

Научная статья

УДК 621.762.242; 66.088; 620.3; 544.556.1

doi: 10.17223/24135542/39/2

Плазмохимический синтез нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ при использовании термической плазмы электродугового разряда

**Андрей Владимирович Самохин¹, Николай Васильевич Алексеев²,
Михаил Александрович Синайский³, Андрей Андреевич Фадеев⁴,
Алексей Андреевич Дорофеев⁵, Юлиан Павлович Калашников⁶,
Александр Владимирович Терентьев⁷,
Надежда Александровна Андреева⁸**

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия

¹ *asamokhin@imet.ac.ru*

² *nvalexeev@yandex.ru*

³ *ms18@mail.ru*

⁴ *afadeev@imet.ac.ru*

⁵ *adorofeev@imet.ac.ru*

⁶ *ulian1996@inbox.ru*

⁷ *aterentev@imet.ac.ru*

⁸ *nandreeva@imet.ac.ru*

Статья подготовлена в рамках VII Международного симпозиума по материалам и технологиям здравоохранения, энерго- и биобезопасности, рациональному природопользованию. Южно-Сахалинск, Россия, 25–28 августа 2025 г.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований получения нанопорошков системы $W-Y_2O_3$ при использовании плазмохимического синтеза. Основной задачей было получение нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ с равномерным распределением оксида иттрия. **Методы.** Исследования процесса получения нанопорошков композиции проводились на экспериментальной установке, разработанной в ИМЕТ РАН (патент РФ 2311225), при взаимодействии смеси исходных прекурсоров триоксида вольфрама и ацетата иттрия с азотно-водородной плазмой, генерируемой с помощью электродугового плазмотрона мощностью до 30 кВт. **Результаты.** Для определения равномерности распределения оксида иттрия в порошках были проведены исследования с помощью электронной микроскопии с элементным микроанализом (ЭДС). Равномерность распределения в композиции наблюдается для разных заданных концентраций оксида иттрия (0,3; 1,2; 5,0 мас. %) на стадии приготовления смеси прекурсоров и для синтезируемых нанопорошков композиции, – расчетное содержание оксида иттрия в композиции соответствует 0,3; 1,3; 4,5 мас. % для смеси исходного сырья и 0,6; 1,0; 3,8 мас. % для получаемых нанопорошков композиции соответственно. Анализ содержания газовых примесей показал, что содержание углерода не превышает 0,03–0,04 мас. %, а содержание кислорода находится на уровне 2,2–2,6; 1,7–

2,0; 3,5–5,0 мас. % для нанопорошков композиции W-Y₂O₃ с заданной концентрацией оксида иттрия 0,3; 1,2 и 5,0 мас. % соответственно. Содержание азота в нанопорошках композиции и нанопорошке вольфрама (0,1–0,2 мас. %) соответствует физической адсорбции на поверхности наночастиц. Отмечено, что содержание 1,2 мас. % оксида иттрия в композиции придает порошку устойчивость к окислению по сравнению с нанопорошком чистого вольфрама; содержание кислорода для W-Y₂O₃ (1,2%) соответствует [O] = 1,7–2,0% (с учетом содержания кислорода в оксиде иттрия [O]Y₂O₃ = 0,26%), а в нанопорошке вольфрама [O] = 2,2–2,4%. Микрофотографии РЭМ и ПЭМ показывают, что наночастицы композиции имеют характерный размер 20–200 нм. С помощью ЭДС микроанализа установлено, что достигается равномерное распределение оксида иттрия по поверхности всех наночастиц вольфрама. Результаты рентгенофазового анализа показали, что в нанопорошке композиции W-Y₂O₃ присутствуют α-фаза W и следы W₃O, наличие Y₂O₃ малозаметно. При сравнении с наночастицами вольфрама для композиции W-Y₂O₃ отмечены незначительное изменение параметра решетки (*a*) с 3,166 до 3,167 Å и увеличение размера кристаллита (ОКР) с 32 до 36–38 нм.

Выводы. Установлены закономерности формирования композитных нанопорошков W-Y₂O₃ с содержанием оксида иттрия в диапазоне от 0,3 до 5,0 мас. %, определены параметры и условия проведения плазмохимического синтеза, при которых достигается полное превращение исходных реагентов в целевые продукты (W и Y₂O₃) с равномерным распределением оксида иттрия в синтезируемых нанопорошках.

Ключевые слова: плазмохимический синтез, нанопорошки, термическая плазма, вольфрам, оксид иттрия

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

Для цитирования: Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Фадеев А.А., Дорофеев А.А., Калашников Ю.П., Терентьев А.В., Андреева Н.А. Плазмохимический синтез нанопорошков композиции W-Y₂O₃ при использовании термической плазмы электродугового разряда // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 39. С. 20–41. doi: 10.17223/24135542/39/2

Original article
doi: 10.17223/24135542/39/2

Plasmochemical synthesis of the W-Y₂O₃ composition nanopowders using thermal plasma of electric-arc discharge

Andrey V. Samokhin¹, Nikolay V. Alexeev², Mikhail A. Sinayskiy³,
Andrey A. Fadeev⁴, Alexey A. Dorofeev⁵, Yulian P. Kalashnikov⁶,
Alexander V. Terentev⁷, Nadezhda A. Andreeva⁸

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science
of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

¹ asamokhin@imet.ac.ru

² nvalexeev@yandex.ru

³ ms18@mail.ru

⁴ afadeev@imet.ac.ru

⁵ adorofeev@imet.ac.ru

⁶ ulian1996@inbox.ru

⁷ aterentev@imet.ac.ru

⁸ nandreeva@imet.ac.ru

Abstract. Object. The results of experimental studies of nanopowders synthesis for the W-Y₂O₃ system using plasmachemical synthesis are presented. The main task was to obtain W-Y₂O₃ nanopowders composition with homogeneous distribution of yttrium oxide. **Methods.** Investigation of producing process for the nanopowders composition were carried out at the experimental setup developed by IMET RAS (RU Patent 2311225) when mixture of initial precursors (tungsten trioxide and yttrium acetate) interacts with nitrogen-hydrogen plasma generated in electric arc plasmatron with up to 30 kW power. **Results.** Distribution homogeneity in the composition was observed using element microanalysis (EDX) for different specified concentrations of yttrium oxide (0.3, 1.2, 5.0 wt%) at the stage of precursors mixture preparing and for synthesized nanopowders composition - the calculated content of yttrium oxide in the composition corresponds to 0.3, 1.3, 4.5 wt% for the mixture of initial materials and 0.6, 1.0, 3.8 wt% for the obtained nanopowders composition, respectively. Gas content analysis showed that the carbon content does not exceed 0.03-0.04 wt%, and the oxygen content is 2.2-2.6, 1.7-2.0, 3.5-5.0 wt% for W-Y₂O₃ composition with specified concentration of yttrium oxide 0.3, 1.2 and 5.0 wt%, respectively. Nitrogen content in the nanopowders compositions and tungsten nanopowder (0.1-0.2 wt%) corresponds to physical adsorption on nanoparticle surface. It is noted that the content of 1.2 wt% yttrium oxide in the composition gives the powder resistance to oxidation compared to pure tungsten nanopowder - the oxygen content for W-Y₂O₃ (1.2%) corresponds to [O] = 1.7-2.0% (taking into account the oxygen content in yttrium oxide [O] Y₂O₃ = 0.26%), and in tungsten nanopowder - [O] = 2.2-2.4%. SEM and TEM micrographs show that composition nanoparticles have characteristic size 20-200 nm. Using EDX microanalysis, it was found that Y₂O₃ homogeneous distribution over the surface of all tungsten nanoparticles is achieved. X-ray phase analysis showed that in the W-Y₂O₃ nanopowder composition there are W-phase and W₃O traces, Y₂O₃ presence is hardly noticeable. When compared with tungsten nanoparticles, insignificant change in the lattice parameter (a) from 3.166 to 3.167 Å, and increase in crystallite size (CSR) from 32 to 36-38 nm noted for the composition. **Conclusions.** Formation patterns for W-Y₂O₃ nanopowders composite with content of yttrium oxide in the range from 0.3 to 5.0 wt% are established; parameters and conditions of plasmachemical synthesis are determined, at which complete conversion of initial reagents into target products with uniform distribution of yttrium oxide in synthesized nanopowders is achieved.

Keywords: plasmachemical synthesis, nanopowders, thermal plasma, tungsten, yttrium oxide

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00112-P (<https://rscf.ru/project/22-19-00112/>).

For citation: Samokhin, A.V., Alexeev, N.V., Sinayskiy, M.A., Fadeev, A.A., Dorofeev, A.A., Kalashnikov, Yu.P., Terentev, A.V., Andreeva, Na.A. Plasmachemical synthesis of the W-Y₂O₃ composition nanopowders using thermal plasma of electric-arc discharge. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 39, 20–41. doi: 10.17223/24135542/39/2

Введение

Благодаря высокой температуре плавления, низкому коэффициенту теплового расширения, хорошим параметрам высокотемпературной прочности, коррозионной и износостойкости материалы на основе вольфрама представляют значительный интерес для развития передовых наукоемких направлений производства. Композиционные материалы и наноматериалы на основе вольфрама, включая W-Y₂O₃, W-Ni, W-Ti, W-Cu, W-C-Co, W-B и др., представляют значительный интерес для перспективных разработок при создании изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками для задач ракетно-космической, электротехнической, энергетической областей [1–5]. В частности, материалы на основе вольфрама рассматриваются как эффективное решение для изготовления элементов первой стенки термоядерных установок, где необходима устойчивость к высокотемпературному, радиационному и химическому воздействию [5–8], а также стойкость к поглощению изотопов водорода и других примесей [9–10].

