

УДК 669-1(66-965);544.556.1(544.558);537-523.5

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-120-135>

EDN QYQWPB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Технологии получения и обработки порошковых материалов в термической плазме электродугового разряда

А.В. Самохин, Н.В. Алексеев, М.А. Синайский✉, А.А. Фадеев, А.Г. Асташов,
Д.Е. Кирпичев, А.А. Дорофеев

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова (ИМЕТ РАН), Москва, 119334 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: ms18@mail.ru

Аннотация

Цели. Обобщить результаты исследований плазменных процессов, обеспечивающих получение порошковых материалов заданного состава; осуществить плазменные процессы: плазмохимический синтез нанопорошков, грануляцию нанопорошков, плазменную сфероидизацию микрогранул и микропорошков для выполнения задач в области нанотехнологий и аддитивных технологий.

Методы. Генерация термической плазмы осуществлялась разработанными в ИМЕТ РАН электродуговыми плазмотронами постоянного тока мощностью до 45 кВт с самоустанавливающейся длиной дуги и плазмотронами с межэлектродной вставкой. В процессах плазмохимического синтеза нанопорошков и плазменной сфероидизации металлических порошков была использована конструкция плазменного реактора с ограниченным струйным течением с использованием термической плазмы восстановительных, окислительных и инертных сред.

Результаты. Использование электродугового плазмотрона позволило в процессах плазмохимического синтеза нанопорошков и плазменной сфероидизации порошков достигнуть производительности 0.5 и 10 кг/ч соответственно для различных металлов, сплавов, соединений и их композиций. Для реализованных процессов получения нанопорошков, формирование частиц в которых происходит по различным макромеханизмам, установлено, что средний размер получаемых частиц управляется и зависит от параметров синтеза — начальной концентрации прекурсора, энтальпии и скорости истечения струи плазмы, скорости охлаждения и конденсации паров. Показаны результаты исследования процессов получения сфероидизированных порошков в потоках термической плазмы, включая металлы (Ti, Ta, Fe, Ni, Mo, W), сплавы (на основе Fe, Ti, Ni, Co, Nb, W, Mg, в том числе нержавеющие, жаропрочные, тугоплавкие, твердые), соединения (бориды, оксиды) и композиции (W–Ni–Fe, ZrB₂–SiC, Ni–TiCN и др.). Показана возможность получения беспористых сферических порошков различной дисперсности: для частиц с размерами 10–100 мкм и для микрогранул, состоящих из частиц с размерами менее 1 мкм. Описаны основные параметры процесса, влияющие на качество сфероидизации, среди которых дисперсность прекурсоров, энтальпия плазменной струи, состав используемых газов, характеристики плазменного потока и его смешения с исходным сырьем.

Выводы. Продемонстрированные результаты исследований показывают диапазон возможностей плазменных процессов и аппаратов для получения нанопорошков различных металлов, неорганических соединений и композиций с необходимыми характеристиками. Подтверждено обеспечение возможности сфероидизации порошков металлов и сплавов, соединений и композиций, полученных различными методами, в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением в широком диапазоне температур плавления, размеров и морфологии частиц. Представленный подход с использованием последовательных стадий плазмохимического синтеза нанопорошков, гранулирования полученных нанопорошков и последующей плазменной сфероидизации микрогранул позволяет получать композитные микропорошки на основе вольфрама с плотными сферическими частицами и субмикронной структурой.

Ключевые слова

термическая плазма, плазмохимический синтез, грануляция, плазменная сфероидизация, сферические микропорошки, нанопорошки

Поступила: 11.07.2025

Доработана: 21.11.2025

Принята в печать: 16.01.2026

Для цитирования

Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Фадеев А.А., Асташов А.Г., Кирпичев Д.Е., Дорوفеев А.А. Технологии получения и обработки порошковых материалов в термической плазме электродугового разряда. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(1):120–135. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-120-135>

RESEARCH ARTICLE

Technologies for production and treatment of powder materials in thermal plasma of electric arc discharge

Andrey V. Samokhin, Nikolay V. Alekseev, Mikhail A. Sinayskiy✉, Andrey A. Fadeev, Alexey G. Astashov, Dmitry E. Kirpichev, Alexey A. Dorofeev

A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science (IMET RAS), Moscow, 119334 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: ms18@mail.ru

Abstract

Objectives. To summarize the results from studies of plasma processes for the production of specified composition powder materials; to implement plasma processes: plasma-chemical synthesis of nanopowders, granulation of nanopowders, plasma spheroidization of microgranules and micropowders in order to perform nanotechnologies and additive technologies tasks.

Methods. Thermal plasma generation was used at the A.A. Baikov IMET RAS by means of direct-current electric arc plasmatrons with a rated power up to 45 kW with self-adjusting arc length and gas stabilization of discharge, as well as plasmatrons with an interelectrode insert. In order to carry out the processes of nanopowders synthesis and metal powders spheroidization, the plasma reactor design with confined jet flow using thermal plasma of reducing, oxidizing, and inert media was used.

Results. The use of electric arc plasmatron in the processes of plasma chemical synthesis of nanopowders and plasma spheroidization of powders enabled productivity of 0.5 and 10 kg/h, respectively, to be achieved for various metals, alloys, compounds, and their compositions. In the case of the implemented processes of producing nanopowders, where the formation of particles depends on various macro-mechanisms, it was established that the average size of the particles obtained is controlled. This also depends on the synthesis parameters—the initial concentration of the precursor, enthalpy, and flow rate of the plasma jet, cooling rate and vapor condensation. The study shows the results of examining the processes of producing spheroidized powders in thermal plasma flows. These include (Ti, Ta, Fe, Ni, Mo, W), alloys (based on Fe, Ti, Ni, Co, Nb, W, Mg, including stainless, heat-resistant, refractory, hard), compounds (borides, oxides) and compositions (W–Ni–Fe, ZrB₂–SiC, Ni–TiCN, etc.). The possibility of obtaining nonporous spherical powders of various dispersity was also shown: for particles of about 10–100 μm and for granules having a particle size of less than 1 μm. The study described the main process parameters determining the quality of spheroidization, including dispersity of precursor, plasma enthalpy, gas composition, characteristics of plasma flow, and their mixing with initial powders.

Conclusions. The research and development results presented here show the possibilities of plasma processes and apparatuses for producing nanopowders of various metal, inorganic compounds and compositions with given properties. The study also confirmed that powders of metals and alloys, compounds and compositions obtained by a variety of methods can be spheroidized in a plasma reactor with confined jet flow in a wide range of melting points, particle sizes, and morphology. The demonstrated approach using successive stages of plasma-chemical synthesis of nanopowders, their granulation and subsequent plasma spheroidization of microgranules enables tungsten-based composite micropowders with dense spherical particles and submicron structure to be obtained.

Keywords

thermal plasma, plasma-chemical synthesis, granulation, plasma spheroidization, spherical micropowders, nanopowders

Submitted: 11.07.2025

Revised: 21.11.2025

Accepted: 16.01.2026

For citation

Samokhin A.V., Alekseev N.V., Sinayskiy M.A., Fadeev A.A., Astashov A.G., Kirpichev D.E., Dorofeev A.A. Technologies for production and treatment of powder materials in thermal plasma of electric arc discharge. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(1): 120–135. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-120-135>

ВВЕДЕНИЕ

В работе показаны результаты применения термической плазмы электрических разрядов в процессах получения и обработки различных порошковых материалов, реализованные на основе исследований и разработок Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) технологий и оборудования для решения задач в области нано- и аддитивных технологий (АТ).

Нанопорошки являются основой для создания наноструктурных материалов различного назначения — это могут быть керамические материалы и твердые сплавы с повышенными механическими свойствами, дисперсно-упрочненные и модифицированные конструкционные сплавы, наноструктурные покрытия с термо-, коррозионно- и износостойкостью, композиты с наполнителями и модификаторами из неорганических наночастиц и др. [1–4].

Синтез нанопорошков может быть осуществлен различными методами: в газофазных, жидкофазных, твердофазных и комбинированных процессах, включая механическое измельчение, осаждение из газовой фазы, осаждение из растворов и др. Плазмохимический синтез является газофазным процессом и может быть универсальным методом получения нанопорошков элементов, соединений и композиций при осуществлении процесса в различных газовых средах — инертной, восстановительной и окислительной [5, 6].

В результате многочисленных исследований плазмохимического синтеза нанопорошков в потоках термической плазмы, генерируемой в плазмотронах различного типа, подтверждена эффективность получения нанопорошков различных металлов, оксидов, карбидов, нитридов, боридов и различных композиций [7–12].

Для генерации термической плазмы могут использоваться различные виды электрических разрядов — электродуговой (ЭД), высокочастотный (ВЧ), сверхвысокочастотный (СВЧ), а также комбинированные разряды [13]. Лидером в области получения нанопорошков является компания *Tekna* (Канада), которая использует плазменные реакторы на базе ВЧ плазмотронов.¹ Современные плазмотроны высокой мощности вплоть до 2400 кВт имеют тепловой коэффициент полезного действия до 70–85%, что обеспечивает работу с высокой энергоэффективностью. Они могут

быть использованы при реализации высокотемпературных процессов в промышленном масштабе.²

В настоящее время в ИМЕТ РАН ведутся активные исследования получения нанопорошков в потоках термической плазмы, генерируемой в ЭД-плазмотронах. Главным направлением исследований является реализация плазмохимического синтеза нанопорошков с заданными физико-химическими свойствами, определяемыми исходя из их конкретного применения для создания соответствующих материалов. Это возможно при управлении дисперсным, фазовым и химическим составами нанопорошков в процессе их получения и при последующей дополнительной термохимической и/или термовакuumной обработке.

