

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138

СФЕРОИДИЗАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ (обзор). Часть 1

Н.П. Бурковская¹, А.П. Бобровский¹, И.Ю. Ефимочкин¹, А.Н. Большакова¹

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

Аннотация. В настоящее время аддитивные технологии, в том числе технологии послойного синтеза, представляют одно из наиболее динамично развивающихся направлений современного материаловедения. Поскольку сырье для производства изделий по аддитивным технологиям – важная составляющая процесса, разработка способов сфероидизации порошковых композиций является актуальной задачей и имеет практическую значимость. Приоритетная цель аддитивных технологий – изготовление изделий из металлов и сплавов (в частности, из металлов и сплавов для высокотемпературных применений) с необходимыми физическими и механическими свойствами.

Ключевые слова: металлический композиционный материал, сфероидизация, тугоплавкий металл, термическая плазма, гранула, аддитивное производство, жаропрочный материал, ниобий, молибден

Для цитирования: Бурковская Н.П., Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Сфероидизация порошковых композиций на основе тугоплавких металлов (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138.

Scientific article

SPHEROIDIZATION OF POWDER COMPOSITIONS BASED ON REFRACTORY METALS (review). Part 1

N.P. Burkovskaya¹, A.P. Bobrovsky¹, I.Yu. Efimochkin¹, A.N. Bol'shakova¹

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

Abstract. At present, additive technologies, including layer-by-layer synthesis technologies, are currently one of the most dynamically developing areas of modern materials science. Since raw materials for the production of products by additive technologies are an important component of the process, the development of methods for spheroidizing powder compositions is relevant and has practical significance. The priority goal of additive technologies has always been the manufacture of products from metals with certain physical and mechanical properties, in particular, metals and alloys for high-temperature applications.

Keywords: metal composite material, spheroidization, refractory metal, thermal plasma, granule, additive manufacturing, refractory material, niobium, molybdenum

For citation: Burkovskaya N.P., Bobrovsky A.P., Efimochkin I.Yu., Bol'shakova A.N. Spheroidization of powder compositions based on refractory metals (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138.

Введение

В настоящее время аддитивные технологии, в том числе технологии послойного синтеза, являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений

современного материаловедения, применение которых приводит к значительному снижению затрат при создании самых разнообразных видов продукции и имеет огромное экономическое и промышленное значение. Степень использования аддитивных технологий определяется уровнем развития промышленности конкретного государства [1–5].

Основные преимущества аддитивных технологий:

- высокий коэффициент использования исходного сырья;
- возможность изготавливать детали сложной геометрической формы (рис. 1);
- возможность быстрой корректировки конструкции синтезируемой детали [6, 7].

Суть аддитивных методов производства, по сравнению с традиционными методами изготовления деталей посредством механической обработки, при которых материал заготовки удаляют, заключается в послойном добавлении материала, «трехмерной печати» или «выращивании» и, таким образом, в придании формы изделию.

В многочисленных научно-технических литературных источниках описаны модификации процесса «трехмерной печати» для различных исходных материалов. Например, в зависимости от поставленных задач аддитивные технологии используются как для построения литейных моделей из полимеров, легкоплавких смол, воска, самих литейных форм [8], так и непосредственно для изготовления деталей сложной формы. На рис. 1 показаны примеры изделий сложных геометрических форм, изготовленных методом селективного лазерного спекания или селективного лазерного сплавления.

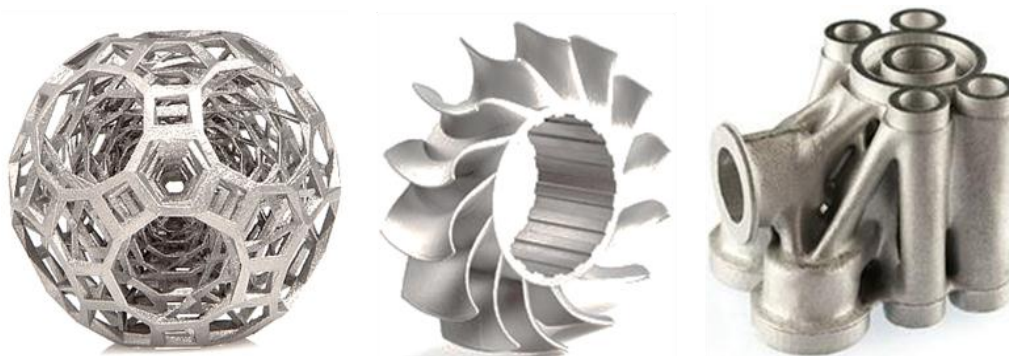


Рис. 1. Примеры деталей сложных геометрических форм, изготовленных методом селективного лазерного сплавления [9]