Повышение физико-механических характеристик материалов на основе вольфрама может быть реализовано при получении композиционного материала с упрочняющей дисперсной фазой, в качестве которой могут использоваться керамические частицы, равномерно распределенные в металлической матрице. Добавление к вольфраму упрочняющей дисперсной фазы в виде оксидов Y₂O₃, HfO₂ и La₂O₃ позволяет стабилизировать его структуру при высоких температурах, что положительно сказывается на прочности [11–14]. При этом наибольший эффект на механические свойства, уменьшение размера зерен и упрочнение композитных материалов на основе вольфрама оказывает добавление частиц оксида иттрия [14–17].

Чаще всего в мире используется спекание смеси порошков вольфрама и оксида иттрия, полученных после их активации в мельнице, активно применяются методы создания смесей и композиций W-Y₂O₃ с помощью мокрой химии, гидротермальный синтез, методы сублимационной и распылительной сушки и др. [13–19]. Добавление оксида иттрия позволяет снизить температуру спекания и приводит к созданию более плотных вольфрамовых материалов и сплавов. При этом свойства материалов системы W-Y₂O₃ очень чувствительны к изменениям характеристик исходных порошков, химическому составу и особенностям получаемой микроструктуры [20, 21].

Уменьшение размеров оксидных частиц приводит к повышению эффекта упрочнения вольфрама, однако это может быть достигнуто лишь при их равномерном распределении в объеме металлической матрицы [22, 23]. Для получения однородного компакта и последующего создания наноструктурного материала требуется использование нанопорошков с определенным физико-химическим и дисперсным составом. На характеристики получаемого материала влияют также форма частиц, их гранулометрический состав и степень агломерации, химический и фазовый состав, содержание примесей и состояние поверхности [24]. Поэтому развитие методов получения

однородных композиционных нанопорошков с заданными свойствами является важной практической задачей.

Создание композиционного нанопорошка $W-Y_2O_3$ с равномерным распределением компонентов может быть успешно реализовано при использовании плазмохимического синтеза, в котором реализуется совместная конденсация паров вольфрама и оксида иттрия без их химического взаимодействия. В ИМЕТ РАН в последнее время активно развиваются работы, посвященные разработке и реализации схемы получения композиционных микропорошков на основе вольфрама ($W-Ni-Fe$, $W-Cu$, $W-C-Co$ и др.) со сферической формой частиц с использованием плазмохимического синтеза наночастиц, грануляции наночастиц и последующей плазменной сфероидизации полученных композитных нанопорошковых микрогранул для задач аддитивных технологий и изготовления металлических деталей сложной формы с высокими эксплуатационными характеристиками [25–29].

Текущая работа направлена на исследование и реализацию процессов получения в термической плазме электродугового разряда нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ с однородным распределением оксида иттрия, используемых далее для создания нанокompозитов в виде сферических частиц с размером 20–50 мкм, предназначенных для создания объемных материалов и покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, в том числе для аддитивных технологий.

Как уже было показано на примере плазмохимического синтеза композиционных нанопорошков системы $W-Ni-Fe$ [30], равномерное распределение более легкоплавкого и легкокипящего компонента (оксида иттрия) возможно в плазмохимическом процессе при последовательной конденсации его паров ($T_{кип} = 4\ 300^\circ C$, $T_{пл} = 2\ 425^\circ C$) на поверхности образовавшихся капель и частиц вольфрама ($T_{кип} = 5\ 680^\circ C$, $T_{пл} = 3\ 421^\circ C$). Таким образом, в нанопорошке композиции $W-Y_2O_3$ может быть достигнуто однородное распределение оксида иттрия на поверхности наночастиц вольфрама в виде тонких пленок со структурой «ядро–оболочка».

Материалы и методика эксперимента

Процесс получения нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ в потоке термической плазмы электрических разрядов был реализован на плазмохимической установке (ПХУ) для синтеза нанопорошков ИМЕТ РАН (рис. 1) на базе реактора с ограниченным струйным течением (патент РФ № 2311225 [31]).

Процесс плазмохимического синтеза нанопорошковых материалов в ПХУ осуществляется в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением. Для генерации термической плазмы использован электродуговой плазмотрон постоянного тока номинальной мощностью до 30 кВт.

Внешний вид и общая схема экспериментальной установки представлены на рис. 1. Подробное описание установки и условий проведения плазмохимического процесса представлено в работах [25, 31, 32].

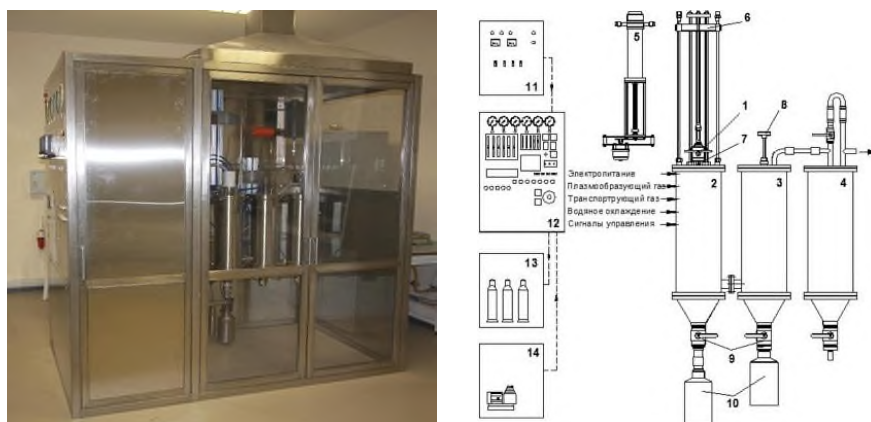


Рис. 1. Плазмохимическая установка (ПХУ) для синтеза нанопорошков (ИМЕТ РАН)

При взаимодействии сырья (оксида вольфрама и ацетата иттрия) с плазменной струей происходят испарение оксида вольфрама и разложение ацетата иттрия, в результате последующих физико-химических превращений в восстановительной среде водорода формируются пары требуемых соединений (W и Y_2O_3). Формирование наночастиц происходит при охлаждении газового потока с продуктами реакций в объеме реактора с участием макро-механизмов пар–жидкость–кристалл и пар–кристалл, происходят конденсация компонентов из газовой фазы и их последующее осаждение на водоохлаждаемых стенках реактора. Эволюция дисперсного состава наночастиц происходит в объеме плазменного реактора в результате конденсационного и коагуляционного роста частиц.

Таблица 1

Основные параметры экспериментов для процесса плазмохимического синтеза нанопорошка системы $W-Y_2O_3$

Тип плазмохимического реактора	Реактор ограниченного струйного течения с холодными стенками
Тип плазмотрона	Плазмотрон с самоустанавливающейся длиной дуги
Подводимая мощность плазмотрона	14–22 кВт
Полезная мощность плазмотрона	7–13 кВт
Плазмообразующий газ	N_2 , N_2+H_2
Расход плазмообразующего газа	1,2–1,7 м ³ /ч
Энтальпия потока плазмы	4,5–7,7 кВт·ч/м ³
Транспортирующий газ	N_2 , H_2
Расход транспортирующего газа	0,65 м ³ /ч
Фокусирующий газ	N_2 , H_2
Расход фокусирующего газа	0,6 м ³ /ч
Смешение исходного сырья с плазменной струей	Ввод в канал плазмотрона
Исходное сырье	$WO_3 + YOAc \cdot 4H_2O$
Расход исходного сырья	2,5–10 г/мин
Место сбора продукта	Реактор и аппарат фильтрации

Диапазон изменения параметров процесса плазмохимического синтеза, обеспечивающих получение нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$, представлен в табл. 1. Сбор порошка осуществлялся со стенок плазменного реактора, а также с аппарата фильтрации плазмохимического реактора в приемник целевого продукта при продувке чистым азотом с минимальным контактом с воздушной средой. Для хранения и проведения последующих физико-химических исследований полученный нанопорошок помещался в защитный перчаточный бокс с контролируемой средой чистого азота.

Исходное сырье

Плазмохимический синтез осуществлялся при подаче в водородсодержащую плазму приготовленной смеси оксида вольфрама WO_3 и легко испаряемого соединения иттрия группы алканоев (4-водный ацетат иттрия).