АТ интенсивно развиваются в мире в последние десятилетия за счет возможности реализовывать все стадии производственного цикла от разработки до выпуска изделия [14–18]. АТ позволяют значительно сократить время изготовления изделия, оперативно вносить изменения в конструкцию изделий, изготавливать изделия сложной формы, значительно сократить количество производственных отходов.

Наиболее универсальный и распространенный вариант АТ в производстве изделий из металлов и сплавов реализуется при последовательном наращивании слоев изделия заданной конфигурации при воздействии лазерного или электронного пучка на слой порошка толщиной 20–60 мкм, обеспечивающий локальное сплавление частиц порошка в результате мощного энергетического воздействия. Свойства металлических порошков в значительной степени определяют эффективность процессов и качество производимой продукции. В связи с этим, одной из важнейших задач развития АТ является разработка продуктивных методов получения порошков металлов и сплавов с необходимыми свойствами и их последующего успешного применения [19–21].

В промышленных масштабах уже реализованы технологии получения сферических порошков различных металлов и сплавов (на основе железа, алюминия, титана, хрома, меди) с возможностью получения необходимого дисперсного состава. Это могут быть процессы распыления расплавленного металла инертным газом, распыления пленки расплава с использованием центробежных сил, однако эти процессы имеют ряд существенных ограничений (например, низкий выход продукта

¹ TEKNANO Nanopowder synthesis systems. 2016. <http://www.tekna.com/nanopowder-synthesis-systems>. Дата обращения 21.11.2025. / Accessed November 21, 2025.

² Nyun A. Plasma Torches by Westinghouse Plasma Corporation. 2005. https://www.academia.edu/24044626/Plasma_Torches_by_Westinghouse_Plasma_Corporation. Дата обращения 21.11.2025. / Accessed November 21, 2025.

с требуемым размером частиц), что значительно увеличивает себестоимость получаемых порошков. Кроме того, метод распыления металлического расплава не позволяет получать порошки тугоплавких металлов и сплавов.

Альтернативой методу распыления при получении сферических порошков является сфероидизация металлических частиц неправильной формы оплавлением в высокотемпературном газовом потоке, генерируемом в электродуговых генераторах термической плазмы. Лидирующее положение в этой сфере принадлежит процессам сфероидизации, реализуемым в потоках термической плазмы ВЧ- и СВЧ-разрядов с использованием установок компаний *Tekna*³ и *6K Inc.* (США)⁴.

В настоящее время в ИМЕТ РАН ведутся работы в области плазменной сфероидизации порошковых материалов с использованием ЭД-плазмотронов, включающие следующие направления:

- исследование и разработка технологии сфероидизации металлических порошков в потоке термической плазмы ЭД-разряда;
- создание основ технологий регенерации отработанных металлических порошков, используемых в АТ;
- разработка и производство эффективных установок сфероидизации порошковых материалов на базе ЭД-плазмотронов.

В настоящей статье приводится обзор результатов экспериментальных исследований, выполненных в ИМЕТ РАН по плазмохимическому синтезу нанопорошков и сфероидизации порошковых материалов в диапазоне размеров частиц от 10 до 100 мкм в потоках термической ЭД плазменной струи.

МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для генерации термической плазмы в лабораторных и пилотных установках ИМЕТ РАН использовались ЭД-плазмотроны постоянного тока номинальной мощностью до 45 кВт с самоустанавливающейся длиной дуги и плазмотроны с межэлектродной вставкой (рис. 1). Плазмотроны позволяли обеспечивать стабильную генерацию потоков термической плазмы восстановительных, окислительных и инертных сред с равновесной среднemasсовой температурой $2-10 \cdot 10^3$ К для реализации процессов плазмохимического синтеза нанопорошков и плазменной сфероидизации.

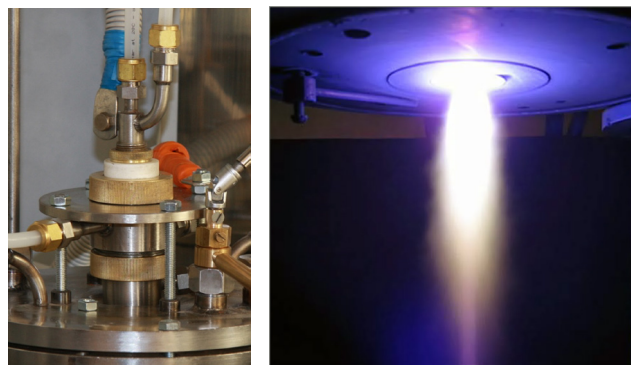


Рис. 1. Электродуговые плазмотроны ИМЕТ РАН номинальной мощностью до 45 кВт

Fig. 1. Electric arc plasma torches of A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science at the Russian Academy of Sciences (IMET RAS) with rated power up to 45 kW

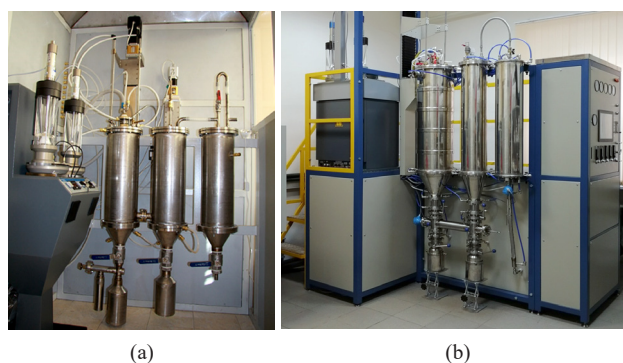


Рис. 2. Общий вид плазменной установки с реактором с ограниченным струйным течением на базе ЭД-плазмотрона мощностью 35 кВт для плазмохимического синтеза нанопорошков (а) и плазменной сфероидизации порошковых материалов (б)

Fig. 2. General view of a plasma setup with restricted jet flow reactor based on 35-kW direct current plasma torch for plasma chemical synthesis of nanopowders (a) and for plasma spheroidization of powders materials (b)

Конструкция плазменного реактора с ограниченным струйным течением для плазмохимического синтеза нанопорошков [22] и плазменной сфероидизации порошковых материалов [23], разработанная в ИМЕТ РАН, защищена патентами Российской Федерации. На рис. 2 представлены общие виды плазменной установки на базе ЭД-плазмотрона мощностью 35 кВт для синтеза нанопорошков и плазменной сфероидизации порошковых материалов.

³ TEKSPHERO. Spheroidization Systems. 2023. <http://www.tekna.com/spheroidization-systems>. Дата обращения 21.11.2025. / Accessed November 21, 2025.

⁴ 6K Production of Breakthrough Materials. 2023. <https://www.6kinc.com>. Дата обращения 21.11.2025. / Accessed November 21, 2025.

Для аттестации и изучения основных свойств получаемых порошков использовались следующие методы исследования. Измерение площади удельной поверхности $S_{уд}$ (m^2/g) нанопорошка осуществляли по методу Брунауэра–Эммета–Теллера на анализаторе удельной поверхности TriStar 3000 (*Micromeritics*, США). Измерение гранулометрического состава порошков и определение параметров распределения частиц по размеру проводили методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц Mastersizer 2000M с автоматическим модулем диспергирования и подачи образцов Hydro 2000S (*Malvern*, Великобритания). Измерение количества общего кислорода, азота и водорода проводили на анализаторе RNH-836 (*Leco*, США) при нагревании образцов в графитовом тигле в токе гелия и детектировании образующихся газов с помощью датчиков инфракрасного (ИК) излучения и теплопроводности. Измерение количества общего углерода проводили на анализаторе CS-600 (*Leco*, США) при сжигании пробы в токе кислорода и детектировании образующихся газов с помощью датчика ИК-излучения. Исследование морфологии и характерного размера частиц проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Scios (*FEI*, США) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе Osiris (*FEI*, США) с элементным энергодисперсионным микроанализом на приставке Elite (*EDAX*, США). Анализ фазового состава проводили на рентгеновском дифрактометре Ultima-4 (*Rigaku*, Япония) и XRD-6000 (*SHIMADZU*, Япония) в монохроматизированном медном излучении при комнатной температуре 20°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плазмохимический синтез нанопорошков

Плазмохимический синтез нанопорошков определяется комплексом физико-химических процессов, протекающих в турбулентных газодисперсных неизотермических потоках. Для осуществления плазменных процессов получения нанопорошков широко распространены реакторы с ограниченным струйным течением, когда плазменная струя истекает в объем реактора, ограниченный стенками реактора при соотношении размеров диаметра реактора и диаметра сопла плазмотрона существенно больше 10. Образование наночастиц в плазменном реакторе происходит при конденсации компонентов из газовой фазы и их последующем осаждении на водоохлаждаемых стенках реактора.