Известно, что для «трехмерной печати» требуются специальные порошки сферической формы и определенного гранулометрического состава. Особые требования к высокой чистоте, фракционному составу порошковых композиций и форме частиц, на поверхности которых не должно быть сателлитов, затрудняющих послойное нанесение материала при печати, предъявляются к порошкам, поскольку такое сырье будет иметь превосходные физические свойства, такие как повышенная текучесть, более низкие значения коэффициента трения между частицами, более высокая плотность упаковки и утряски. Несмотря на то, что все указанные характеристики определяют высокую стоимость исходного сырья, частицы сферической формы привлекают все большее внимание при литье порошков под давлением, 3D-печати, термическом напылении и т. д. [2–5]. Развитие аддитивных технологий ускорило и развитие технологий получения металлических порошков.

Металлические порошковые композиции для аддитивных технологий [10, 11] производят с помощью нескольких классических методов, таких как газовая, вакуумная и центробежная атомизация, которую проводят на специальных установках, называемых атомайзерами [5, 6, 12–16].

Разработка новых способов сфероидизации частиц порошковых композиций является актуальной задачей и имеет практическую значимость, поскольку сырье для производства изделий по аддитивным технологиям – важная составляющая процесса послойной печати.

По одному из способов получения сферических гранул частицы порошка с первоначально неправильной формой оплавливают в потоке термической плазмы электродугового разряда. При этом все неровности на поверхности частиц сглаживаются под действием сил поверхностного натяжения. В свободном падении при остывании формируются сферические гранулы [15]. Схема процесса сфероидизации порошка приведена на рис. 2.

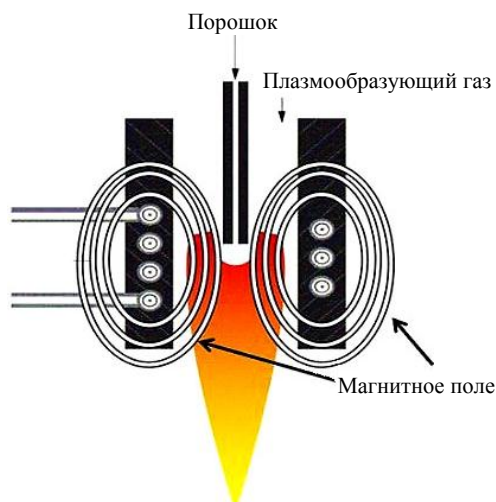


Рис. 2. Схема процесса плазменной обработки (или сфероидизации) порошка [17]

Цель данной работы – анализ научно-технической литературы в области сфероидизации порошковых композиций на основе тугоплавких металлов для разработки технологий получения сферических гранул для аддитивного производства.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 12. «Металломатричные и полиматричные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Сфероидизация металлических порошков

По мнению авторов работы [16], с появлением «трехмерной печати» дальнейшие исследования были направлены на расширение спектра используемых материалов для производства изделий. Однако приоритетной целью всегда являлось изготовление изделий из металлов, имеющих определенные физические и механические свойства – в частности, из металлов и сплавов для высокотемпературных применений. Традиционный способ подготовки порошковой композиции на основе простого смешивания порошков тугоплавких элементов часто приводит к неравномерному распределению химического состава и локальному недостаточному сплавлению. Поэтому эффективнее использовать порошки из сплава, а не просто смесь элементарных порошков.

В настоящее время композиционные материалы на основе тугоплавких металлов и их соединений применяются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах и напряжениях.

Ввиду высокой температуры плавления тугоплавких металлов традиционными методами (например, путем литья или с использованием порошковой металлургии) получить из таких металлов и их сплавов изделия сложной формы, в частности, имеющих решетчатую структуру, невозможно. В настоящее время цифровые методы аддитивного производства – например, послойное лазерное сплавление – позволяют конструировать изделия, имеющие сложную геометрическую форму (изделия с ячеистой структурой), и контролировать долю пустот, что особенно важно для деталей ответственного назначения.

