

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-101-112

**СФЕРОИДИЗАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ
НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ (обзор). Часть 2***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. Во второй части статьи представлен обзор научно-технической литературы в области сфероидизации порошковых композиций на основе вольфрама. Ввиду высокой температуры плавления тугоплавких металлов, традиционными методами (например, путем литья или с использованием порошковой металлургии) получить изделия сложной формы из таких металлов и их сплавов, в сравнении с возможностями аддитивных технологий, невозможно. Для получения металлических порошков вольфрама или композиций на его основе, которые удовлетворяют требованиям аддитивных лазерных технологий, наиболее перспективной является технология плазменной обработки металлических порошков.

Ключевые слова: металлический композиционный материал, сфероидизация, тугоплавкий металл, термическая плазма, гранула, аддитивное производство, жаропрочный материал, вольфрам, высокоэнтальпийные сплавы

Для цитирования: Бурковская Н.П., Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Сфероидизация порошковых композиций на основе тугоплавких металлов (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-101-112.

Scientific article

**SPHEROIDIZATION OF POWDER COMPOSITIONS BASED
ON REFRACTORY METALS (review). Part 2**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. The second part of the article presents a review of scientific and technical literature in the field of spheroidization of powder compositions based on tungsten. Due to the high melting point of refractory metals, it is impossible to obtain products of complex shape from such metals and their alloys by traditional methods (for example, by casting or using powder metallurgy), in comparison with the capabilities of additive technologies. To obtain metal powders of tungsten or compositions based on it, which meet the requirements of additive laser technologies, the most promising technology is the plasma treatment of metal powders.

Keywords: metal composite material, spheroidization, refractory metal, thermal plasma, granule, additive manufacturing, refractory material, tungsten, high-enthalpy alloys

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 2. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-101-112.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 1 (119), 2023.

Введение

Известно, что, ввиду высокой температуры плавления тугоплавких металлов, традиционными методами (например, путем литья или порошковой металлургией) получить изделия сложной формы из таких металлов и их сплавов, в частности, имеющих сложную геометрию, в сравнении с возможностями аддитивных технологий, невозможно [1–9].

Цель данной работы – анализ научно-технической литературы в области сфероидизации порошковых композиций на основе тугоплавких металлов 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].

Вольфрам и его сплавы

Порошок вольфрама или его сплав, используемые для аддитивного производства, получить газовым распылением достаточно проблематично: генерируемое в ходе вакуумной индукционной плавки тепло не позволяет превысить температуру плавления сплава. Кроме того, сферичность и текучесть порошка, полученного методом механического легирования, не удовлетворяют требованиям послойного лазерного спекания [10–19].

Эффективным методом получения сфероидизированного тугоплавкого порошка вследствие его ультравысокой температуры плавления, повышенной скорости охлаждения и высокой продолжительности реакции является термическая плазменная сфероидизация. Данным методом успешно получены порошки ряда тугоплавких металлов – вольфрама (W), молибдена (Mo) и тантала (Ta) для аддитивного производства [20–30]. В отличие от порошков чистых металлов, для сплавов, которые подвергаются термической плазменной сфероидизации, как правило, требуется порошок-предшественник. Традиционный способ его получения – механическое легирование. Данный способ не лишен недостатков. В частности, механическое легирование приводит к загрязнению порошка ввиду высокой твердости вольфрама и его сплавов. Кроме того, гранулометрический состав и текучесть порошка с большим трудом удовлетворяют требованиям процесса термической плазменной сфероидизации. Перспективным методом для получения порошка-предшественника требуемых гранулометрического состава и текучести является распылительная грануляция. Несмотря на высокую пористость порошка, используемого для распылительной грануляции, его можно модифицировать при последующей термической плазменной сфероидизации.

Первые упоминания о сфероидизации вольфрама встречаются в литературных научно-технических источниках с 1964 по 1966 г. В работе [28] рассматривается влияние параметров процесса атомизации на гранулометрический состав вольфрамового порошка. Вследствие высокой температуры плавления вольфрама традиционные методы не могут быть использованы для изготовления его сферических частиц [29–32].