Эволюция наночастиц в объеме реактора приводит к изменению их дисперсного состава в результате

конденсационного и коагуляционного роста; также может происходить изменение их химического и фазового составов. В плазмохимическом процессе получения нанопорошков возможны изменения различных параметров — состава, энтальпии и скорости плазменной струи, концентраций реагентов и характеристик их ввода, а также размеров исходных частиц дисперсного сырья. При этом важна не только технологическая реализация плазмохимического процесса получения нанопорошков, но и способ сбора и хранения нанопорошков. В первую очередь необходимо предотвратить протекание физико-химических превращений в слое осажденных частиц, их спекание и возможные фазовые превращения. Для этого необходимо не допускать превышения толщины слоя наночастиц заданного значения, производя периодическую очистку слоя частиц со стенок реактора и их сбор в герметичные сборники.

Для реализации процесса плазмохимического синтеза нанопорошков использовался реактор с ограниченным струйным течением. Отдельные синтезы были реализованы в комбинированном реакторе с узлом предварительного испарения дисперсного сырья в теплоизолированном канале и последующим использованием газовой химической закалки.

В табл. 1 представлены нанопорошки металлов и их неорганических соединений, получаемые в ИМЕТ РАН в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением при использовании ЭД-плазмотрона с номинальной мощностью 25 кВт [22, 24]. В составе плазмообразующих газов использовались различные индивидуальные газы и их смеси (с чистотой не менее 99.98%). Исходным сырьем являлись порошки элементов и их соединений с размерами частиц не более 25–40 мкм, жидкие реагенты подвергались предварительному испарению перед подачей в реактор. Использовались коммерческие исходные химические реагенты (производства России) с чистотой не менее 99.9%.

Дисперсный состав получаемых нанопорошков и морфология частиц

Одной из важнейших характеристик нанопорошков, определяющей возможность их использования при решении научных задач и в практических приложениях, является их дисперсный состав.

В процессе плазмохимического синтеза формирование наночастиц происходит по трем макро механизмам:

- пар – жидкость – кристалл (ПЖК);
- пар – кристалл (ПК);
- смешанный, включающий совокупность указанных механизмов (ПЖК и ПК).

Таблица 1. Нанопорошки, полученные в процессе плазмохимического синтеза в ИМЕТ РАН

Table 1. Nanopowders produced in plasmachemical synthesis at IMET RAS

№	Получаемый нанопорошок Produced nanopowder	Реагенты Reagents	Плазмо-образующий газ Plasma-forming gas	Удельная поверхность, м ² /г Specific surface area, m ² /g
Индивидуальные металлы / Individual metals				
1	W, Mo, Ni, Co, Re	Me _x O _y , H ₂ , C ₃ H ₈ +воздух Me _x O _y , H ₂ , C ₃ H ₈ +air	H ₂ +N ₂ , C ₃ H ₈ +воздух H ₂ +N ₂ , C ₃ H ₈ +air	2–30
2	Cu	CuCl, H ₂	H ₂ +N ₂	2–5
		Cu(CH ₃ COO) ₂ ·H ₂ O	N ₂	5–35
		Cu	N ₂	20–36
Композиционные материалы / Composite materials				
3	W–Ni–Fe (W = 95%)	WO ₃ , NiO, Fe ₂ O ₃ , H ₂	H ₂ +N ₂	4–10
4	W–Cu (W = 80%)	WO ₃ , CuO, H ₂	H ₂ +N ₂	4–10
5	W–Y ₂ O ₃ (W = 95–99.7%)	WO ₃ , Y(CH ₃ COO) ₃ , H ₂	H ₂ +N ₂	4–10
6	W–B (W = 88–97%)	WCl ₆ , BCl ₃ , H ₂	H ₂ , Ar+H ₂	13–20
7	Ag–SnO ₂	Ag, SnO ₂	Воздух / Air	5–12
Бескислородные соединения / Anoxic compounds				
8	TiN	Ti, TiH ₂ , N ₂	N ₂	12–18
		TiCl ₄ , H ₂ , N ₂	H ₂ +N ₂	11–39
9	AlN	Al, NH ₃ , N ₂	N ₂	30–70
10	TiC	TiCl ₄ , H ₂ , CH ₄	H ₂ +Ar	15–30
11	TiCN	TiCl ₄ , H ₂ , N ₂ , CH ₄	H ₂ +N ₂	13–23
12	SiC	SiCl ₄ , H ₂ , CH ₄	H ₂ +Ar	15–30
13	WC	WO ₃ , CH ₄ , H ₂	H ₂ +N ₂	20–40
14	ZrB ₂	ZrCl ₄ , BCl ₃ , H ₂	H ₂ +Ar	10–50
15	HfB ₂	HfCl ₄ , BCl ₃ , H ₂	H ₂ +Ar	5–30
Оксиды / Oxides				
16	Al ₂ O ₃	Al, O ₂	Воздух / Air	15–35
17	Al ₂ O ₃ –MeO (Me: Mg, Co)	Al, Me, O ₂	Воздух / Air	15–25
18	AlON	Al, NH ₃ , N ₂ , O ₂	N ₂	30–50
19	TiO ₂	TiCl ₄ , O ₂	O ₂ +Ar	30–120
20	SiO ₂	SiCl ₄ , O ₂	O ₂ +Ar	120–250
21	ZrO ₂	ZrCl ₄ , O ₂	O ₂ +Ar	18–32
22	ZrO ₂ –Al ₂ O ₃	ZrCl ₄ , Al, O ₂	O ₂ +Ar	17
23	Y ₂ O ₃	Y(CH ₃ COO) ₃ , O ₂	O ₂ +Ar	12–25

Формирования наночастиц и соответствующий механизм в плазмохимическом процессе может быть оценен с помощью термодинамических расчетов выхода нанопорошка в зависимости от температуры. Если материал существует в жидком и твердом состоянии, его выход будет зависеть от температуры, при этом T^* — минимальная температура, соответствующая максимуму выхода материала наночастиц, T_k — максимальная температура, при достижении которой наночастицы находятся в конденсированном состоянии, T — температура, при которой происходит плавление материала наночастиц.

Плазменный процесс происходит при температуре, первоначально превышающей T_k , которая постепенно снижается. В связи с этим, температурные условия формирования наночастиц по указанным макромеханизмам можно описать как:

- механизм ПЖК: $T < T^* < T_k$, все наночастицы имеют сферическую форму;
- механизм ПК: $T^* < T_k < T$, все наночастицы имеют ограниченную форму;
- механизм ПЖК–ПК: $T^* < T < T_k$, наночастицы имеют как сферическую, так и ограниченную форму.

В условиях снижающейся температуры процесса формирования преимущественно сферических наночастиц по механизму ПЖК происходит, когда максимальный выход частиц обеспечивается при температурах, превышающих температуру плавления вещества (рис. 3а). Если образование наночастиц происходит при температурах ниже температуры плавления вещества или вещество не имеет жидкого состояния, то процесс реализуется по механизму ПК, за счет которого преимущественно происходит формирование частиц с огранкой (рис. 3б). Когда вещество кристаллизуется до достижения максимума выхода, происходит смена механизма с ПЖК на ПК, и в получаемом продукте будут присутствовать частицы как сферической формы, так и имеющие огранку (рис. 3с).

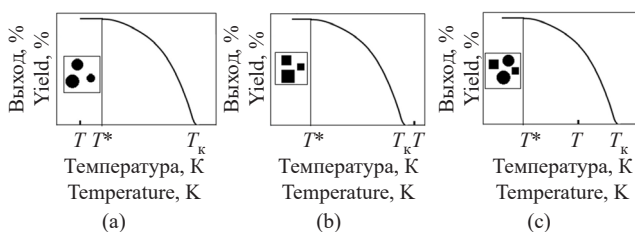


Рис. 3. Условия формирования морфологии наночастиц при характерных температурах в различных макромеханизмах: (а) ПЖК (пар–жидкость–кристалл), (б) ПК (пар–кристалл), (с) ПЖК–ПК

Fig. 3. Conditions for the formation of nanoparticles morphology at characteristic temperatures in various macromechanisms: (a) VLC (vapor–liquid–crystal), (b) VC (vapor–crystal), (c) VLC–VC

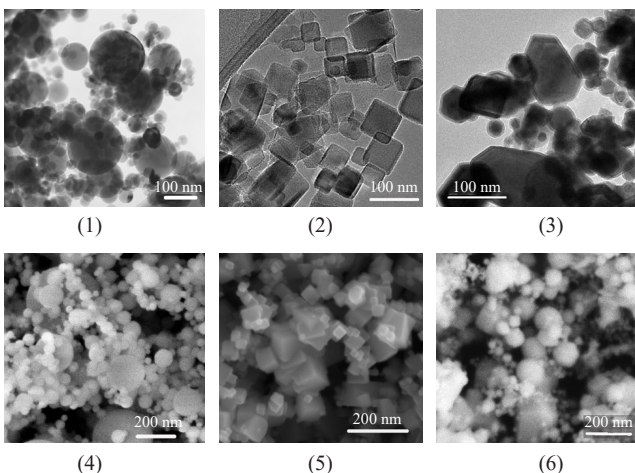


Рис. 4. Микрофотографии нанопорошков, формирующихся в плазменном реакторе по различным макромеханизмам, полученные с помощью ПЭМ (1–3) и СЭМ (4–6): (1), (4) Al_2O_3 (ПЖК); (2), (5) TiCN (ПК); и (3), (6) W (ПЖК–ПК)

Fig. 4. Transmission electron microscopy (1–3) and scanning electron microscopy (4–6) micrographs of nanopowders formed in a plasma reactor by various macromechanisms: (1), (4) Al_2O_3 (VLC); (2), (5) TiCN (VC); and (3), (6) W (VLC–VC)

На рис. 4 продемонстрированы результаты электронно-микроскопических исследований нанопорошков, полученных в результате плазмохимического синтеза. Все порошки полидисперсны и состоят из частиц равноосной округлой или ограненной формы. Показано, что формирование наночастиц может происходить по всем трем указанным механизмам ПЖК, ПК и ПЖК–ПК (нанопорошки Al_2O_3 , TiCN и W соответственно).