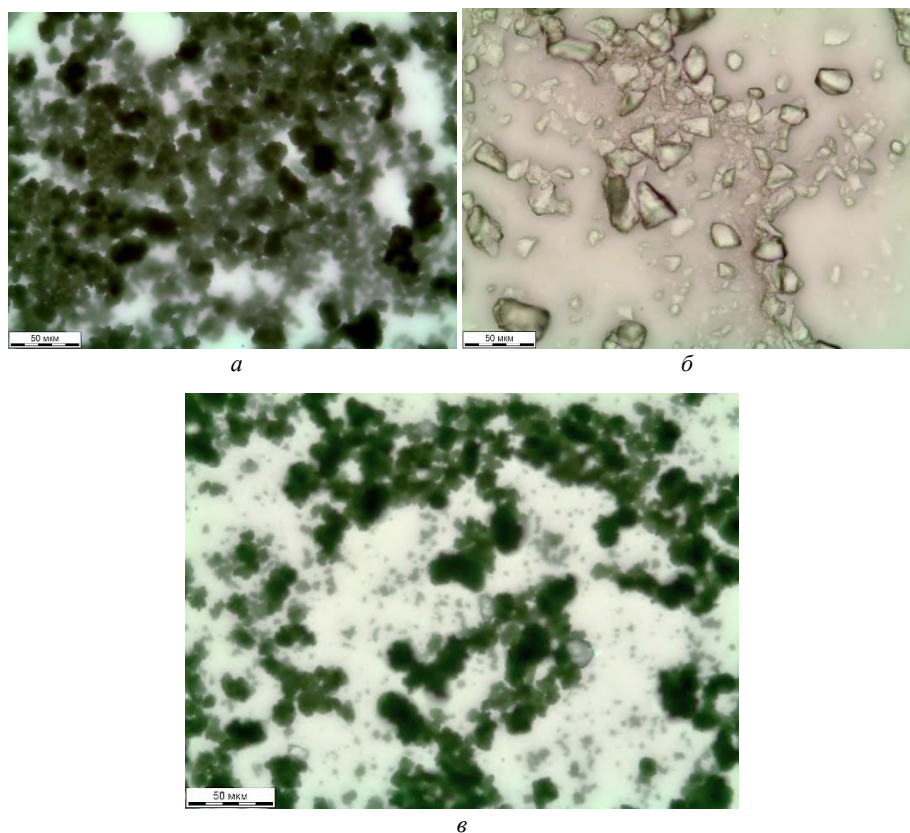


Рис. 2. Оптическая микроскопия для порошков исходного сырья: оксид вольфрама WO_3 фракции < 21 μm (*а*), 4-водный ацетат иттрия $YOAc \cdot 4H_2O$ после помола фракции < 35 μm (*б*), смесь WO_3 (< 21 μm) и $YOAc \cdot 4H_2O$ (< 35 μm) после перемешивания в смесителе (*в*)

Азот, используемый в составе плазмообразующего и транспортирующего газа, подавался из установки генерации чистого азота (с чистотой не менее 99,99 об. %). В качестве восстановителя использовался водород, который подавался из газовых баллонов (1-й сорт).

Исходная смесь состояла из порошков оксида вольфрама WO₃ с размером частиц фракции < 21 мкм (ТУ 6-09-17-250–88) и ацетата иттрия (4-водный гидрат YOAc·4H₂O) с размером частиц менее 35 мкм (ТУ 6-09-4769) и приготавливалась в механическом смесителе С2.0 «Турбула» в течение 240 мин с частотой вращения чаши 40 об/мин при соотношении компонентов, соответствующем массовому содержанию оксида иттрия в композиции W-Y₂O₃: 0,3; 1,2 и 5,0 мас. %.

Для оценки размера частиц исходного сырья и их морфологии использовали оптическую микроскопию (рис. 2).

Методы исследования

Измерение гранулометрического состава порошков и определение параметров распределения частиц по размеру (D_{10} – 10% представленного распределения; D_{50} – медиана распределения ($D_{ср}$), D_{90} – 90% распределения) проводили на анализаторе размера частиц методом лазерной дифракции Mastersizer 2000M с автоматическим модулем диспергирования и подачи образцов Hydro 2000S (Malvern).

Измерение количества общего кислорода, азота и водорода на анализаторе RNH-836 (Leco) проводили при нагревании образцов в графитовом тигле в токе гелия и детектировании образующихся газов с помощью датчиков ИК-излучения и теплопроводности. Измерение количества общего углерода осуществляли на анализаторе CS-600 (Leco) при сжигании пробы в токе кислорода и детектировании образующихся газов с помощью датчика ИК-излучения.

Измерение площади удельной поверхности $S_{уд}$ (м²/г) нанопорошка по методу БЭТ проводили на анализаторе удельной поверхности TriStar 3000 (Micromeritics).

Исследование морфологии и характерного размера частиц проводили методом растровой электронной (РЭМ, Scios FEI) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, Osiris FEI) с элементным энергодисперсионным микроанализом (ЭДС).

Определение содержания микронных частиц в нанопорошке (с размером более 1–5 мкм) проводили с помощью фракционного разделения в жидкости методом седиментации суспензии после ультразвуковой обработки.

Анализ фазового состава осуществлялся на рентгеновском дифрактометре Ultima-4 (Rigaku) и XRD-6000 (SHIMADZU) в монохроматизированном медном излучении при комнатной температуре. Размер области когерентного рассеяния (ОКР) рассчитывали по методу Селякова–Шерера по формуле [3]

$$d = (0,9\lambda)/(b\cos\theta),$$

где λ – длина монохроматической волны, b – ширина пика на половине высоты линии, θ – угол дифракции, d – размер ОКР [33].

Результаты исследований и их обсуждение

Выполнены экспериментальные исследования плазмохимического процесса при взаимодействии с водородсодержащей плазмой смеси оксида вольфрама WO_3 и ацетата иттрия с целью получения нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$ с максимально равномерным распределением оксида иттрия в диапазоне концентраций 0,3–5,0 мас. % в композиции. В качестве объектов для экспериментальных исследований были выбраны нанопорошки композиции $W-Y_2O_3$ с концентрацией оксида иттрия на трех различных уровнях: 0,3; 1,2 и 5,0 мас. %.

Для определения оптимального уровня концентрации оксида иттрия в композиции $W-Y_2O_3$, для выбора оптимальных параметров плазмохимического процесса, а также для выполнения основной задачи контроля полного превращения реагентов в целевые продукты композиции проводились следующие работы и исследования:

- выбор дисперсного состава исходных прекурсоров (WO_3 фракции < 21 мкм и ацетат иттрия фракции < 35 мкм);
- проведение экспериментов плазмохимического синтеза индивидуальных компонентов композиции (синтез нанопорошка вольфрама из оксида вольфрама, синтез нанопорошка оксида иттрия из ацетата иттрия);
- проведение экспериментов плазмохимического синтеза нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ с различной концентрацией оксида иттрия (0,3; 1,2 и 5,0 мас. %) при использовании смеси оксида вольфрама и ацетата иттрия в необходимых пропорциях;
- контроль содержания микронных примесей в получаемом нанопорошке (минимальное содержание микронных частиц с размером более 1–5 мкм);
- контроль фазового состава нанопорошков (контроль отсутствия фаз исходного сырья);
- контроль содержания газовых примесей (контроль содержания примесей O, N, H, C);
- исследование однородности распределения иттрия в смеси исходного сырья (оксид вольфрама и ацетат иттрия).

Для выбора оптимального режима плазмохимического синтеза основные экспериментальные исследования проводились при синтезе композиции $W-Y_2O_3$ с концентрацией оксида иттрия с заданной концентрацией 1,2 мас. %.

В результате проведения экспериментальных исследований плазмохимического синтеза нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$ (1,2 мас. %) были получены следующие результаты.

Оптимизация и выбор дисперсного состава смеси прекурсоров (WO_3 фракции < 21 мкм и ацетат иттрия фракции < 35 мкм) осуществлялись для стабильной подачи сырья от порошкового питателя по транспортной линии в плазменный реактор и во избежание образования гарнисажа и коронок

в присопловой области во время плазмохимического синтеза. При этом важной характеристикой были обеспечение испарения дисперсного сырья и его полного превращения в плазмохимическом процессе в продукты композиции W-Y₂O₃.

Изменение энтальпии плазменной струи в диапазоне 4,5–7,7 кВт·ч/м³ показало, что оптимальным значением, обеспечивающим полноту превращения исходного сырья с минимальным содержанием микронной фракции, является диапазон значений около 6,5–7,7 кВт·ч/м³. Изменение содержания микронной фракции составляло от 20 мас. % до практически полного ее отсутствия (следы с содержанием менее 0,5–1 мас. %).

Изменение расхода дисперсного сырья в диапазоне 2,5–10 г/мин в процессе с оптимальной выбранной энтальпией плазменной струи (около 7 кВт·ч/м³) приводило к изменению дисперсности порошка в диапазоне изменения площади удельной поверхности 4–8 м/г. Увеличение расхода сырья приводило к уменьшению удельной поверхности, кроме того, увеличение расхода до 10 г/мин увеличивало содержание микронных частиц в нанопорошке до 7 мас. %. Оптимальным расходом дисперсного сырья можно считать 2,5–5 г/мин.