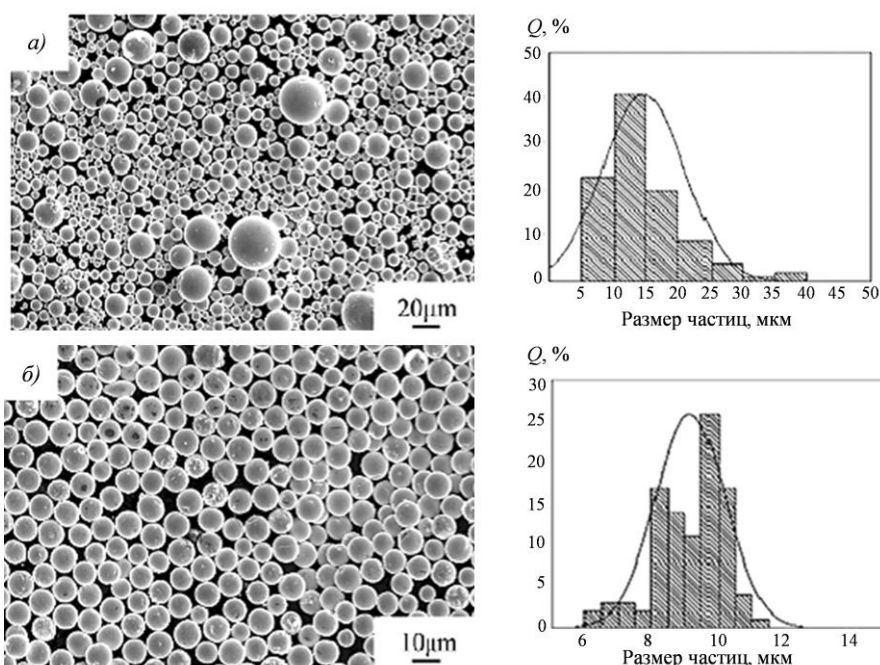
Для производства сфероидизированного вольфрамового порошка применяют несколько методов, включая технологию нагрева сверхвысокочастотным излучением [29], избирательное локальное окисление полиэдрических частиц вольфрама с последующей щелочной промывкой NaOH [33]. Термоплазменная технология является одним из перспективных применений одностадийной сфероидизации.

Благодаря особому преимуществу – высокотемпературной, высокоэнергетической и осевой подаче порошка, высокочастотную индуктивно связанную плазму используют для сфероидизации порошков с мелкими частицами из сплавов, керамики и тугоплавких металлов [32]. В настоящее время исследователи успешно применяют эту технологию для получения порошка вольфрама с хорошей сферичностью и высокой степенью сфероидизации частиц [34–36]. Тем не менее технология имеет и ряд недостатков: наблюдается образование оксидов вольфрама в порошке W, сфероидизированном в условиях мягкого вакуума, а также укрупнение зерна внутри некоторых сфероидизированных частиц вольфрамового порошка.

Следует отметить, что чрезвычайно сложно изготовить сфероидизированный порошок вольфрама с узким гранулометрическим составом, особенно мелкозернистый порошок со средним размером частиц <10 мкм. Изготовление сфероидизированного вольфрамового порошка в основном ограничивается широким гранулометрическим составом или, точнее, агломерацией частиц. В работе [36] указывается, что широкий гранулометрический состав исходного порошка приводит либо к чрезмерному испарению более мелких частиц, либо к недостаточному плавлению более крупных. Однако такой состав исходного порошка приводит к получению порошка с непредсказуемыми характеристиками плазмы и к неуправляемому процессу сфероидизации, что препятствует его применению в крупномасштабном непрерывном производстве. Таким образом, актуальной является проблема предварительной обработки исходного вольфрамового порошка.

В работе [32] показано использование струйной мельницы при модуляции гранулометрического состава порошка, что позволило получить частицы размером от 1 до 10 мкм.

На рисунке представлена морфология поверхности сфероидизированного порошка вольфрама в высокочастотной индуктивно связанной плазме.