На рис. 5 представлены результаты проведенного анализа распределения частиц по размеру нанопорошков Al_2O_3 , TiCN и W [25]. Отмечено, что все нанопорошки достоверно описываются (с коэффициентом корреляции более 0.95) логарифмически нормальной функцией распределения частиц по размеру:

$$p(d) = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - m}{\sigma}\right)^2\right),$$

где d — диаметр частицы, σ — среднеквадратичное отклонение, m — медиана распределения. Соответствие логнормальному распределению частиц по размерам подтверждено для нанопорошков, получаемых в процессах при формировании частиц по коагуляционному механизму ПЖК [26]. При отсутствии коагуляционного роста [4] логарифмически нормальное распределение для времени пребывания частиц в зоне роста может также обуславливать логарифмически нормальное распределение для размеров частиц, что было отмечено в экспериментальных исследованиях плазмохимического синтеза нанопорошков.

Для реализованных процессов получения нанопорошков, формирование частиц в которых происходит по различным макромеханизмам, было экспериментально установлено, что средний размер получаемых частиц нанопорошков возрастает при увеличении концентрации используемого исходного сырья в газовых компонентах. Результаты исследований также показали, что средний размер частиц зависит от параметров синтеза — начальной концентрации исходного сырья, энтальпии плазменной струи и скорости ее истечения в объем реактора. Размер наночастиц уменьшается при снижении концентрации конденсирующегося компонента в газе или увеличении скорости плазменной струи, при этом снижение концентрации приводит к снижению производительности, а повышение скорости струи имеет технические и физические ограничения. Использование газовой закалки позволяет проводить принудительно торможение коагуляционного роста частиц и тем самым управлять размерами частиц, формирующихся по механизму ПЖК. Полученные результаты показывают возможность

получения различных нанопорошков и управления их дисперсным составом при использовании плазмохимического синтеза в реакторе с ограниченным струйным течением.

Плазменная сфероидизация металлических порошков

Для изготовления изделий из металлов и сплавов современными методами аддитивного производства

используются сферические порошки с размером частиц порядка 10 мкм. Обеспечение формирования сферических микропорошков достигается при обработке в термической плазме частиц, имеющих неправильную форму. В результате нагрева и плавления частиц, происходит изменение их морфологии с формированием жидких капель округлой формы за счет сил поверхностного натяжения. При последующем снижении температуры в объеме реактора с водоохлаждаемыми стенками осуществляется охлаждение капель и их кристаллизация в виде металлических микрошаров.

По итогам выполненных экспериментов по плазменной сфероидизации порошковых материалов была установлена возможность получения микропорошков различных металлов и сплавов с размером от 10 до 100 мкм преимущественно со сферической формой частиц. Степень сфероидизации обработанных в плазме частиц может достигать 99 кол. %. При этом коэффициент округлости частиц варьируется в диапазоне от 1 до 1.4, а среднее значение составляет 1.01. Сферическая форма частиц порошка обеспечивает достижение высокого значения насыпной плотности и хорошей текучести, необходимых для их дальнейшего использования в АТ.

Для получения сфероидизированных порошков различных металлов (Ti, Ta, Fe, Ni, Mo и W), сплавов (нержавеющих, жаропрочных и тугоплавких), соединений и композиций (табл. 2) при их обработке в термической плазменной струе в ИМЕТ РАН в настоящее время проводятся не только интенсивные исследования процессов, но и разработка технологий и необходимого оборудования.

Результаты плазменной обработки и характеристики некоторых сфероидизированных порошков представлены на рис. 6–12: сфероидизация порошков титана [27] (рис. 6 и 7), сфероидизация порошков железа [28] (рис. 8 и 9), сфероидизация порошков Ti–Al–V сплава марки ВТ6 (рис. 10), сфероидизация порошков Ni–Al–Cr–Co сплава CompoNiAl-M5-3 [29] (рис. 11). Выполненные экспериментальные исследования показали возможность получения беспористых сферических порошков многокомпонентных сплавов металлов с размером частиц в диапазоне от 10 до 100 мкм из исходных порошков различной дисперсности, состоящих из частиц неправильной формы. Представленные результаты экспериментов свидетельствуют о возможности получения сферических порошков металлов и сплавов из различных исходных порошковых материалов в плазменном аппарате с ограниченным струйным течением на базе ЭД-плазмотрона.

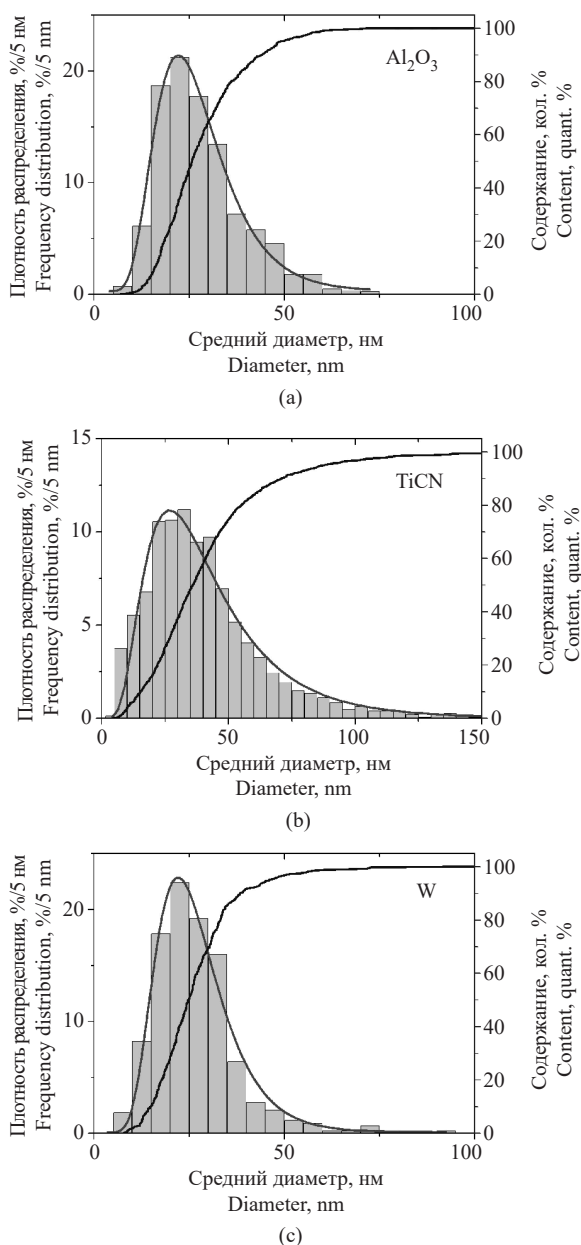


Рис. 5. Гистограммы распределения частиц по размеру для нанопорошков, формирующихся по разным механизмам: (a) Al_2O_3 (ПЖК), (b) TiCN (ПК) и (c) W (ПЖК–ПК) [25]

Fig. 5. Histograms of particle size distributions for nanopowders formed by various macromechanisms: (a) Al_2O_3 (VLC), (b) TiCN (VC), and (c) W (VLC–VC) [25]

Таблица 2. Порошки, полученные в процессе сфероидизации в термической плазме в ИМЕТ РАН

Table 2. Powders produced by spheroidization in thermal plasma at IMET RAS

Металлы Metals	W, Mo, Ta, Fe, Ti
Сплавы	316L, 12X18H10T, X15H5Д4Б, AISI321 (нерж. сталь) Inconel (718, 625), ВКМ, ВЖ159, ВНЛ14 (Ni-сплавы) ВПр27-50 (Ni-припой) BT6, BT14 (Ti-Al-V сплавы) КХМ (Co-Cr-Mo сплавы) БрХЦр (бронза) Nb-Si, Nb-C, Nb-Al, Nb-Mo (Nb-сплавы) Ni-Al, Ti-Al, Nb-Al, Ni-Al-Co-Cr, Ti-Ni, CompoNiAl-M5-3 (интерметаллиды) WC-Co (твердые сплавы) 27КХ (Mg-сплав)
Alloys	316L, 12Kh18N10T, Kh15N5D4B, AISI321 (stainless steel) Inconel (718, 625), VKM, VZh159, VNL14 (Ni alloys) VPr27-50 (Ni solder) VT6, VT14 (Ti-Al-V alloys) CCM (Co-Cr-Mo alloys) CuCrZr (bronze) Nb-Si, Nb-C, Nb-Al, Nb-Mo (Nb alloys) Ni-Al, Ti-Al, Nb-Al, Ni-Al-Co-Cr, Ti-Ni, CompoNiAl-M5-3 (intermetallic compounds) WC-Co (hard alloy) 27KKh (Mg alloy)
Композиции Composites	W-Ni-Fe, W-Cu, W-Y ₂ O ₃ , W-B, W-C-Co, ZrB ₂ -SiC, Ni-TiCN
Оксиды Oxides	Ta ₂ O ₅ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂
Соединения Compounds	ZrB ₂ , HfB ₂ Ca ₃ (PO ₄) ₂ , Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂

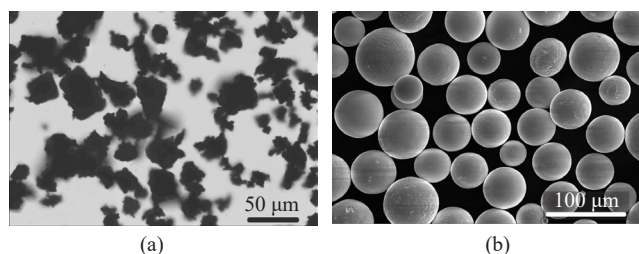


Рис. 6. Микрофотографии частиц порошка титана фракции 20–50 мкм до плазменной сфероидизации (а) и после (б)

Fig. 6. Micrographs of particles for 20–50-μm fraction of titanium powder (a) before and (b) after plasma spheroidization

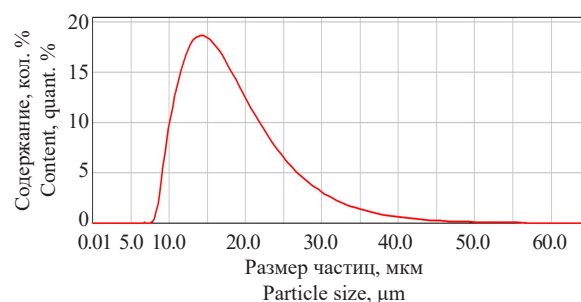


Рис. 7. Распределение частиц по размерам сфероидизированного порошка титана

Fig. 7. Particle size distribution of spheroidized titanium powder

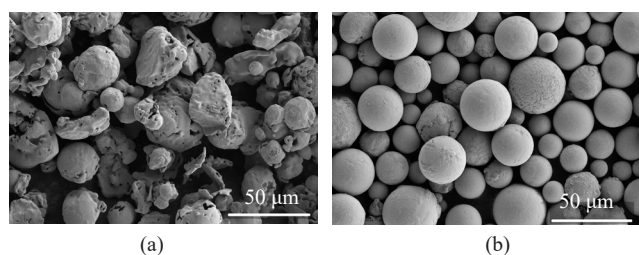


Рис. 8. Микрофотографии порошка железа фракции 25–50 мкм до плазменной сфероидизации (а) и после (б)

Fig. 8. Micrographs of 25–50-μm iron powder (a) before and (b) after plasma spheroidization

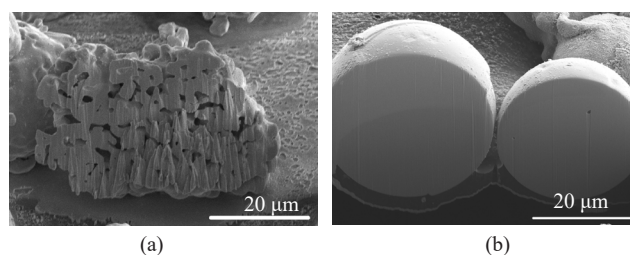


Рис. 9. Микрофотографии частиц порошка железа в разрезе ионного травления до плазменной сфероидизации (а) и после (б)

Fig. 9. Micrographs of iron powder particles in focused ion beam cross section (a) before and (b) after plasma spheroidization

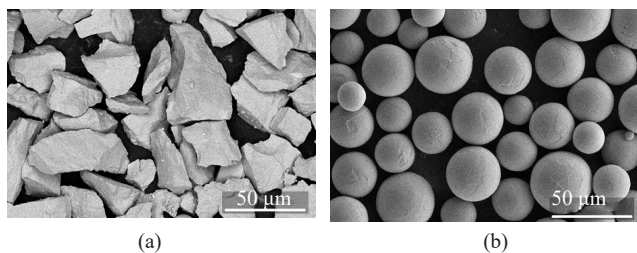


Рис. 10. Микрофотографии частиц порошка Ti–Al–V сплава марки VT6 до плазменной сфероидизации (а) и после (б)

Fig. 10. Micrographs of particles for powder of Ti–Al–V alloy (VT6 grade) (a) before and (b) after plasma spheroidization

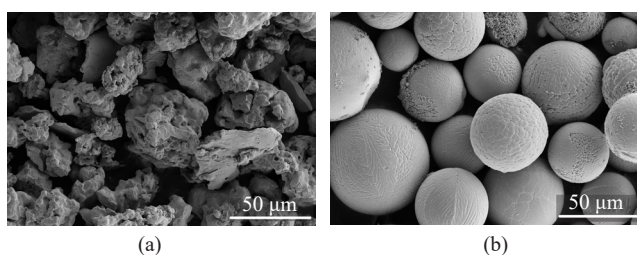


Рис. 11. Морфология частиц порошка сплава CompoNiAl-M5-3 фракции 20–50 мкм до плазменной сфероидизации (а) и после (б)

Fig. 11. Morphology of 20–50 μm powder particles of CompoNiAl-M5-3 alloy (a) before and (b) after plasma spheroidization

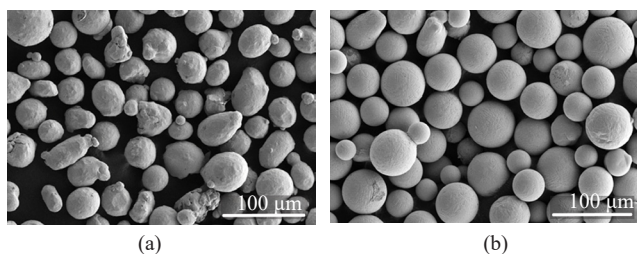


Рис. 12. Микрофотографии частиц порошка Fe–Ni–Cr сплава марки IN718 до плазменной регенерации (а) и после (б)

Fig. 12. Micrographs of particles for powder of Fe–Ni–Cr alloy (IN718 grade) (a) before and (b) after plasma regeneration

Также в ИМЕТ РАН проводятся работы по использованию плазменной регенерации для сфероидизации ранее использованных порошков и уменьшению количества газовых примесей [30]. Примеры сфероидизации и регенерации порошков нержавеющей стали марки X-IN718 представлены на рис. 12.

Использование водородсодержащей плазменной струи при регенерации порошков сплавов на основе Fe, Ni, Co, W и Mo позволяет значительно снизить содержание газовых примесей — кислорода в 1.5–6 раз и азота в 1.5–10 раз (в зависимости от значения энтальпии плазмы и содержания в ней водорода), а также улучшить морфологию частиц, уменьшить содержание примесей кислорода и азота (табл. 3). Газовые примеси (кислород) присутствуют в поверхностном слое частиц в форме оксидов металлов, что позволяет осуществить в этом слое восстановление оксидов до металлов в реакциях с водородом за время пребывания частиц в зоне высоких температур.

Факторами, определяющими качество получаемых в процессах плазменной сфероидизации порошков, являются теплофизические свойства обрабатываемого материала и его гранулометрический состав, характеристики потока термической плазмы, организация смешения порошка с потоком плазмы, организация течения высокотемпературного газодисперсного потока в камере обработки. Для каждого порошкового материала экспериментально определяется совокупность параметров процесса, обеспечивающих его оптимальные показатели — максимальная степень сфероидизации частиц, заданный гранулометрический состав, максимальная производительность.

Процесс сфероидизации частиц расплавлением в потоке термической плазмы, температура газовой среды в котором превышает температуру кипения обрабатываемого материала, сопровождается его испарением. При охлаждении газодисперсного потока происходит конденсация паров с образованием наночастиц.

Присутствие наночастиц в сфероидизированном в плазме порошке является крайне нежелательным, так как, в частности, снижает текучесть порошка,

Таблица 3. Свойства порошка IN718 до и после плазменной регенерации

Table 3. Properties of IN718 powder alloy before and after plasma regeneration

Образец Sample	[O], мас. % [O], wt %	[N], мас. % [N], wt %	Текучесть, с/50 г Flowability, s/50 g	Насыпная плотность, г/см ³ Bulk weight, g/cm ³
Исходный порошок Initial powder	0.031	0.14	19	4.6
После плазменной регенерации After plasma regeneration	0.019	0.071	18	4.6

а повышенная химическая активность металлических наночастиц приводит к их окислению при контакте с воздухом. Для удаления наночастиц из порошков, прошедших обработку в потоке термической плазмы, используется специальный метод классификации порошка в жидкой среде с предварительной ультразвуковой обработкой для разрушения агрегатов наночастиц и их удаления с поверхности сфероидизированных микрочастиц.

Для снижения содержания наночастиц в сфероидизированных порошках металлов и сплавов предложено проводить разделение обрабатываемого порошка на более узкие фракции по размерам частиц и обрабатывать каждую фракцию при соответствующих оптимальных параметрах процесса сфероидизации. После обработки фракции порошка перемешиваются. Этот подход позволяет уменьшить содержание наночастиц в целевом продукте.

