования, имеют меньшую плотность относительно матрицы и при расплавлении композиционной частицы при воздействии плазмы электродугового разряда «всплывают» на поверхность. На образование сателлитов оказывает влияние и то, что температура плавления керамических частиц больше температуры плавления матричных компонентов. В связи с этим в процессе сфероидизации, по-видимому, керамические частицы не удается полностью перевести из твердого состояния в состояние расплава, что также влияет на их взаимосвязь с матричными частицами.

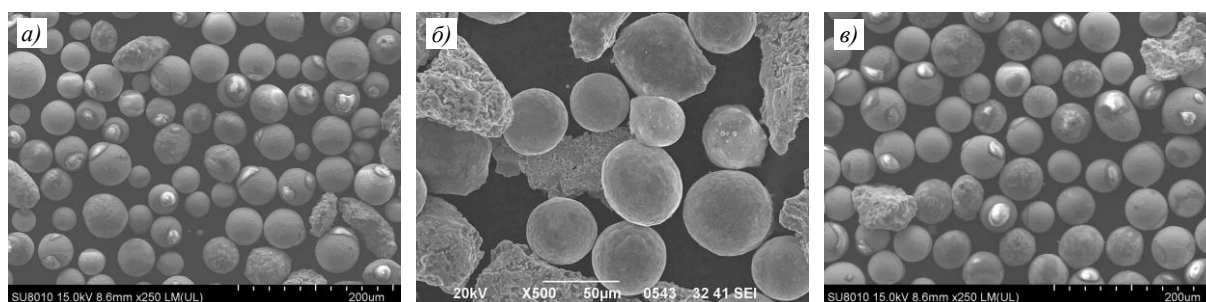


Рис. 6. Фотографии (РЭМ; *a*, *v* – $\times 250$; *b* – $\times 500$) агломерированных гранул МКМ на основе молибдена после сфероидизации

Заключения

В ходе проведенных исследований удалось установить, что порошок МКМ на основе молибдена, полученный методом механохимического синтеза, невозможно использовать в аддитивных технологиях без проведения дополнительных технологических операций и обработки, исходя из размера и формы гранул.

Получить гранулы с фракциями требуемого размера для применения в аддитивных технологиях возможно методом высокотемпературной диффузии.

Установлена принципиальная возможность получения гранул сферической формы из МКМ на основе молибдена при воздействии плазмы электродугового разряда. Однако ввиду наличия в составе материала частиц керамических соединений требуется корректировка режимов сфероидизации для минимизации образования сателлитов на гранулах конечного продукта.

Выявлено, что процесс сфероидизации в плазме электродугового разряда влияет на размер получаемых гранул из МКМ на основе молибдена относительно исходного сырья. В процессе сфероидизации фракционный состав частиц уменьшается благодаря полному испарению мелкой и частичному испарению крупной фракций.

Список источников

1. Кашин Д.С., Дергачева П.Е., Стехов П.А. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75.
2. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
3. Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // Материаловедение. 2010. № 9. С. 29–38.
6. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si-композиты (окончание) // Материаловедение. 2010. № 10. С. 18–27.
7. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
9. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
10. Ершова И.О., Федотенкова О.Б. Порошковые композиционные материалы на основе молибдена // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 1. С. 93–98.
11. Титов Д.Д., Каргин Ю.Ф., Лысенков А.С. и др. Влияние содержания WSi_2 и добавок алюмосиликатов магния на окисление и прочностные свойства композитов $MoSi_2$ – WSi_2 // Материаловедение. 2012. № 7. С. 45–49.
12. Климкина А.А. Изучение структуры и свойств молибденовых сплавов, полученных методами аддитивных технологий // XLVII Гагаринские чтения: сб. трудов Междунар. молодежной науч. конф. М., 2021. С. 81.
13. Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я., Искандарова Е.И., Усаченко О.И. Современное состояние, пути развития, области применения селективного лазерного спекания (SLS) // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева, 2019. С. 174–177.
14. Залесский В.Г., Поболь И.Л., Бакиновский А.А., Губко А.Д. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2018. Т. 63. № 2. С. 169–180.
15. Родионов А.И., Ефимочкин И.Ю., Самохин А.В., Синайский М.А. Влияние процесса сфероидизации на фракционный состав и морфологию сплава ВКНА-4У, армированного частицами Al_2O_3 – Y_2O_3 // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-12-21.

References

1. Kashin D.S., Dergacheva P.E., Stekhov P.A. Heat resistant slurry coatings (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75.
2. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
3. Grashchenkov D.V., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. High-temperature metal-matrix composite materials reinforced with particles and fibers of refractory compounds. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-318-328.
4. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Svetlov I.L. High-temperature Nb – Si-composites. *Materialovedenie*, 2010, no. 9, pp. 29–38.
6. Svetlov I.L. High-temperature Nb – Si-composites (end). *Materialovedenie*, 2010, no. 10, pp. 18–27.
7. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7-8, pp. 54–58.
8. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.

9. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
10. Ershova I.O., Fedotenkova O.B. Powder composite materials based on molybdenum. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2015, no. 1, pp. 93–98.
11. Titov D.D., Kargin Yu.F., Lysenkov A.C. et al. Influence of WSi₂ content and magnesium aluminosilicate additives on oxidation and strength properties of MoSi₂–WSi₂ composites. *Materialovedenie*, 2012, no. 7, pp. 45–49.
12. Klimkina A.A. Study of the structure and properties of molybdenum alloys obtained by the methods of additive technologies. *XLVII Gagarin readings: collection of articles. Proceedings of Mezhdunar. youth scientific. conf. Moscow, 2021*, p. 81.
13. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya., Iskandarova E.I., Usachenko O.I. Current state, development paths, areas of application of selective laser sintering (SLS). *Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport: materials III Intern. scientific-practical conf. Kemerovo: Kuzbass state tech. un-t them T.F. Gorbachev, 2019*, pp. 174–177.
14. Zalesky V.G., Pobol I.L., Bakinovskiy A.A., Gubko A.D. Obtaining metal products using electron-beam additive technologies. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi, A series of physical and technical sciences*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 169–180.
15. Rodionov A.I., Efimochkin I.Yu., Samokhin A.V., Sinayskiy M.A. The influence of the spheroidization process on the fractional composition and morphology of alloy VKNA-4u in a particle-reinforced sheath Al₂O₃–Y₂O₃. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-12-21.

Информация об авторах

Бобровский Андрей Павлович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ефимочкин Иван Юрьевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Большакова Александра Николаевна, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Худнев Алексей Александрович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey P. Bobrovskiy, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan Y. Efimochkin, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexandra N. Bolshakova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey A. Khudnev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2021; одобрена после рецензирования 12.11.2021; принята к публикации 12.11.2021.

The article was submitted 28.09.2021; approved after reviewing 12.11.2021; accepted for publication 12.11.2021.