Морфология поверхности по размерам сфероидизированного порошка вольфрама и распределение его частиц: *а* – исходный порошок; *б* – порошок, подвергнутый предварительному размолу на струйной мельнице (Q – количество частиц данного диаметра (мкм) по отношению к общему количеству частиц (%)) [32]

В работе [32] мелкозернистый сферический порошок вольфрама с размером частиц от 6 до 11 мкм получали в два этапа. На первом этапе выполнена предварительная обработка данного порошка. Полное диспергирование и классификацию проводили при помощи фрезерно-струйной мельницы, использование которой позволило получить монодисперсные порошки вольфрама с узким гранулометрическим составом. Параметры плазменной сфероидизации оптимизированы на основании имеющихся расчетов и моделирования. Таким образом, мелкозернистый порошок вольфрама с узким гранулометрическим составом получают путем последующей сфероидизации в высокочастотной индуктивно связанной плазме. Представленный способ достаточно эффективный и может применяться в крупномасштабном непрерывном производстве сфероидизированного порошка вольфрама с указанным составом.

В работе [37] рассмотрен простой и экономически выгодный способ получения сферических частиц порошка из тугоплавких материалов различной дисперсности. Изобретение относится к области порошковой металлургии и может использоваться для сфероидизации порошков из тугоплавких материалов, применяемых для получения твердых сплавов, композиционных материалов и покрытий различного назначения. Сфероидизации по указанной технологии [37] могут подвергаться любые тугоплавкие металлы, сплавы на их основе, карбиды, бориды, нитриды, карбонитриды металлов и т. д.

Исходную дробленую крупку релита (карбид вольфрама с содержанием углерода 4,0 % (по массе)) с частицами неправильной формы размером 80–100 мкм засыпали в дозатор, расположенный над вертикально стоящей трубой, установленной в вакуумируемой камере и изготовленной из углерод-углеродного материала. Внутренний диаметр трубы составлял 80 мм, длина 600 мм. Установку вакуумировали до остаточного давления $2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., а затем заполняли азотом до атмосферного давления. Трубу нагревали проходящим током до температуры 3000 ± 20 °С. Крупку релита из дозатора просыпали через внутреннюю полость трубы со скоростью 4,5 кг/ч. В процессе свободного пролета крупки через нагретую трубу ее материал плавился, частицы принимали сферическую форму и затвердевали. Мощность нагревателя составляла 20 кВт. Расчетный расход электроэнергии на сфероидизацию релита по предлагаемому способу составил 4,4 кВт/кг. Для сравнения: расход энергии при сфероидизации аналогичного порошка в высокочастотной индуктивно связанной плазме составляет 8,2 кВт/кг, т. е. эффективность нагрева по предложенной технологии ввиду более высокого КПД выше, а энергозатраты меньше.

В работе [38] в качестве метода для сфероидизации порошка из тугоплавких металлов представлена плазменная сфероидизация. Эффективность данного метода экспериментально проверена на порошках вольфрама и композиционного материала на основе системы W-Ta. Исследованы сферические частицы порошков из тугоплавких металлов, обработанные с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы с высокочастотной индуктивно связанной плазмой. При использовании этого технического способа успешно получены чистые сфероидизированные порошки вольфрама, сыпучесть и кажущаяся плотность которых увеличились с $10,7$ до $5,5$ с $(50 \text{ г})^{-1}$ и с $6,916$ до $11,041$ г/см³ соответственно. Склонность к образованию микротрещин во время плавления лазером и быстрого затвердевания вольфрама может быть снижена легирующим элементом танталом. Тантал гомогенно диспергирован в вольфрамовой матрице сфероидизированных порошков из материала состава W-6 % (по массе) Ta. Тем не менее после измельчения в высокоэнергетической мельнице образуется небольшое количество частиц чешуйчатой формы. Такие частицы не могут быть сфероидизированы в последующем процессе обработки высокочастотной индуктивно связанной

плазмой, что является результатом взвешенного состояния чешуек в электрических и магнитных полях, а также связано с особенностями теплообмена между частицами и плазмой при различных моделях турбулентности. Таким образом, частицы чешуйчатой формы не могут пройти через высокотемпературную зону термической плазменной горелки и быть сфероидизированы должным образом. Поэтому для сужения гранулометрического состава «сырых» порошков и контроля их формы необходимо улучшить степень их сфероидизации. Процессы тепломассопереноса и движение частиц порошка в потоке высокочастотной индуктивно связанной плазмы при сфероидизации тесно связаны с такими параметрами плазмы, как уровень ее мощности, состав газа и т. д.