Для удовлетворения требований послойного синтеза разработаны различные способы получения металлических порошков для аддитивных лазерных технологий. Наиболее перспективной является технология плазменной обработки металлических порошков.

Ниобий и его сплавы

Принципиальная возможность процесса плазменной сфероидизации порошковых композиций из сплавов на основе системы Nb–Si, полученных механическим легированием элементарных порошков Nb, Si, Al, Ti и Cr в планетарной мельнице, показана в работе [11].

Индукционную плазменную сфероидизацию проводили с использованием установки – высокочастотного индуктора.

Результаты исследования показали, что вследствие широкого распределения частиц по размерам в исходном сырье и их низкой механической прочности, приводящей к разрушению частиц на мелкие фрагменты, в процессе плазменной сфероидизации возможно испарение наиболее мелких фрагментов с последующей конденсацией паров в виде мелкодисперсных и субмикронных частиц. Поверхность полученных частиц неровная и отображает литую структуру материала (рис. 3).

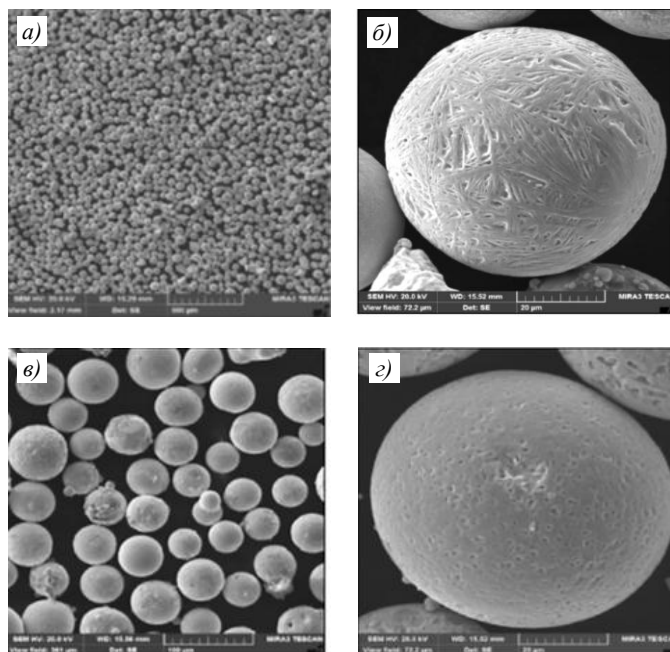


Рис. 3. Морфология частиц порошковой композиции из сплавов составов Nb–25Ti–2Al–2Cr–16Si (а, б) и Nb–24Ti–2Al–10Cr–16Si (в, г) после плазменной сфероидизации

Данные рентгенофазового анализа порошков указывают на наличие пиков твердого раствора ниобия ($Nb_{\text{тв.р-р}}$), а также на присутствие силицидов ниобия – Nb_5Si_3 и

Nb_3Si . При проведении дальнейших работ в данном направлении возникают вопросы (требующие особого внимания), касающиеся элементного и фазового составов исходного сырья, присутствия примесей, фракционного состава исходного сырья и механической прочности гранул ниобиевого сплава.

Аналогичные исследования по получению порошка сплава состава (% (атомн.)) $Nb-25Ti-2Cr-2Al-16Si$ путем механического легирования в атриторе с последующей плазменной сфероидизацией представлены в работе [17] (рис. 4). После плазменной сфероидизации порошок имеет микроструктуру с равномерно распределенными фазами Nb_5Si_3 , Nb_3Si и Nb_{ss} . Процесс плавления и быстрой закалки во время плазменной сфероидизации приводит к измельчению фаз и стабилизации силицидов Nb.