Плазменная сфероидизация композиционных порошков

Новым направлением в области получения порошков со сферической формой частиц является исследование получения сферических микропорошков композиций W–C–Co, W–Ni–Fe, W–Cu, W–Y₂O₃ и W–B из нанопорошков соответствующих систем, изготовленных методом плазмохимического синтеза.

Основными стадиями таких процессов являются:

1. Получение нанопорошков систем W–Ni–Fe и W–Cu при восстановлении смесей порошков оксидов металлов соответствующих систем в потоке водородсодержащей плазмы ЭД-плазмотрона. При получении нанопорошка системы W–C–Co реакция осуществляется в присутствии метана, в случае получения нанопорошка системы W–Y₂O₃ сырьем является триоксид вольфрама и ацетат иттрия. Получение нанопорошка композиции W–B осуществляется при водородном восстановлении смеси хлоридов, либо композиция W–B и остальные могут быть получены при смешении полученных в плазмохимическом синтезе индивидуальных нанопорошков.
2. Получение соответствующих жидкостных суспензий с дополнительно введенной связкой (например, сахароза).
3. Распылительная сушка суспензий с получением нанопорошковых пористых микрогранул.
4. Классификация микрогранул с выделением необходимой дисперсной фракции.
5. Уплотнение и сфероидизация микрогранул при спекании и/или оплавлении в потоке термической ЭД-плазмы.

Процесс синтеза нанопорошков рассматриваемых систем в потоке плазменной струи обеспечивается за счет протекания восстановительных реакций в газовой фазе и получения целевых металлов в виде наноразмерных частиц. Одним из примеров таких композитов является нанопорошок системы W–Ni–Fe. Как видно из рис. 13а, такие нанопорошки состоят преимущественно из сферических наноразмерных частиц, имеющих структуру «ядро–оболочка», где никель и железо образуют сплав в приповерхностных слоях наночастиц, а ядро наночастиц состоит из вольфрама. Значение удельной поверхности нанопорошков может находиться в диапазоне от 4 до 10 м²/г.

Полученная из нанопорошка водная суспензия, содержащая 2 мас. % органического связующего (сахарозы), гранулировалась методом распылительной сушки в лабораторной установке Mini Spray Dryer B-290 (Buchi, Швейцария). Полученные микрогранулы были рассеяны на ситовой машине AS 200 (Reisch, Германия) для выделения частиц с размером менее 50 мкм (рис. 13б). Выход микрогранул в указанном диапазоне размеров составил порядка 60%. Полученные нанопорошковые микрогранулы имеют однородную структуру, не содержащую внутренних полостей и обладающую однородным распределением металлов [31].

В результате обработки микрогранул в потоке аргоно-водородной (до 20 об. % H₂) ЭД плазмы были получены сферические микрочастицы системы W–Ni–Fe (рис. 14а), имеющие преимущественно плотную структуру и не содержащие внутренних полостей (рис. 14б). По результатам анализа микроструктуры обработанных в плазме частиц порошков было установлено, что размер зерна вольфрама соответствует микронному и субмикронному диапазону (рис. 14б).

В полученных микропорошках отмечено незначительное содержание кислорода (до 0.2 мас. %) и углерода (до 0.01 мас. %). Насыпная плотность порошка составила 10 г/см³, текучесть — 9 с/50 г.

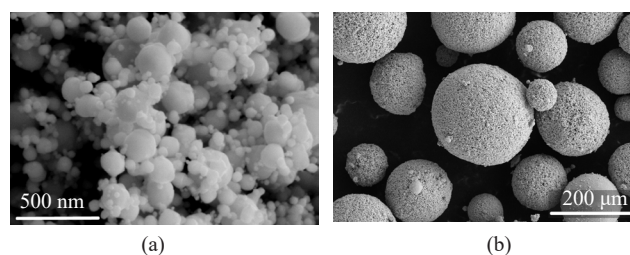


Рис. 13. Микрофотографии нанопорошка (а) и получаемых нанопорошковых гранул (б) для композиции W–Ni–Fe

Fig. 13. Micrographs of nanopowder (a) and resulting nanopowder granules (b) for W–Ni–Fe composition

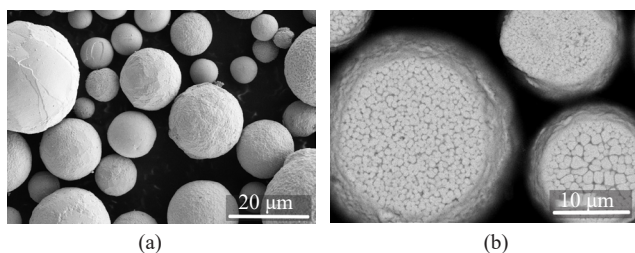


Рис. 14. Микрофотография частиц порошка (а) и шлифа (b) для композита W–Ni–Fe после плазменной обработки нанопорошковых гранул

Fig. 14. Micrograph of particles (a) and grinding thin sections (b) for powder of W–Ni–Fe composition after plasma treatment of nanopowder granules

Выполненные исследования продемонстрировали возможность сфероидизации порошков металлов и сплавов, полученных различными методами, в широком диапазоне температур плавления, размеров и морфологии частиц.

Особое внимание уделяется разработке и созданию плазменного оборудования и технологий. Плазменные технологии получения нанопорошков с производительностью до 0.5 кг/ч и сферических микронных порошков с производительностью до 10 кг/ч осуществляются на установках ИМЕТ РАН мощностью до 45 кВт. Установки обеспечивают возможность получения порошков и могут использоваться как для проведения научно-исследовательских работ, так и для изготовления опытных партий сферических микропорошков и нанопорошков.

На основании накопленного многолетнего опыта в области исследований сфероидизации порошковых материалов в потоках термической плазмы в ИМЕТ РАН разработана и поставляется заказчикам плазменная установка на базе ЭД-плазмотрона номинальной мощностью 30 кВт для сфероидизации порошков металлов, сплавов и металломатричных композитов. Установка была внесена Министерством промышленности и торговли Российской Федерации в «Каталог аддитивного оборудования, производимого на территории Российской Федерации». На начало 2024 г. представленная установка эксплуатируется непосредственно в ИМЕТ РАН, а также в АО ГИРЕДМЕТ (Россия), Institute of Advanced Technology (Харбин, Китай), Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия). В ИМЕТ РАН на установке плазменной сфероидизации проводится обработка партий порошков различных сплавов в количестве до 1000 кг по заказам российских компаний, работающих в сфере АТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты разработок и экспериментальных исследований подтверждают широкие возможности плазменных процессов и оборудования для получения нанопорошков металлов, их неорганических соединений и композиций. Порошки, полученные на установках плазмохимического синтеза, были использованы при проведении большого числа научных работ по созданию новых материалов с улучшенными свойствами специального назначения.

Помимо получения различных нанопорошковых материалов, разработанный в ИМЕТ РАН реактор с ограниченным струйным течением позволяет осуществлять плазменную сфероидизацию порошков металлов и сплавов для их последующего использования в АТ. Показана возможность реализации процесса сфероидизации порошков металлов и сплавов, полученных различными методами, в широком диапазоне температур плавления, размеров и морфологии частиц.

Новый подход с использованием последовательных стадий плазмохимического синтеза нанопорошков, гранулирования полученных нанопорошков и последующей плазменной сфероидизации микрогранул позволяет получать композитные микропорошки с плотными сферическими частицами и субмикронной структурой.

Накопленный опыт разработки и использования плазменных аппаратов на базе ЭД-плазмотронов является основой для создания высокоэффективных производств порошковых материалов в промышленном масштабе.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00112-П (<https://rscf.ru/project/22-19-00112/>).

Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 22-19-00112-P, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00112/>).

Вклад авторов

А.В. Самохин — создание концепции, авторский надзор, привлечение финансирования, работа с текстом рукописи, анализ данных и обобщение результатов.

Н.В. Алексеев — работа с текстом рукописи, методология, анализ данных и обобщение результатов, работа с литературой.

М.А. Синайский — проведение экспериментальных исследований и анализов, работа с литературой, написание и редактирование текста рукописи, анализ данных и обобщение результатов.

А.А. Фадеев, А.Г. Асташов, Д.Е. Кирпичев — разработка и подготовка оборудования для экспериментов, проведение экспериментальных исследований.

А.А. Дорофеев — проведение экспериментальных исследований и анализов.

Authors' contributions

A.V. Samokhin — conceptualization, supervision, funding acquisition, manuscript writing, data analysis and results.

N.V. Alekseev — manuscript writing, methodology, data analysis and results, references.

M.A. Sinayskiy — experimental studies and analyses, references, manuscript writing and editing, data analysis and results.

A.A. Fadeev, A.G. Astashov, D.E. Kirpichev — engineering and preparation of equipment for experiments, experimental research.