Учеными Пекинского технологического университета (Beijing University of Technology) успешно проведен синтез сфероидизированного порошка из сплава на основе системы W–Mo для аддитивного производства методом распылительной грануляции в комбинации с термической плазменной сфероидизацией [39]. На начальной стадии частицы вольфрама и молибдена (размером 1–3 мкм), сформированные при распылительной грануляции, связываются друг с другом с образованием пористого агломерированного порошка требуемых гранулометрического состава и текучести. На последующей стадии пористый агломерированный порошок из сплава на основе системы W–Mo подвергается плавлению посредством термической плазмы. Вольфрам и молибден растворяются друг в друге, образуя твердый раствор. В процессе термической плазменной сфероидизации порошок уплотняется.

Изменение микроструктуры порошка из W–Mo-сплава при этом происходит по следующей схеме: порошок адсорбирует тепловую энергию плазмы и плавится, начиная с поверхности. В то же время происходит перестроение частиц этого порошка, которое приводит к различиям в их морфологии на различных стадиях процесса термической плазменной сфероидизации. В результате практически весь порошок приобретает плотную структуру с равномерным распределением элементов.

Благодаря оптимизации технологических параметров процесса получают сфероидизированный порошок из сплава на основе системы W–Mo с равномерным распределением элементов, низким содержанием кислорода (0,08 %) и хорошей текучестью ($10 \text{ с } (50 \text{ г})^{-1}$). По данным показателям на основе полученного сфероидизированного порошка, соответствующего требованиям метода послойного лазерного спекания, можно получить образцы W–Mo-сплава с плотностью, близкой к 100 %, однако с незначительным количеством дефектов. Трещинообразование в образцах значительно ограничено вследствие повышения прочности и пластичности материала в результате легирования и измельчения зерна. Благодаря высокой прочности, превосходной стойкости к коррозии и ползучести при повышенных температурах такой сплав считается перспективным материалом для высокотемпературных применений.

Кроме того, большой интерес представляет получение сфероидизированных порошков из высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) на основе тугоплавких элементов. Поскольку высокая температура плавления тугоплавких компонентов неизбежно вызывает проблемы при использовании традиционных способов производства (например, литья иковки), плазменная сфероидизация такого типа порошков является альтернативным вариантом для получения материалов на основе ВЭС, а также изделий из них, получаемых методами аддитивного производства. Высокоэнтропийные сплавы представляют собой новый тип материалов, в которых сочетание элементов, взятых в эквивалентных или эквимольных пропорциях, способствует получению неожиданных свойств материалов. Так, возникающий эффект искаженной кристаллической решетки позволяет повысить сопротивление высокотемпературному разупрочнению, что в свою

очередь дает возможность увеличить рабочую температуру до 1600 °С. Например, сплав Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ (далее – NbMoTaW), разработка которого представлена в статьях [40, 41], демонстрирует значения предела текучести >400 МПа при температуре 1600 °С.

Производство сфероидизированных тугоплавких порошков из ВЭС в промышленных масштабах остается важной задачей. В исследовании [42] такие порошки (например, из сплава NbMoTaW) с однородным распределением частиц по размерам ($d_{50} = 35,0$ мкм) успешно получены с использованием нового промышленного метода, сочетающего сушку распылением и сфероидизацию в плазме. Порошок из ВЭС представляет собой сплав с объемноцентрированной кубической решеткой, но с клеточной сегрегацией элементов, включающей в основном ниобий и вольфрам в нанометровом размере. Микротвердость такого порошка составляет 10,09 ГПа, что на ~50 % больше, чем у порошка из ВЭС того же состава в объемном состоянии. Таким образом, сверхвысокие значения микротвердости способствуют перспективному использованию порошка из ВЭС в качестве сверхтвердых материалов. Кроме того, новый метод получения сфероидизированного порошка имеет большое значение для промышленного применения жаропрочных ВЭС (или сложных тугоплавких сплавов), особенно на основе 3D-печати и термических покрытий.