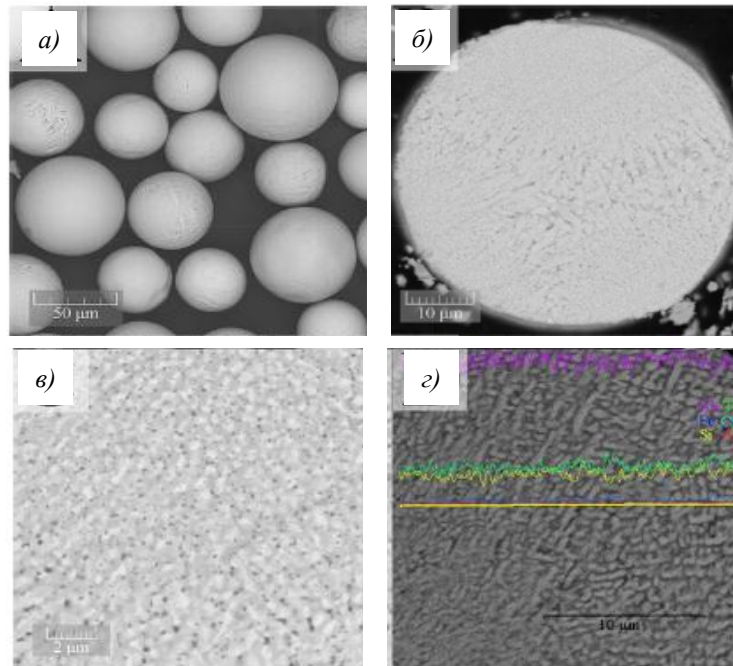


Рис. 4. Порошок из сплава состава (% (атомн.)) $Nb-25Ti-2Cr-2Al-16Si$ после плазменной обработки: *a* – общий вид; *б, в* – микроструктура в обратно-отраженных электронах; *г* – линейное распределение элементов, полученное методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

В работе [10] рассмотрена сфероидизация порошков из ниобиевых сплавов марки НБП-2 и системы $Ti-Nb$ на электродуговом плазмотроне постоянного тока с секционированной межэлектродной вставкой (рис. 5). Плазмотрон укомплектован узлом ввода порошка, обеспечивающим равномерную его подачу в поток термической плазмы, что существенно повышает эффективность обработки порошка и, соответственно, производительность плазмотрона.



Рис. 5. Внешний вид установки для сфероидизации порошков ниобия

В работе [18] описан процесс изготовления тонкодисперсных сферических порошков из сплава на основе системы TiAl–Nb путем комбинации реакционного синтеза и плазменной сфероидизации. Сначала порошки TiH₂, Al и Nb смешивали в высокоэнергетической шаровой мельнице, а затем смесь нагревали при различных температурах (от 600 до 1200 °С) в течение 2 ч, позволяя протекать реакции синтеза. В конечном итоге синтезированные порошки плавилась в радиочастотной (RF) плазме аргона и быстро затвердевали в мелкодисперсные сферические порошки из сплава на основе системы TiAl–Nb. Полученные сферические порошки имеют однородную микроструктуру с равноосными зернами, в которой преобладает пересыщенная фаза α_2 -Ti₃Al. Средний размер микрочастиц данного порошка составил 9,6 мкм с уровнем однородности распределения 0,622.

Молибден и его сплавы

Высокочастотная тепловая плазма является эффективным методом получения сферических порошков с высокой насыпной плотностью и широко используется для сфероидизации керамики и порошков тугоплавких металлов [19–24].

В статье [25] рассмотрена оптимизация параметров плазменной сфероидизации порошка молибдена с целью контроля морфологии и размеров частиц. Интерес к тепловой плазменной технологии в последние несколько десятилетий можно объяснить широким диапазоном рабочих условий и различных промышленных применений [26–29]. Данную технологию успешно использовали для сфероидизации порошков тантала и вольфрама. Однако информации об использовании высокочастотной плазмы для сфероидизации порошка молибдена существует немного.

В работе [25] представлено исследование влияния расхода газа-носителя и скорости подачи порошка молибдена на форму и размер конечных продуктов. Оптимальные параметры процесса для получения сферического порошка молибдена установлены при следующих показателях: скорость подачи порошка 50 г/мин, скорость газа-носителя 0,6 м³/ч. Кроме того, чистый сферический порошок молибдена можно получить из частиц неправильной формы, а плотность утряски увеличивается после плазменной обработки. Таким образом, сфероидизация порошка молибдена по указанной технологии способствует уменьшению среднего размера частиц с 72 до 62 мкм и увеличению плотности утряски с 2,7 до 6,2 г/см³. Контроль атмосферы внутри плазменной горелки позволяет получать плотный сферический порошок молибдена высокой чистоты. Весь технологический цикл имеет небольшую продолжительность и обладает высоким потенциалом промышленного применения. Рассматриваемый метод также можно использовать для сфероидизации и уплотнения других тугоплавких металлов или керамики [30–34].