Полнота превращения компонентов смеси исходного сырья (оксид вольфрама и ацетат иттрия) в процессе плазмохимического синтеза контролировалась также при анализе общего содержания углерода и кислорода в получаемых нанопорошках. В случае неполного превращения компонентов исходного сырья в плазмохимическом процессе будет характерно присутствие газовых примесей (O, C) в нанопорошке композиции W-Y₂O₃, так как в оксиде вольфрама содержится значительное количество кислорода (20,7 мас. %), а в 4-водном ацетате иттрия – значительное количество кислорода (28,4 мас. %) и углерода (21,3 мас. %). Исследование содержания общего углерода и кислорода в получаемых нанопорошках композиции W-Y₂O₃ показало, что содержание углерода не превышает 0,03–0,04 мас. %, а содержание кислорода находится на уровне 2,2–2,6; 1,7–2,0; 3,5–5,0 мас. % для нанопорошков композиции W-Y₂O₃ с заданной концентрацией оксида иттрия 0,3; 1,2 и 5,0 мас. % соответственно. При этом для нанопорошка вольфрама, полученного при схожих условиях плазмохимического синтеза, содержание углерода и кислорода соответствует 0,01–0,02 и 2,2–2,4 мас. % соответственно. Исходя из полученных результатов содержания кислорода (2,2–2,6; 1,7–2,0; 3,5–5,0 мас. %) в нанопорошках композиции W-Y₂O₃ (0,3; 1,2 и 5,0 мас. % соответственно), отмечаются стабилизация композиции W-Y₂O₃ (1,2 мас. %) и ее стойкость к окислению относительно нанопорошка чистого вольфрама (2,2–2,4 мас. %). Расчетная доля кислорода в присутствующем оксиде иттрия для нанопорошков композиции W-Y₂O₃ (0,3; 1,2 и 5,0 мас. %) соответствует 0,06; 0,26 и 1,06 мас. % соответственно. Измеренное содержание азота в нанопорошках композиции W-Y₂O₃ (0,3–5,0 мас. %) находится на уровне 0,1–0,2 мас. %, для нанопорошка чистого вольфрама – около 0,14 мас. %, и в большей степени соответствует физической адсорбции на поверхности наночастиц.

В работе проводились попытки улучшить полноту взаимодействия исходного сырья с плазменной струей при помощи увеличения соотношения восстановителя H_2/WO_3 : осуществлялось добавление водорода в транспортирующий газ и в плазмообразующий газ. Однако данная попытка привела лишь к увеличению содержания микронных частиц в нанопорошке, так как взаимодействие компонентов $\text{WO}_3 + \text{H}_2$ начинало проходить в гетерофазном процессе до полного испарения WO_3 , что ухудшало полноту превращения.

Таким образом, удалось установить оптимальный режим для плазмохимического синтеза композиции $\text{W}-\text{Y}_2\text{O}_3$, характеризующийся подачей с помощью $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ транспортирующего газа (N_2) и смеси WO_3 ($< 21 \text{ мкм}$) и $\text{YOA} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($< 35 \text{ мкм}$) с расходом $2-5 \text{ г/мин}$ вводом в канал плазмотрона, генерирующего азотную плазму с энтальпией около $7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ при подаче $1,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ плазмообразующего газа (N_2) и $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ фокусирующего газа (H_2). Сбор такого порошка осуществляется при продувке чистым азотом с минимальным контактом с воздушной средой. Для последующих операций хранения и физико-химических исследований полученный нанопорошок помещался в защитный перчаточный бокс с контролируемой азотной средой.

Основной концентрацией композиции оксида иттрия в композиции $\text{W}-\text{Y}_2\text{O}_3$ выбрана $1,2 \text{ мас. \%}$, так как отмечают стабилизацию такого состава и стойкость к окислению ($[\text{O}] = 1,7-2,0\%$ с учетом расчетного содержания кислорода в оксиде иттрия композиции $[\text{O}]_{\text{Y}_2\text{O}_3} = 0,26\%$) относительно нанопорошка чистого вольфрама ($2,2-2,4\%$).

По результатам растровой электронной микроскопии (рис. 3) нанопорошки композиции $\text{W}-\text{Y}_2\text{O}_3$ ($0,3-5,0 \text{ мас. \%}$) имеют полидисперсный состав и схожую морфологию, характеризующую присутствием округлых наночастиц с характерным размером около $20-200 \text{ нм}$ с редким присутствием микронных частиц с размером $1-5 \text{ мкм}$.

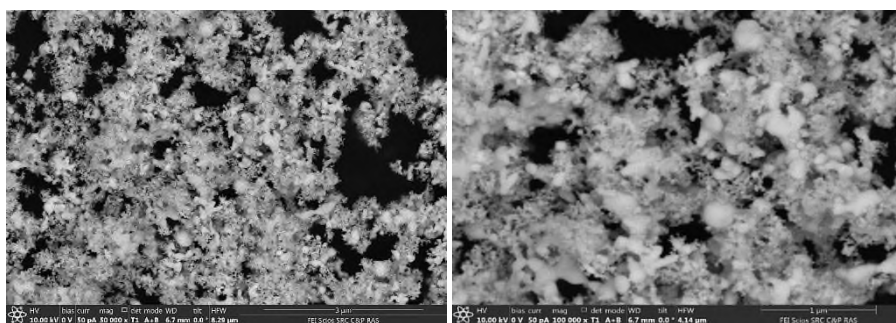


Рис. 3. РЭМ микрофото нанопорошка композиции $\text{W}-\text{Y}_2\text{O}_3$ ($1,2 \text{ мас. \%}$)

Значение удельной поверхности для нанопорошка композиции $\text{W}-\text{Y}_2\text{O}_3$ ($0,3-5,0 \text{ мас. \%}$) находится около $5-8 \text{ м}^2/\text{г}$, что соответствует среднему размеру частиц ($D_{\text{ср}}$, БЭТ) около $40-80 \text{ нм}$. Доля микронной фракции в нанопорошковом продукте с размером частиц более $1-5 \text{ мкм}$ составила не более $0,5-1,0 \text{ мас. \%}$. Значения удельной поверхности для индивидуальных нано-

порошков W и Y₂O₃ находятся на уровне около 5–8 и 7–10 м²/г, что соответствует среднему размеру частиц ($D_{ср}$, БЭТ) около 40–70 и 120–170 нм соответственно.

На рис. 4 представлен результат характерного гранулометрического анализа нанопорошка системы W-Y₂O₃ (1,2 мас. %). Характеристики дисперсного состава: $D_{10} = 0,03$ мкм; $D_{50} = 0,06$ мкм; $D_{90} = 0,09$ мкм; диапазон присутствия частиц от 0,02 до 1,2 мкм.

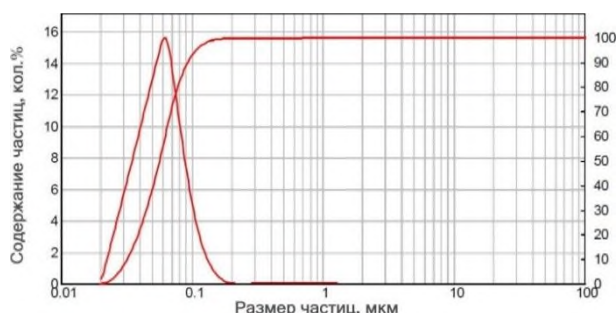


Рис. 4. Результаты гранулометрического анализа методом лазерной дифракции для нанопорошка системы W-Y₂O₃

По результатам просвечивающей электронной микроскопии (рис. 5) нанопорошки композиции W-Y₂O₃ (0,3–5,0 мас. %) имеют полидисперсный состав и схожую морфологию, характеризуемую присутствием округлых и ограниченных наночастиц вольфрама с характерным размером 20–200 нм. Присутствие разной морфологии частиц вольфрама характеризуется смешанным механизмом конденсации при восстановлении паров оксида вольфрама водородом с участием двух макромеханизмов формирования пар–кристалл и пар–жидкость–кристалл. Для частиц нанопорошка композиции W-Y₂O₃ (5,0 мас. %) характерно присутствие большего объема и толщины аморфной оксидной оболочки на поверхности частиц вольфрама, что также подтверждает значительное окисление частиц и соотносится с повышенным содержанием общего кислорода для нанопорошка композиции W-Y₂O₃ (5,0 мас. %).

Равномерность распределения оксида иттрия в композиции W-Y₂O₃ контролировалась на всех этапах получения порошков, начиная с создания смеси исходного сырья (WO₃ (< 21 мкм) и YOAc·4H₂O (< 35 мкм)) с помощью ЭДС микроанализа с площади порядка 200·150 мкм. Общее расчетное содержание оксида иттрия в композиции W-Y₂O₃ определялось, исходя из полученных данных о содержании иттрия и вольфрама. Равномерность распределения характерна в композиции для разных выбранных уровней концентрации оксида иттрия – 0,3; 1,2 и 5,0 мас. %, и на стадии приготовления смеси исходного сырья, и для синтезируемых нанопорошков композиции W-Y₂O₃. Общее расчетное содержание оксида иттрия в композиции W-Y₂O₃ соответствует содержанию 0,3; 1,3 и 4,5 мас. % для смеси исходного сырья с заданным содержанием 0,3; 1,2 и 5,0 мас. % соответственно и также находится на уровне 0,5, 0,8–1,1 и 3,2–3,8 мас. % для получаемых нанопорошков композиции W-Y₂O₃.