В работе [43] сферические порошки из тугоплавкого ВЭС (W-Ta-Mo-Nb-V) изготовлены путем измельчения и сфероидизации в индуктивно связанной термической плазме. При комнатной температуре сплав W-Ta-Mo-Nb-V – хрупкий, следовательно, его слиток можно измельчить путем размола в щековой дробилке и шаровой мельнице, при этом полученные порошки будут иметь неправильную форму. После рассеивания на ситах фракцию порошка размером от 25 до 63 мкм сфероидизировали в индуктивно связанной термической плазме. Используя данный процесс, можно успешно сфероидизировать порошки из ВЭС (W-Ta-Mo-Nb-V) с $d_{50} = 45,1$ мкм.

В работе [44] исследован процесс сфероидизации порошка из сплава V-Nb-Mo-Ta-W по технологии, сочетающей водородное охрупчивание и сфероидизацию в термической плазме. Слиток данного сплава получен методом вакуумно-дуговой плавки. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа ВЭС показали наличие лишь одной фазы с объемноцентрированной кубической решеткой. Для более легкого измельчения слитка в мелкодисперсный порошок осколочной формы, водородное охрупчивание проводили путем отжига в атмосфере водорода. Затем порошок отжигали в вакууме с целью удаления водорода из гидrogenизированного ВЭС, что привело к снижению концентрации водорода с 0,1033 до 0,0003 % (по массе). Такой порошок осколочной формы сфероидизируют в индуктивно связанной термической плазме, что позволяет получать порошок ВЭС на основе системы V-Nb-Mo-Ta-W со значением $d_{50} = 28,0$ мкм.

Изобретение китайских разработчиков [45] относится к способу лазерной сфероидизации несферических частиц порошка тугоплавкого металла и твердого сплава осколочной формы, которые в среде аргона «попадают» в лазерный луч с высокой плотностью энергии таким образом, что выступающие части поверхности частиц порошка оплавляются под действием поверхностного натяжения и затвердевают. Поскольку лазерная обработка не приводит к появлению внешних примесей, а процесс сфероидизации выполняется в защитной среде аргона высокой чистоты, сфероидизированный порошок не может быть загрязнен внешними примесями. В то же время, поскольку энергия лазера является точной и управляемой, в процессе сфероидизации можно избежать потерь при сгорании упрочняющих (легирующих) элементов.

В работе [46] описан сфероидизированный порошок для покрытия и способ его лазерной наплавки. Порошковую композицию получают смешиванием порошков Fe, Mn, Si,

Cr, Ni и наноразмерного порошка из карбида вольфрама (WC). Материал готовят способом, который включает следующие этапы: сначала порошки смешивают и помещают в шаровую мельницу для измельчения, далее измельченный порошок сушат при температуре 110 °С, а затем для получения сфероидизированной порошковой композиции для покрытия высушенный порошок обрабатывают методом лазерной сфероидизации. Мощность лазера составляет 300–800 Вт, диаметр лазерного пучка 3–6 мм, скорость лазерного сканирования 15–25 мм/с. Метод лазерной сфероидизации включает этап укладки сухого порошка на поверхность подложки из нержавеющей стали 304 (толщина слоя порошка составляет 0,4–1 мм) и последующее лазерное сканирование. Получаемая порошковая композиция имеет равномерное распределение керамических частиц и обладает более высокой твердостью и лучшей износостойкостью.

Заключения

Анализ данных научно-технической литературы показал, что сфероидизацией порошков из тугоплавких металлов занимаются во многих странах – в США, Китае, Японии, Германии и Франции.