Высокая температура плавления и низкая температура вязко-хрупкого перехода чистого молибдена объясняют многие трудности традиционных методов по его переработке. Например, штамповка и перфорация чрезвычайно легко инициируют плоские трещины в формованном листе, которые представляют собой межкристаллитные трещины, при прокатке распространяющиеся вдоль плоскости границ зерен. В процессе сварки молибдена происходит его рекристаллизация, что приводит к охрупчиванию паяного соединения и молибдена [35]. Традиционная технология порошковой металлургии не позволяет изготавливать детали сложных геометрических форм. Сложность при механической обработке молибдена приводит к увеличению стоимости изделий из него и ограничивает их геометрическую сложность и характеристики.

В работе [36] рассмотрено получение сферического порошка молибдена. Показан технологический процесс плазменного распыления под действием центробежной

силы вращающегося электрода со скоростью 17000 об/мин в атмосфере аргона. Сферичность гранул молибдена составила >90 %, гранулометрический состав имеет равномерное распределение, средний размер частиц равен 85 мкм. Доля частиц диаметром от 60 до 100 мкм составила более 80 %, диаметром <60 мкм – менее 4 %, а диаметром >150 мкм – менее 3 мкм (рис. 6).

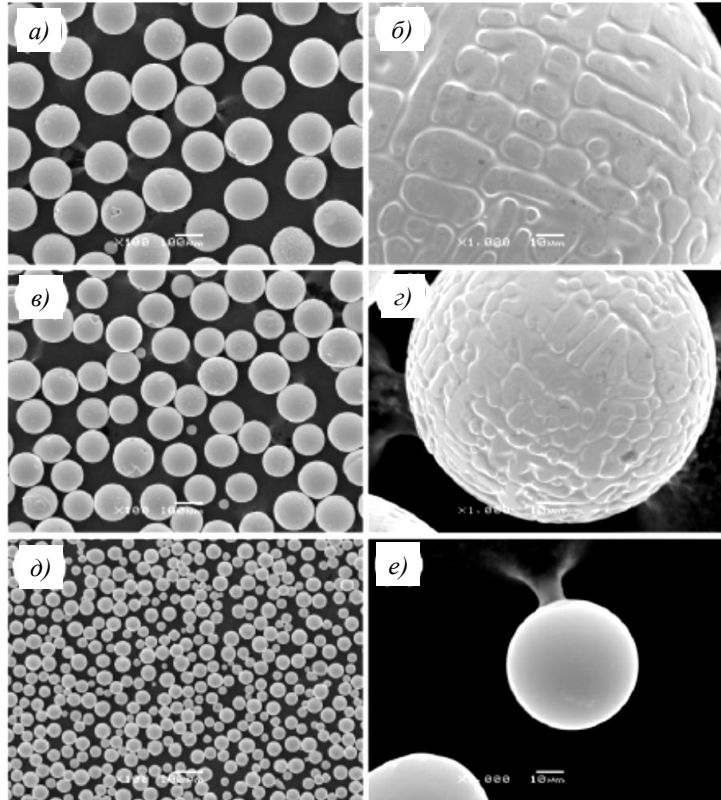


Рис. 6. Морфология поверхности частиц порошка молибдена диаметром ≥ 150 (а, б), 45–150 (в, г) и ≤ 45 мкм (д, е), полученных путем плазменного распыления под действием центробежной силы вращающегося электрода в плазме [36]

Содержание кислорода увеличивается с уменьшением диаметра частиц порошка. Когда частицы имеют диаметр 45–150 или >150 мкм, микроструктура порошка молибдена представляет собой смешанную структуру дендритов и ячеистых кристаллов. При диаметре частиц <45 мкм, имеющих гладкую поверхность, порошок молибдена не обладает видимой кристаллической структурой. Приготовленный порошок молибдена имеет текучесть 10,2–11,2 с $(50 \text{ г})^{-1}$, насыпную плотность 5,94–6,07 г/см³ и плотность после утряски 6,2–6,4 г/см³.