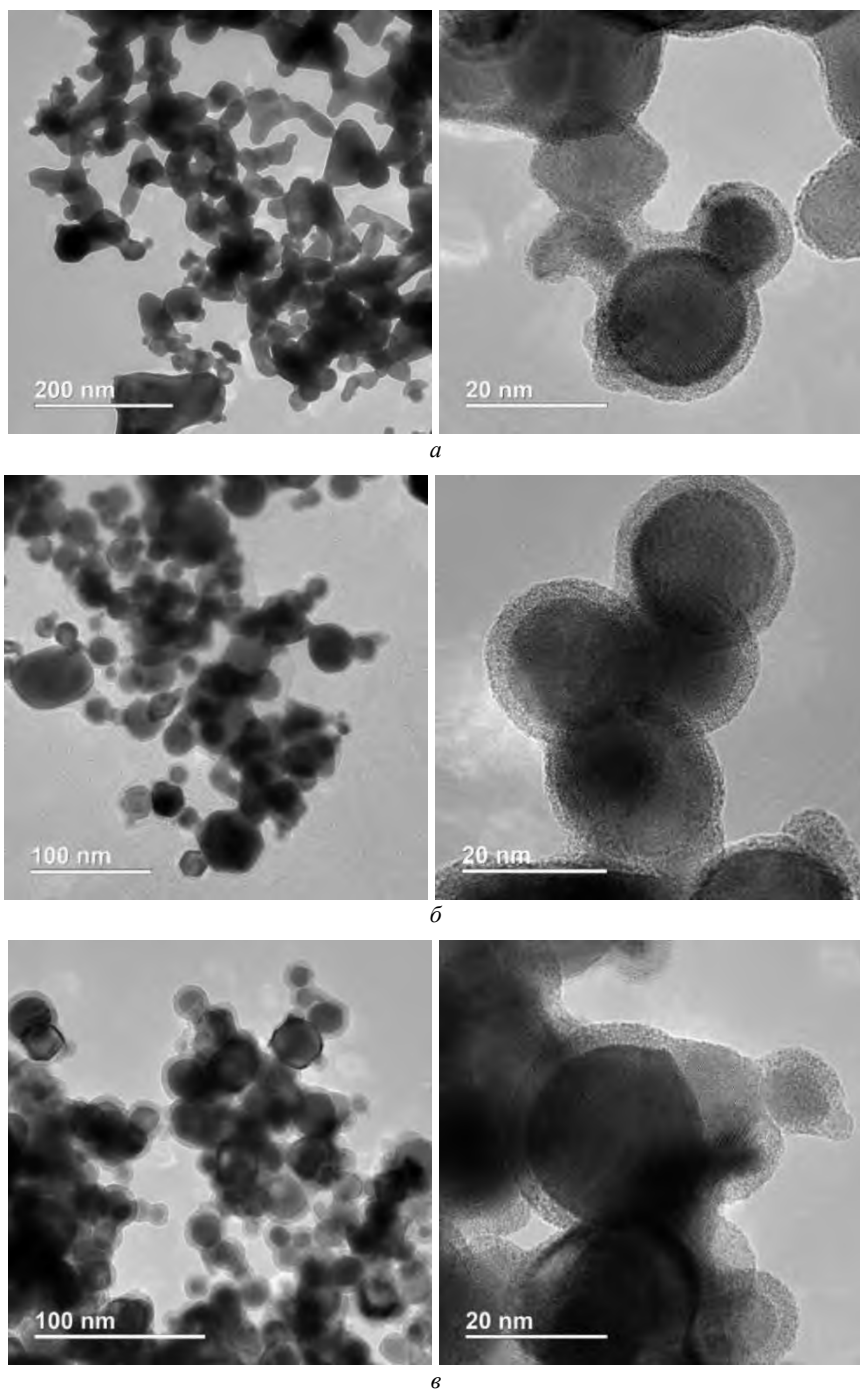


Рис. 5. Характерные ПЭМ-изображения частиц нанопорошков системы W–Y₂O₃ с разной заданной концентрацией оксида иттрия: 0,3 (а), 1,2 (б) и 5,0 мас.% (в)

Однородность распределения оксида иттрия в разных областях исследования (с площади около $30 \cdot 30$ мкм) для спрессованного нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$ (1,2%), собранного с реактора и фильтра, составили $1,3 \pm 0,6$ и $1,1 \pm 0,6$ мас. % соответственно; для нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ (0,3 и 5,0%) – $0,8 \pm 0,5$ и $3,8 \pm 0,9$ мас. % соответственно. При этом для рыхлого слоя нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$ (1,2%) однородность распределения оксида иттрия в разных областях исследования (с площади около $30 \cdot 30$ мкм) была значительно лучше и составила $1,1 \pm 0,1$ мас. % (рис. 6).

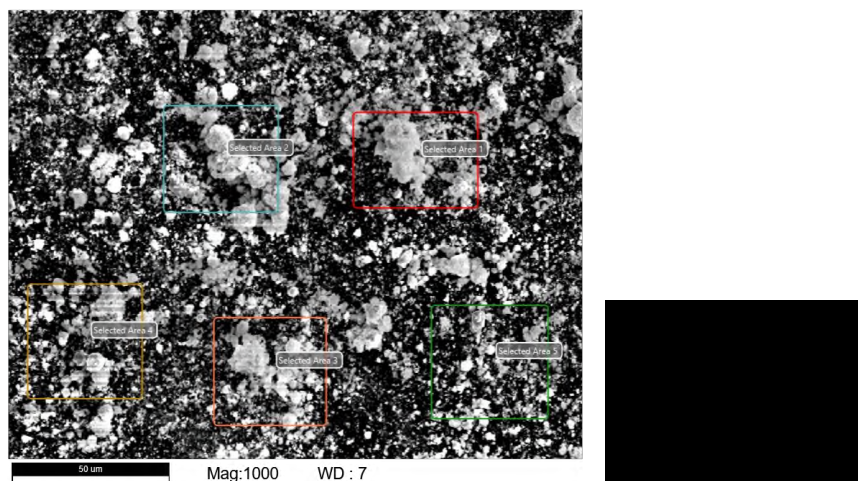


Рис. 6. РЭМ микрофото и результаты исследования однородности содержания Y (К-линия) и Y_2O_3 для полученного нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$ (1,2 мас. %). Результаты элементного ЭДС анализа для содержания Y_2O_3 соответствуют $1,09 \pm 0,11$ мас. %

Равномерное распределение оксида иттрия возникает в плазмохимическом процессе при равновесной конденсации паров ($T_{\text{кип}} Y_2O_3 = 4\,300^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} Y_2O_3 = 2\,425^\circ\text{C}$) на поверхности образовавшихся капель и частиц вольфрама ($T_{\text{кип}} W = 5\,680^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} W = 3\,421^\circ\text{C}$). Увеличение концентрации оксида иттрия в композиции $W-Y_2O_3$ приводит к отдельной конденсации паров оксида иттрия в капли и их гетерогенной коагуляции с образовавшимися частицами вольфрама. Таким образом, в нанопорошке композиции $W-Y_2O_3$ (0,3–5,0 мас. %) отсутствуют свободные частицы оксида иттрия и достигается однородное распределение оксида иттрия на поверхности наночастиц вольфрама в виде тонких пленок и отдельных наночастиц с характерной структурой «ядро–оболочка» (рис. 7) аналогично нанопорошку композиции $W-Ni-Fe$, полученной в плазмохимическом процессе ранее [20]. Однородное распределение со структурой «ядро–оболочка» также наблюдается в порошках композиции $W-Y_2O_3$, полученных другими способами [22, 23].

Исследование рентгенофазового состава индивидуальных нанопорошков показало, что в нанопорошок вольфрама (W) состоит из кубической α -фазы W и следов оксида W_3O , а нанопорошок оксида иттрия (Y_2O_3) – из кубической и моноклинной модификаций оксида.