Поскольку сырье для производства изделий по аддитивным технологиям – важная составляющая процесса, то разработка способов сфероидизации порошковых композиций является актуальной проблемой, решение которой имеет практическую значимость. Наиболее эффективный метод получения сферических частиц порошков из тугоплавких металлов – это обработка порошков высокочастотной тепловой плазмой, способствующая получению частиц с высокой насыпной плотностью и широко используемая для сфероидизации тугоплавкой керамики. Традиционный способ получения порошков тугоплавких элементов часто приводит к неравномерному распределению химического состава и локальному недостаточному сплавлению, поэтому более эффективно применение порошков из сплава вместо смешивания элементарных порошков. Ввиду высокой температуры плавления тугоплавких металлов, традиционными методами (например, путем литья или с использованием порошковой металлургии) получить изделия сложной формы из таких металлов и их сплавов, в частности, имеющих решетчатую структуру, невозможно. В зависимости от особенностей технологии плазменной обработки металлических порошков возможно получение частиц сферической формы – вольфрама или композиций на его основе с размером фракций от 1 до 11 и 25–63 мкм соответственно.

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. 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.
8. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 1917–1928.
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/mateconf/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.
16. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий // *Masters journal*. 2016. No. 1. P. 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. P. 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. P. 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. 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. 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.
22. Liu X.-P., Wang K.-S., 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

28. 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.
29. Peiquan Z. Application and Processing Method of Molybdenum and Molybdenum Alloy // China Molybdenum Industry. 2000. Vol. 24. No. 5. P. 15–16.
30. 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.
31. Krasnov A.N. Theory, Technology and Properties of Powders Plasma Atomization of Tungsten // Translated from Poroshkovaya Metallurgiya. 1966. Vol. 38. No. 2. P. 1–5.
32. Li R., Qin M., Huang H. et al. Fabrication of fine-grained spherical tungsten powder by radio frequency (RF) inductively coupled plasma spheroidization combined with jet milling // Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28. No. 12. P. 3158–3163. DOI: 10.1016/j.apt.2017.09.019.
33. Qiu W.T., Li Z., Xiao Z. et al. Sphericizing tungsten particles by means of localized preferential oxidation and alkaline washing // Powder Technology. 2012. Vol. 228. P. 187–192.
34. Li B., Sun Z., Jin H. et al. Fabrication of homogeneous tungsten porous matrix using spherical tungsten powders prepared by thermal plasma spheroidization process // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2016. Vol. 59. P. 105–113.
35. Jiang X.L., Boulos M. Induction plasma spheroidization of tungsten and molybdenum powders // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2006. Vol. 16. P. 13–17.
36. Károly Z., Szépvölgyi J. Plasma spheroidization of ceramic particles // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005. Vol. 44. P. 221–224.
37. Способ сфероидизации порошка тугоплавкого материала: пат. № 2469817 Рос. Федерация; заявл. 27.06.11; опубл. 20.12.12.
38. Yu C.F., Zhou X., Wang D.Z. et al. Study on the RF inductively coupled plasma spheroidization of refractory W and W–Ta alloy powders // Plasma Sources Science and Technology. 2018. Vol. 20. No. 1. Art. 014019.
39. Tan Zh., Wu X., Wang Y. et al. In situ synthesis of spherical W–Mo alloy powder for additive manufacturing by spray granulation combined with thermal plasma spheroidization // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2021. Vol. 95. No. 9. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105460.
40. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys // Intermetallics. 2011. Vol. 19. P. 698–706. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.01.004.
41. Senkov O.N., Senkova S.V., Meisenkothen F. et al. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy // Journal of Materials Science. 2012. Vol. 47. P. 4062–4074. DOI: 10.1007/s10853-012-6260-2.
42. Liu B., Duan H., Li L. et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-hard spherical refractory high-entropy alloy powders fabricated by plasma spheroidization // Powder Technology. 2021. Vol. 382. P. 550–555.
43. Park J.-M., Kang J.-W., Lee W.-H. et al. Preparation of spherical WTaMoNbV refractory high entropy alloy powder by inductively-coupled thermal plasma // Materials Letters. 2019. Vol. 255. Art. 126513. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126513.
44. Lee W.-H., Park K.B., Yi K.-W. et al. Synthesis of Spherical V–Nb–Mo–Ta–W High-Entropy Alloy Powder Using Hydrogen Embrittlement and Spheroidization by Thermal Plasma // Metals. 2019. Vol. 9. P. 1296–1312. DOI: 10.3390/met9121296.
45. The method of rare refractory metal of a kind of laser spheroidization and the non-spherical powder of carbide alloy: pat. CN 101602107; filed 16.12.09; publ. 16.11.11.
46. A kind of nodularization MMC composite coating material and its laser cladding method: pat. CN 109943845, filed 28.06.19; publ. 14.05.21.