Заключения

Анализ научно-технической литературы показал, что сфероидизацией порошков тугоплавких металлов (молибдена и ниобия) занимаются в таких странах, как США, Китай, Япония, Франция, Германия.

Поскольку сырье для производства изделий по аддитивным технологиям – важная составляющая процесса, разработка способов сфероидизации порошковых композиций является актуальной задачей и имеет практическую значимость. Наиболее эффективный метод получения сферических порошков – распыление в высокочастотной тепловой плазме тугоплавких металлов. Данный метод позволяет получать порошок сферической формы с высокой насыпной плотностью и широко используется для

сфероидизации керамики и порошков тугоплавких металлов. Традиционный способ подготовки порошковой композиции на основе простого смешивания порошков тугоплавких элементов часто приводит к неравномерному распределению химического состава и локальному недостаточному сплавлению, поэтому использование порошков из сплава (а не просто смеси элементарных порошков) более эффективно. Ввиду высокой температуры плавления тугоплавких металлов традиционными методами (например, путем литья или с использованием порошковой металлургии) получить изделия сложной формы из тугоплавких металлов и их сплавов, в частности, имеющих решетчатую структуру, невозможно. В зависимости от особенностей технологии плазменной обработки металлических порошков возможно получение сферического порошка с размером частиц: ~50 мкм – для ниобия и композиций на его основе и 45–150 мкм – для молибдена.

Во второй части статьи будет рассмотрена сфероидизация порошков вольфрама и высокоэнтропийных сплавов на его основе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
4. Wohlers T. Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry // *Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates Inc., 2014. 275 p.
5. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G // *Journal of Aerospace Engineering*. 2015. Vol. 229. No. 11. P. 2132–2147.
6. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.
7. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 1917–1928.
8. Лопатин А.Н., Зверков И.Д. Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59.
9. Чехович А. Технология селективного лазерного плавления // *iQB Technologies*. URL: <https://blog.iqb.ru/slm-technology> (дата обращения: 27.08.2021).
10. Дудихин Д.В. Плазменная сфероидизация металлических порошков для аддитивных технологий. Томск: Нац. иссл. Томск. политехн. ун-т, 2018. 53 с.
11. Григорьев А.В., Разумов Н.Г., Попович А.А., Самохин А.В. Плазменная сфероидизация порошков на основе сплавов Nb–Si, полученных механическим легированием // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2017. Т. 23. № 1. С. 247–255. DOI: 10.18721/JEST.230125.
12. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering // *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 69. P. 65–89.
13. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла. URL: https://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf (дата обращения: 27.08.2021).
14. Baskoro A.S., Supriadi S., Dharmanto. Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 269. P. 1–9. DOI: 10.1051/matecconf/201926905004.
15. Родионов А.И., Ефимочкин И.Ю., Буякина А.А., Летников М.Н. Сфероидизация металлических порошков (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S1 (43). С. 60–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-60-64.

16. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий // *Master's Journal*. 2016. No. 1. P. 51–55.
17. Goncharov I.S., Razumov N.G., Silin A.O. et al. Synthesis of Nb-based powder alloy by mechanical alloying and plasma spheroidization processes for additive manufacturing // *Materials Letters*. 2019. Vol. 245. P. 188–191.
18. Tong J.B., Lu X., Liu C.C. et al. Fabrication of Micro-fine Spherical High Nb Containing Plasma Spheroidization TiAl Alloy Powder Based on Reaction Synthesis and RF // *Powder Technology*. 2015. Vol. 283. P. 9–15. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.062.
19. Sheng Y.W., Guo Z.M., Hao J.J. et al. Preparation of micro-spherical titanium powder by RF plasma // *Rare metal materials and engineering*. 2013. Vol. 42. No. 6. P. 1291–1297.
20. Zhang H.B., Bai L.Y., Hu P. et al. Single-step pathway for the synthesis of tungsten nanosized powders by RF induction thermal plasma // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2012. Vol. 31. P. 33–38.
21. Bai L.Y., Fan J.M., Hu P. et al. RF plasma synthesis of nickel nanopowders via hydrogen reduction of nickel hydroxide/carbonate // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 481. No. 1–2. P. 563–568.
22. Hu P., Yan S.K., Yuan F.L. et al. Effect of plasma spheroidization process on the microstructure and crystallographic phases of silica, alumina and nickel particles // *Plasma Science and Technology*. 2007. Vol. 9. No. 5. P. 611–617.
23. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
24. Князев А.Е., Востриков А.В. Рассев порошков в аддитивном и гранульном производствах (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 11 (93). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
25. Liu X., Wang K., Hu P. et al. Spheroidization of molybdenum powder by radio frequency thermal plasma // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2015. Vol. 22. No. 11. P. 1212–1218. DOI: 10.1007/s12613-015-1187-7.
26. Saheb N. Spark plasma and microwave sintering of Al6061 and Al2124 alloys // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 20. No. 2. P. 152–159.
27. Lu X., Sun B., Zhao T.F. et al. Microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti-Mo alloys for dental applications // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2014. Vol. 21. No. 5. P. 479–486.
28. Kersten H., Rohde D., Berndt J. et al. Investigations on the energy influx at plasma processes by means of a simple thermal probe // *Thin Solid Films*. 2000. Vol. 377–378. P. 585–591.
29. Belmonte M., Osendi M.I., Miranzo P. Modeling the effect of pulsing on the spark plasma sintering of silicon nitride materials // *Scripta Materialia*. 2011. Vol. 65. No. 3. P. 273–276.
30. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S. et al. Chemical vapor synthesis (CVS) of tungsten nanopowder in a thermal plasma reactor // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009. Vol. 27. No. 1. P. 149–154.
31. Boulos M. Plasma power can make better powders // *Metal Powder Report*. 2004. Vol. 59. No. 5. P. 16–21.
32. Ko T.S., Yang S., Hsu H.C. et al. ZnO nanopowders fabricated by dc thermal plasma synthesis // *Materials Science and Engineering B*. 2006. Vol. 134. No. 1. P. 54–58.
33. Kumar S., Selvarajan V., Padmanabhan P.V.A. et al. Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet: comparison between experimental results and theoretical estimation // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 176. No. 1–3. P. 87–94.
34. Jiang X.L., Boulos M. Induction plasma spheroidization of tungsten and molybdenum powders // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2000. Vol. 16. No. 1. P. 13–17.
35. Peiquan Z. Application and Processing Method of Molybdenum and Molybdenum Alloy // *China Molybdenum Industry*. 2000. Vol. 24. No. 5. P. 15–16.
36. Qiu S., Chen B., Xiang C. Preparation and Properties of Spherical Mo Powders by Plasma Rotating Electrode Process for Additive Manufacturing // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 993. P. 391–397. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.993.391.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Kablov E.N. Present and future of additive technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
4. Wohlers T. Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. *Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates Inc., 2014, 275 p.
5. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, vol. 229, no. 11, pp. 2132–2147.
6. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylyna I.N. *Additive technologies in mechanical engineering*. St. Petersburg: Polytech. Univ., 2013, 222 p.
7. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928.
8. Lopatin A.N., Zverkov I.D. Shaping molding tools production for composite parts by means of additive technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55). pp. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59.
9. Chekhovich A. Technology of selective laser melting. Available at: <https://blog.iqb.ru/slm-technology> (accessed: August 27, 2021).
10. Dudikhin D.V. *Plasma spheroidization of metal powders for additive technologies*. Tomsk: National Research Tomsk Polytech. Univ., 2018, 53 p.
11. Grigoriev A.V., Razumov N.G., Popovich A.A., Samokhin A.V. Plasma spheroidization of powders based on Nb–Si alloys obtained by mechanical alloying. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SpbGPU*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 247–255. DOI: 10.18721/JEST.230125.
12. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 69, pp. 65–89.
13. Dovbysh V.M., Zabednov P.V., Zlenko M.A. *Additive technologies and metal products*. Available at: https://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf (accessed: August 27, 2021).
14. Baskoro A.S., Supriadi S., Dharmanto. Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 269, pp. 1–9. DOI: 10.1051/mateconf/201926905004.
15. Rodionov A.I., Efimochkin I.Ju., Bujakina A.A., Letnikov M.N. Spheredizatsiya of metal powders (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S1, pp. 60–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-60-64.
16. Dudikhin D.V., Saprykin A.A. Methods for obtaining spherical powders for additive laser technologies. *Master's Journal*, 2016, no. 1, pp. 51–55.
17. Tong J.B., Lu X., Liu C.C. et al. Fabrication of Micro-fine Spherical High Nb Containing Plasma Spheroidization TiAl Alloy Powder Based on Reaction Synthesis and RF. *Powder Technology*, 2015, vol. 283, pp. 9–15. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.062.
18. Goncharov I.S., Razumov N.G., Silin A.O. et al. Synthesis of Nb-based powder alloy by mechanical alloying and plasma spheroidization processes for additive manufacturing. *Materials Letters*, 2019, vol. 245, pp. 188–191.
19. Sheng Y.W., Guo Z.M., Hao J.J. et al. Preparation of micro-spherical titanium powder by RF plasma. *Rare metal materials and engineering*, 2013, vol. 42, no. 6, pp. 1291–1297.
20. Zhang H.B., Bai L.Y., Hu P. et al. Single-step pathway for the synthesis of tungsten nanosized powders by RF induction thermal plasma. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, vol. 31, pp. 33–38.
21. Bai L.Y., Fan J.M., Hu P. et al. RF plasma synthesis of nickel nanopowders via hydrogen reduction of nickel hydroxide/carbonate. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 481, no. 1–2, pp. 563–568.