A.A. Dorofeev — experimental research and analysis.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koch C.C. *Nanostructured Materials: Processing, Properties and Applications*. William Andrew; 2006, 784 p.
2. Wang Z.L., Liu Y., Zhang Z. *Handbook of Nanophase and Nanostructured materials*. Springer; 2002, 406 p.
3. Shaw D., Liu B. *Handbook of Micro and Nanoparticle Science and Technology*. Springer; 2012, 2400 p.
4. Hosokawa M., Nogi K., Naito M., Yokoyama T. *Nanoparticle Technology Handbook*. Elsevier; 2007, 644 p.
5. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. *Низкотемпературная плазма в процессах восстановления*. М.: Наука; 1980, 360 с.
6. Туманов Ю.Н. *Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах*. М.: Физматлит; 2010, 968 с.
7. Seo J.-H., Hong B.-G. Thermal plasma synthesis of nano-sized powders. *Nuclear Eng. Technol.* 2012;44(1):9–20. <https://doi.org/10.5516/NET.77.2012.002>
8. Tanaka Y. Synthesis of nanosize particles in thermal plasmas. In: *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Springer; 2018. P. 2791–2828. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26695-4_31
9. Kim K.S., Kim T.H. Nanofabrication by thermal plasma jets: From nanoparticles to low-dimensional nanomaterials. *J. Appl. Phys.* 2019;125(7):070901. <https://doi.org/10.1063/1.5060977>
10. Phillips J., Luhrs C.C., Richard M. Review: Engineering particles using the aerosol-through-plasma method, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2009;37(6):726–739. <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2016969>
11. Shigeta M., Murphy A.B. Thermal plasmas for nanofabrication. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011;44(17):174025. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/17/174025>
12. Szabó D.V., Schlabach S. Microwave Plasma Synthesis of Materials—From physics and chemistry to nanoparticles: a materials scientist's viewpoint. *Inorganics*. 2014;2(3): 468–507. <https://doi.org/10.3390/inorganics2030468>
13. Vollath D. Plasma Synthesis of Nanoparticles. *KONA Powder and Particle J.* 2007;25:39–55. <https://doi.org/10.14356/kona.2007007>
14. Dongdong Gu. *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. Springer; 2015, 311 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4>
15. Shishkovsky I.V. (Ed.). *New Trends in 3D Printing*. InTechOpen; 2016, 268 p. <https://doi.org/10.5772/61398>
16. Lewis G. Aspects of the powder in metal additive manufacturing: A review. *World J. Eng. Technol.* 2022;10(02):363–409. <https://doi.org/10.4236/wjet.2022.102022>
17. Wohlers T.T., Campbell R.L., Diegel O., Kowen J., Mostow N. *Wohlers Report 2021: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*. Wohlers Associates Inc.; 2021, 374 p.

REFERENCES

1. Koch C.C. *Nanostructured Materials: Processing, Properties and Applications*. William Andrew; 2006, 784 p.
2. Wang Z.L., Liu Y., Zhang Z. *Handbook of Nanophase and Nanostructured materials*. Springer; 2002, 406 p.
3. Shaw D., Liu B. *Handbook of Micro and Nanoparticle Science and Technology*. Springer; 2012, 2400 p.
4. Hosokawa M., Nogi K., Naito M., Yokoyama T. *Nanoparticle Technology Handbook*. Elsevier; 2007, 644 p.
5. Tsvetkov Yu.V., Panfilov S.A. *Nizkotemperaturnaya plazma v protsessakh vosstanovleniya (Low-Temperature Plasma in Reduction Processes)*. Moscow: Nauka; 1980, 360 p. (In Russ.).
6. Tumanov Yu.N. *Plazmennyye, vysokochastotnye, mikrovolnovyye i lazernyye tekhnologii v khimiko-metallurgicheskikh protsessakh (Plasma, High-Frequency, Microwave, and Laser Technologies in the Chemical and Metallurgical processes)*. Moscow: Fizmatlit; 2010, 968 p. (In Russ.).
7. Seo J.-H., Hong B.-G. Thermal plasma synthesis of nano-sized powders. *Nuclear Eng. Technol.* 2012;44(1):9–20. <https://doi.org/10.5516/NET.77.2012.002>
8. Tanaka Y. Synthesis of nanosize particles in thermal plasmas. In: *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Springer; 2018. P. 2791–2828. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26695-4_31
9. Kim K.S., Kim T.H. Nanofabrication by thermal plasma jets: From nanoparticles to low-dimensional nanomaterials. *J. Appl. Phys.* 2019;125(7):070901. <https://doi.org/10.1063/1.5060977>
10. Phillips J., Luhrs C.C., Richard M. Review: Engineering particles using the aerosol-through-plasma method, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2009;37(6):726–739. <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2016969>
11. Shigeta M., Murphy A.B. Thermal plasmas for nanofabrication. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011;44(17):174025. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/17/174025>
12. Szabó D.V., Schlabach S. Microwave Plasma Synthesis of Materials—From physics and chemistry to nanoparticles: a materials scientist's viewpoint. *Inorganics*. 2014;2(3): 468–507. <https://doi.org/10.3390/inorganics2030468>
13. Vollath D. Plasma Synthesis of Nanoparticles. *KONA Powder and Particle J.* 2007;25:39–55. <https://doi.org/10.14356/kona.2007007>
14. Dongdong Gu. *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. Springer; 2015, 311 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4>
15. Shishkovsky I.V. (Ed.). *New Trends in 3D Printing*. InTechOpen; 2016, 268 p. <https://doi.org/10.5772/61398>
16. Lewis G. Aspects of the powder in metal additive manufacturing: A review. *World J. Eng. Technol.* 2022;10(02):363–409. <https://doi.org/10.4236/wjet.2022.102022>

18. Kendrick A. *3D Printing: The Next Industrial Revolution? A Look into the Impacts on the Aerospace Industry*. Nerac Inc.; 2013, 276 p. Available: <https://www.nerac.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Dec.pdf>. Accessed July 15, 2024.
19. Vock S., Klöden B., Kirchner A., et al. Powders for powder bed fusion: a review. *Prog. Addit. Manuf.* 2019;4(4):383–397. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
20. Dejene N.D., Lemu H.G. Current status and challenges of powder bed fusion-based metal additive manufacturing: literature review. *Metals*. 2023;13(2):424. <https://doi.org/10.3390/met13020424>
21. Ladani L., Sadeghilaridjani M. Review of powder bed fusion additive manufacturing for metals. *Metals*. 2021;11(9):1391. <https://doi.org/10.3390/met11091391>
22. Алексеев Н.В., Самохин А.В., Цветков Ю.В. *Плазменная установка для получения нанодисперсных порошков*: пат. 2311225 РФ. Заявка № 2006110838/15; заявл. 05.04.2006; опубл. 27.11.2007.
23. Самохин А.В., Фадеев А.А., Кирпичев Д.Е., Алексеев Н.В., Берестенко В.И., Асташов А.Г., Завертяев И.Д. *Плазменная установка для сфероидизации металлических порошков в потоке термической плазмы*: пат. 2756327 РФ. Заявка № 2020134059; заявл. 16.10.2020; опубл. 29.09.2021.
24. Samokhin A., Alekseev N., Sinayskiy M., Astashov A., Kirpichev D., Fadeev A., Tsvetkov Y., Kolesnikov A. Nanopowders Production and Micron-Sized Powders Spheroidization in DC Plasma Reactors. In: Cavalheiro A.A. (Ed.). *Powder Technology*. London: IntechOpen; 2018. Ch. 1. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76262>
25. Синайский М.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Расширенные характеристики дисперсного состава для нанопорошков плпзмохимического синтеза. *Российские нанотехнологии*. 2016;11(11-12): 110–115.
26. Granqvist C.G., Buhrman R.A. Ultrafine metal particles. *J. Appl. Phys.* 1976;47(5):2200–2219. <https://doi.org/10.1063/1.322870>
27. Котляров В.И., Бешкарев В.Т., Карцев В.Е., Иванов В.В., Гасанов А.А., Южакова Е.А., Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Третьяков Е.В. Получение сферических порошков для аддитивных технологий на основе металлов IV группы. *Физика и химия обработки материалов*. 2016;2:63–70.
28. Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Корзников О.В., Федина Т.В., Водовозова Г.С., Барышков С.В. Сфероидизация порошков на основе железа в потоке плазмы электродугового плазматрона и их применение в селективном лазерном наплавлении. *Физика и химия обработки материалов*. 2019;4:12–20.
29. Самохин А., Цветков Ю., Алексеев Н., Фадеев А., Синайский М., Левашов Е., Капланский Ю. Плазменная сфероидизация микропорошков жаропрочного сплава на основе моноалюминиды никеля. *Доклады Академии наук*. 2018;483(4):403–408. <https://doi.org/10.31857/S086956520003276-6>
30. Самохин А.В., Алексеев Н.В., Фадеев А.А., Завертяев И.Д., Кирпичев Д.Е., Синайский М.А. *Способ регенерации в термической плазме отработанных металлических порошков аддитивных технологий*: пат. 2779558 РФ. Заявка № 2021135511; заявл. 03.12.2021; опубл. 09.09.2022. Бюл. № 25.
17. Wohlers T.T., Campbell R.I., Diegel O., Kowen J., Mostow N. *Wohlers Report 2021: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*. Wohlers Associates Inc.; 2021, 374 p.
18. Kendrick A. *3D Printing: The Next Industrial Revolution? A Look into the Impacts on the Aerospace Industry*. Nerac Inc.; 2013, 276 p. Available: <https://www.nerac.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Dec.pdf>. Accessed July 15, 2024.
19. Vock S., Klöden B., Kirchner A., et al. Powders for powder bed fusion: a review. *Prog. Addit. Manuf.* 2019;4(4):383–397. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
20. Dejene N.D., Lemu H.G. Current status and challenges of powder bed fusion-based metal additive manufacturing: literature review. *Metals*. 2023;13(2):424. <https://doi.org/10.3390/met13020424>
21. Ladani L., Sadeghilaridjani M. Review of powder bed fusion additive manufacturing for metals. *Metals*. 2021;11(9):1391. <https://doi.org/10.3390/met11091391>
22. Alekseev N.V., Samokhin A.V., Tsvetkov Yu.V. *Plasma Device for Producing Nano-Powders*: RF Pat. 2311225. Publ. 27.11.2007 (in Russ.).
23. Samokhin A.V., Fadeev A.A., Kirpichev D.E., Alekseev N.V., Berestenko V.I., Astashov A.G., Zavertyaev I.D. *Plasma Unit for Spheroidising Metal Powders in a Thermal Plasma Flow*: RF Pat. 2756327. Publ. 29.09.2021 (in Russ.).
24. Samokhin A., Alekseev N., Sinayskiy M., Astashov A., Kirpichev D., Fadeev A., Tsvetkov Y., Kolesnikov A. Nanopowders Production and Micron-Sized Powders Spheroidization in DC Plasma Reactors. In: Cavalheiro A.A. (Ed.). *Powder Technology*. London: IntechOpen; 2018. Ch. 1. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76262>
25. Sinaiskii M.A., Samokhin A.V., Alexeev N.V., et al. Extended characteristics of dispersed composition for nanopowders of plasmachemical synthesis. *Nanotechnol. Russia*. 2016; 11(11-12):805–814. <https://doi.org/10.1134/S1995078016060185> [Original Russian Text: Sinayskiy M.A., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Tsvetkov Yu.V. Extended characteristics of dispersed composition for nanopowders of plasmachemical synthesis. *Rossiiskie Nanotekhnologii*. 2016;11(11-12): 110–115 (in Russ.).]
26. Granqvist C.G., Buhrman R.A. Ultrafine metal particles. *J. Appl. Phys.* 1976;47(5):2200–2219. <https://doi.org/10.1063/1.322870>
27. Kotlyarov V.I., Beshkarev V.T., Kartsev V.E., et al. Production of spherical powders on the basis of group IV metals for additive manufacturing. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2017;8(3):452–458. <https://doi.org/10.1134/S2075113317030157> [Original Russian Text: Kotlyarov V.I., Beshkarev V.T., Kartsev V.E., Ivanov V.V., Gasanov A.A., Yuzhakova E.A., Samokhin A.V., Fadeev A.A., Alekseev N.V., Sinayskiy M.A., Tret'yakov E.V. Production of spherical powders on the basis of group IV metals for additive manufacturing. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2016;2:63–70 (in Russ.).]
28. Samokhin A.V., Fadeev A.A., Alekseev N.V., et al. Spheroidization of Fe-based powders in plasma jet of DC arc plasma torch and application of these powders in selective laser melting. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2020;11(3):579–585. <https://doi.org/10.1134/S2075113320030417> [Original Russian Text: Samokhin A.V., Fadeev A.A., Alekseev N.V., Sinayskiy M.A., Sufiyarov V.Sh., Borisov E.V., Korznikov O.V., Fedina T.V., Vodovozova G.S., Baryshkov S.V. Spheroidization of Fe-based powders in plasma jet of DC arc plasma torch and application of these powders in selective laser melting. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2019;4:12–20 (in Russ.).]