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 of 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., Mutylyina I.N. *Additive technologies in mechanical engineering*. St. Petersburg: Publ. House of Polytechnic Univ., 2013, 222 p.
7. 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.
8. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928.
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: Nat. research Tomsk Polytechnic 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-tekhnicheskiye 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. *Masters 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. Knyazev A.E., Vostrikov A.V. Sieving of powders additive and powder manufacturings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.

22. Liu X.-P., Wang K.-S., 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Peiquan Z. Application and Processing Method of Molybdenum and Molybdenum Alloy. *China Molybdenum Industry*, 2000, vol. 24, no. 5, pp. 15–16.
30. 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.
31. Krasnov A.N. Theory, Technology and Properties of Powders Plasma Atomization of Tungsten. *Translated from Poroshkovaya Metallurgiya*, 1966, vol. 38, no. 2, pp. 1–5.
32. Li R., Qin M., Huang H. et al. Fabrication of fine-grained spherical tungsten powder by radio frequency (RF) inductively coupled plasma spheroidization combined with jet milling. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28, no. 12, pp. 3158–3163. DOI: 10.1016/j.apt.2017.09.019.
33. Qiu W.T., Li Z., Xiao Z. et al. Sphericizing tungsten particles by means of localized preferential oxidation and alkaline washing. *Powder Technology*, 2012, vol. 228, pp. 187–192.
34. Li B., Sun Z., Jin H. et al. Fabrication of homogeneous tungsten porous matrix using spherical tungsten powders prepared by thermal plasma spheroidization process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 59, pp. 105–113.
35. Jiang X.L., Boulos M. Induction plasma spheroidization of tungsten and molybdenum powders. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2006, vol. 16, pp. 13–17.
36. Károlyi Z., Szépvölgyi J. Plasma spheroidization of ceramic particles. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2005, vol. 44, pp. 221–224.
37. *Method for spheroidization of refractory material powder*: pat. no. 2469817 Rus. Federation; filed 27.06.11; publ. 20.12.12.
38. Yu C.F., Zhou X., Wang D.Z. et al. Study on the RF inductively coupled plasma spheroidization of refractory W and W-Ta alloy powders. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, vol. 20, no. 1, art. 014019.
39. Tan Zh., Wu X., Wang Y. et al. In situ synthesis of spherical W-Mo alloy powder for additive manufacturing by spray granulation combined with thermal plasma spheroidization. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 95, no. 9. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105460.
40. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 698–706. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.01.004.
41. Senkov O.N., Senkova S.V., Meisenkothen F. et al. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, pp. 4062–4074. DOI: 10.1007/s10853-012-6260-2.

42. Liu B., Duan H., Li L. et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-hard spherical refractory high-entropy alloy powders fabricated by plasma spheroidization. *Powder Technology*, 2021, vol. 382, pp. 550–555.
43. Park J.-M., Kang J.-W., Lee W.-H. et al. Preparation of spherical WTaMoNbV refractory high entropy alloy powder by inductively-coupled thermal plasma. *Materials Letters*, 2019, vol. 255, art. 126513. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126513.
44. Lee W.-H., Park K.B., Yi K.-W. et al. Synthesis of Spherical V–Nb–Mo–Ta–W High-Entropy Alloy Powder Using Hydrogen Embrittlement and Spheroidization by Thermal Plasma. *Metals*, 2019, vol. 9, pp. 1296–1312. DOI: 10.3390/met9121296.
45. *The method of rare refractory metal of a kind of laser spheroidization and the non-spherical powder of carbide alloy*: pat. CN 101602107; filed 16.12.09; publ. 16.11.11.
46. *A kind of nodularization MMC composite coating material and its laser cladding method*: pat. CN 109943845, filed 28.06.19; publ. 14.05.21.

Информация об авторах

Бурковская Наталия Петровна, научный сотрудник, к.х.н., 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, Candidate of Sciences (Chem.), 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. Bol'shakova, 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.