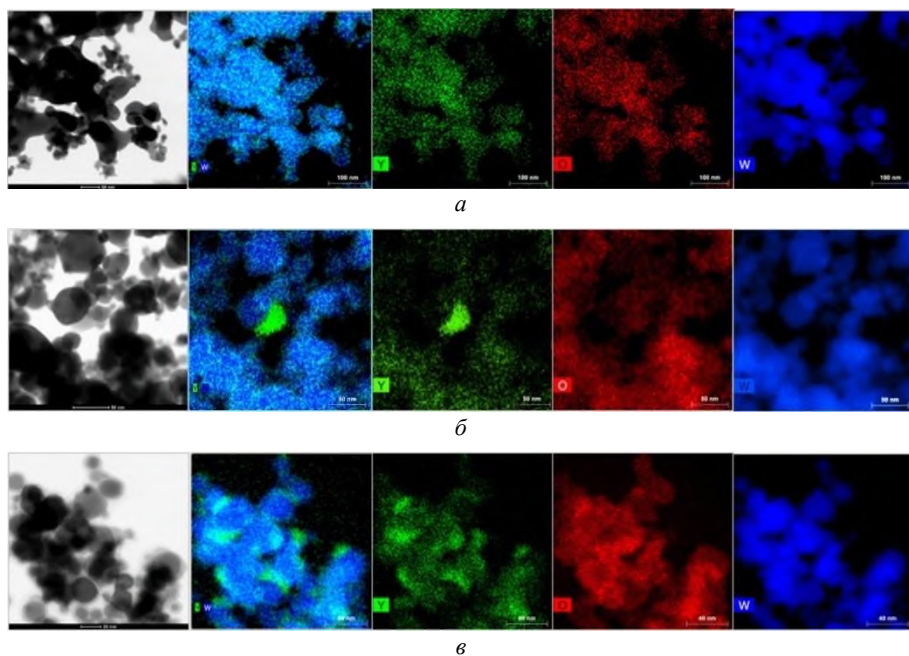


Рис. 7. ПЭМ микрофото и карты распределения основных элементов (W, Y и O) для полученных нанопорошков композиции W–Y₂O₃ с заданным содержанием оксида иттрия: 0,3 (а), 1,2 (б) и 5,0 (в) мас. %. Результаты элементного ЭДС-анализа для содержания Y/O с разных полей соответствуют диапазонам: 0,50–0,84/0,29–0,55 (а), 0,20–0,31/0,15–0,45(б), и 3,02–3,31/1,11–2,59 мас. % (в)

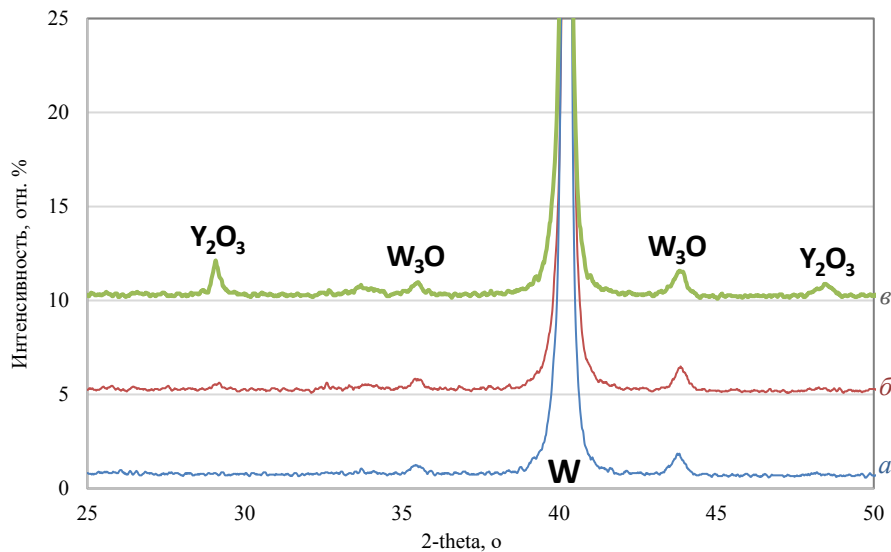


Рис 8. Рентгенограмма нанопорошковых композиций W–Y₂O₃ с разной концентрацией оксида иттрия: 0,3 (а), 1,2 (б) и 5,0 (в) мас. %

По результатам проведенного рентгенофазового анализа в нанопорошке композиции $W-Y_2O_3$ (рис. 8) основными фазами являются α -фаза вольфрама (W) и следы оксида (W_3O). Присутствие Y_2O_3 малозаметно на рентгенограммах для композиций $W-Y_2O_3$ с концентрациями Y_2O_3 до 1,2 мас. % ввиду плохой чувствительности определения оксида иттрия в композиции $W-Y_2O_3$.

В сравнении с нанопорошком вольфрама для наночастиц композиции $W-Y_2O_3$ отмечены незначительные увеличения параметра решетки (a) с 3,166 до 3,167 Å и размера кристаллита (ОКР) с 32 до 36–38 нм.

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования плазмохимического синтеза при взаимодействии с водородсодержащей плазмой смеси оксида вольфрама WO_3 и ацетата иттрия с целью получения нанопорошка композиции $W-Y_2O_3$ с максимально равномерным распределением оксида иттрия в диапазоне концентраций 0,3–5,0 масс.%. в композиции.

Установлены закономерности формирования композитного нанопорошка $W-Y_2O_3$ в потоке термической плазмы, и определены параметры проведения плазмохимического синтеза, при которых достигается наиболее полное превращение исходных реагентов в целевые продукты (W и Y_2O_3) с равномерным распределением оксида иттрия (Y_2O_3) в диапазоне концентраций 0,3–5,0 мас. % в получаемом нанопорошке композиции $W-Y_2O_3$.

Значение удельной поверхности для нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ находится около 5–8 м²/г, что соответствует среднему размеру частиц ($D_{ср}$, БЭТ) около 40–80 нм. По результатам гранулометрического анализа нанопорошки системы $W-Y_2O_3$ имеют средний размер (D_{50}) около 0,06 мкм и диапазон присутствия частиц от 0,02 до 1,2 мкм.

По результатам рентгенофазового анализа определено, что в полученном нанопорошке композиции $W-Y_2O_3$ основными фазами являются устойчивая кубическая α -фаза вольфрама W и следы W_3O ; присутствие Y_2O_3 малозаметно. При сравнении с наночастицами вольфрама для композиции $W-Y_2O_3$ отмечены незначительное увеличение параметра решетки (a) с 3,166 до 3,167 Å и незначительное увеличение размера кристаллита (ОКР) с 32 до 36–38 нм.

С использованием методов электронной микроскопии и элементного ЭДС-микроанализа установлено, что достигается равномерное распределение оксида иттрия по поверхности всех наночастиц вольфрама в виде тонких пленок и отдельных наночастиц. Общее расчетное содержание оксида иттрия в композиции $W-Y_2O_3$ согласно методу ЭДС элементного микроанализа соответствует содержанию 0,3; 1,3 и 4,5 мас. % для смеси исходного сырья и также находится на уровне однородного распределения с концентрацией (Y_2O_3) $0,8 \pm 0,5$; $1,1 \pm 0,6$ и $3,8 \pm 0,9$ мас. % для получаемых нанопорошков композиции $W-Y_2O_3$ с заданным содержанием 0,3; 1,2 и 5,0 мас. % соответственно.

Результаты анализов на содержание газовых примесей показали, что общее содержание углерода находится около 0,03–0,04 мас. %, а содержание кислорода – на уровне 2,2–2,6; 1,7–2,0; 3,5–5,0 мас. % для нанопорошков композиции W–Y₂O₃ с заданной концентрацией оксида иттрия 0,3; 1,2 и 5,0 мас. % соответственно. Содержание азота в нанопорошках W и композиции W–Y₂O₃ (0,3–5,0 мас. %) находится на уровне 0,1–0,2 мас. % для нанопорошка и в большей степени соответствует физической адсорбции на поверхности наночастиц. Лучшей концентрацией оксида иттрия для синтеза композиции W–Y₂O₃ можно считать 1,2 мас. % ввиду стабилизации и стойкости такого состава композиции к окислению ([O] = 1,7–2,0% с учетом расчетного содержания кислорода в оксиде иттрия композиции [O]_{Y₂O₃} = 0,26%) относительно нанопорошка чистого вольфрама ([O] = 2,2–2,4%).

Список источников

1. Wang S., Luo L., Zhao M., Zhu X., Wu Y., Luo G. Current status and development trend of toughening technology of tungsten-based materials // *Xiyou Jinshu*. 2015. Vol. 39 (8). P. 741–748.
2. Климова О.Г. Структура и свойства спеченных сплавов на основе вольфрама, полученных с использованием наноразмерных порошков : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 150 с.
3. Fang Z.Z., Ren C., Simmons M., Sun P. The effect of Ni doping on the mechanical behavior of tungsten // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*. 2020. Vol. 92. Art. 105281.
4. Сокол И.В., Сундуков А.М. Способ получения композиционного материала на основе псевдосплава вольфрам-медь: пат. RU 2043861 C1 Рос. Федерация. №2043861; заявл. 20.09.1995.
5. Veleva L. Contribution to the Production and Characterization of W-Y, W-Y₂O₃ and W-TiC Materials for Fusion Reactors : PhD thesis work No. 4995. Suisse, 2011. doi: 10.5075/EPFL-THESIS-4995
6. Howard L., Parker G.D., Yu Xiao-Ying. Progress and challenges of additive manufacturing of tungsten and alloys as plasma-facing materials // *Materials*. 2024. Vol. 17. Art. 2104.
7. You J.H., Mazzone G., Visca E., Greuner H., Fursdon M., Addab Y., Bachmann C., Barrett T., Bonavolontà U., Böswirth B. et al. Divertor of the European DEMO: Engineering and technologies for power exhaust // *Fusion Eng. Des*. 2022. Vol. 175. Art. 113010.
8. Ильющенко А.Ф., Батырбеков Э.Г., Бакланов В.В., Савич В.В., Коняев Е.Т., Лецко А.И., Миниязов А.Ж., Кузнечик О.О. Перспективы использования порошковых материалов на основе вольфрама и титана для изготовления защиты первой стенки и дивертора термоядерного реактора // *Порошковая металлургия : республ. межвед. сб. науч. тр. Минск : Нац. акад. наук Беларуси*, 2023. С. 23–41.
9. Голубева А.В., Черкез Д.И. Накопление водорода в разработанных для термоядерных установок сплавах вольфрама // *Вопросы атомной науки и техники (термоядерный синтез)*. 2018. № 41 (4). С. 26–37.
10. Jenuš P., Abram A., Novak S., Kelemen M., Pečovnik M., Schwarz-Selinger T., Markelj S. Deuterium retention in tungsten, tungsten carbide and tungsten-ditungsten carbide composites // *Journal of Nuclear Materials*. 2023. Vol. 581. Art. 154455.
11. Qin M., Yang J., Chen Z., Chen P., Zhao S., Cheng J., Cao P., Jia B., Chen G., Zhang L., Qu X. Preparation of intragranular-oxide-strengthened ultrafine-grained tungsten via low-temperature pressureless sintering // *Mater. Sci. Eng. A*. 2020. Vol. 774. Art. 138878.
12. Lin J.-S., Luo L.-M., Xu Q., Zhan X. et al. Microstructure and deuterium retention after ion irradiation of W–Lu₂O₃ composites // *J. of Nucl. Mater*. 2017. Vol. 490. P. 272–278.