31. Дорофеев А.А., Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Литвинова И.С., Завертяев И.Д. Исследование процесса гранулирования нанопорошка системы W–Ni–Fe методом распылительной сушки. *Физика и химия обработки материалов*. 2022;6:54–69. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2022-6-54-69>
29. Tsvetkov Y.V., Samokhin A.V., Alekseev N.V., *et al.* Plasma spheroidization of micropowders of a heat-resistant alloy based on nickel monoaluminide. *Dokl. Chem.* 2018;483(2):312–317. <https://doi.org/10.1134/S0012500818120030> [Original Russian Text: Samokhin A., Tsvetkov Yu., Alekseev N., Fadeev A., Sinayskiy M., Levashov E., Kaplanskii Yu. Plasma spheroidization of micropowders of a heat-resistant alloy based on nickel monoaluminide. *Doklady Akademii nauk*. 2018;483(4):403–408 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S086956520003276-6>]
30. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Fadeev A.A., Zavertyaev I.D., Kirpichev D.E., Sinayskiy M.A. *Method for Regeneration in Thermal Plasma of Waste Metal Powders of Additive Technologies*: RF Pat. 2779558. Publ. 09.09.2022 (in Russ.).
31. Dorofeev A.A., Samokhin A.V., Fadeev A.A., *et al.* Investigation of nanopowder granulation in W–Ni–Fe systems using spray-drying approach. *Inorg. Mate. Appl. Res.* 2023;14(3):884–895. <https://doi.org/10.1134/s2075113323030115> [Original Russian Text: Dorofeev A.A., Samokhin A.V., Fadeev A.A., Alekseev N.V., Sinayskiy M.A., Litvinova I.S., Zavertyaev I.D. Investigation of nanopowder granulation in W–Ni–Fe systems using spray-drying approach. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2022;6:54–69 (in Russ.). <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2022-6-54-69>]

Об авторах

Самохин Андрей Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: samokhin@imet.ac.ru. Scopus Author ID 7005200081, ResearcherID L-8328-2013, SPIN-код РИНЦ 4448-7132, <https://orcid.org/0000-0002-1708-5501>

Алексеев Николай Васильевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: nvalexeev@yandex.ru. Scopus Author ID 57197595257, ResearcherID M-1438-2013, SPIN-код РИНЦ 8351-1958, <https://orcid.org/0000-0003-2499-9229>

Синайский Михаил Александрович, научный сотрудник, лаборатория № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: ms18@mail.ru. Scopus Author ID 56901263200, ResearcherID W-2469-2019, SPIN-код РИНЦ 9915-7447, <https://orcid.org/0000-0001-7515-4248>

Фадеев Андрей Андреевич, к.т.н., научный сотрудник, лаборатория № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: afadeev@imet.ac.ru. Scopus Author ID 57191970491, ResearcherID A-6273-2014, SPIN-код РИНЦ 9309-5732, <https://orcid.org/0000-0003-2147-1787>

Асташов Алексей Григорьевич, к.т.н., старший научный сотрудник, лаборатория № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: alexey.astashov@gmail.com. Scopus Author ID 55353606400, ResearcherID A-5601-2014, SPIN-код РИНЦ 8533-7836, <https://orcid.org/0000-0002-5647-2109>

Кирпичев Дмитрий Евгеньевич, к.т.н., старший научный сотрудник, лаборатория № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: dkiprichev@imet.ac.ru. Scopus Author ID 23397493800, ResearcherID A-5603-2014, SPIN-код РИНЦ 1101-5370, <https://orcid.org/0009-0000-9122-5448>

Дорофеев Алексей Андреевич, младший научный сотрудник, лаборатория № 16 (Лаборатория плазменных процессов в металлургии и обработке металлов), ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 49). E-mail: adorofeev@imet.ac.ru. Scopus Author ID 57222373498, ResearcherID КОС-6589-2024, SPIN-код РИНЦ 4987-3835, <https://orcid.org/0000-0003-0624-6944>

About the Authors

Andrey V. Samokhin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: samokhin@imet.ac.ru. Scopus Author ID 7005200081, ResearcherID L-8328-2013, RSCI SPIN-code 4448-7132, <https://orcid.org/0000-0002-1708-5501>

Nikolay V. Alekseev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: nvalexeev@yandex.ru. Scopus Author ID 57197595257, ResearcherID M-1438-2013, RSCI SPIN-code 8351-1958, <https://orcid.org/0000-0003-2499-9229>

Mikhail A. Sinayskiy, Researcher, Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: ms18@mail.ru. Scopus Author ID 56901263200, ResearcherID W-2469-2019, RSCI SPIN-code 9915-7447, <https://orcid.org/0000-0001-7515-4248>

Andrey A. Fadeev, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: afadeev@imet.ac.ru. Scopus Author ID 57191970491, ResearcherID A-6273-2014, RSCI SPIN-code 9309-5732, <https://orcid.org/0000-0003-2147-1787>

Alexey G. Astashov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: alexey.astashov@gmail.com. Scopus Author ID 55353606400, ResearcherID A-5601-2014, RSCI SPIN-code 8533-7836, <https://orcid.org/0000-0002-5647-2109>

Dmitry E. Kirpichev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: dkirpichev@imet.ac.ru. Scopus Author ID 23397493800, ResearcherID A-5603-2014, RSCI SPIN-code 1101-5370, <https://orcid.org/0009-0000-9122-5448>

Alexey A. Dorofeev, Junior Researcher, Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Metal Processing, A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia). E-mail: adorofeev@imet.ac.ru. Scopus Author ID 57222373498, ResearcherID KOC-6589-2024, RSCI SPIN-code 4987-3835, <https://orcid.org/0000-0003-0624-6944>