22. Hu P., Yan S.K., Yuan F.L. et al. Effect of plasma spheroidization process on the microstructure and crystallographic phases of silica, alumina and nickel particles. *Plasma Science and Technology*, 2007, vol. 9, no. 5, pp. 611–617.
23. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
24. Knyazev A.E., Vostrikov A.V. Sieving of powders additive and powder manufacturings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 2. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
25. Liu X., Wang K., Hu P. et al. Spheroidization of molybdenum powder by radio frequency thermal plasma. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2015, vol. 22, no. 11, pp. 1212–1218. DOI: 10.1007/s12613-015-1187-7.
26. Saheb N. Spark plasma and microwave sintering of Al6061 and Al2124 alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 152–159.
27. Lu X., Sun B., Zhao T.F. et al. Microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti-Mo alloys for dental applications. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 479–486.
28. Kersten H., Rohde D., Berndt J. et al. Investigations on the energy influx at plasma processes by means of a simple thermal probe. *Thin Solid Films*, 2000, vol. 377–378, pp. 585–591.
29. Belmonte M., Osendi M.I., Miranzo P. Modeling the effect of pulsing on the spark plasma sintering of silicon nitride materials. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 65, no. 3, pp. 273–276.
30. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S. et al. Chemical vapor synthesis (CVS) of tungsten nanopowder in a thermal plasma reactor. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, no. 1, pp. 149–154.
31. Boulos M. Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*, 2004, vol. 59, no. 5, pp. 16–21.
32. Ko T.S., Yang S., Hsu H.C. et al. ZnO nanopowders fabricated by dc thermal plasma synthesis. *Materials Science and Engineering B*, 2006, vol. 134, no. 1, pp. 54–58.
33. Kumar S., Selvarajan V., Padmanabhan P.V.A. et al. Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet: comparison between experimental results and theoretical estimation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 176, no. 1–3, pp. 87–94.
34. Jiang X.L., Boulos M. Induction plasma spheroidization of tungsten and molybdenum powders. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2000, vol. 16, no. 1, pp. 13–17.
35. Peiquan Z. Application and Processing Method of Molybdenum and Molybdenum Alloy. *China Molybdenum Industry*, 2000, vol. 24, no. 5, pp. 15–16.
36. Qiu S., Chen B., Xiang C. Preparation and Properties of Spherical Mo Powders by Plasma Rotating Electrode Process for Additive Manufacturing. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 993, pp. 391–397. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.993.391.

Информация об авторах

Бурковская Наталия Петровна, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Natalya P. Burkovskaya, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Ivan Yu. 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

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.09.2022.
The article was submitted 04.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 01.09.2022.