13. Xiao F., Miao Q., Wei S., Barriere T., Cheng G., Zuo S., Xu L. Uniform nanosized oxide particles dispersion strengthened tungsten alloy fabricated involving hydrothermal method and hot isostatic pressing // *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 824. Art. 153894.
14. Veleva L., Schaeublin R., Battabyal M., Plociski T., Baluc N. Investigation of microstructure and mechanical properties of W-Y and W-Y₂O₃ materials fabricated by powder metallurgy method // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2015. Vol. 50. P. 210–216.
15. Heo Youn Ji, Lee Eui Seon, Kim Jeong Hyun, Lee Young-In, Jeong Young-Keun, Oh Sung-Tag. Synthesis and Characterization of W Composite Powder with La₂O₃-Y₂O₃ Nano-dispersoids by Ultrasonic Spray Pyrolysis // *Archives of Metallurgy and Materials.* 2022. Vol. 67 (4). P. 1507–1510. doi: 10.24425/amm.2022.141083
16. Hu W., Dong Z., Yu L., Ma Z., Liu Y. Synthesis of W-Y₂O₃ alloys by freeze-drying and subsequent low temperature sintering // *J. Mater. Sci. Technol.* 2020. Vol. 36. P. 84–90.
17. Dong Z., Liu N., Ma Z., Liu C., Guo Q., Yamauchi Y., Alamri H.R., Allothman Z.A., Hossain M.S.A., Liu Y. Synthesis of nanosized composite powders via a wet chemical process for sintering high performance W-Y₂O₃ alloy // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2017. Vol. 69. P. 266–272.
18. Antolak-Dudka A., Oleszak D., Zielinski R., Kulik T. W-Y₂O₃ composites obtained by mechanical alloying and sintering // *Advanced Powder Technology.* 2021. Vol. 32 (2). P. 390–397.
19. Wahlberg S. et al. Fabrication of nanostructured W-Y₂O₃ materials by chemical methods // *Journal of Materials Chemistry.* 2012. Vol. 22. P. 12622–12628.
20. Kim J.H., Ji M., Choi W.Ju., Byun J., Lee Y.In. Effect of Y₂O₃ nanoparticles on enhancing microstructure and mechanical properties of oxide dispersion strengthened W alloy // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2024. Vol. 119. Art. 106534.
21. Hu W., Dong Z., Ma Z., Liu Y. Microstructure refinement in W-Y₂O₃ alloys via an improved hydrothermal synthesis method and low temperature sintering // *Inorg. Chem. Front.* 2020. Vol. 7. P. 659–666.
22. Zhao S., Lv Y., Zhang Z., Fan J. Synthesis and Characterization of W-Y₂O₃ Composites with Core-Shell Structure Via Wet Chemical Method in an Acidic Solution // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2024. Vol. 122. Art. 106729.
23. Liu N., Dong Z., Ma Z., Yu L., Li C., Liu C., Guo Q., Liu Y. Eliminating bimodal structures of W-Y₂O₃ composite nanopowders synthesized by wet chemical method via controlling reaction conditions // *J. Alloy. Compd.* 2019. Vol. 774. P. 122–128.
24. Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов А.М. Наноматериалы : классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учеб. пособие. М. : Междунар. ун-т природы, о-ва и человека «Дубна», фил. «Угреша», 2007. 125 с.
25. 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 // *Powder Technology. IntechOpen*, 2018. Ch. 1. P. 4–20.
26. Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Дорофеев А.А., Калашников Ю.П., Синайский М.А., Завертяев И.Д. Сфероидизация нанопорошковых микрогранул вольфрама в термической плазме электродугового разряда // *Перспективные материалы.* 2023. № 12. С. 71–82.
27. Samokhin A., Alekseev N., Dorofeev A., Fadeev A., Sinaiskiy M. Production of Spheroidized Micropowders of W-Ni-Fe Pseudo-Alloy Using Plasma Technology // *Metals.* 2024. Vol. 14 (9). Art. 1043. doi: 10.3390/met14091043
28. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Dorofeev A.A., Fadeev A.A., Sinayskiy M.A., Zavertiaev I.D., Grigoriev Y.V. Preparation of a spheroidized W-Cu pseudo-alloy micropowder with a sub-micrometer particle structure using plasma technology // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (TNMSC).* 2024. Vol. 34. P. 592–603. doi: 10.1016/S1003-6326(23)66420-9

29. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Astashov A.G., Dorofeev A.A., Fadeev A.A., Sinayskiy M.A., Kalashnikov Y.P. Preparation of W-C-Co composite micropowder with spherical shaped particles using plasma technologies // *Materials*. 2021. Vol. 14 (15). Art. 4258.
30. Krasovskii P.V., Samokhin A.V., Fadeev A.A., Sinayskiy M.A., Sigalaev S.K. Alloying effects and composition inhomogeneity of plasma-created multimetallic nanopowders: A case study of the W-Ni-Fe ternary system // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 750. P. 265–275.
31. Пат. РФ № 2311225. МПК В 01 J 19/00. Плазменная установка для получения нанопорошков / Алексеев Н.В., Самохин А.В., Цветков Ю.В. 27.11.2007.
32. Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов // *Химия высоких энергий*. 2006. № 40 (2). С. 120–125.
33. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. М. : Геоинформмарк, 2000. 296 с.

References

1. Wang S., Luo L., Zhao M., Zhu X., Wu Y., Luo G. Current status and development trend of toughening technology of tungsten-based materials. *Xiyou Jinshu*. 2015. Vol. 39 (8). P. 741–748.
2. Klimova O.G. *Struktura i svoystva spechennykh splavov na osnove vol'frama, poluchennykh s ispol'zovaniem nanorazmernykh poroshkov* [The structure and properties of sintered tungsten-based alloys obtained using nanoscale powders]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.16.04 / Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet. Sankt-Peterburg, 2011. 150 p.
3. Fang Z.Z., Ren C., Simmons M., Sun P. The effect of Ni doping on the mechanical behavior of tungsten. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. Vol. 92. Art. 105281.
4. Sokol I.V., Sundukov A.M. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala na osnove psevdosplava vol'fram-med'* [Method for producing a composite material based on tungsten-copper pseud alloy]: pat. RU 2043861 C1 Ros. Federatsiya. №2043861; zayavl. 20.09.1995.
5. Veleva L. *Contribution to the Production and Characterization of W-Y, W-Y₂O₃ and W-TiC Materials for Fusion Reactors* : PhD thesis work No. 4995. Suisse, 2011. doi: 10.5075/EPFL-THESIS-4995
6. Howard L., Parker G.D., Yu Xiao-Ying. Progress and challenges of additive manufacturing of tungsten and alloys as plasma-facing materials. *Materials*. 2024. Vol. 17. Art. 2104.
7. You J.H., Mazzone G., Visca E., Greuner H., Fursdon M., Addab Y., Bachmann C., Barrett T., Bonavolontà U., Böswirth B. et al. Divertor of the European DEMO: Engineering and technologies for power exhaust. *Fusion Eng. Des.* 2022. Vol. 175. Art. 113010.
8. Ilyushchenko A.F., Batyrbekov E.G., Baklanov V.V., Savich V.V., Konyayev E.T., Letsko A.I., Miniyazov A.Zh., Kuznechik O.O. Perspektivy ispol'zovaniya poroshkovykh materialov na osnove vol'frama i titana dlya izgotovleniya zashchity pervoy stenki i divertora termoyadernogo reaktora [Prospects for the use of powder materials based on tungsten and titanium for the manufacture of protection of the first wall and divertor of a thermonuclear reactor] // *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov* [Powder metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers]. Minsk, 2023. P. 23–41.
9. Golubeva A.V., Cherkez D.I. Nakopleniye vodoroda v razrabotannykh dlya termoyadernykh ustanovok splavakh vol'frama [Hydrogen accumulation in tungsten alloys developed for thermonuclear installations] // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki (Termoyadernyy sintez)* [Questions of atomic science and technology (Thermonuclear fusion)]. 2018. Vol. 41, No. 4. P. 26–37.
10. Jenuš P., Abram A., Novak S., Kelemen M., Pečovnik M., Schwarz-Selinger T., Markelj S. Deuterium retention in tungsten, tungsten carbide and tungsten-ditungsten carbide composites. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. Vol. 581. Art. 154455.
11. Qin M., Yang J., Chen Z., Chen P., Zhao S., Cheng J., Cao P., Jia B., Chen G., Zhang L., Qu X. Preparation of intragranular-oxide-strengthened ultrafine-grained tungsten via low-temperature pressureless sintering. *Mater. Sci. Eng. A*. 2020. Vol. 774. Art. 138878.

12. Lin J.-S., Luo L.-M., Xu Q., Zhan X. et al. Microstructure and deuterium retention after ion irradiation of W-Lu₂O₃ composites. *J. of Nucl. Mater.* 2017. Vol. 490. P. 272–278.
13. Xiao F., Miao Q., Wei S., Barriere T., Cheng G., Zuo S., Xu L. Uniform nanosized oxide particles dispersion strengthened tungsten alloy fabricated involving hydrothermal method and hot isostatic pressing. *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 824. Art. 153894.
14. Veleva L., Schaeublin R., Battabyal M., Plociski T., Baluc N. Investigation of microstructure and mechanical properties of W-Y and W-Y₂O₃ materials fabricated by powder metallurgy method. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2015. Vol. 50. P. 210–216.
15. Heo Youn Ji, Lee Eui Seon, Kim Jeong Hyun, Lee Young-In, Jeong Young-Keun, Oh Sung-Tag. Synthesis and Characterization of W Composite Powder with La₂O₃-Y₂O₃ Nano-dispersoids by Ultrasonic Spray Pyrolysis. *Archives of Metallurgy and Materials.* 2022. Vol. 67 (4). P. 1507–1510. doi: 10.24425/amm.2022.141083
16. Hu W., Dong Z., Yu L., Ma Z., Liu Y. Synthesis of W-Y₂O₃ alloys by freeze-drying and subsequent low temperature sintering. *J. Mater. Sci. Technol.* 2020. Vol. 36. P. 84–90.
17. Dong Z., Liu N., Ma Z., Liu C., Guo Q., Yamauchi Y., Alamri H.R., Alothman Z.A., Hossain M.S.A., Liu Y. Synthesis of nanosized composite powders via a wet chemical process for sintering high performance W-Y₂O₃ alloy. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2017. Vol. 69. P. 266–272.
18. Antolak-Dudka A., Oleszak D., Zielinski R., Kulik T. W-Y₂O₃ composites obtained by mechanical alloying and sintering. *Advanced Powder Technology.* 2021. Vol. 32 (2). P. 390–397.
19. Wahlberg S. et al. Fabrication of nanostructured W-Y₂O₃ materials by chemical methods. *Journal of Materials Chemistry.* 2012. Vol. 22. P. 12622–12628.
20. Kim J.H., Ji M., Choi W.Ju., Byun J., Lee Y.In. Effect of Y₂O₃ nanoparticles on enhancing microstructure and mechanical properties of oxide dispersion strengthened W alloy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2024. Vol. 119. Art. 106534.
21. Hu W., Dong Z., Ma Z., Liu Y. Microstructure refinement in W-Y₂O₃ alloys via an improved hydrothermal synthesis method and low temperature sintering. *Inorg. Chem. Front.* 2020. Vol. 7. P. 659–666.
22. Zhao S., Lv Y., Zhang Z., Fan J. Synthesis and Characterization of W-Y₂O₃ Composites with Core-Shell Structure Via Wet Chemical Method in an Acidic Solution. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2024. Vol. 122. Art. 106729.
23. Liu N., Dong Z., Ma Z., Yu L., Li C., Liu C., Guo Q., Liu Y. Eliminating bimodal structures of W-Y₂O₃ composite nanopowders synthesized by wet chemical method via controlling reaction conditions. *J. Alloy. Compd.* 2019. Vol. 774. P. 122–128.
24. Baloyan B. M., Kolmakov A. G., Alymov M. I., Krotov A. M. *Nanomaterialy: klassifikatsiya, osobennosti svoystv, primeneniye i tekhnologii polucheniya* [Nanomaterials: Classification, Properties, Applications, and Production Technologies]: uchebnoye posobie. Moscow: Mezhdunarodnyy universitet prirody, obshchestva i cheloveka «Dubna», filial «Ugresha», 2007. 125 p.
25. 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. *Powder Technology.* IntechOpen, 2018. Ch. 1. P. 4–20.
26. Samokhin A. V., Fadeev A. A., Alekseev N. V., Dorofeev A. A., Kalashnikov Yu. P., Sinayskiy M. A., Zavertyaev I. D. Sferoidizatsiya nanoporoshkovykh mikrogranul vol'frama v termicheskoy plazme elektrodugovogo razryada [Spheroidization of Tungsten Nanopowder Microgranules in Thermal Plasma of Electric Arc Discharge] // *Perspektivnye materialy* [Prospective Materials]. 2023. No. 12. P. 71–82.
27. Samokhin A., Alekseev N., Dorofeev A., Fadeev A., Sinaiskiy M. Production of Spheroidized Micropowders of W-Ni-Fe Pseudo-Alloy Using Plasma Technology. *Metals.* 2024. Vol. 14 (9). Art. 1043. doi: 10.3390/met14091043
28. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Dorofeev A.A., Fadeev A.A., Sinayskiy M.A., Zavertiaev I.D., Grigoriev Y.V. Preparation of a spheroidized W-Cu pseudo-alloy micropowder with a sub-

- micrometer particle structure using plasma technology. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (TNMSC)*. 2024. Vol. 34. P. 592–603. doi: 10.1016/S1003-6326(23)66420-9
29. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Astashov A.G., Dorofeev A.A., Fadeev A.A., Sinayskiy M.A., Kalashnikov Y.P. Preparation of W-C-Co composite micropowder with spherical shaped particles using plasma technologies. *Materials*. 2021. Vol. 14 (15). Art. 4258.
 30. Krasovskii P.V., Samokhin A.V., Fadeev A.A., Sinayskiy M.A., Sigalaev S.K. Alloying effects and composition inhomogeneity of plasma-created multimetallic nanopowders: A case study of the W–Ni–Fe ternary system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 750. P. 265–275.
 31. Pat. No. 2311225, Russian Federation, IPC B01J19/00. *Plazmennaya ustanovka dlya polucheniya nanoporoshkov* [Plasma installation for nanopowder production] / Alekseev N. V., Samokhin A. V., Tsvetkov Yu. V.; applicant and patent holder: Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of the Russian Academy of Sciences. Application No. 2006115413/15; filed 04.05.2006; published 27.11.2007, Bulletin No. 33. 6 p.
 32. Samokhin A. V., Alekseev N. V., Tsvetkov Yu. V. Plazmokhimicheskie protsessy sozdaniya nanodispersnykh poroshkovykh materialov [Plasma-Chemical Processes for the Creation of Nanodispersed Powder Materials] // *Khimiya vysokikh energiy* [High Energy Chemistry]. 2006. No. 40 (2). P. 120–125.
 33. Pushcharovskiy D. Yu. *Rentgenografiya mineralov* [X-Ray Diffraction of Minerals]. Moscow: Geoinformmark, 2000. 296 p.

Сведения об авторах:

Самохин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: samokhin@imet.ac.ru; Scopus Author ID 7005200081; ResearcherID L-8328-2013; ORCID 0000-0002-1708-5501.

Алексеев Николай Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: nvalexeev@yandex.ru; Scopus Author ID 57197595257; ResearcherID M-1438-2013, ORCID 0000-0003-2499-9229.

Синайский Михаил Александрович – научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: ms18@mail.ru; Scopus Author ID 56901263200; ResearcherID W-2469-2019; ORCID 0000-0001-7515-4248.

Фадеев Андрей Андреевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: afadeev@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57191970491; ResearcherID A-6273-2014; ORCID 0000-0003-2147-1787.

Дорофеев Алексей Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: adorofoev@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57222373498; ResearcherID KOC-6589-2024; ORCID 0000-0003-0624-6944.

Калашников Юлиан Павлович – младший научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: ulian1996@inbox.ru

Терентьев Александр Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в металлургии и обработке материалов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail:

aterentev@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57205612529; ResearcherID HMD-4144-2023; ORCID 0000-0002-7591-9973.

Андреева Надежда Александровна – научный сотрудник аналитической лаборатории Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: nandreeva@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57196495509; ORCID 0000-0003-2237-1956.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Samokhin Andrey V. – PhD, Head of Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: samokhin@imet.ac.ru; Scopus Author ID 7005200081; ResearcherID L-8328-2013; ORCID 0000-0002-1708-5501.

Alekseev Nikolay V. – PhD, Leading Researcher at Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: nvalexeev@yandex.ru; Scopus Author ID 57197595257; ResearcherID M-1438-2013; ORCID 0000-0003-2499-9229.

Sinayskiy Mikhail A. – Researcher at Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: ms18@mail.ru; Scopus Author ID 56901263200; ResearcherID W-2469-2019; ORCID 0000-0001-7515-4248.

Fadeev Andrey A. – PhD, Researcher at Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: afadeev@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57191970491; ResearcherID A-6273-2014; ORCID 0000-0003-2147-1787.

Dorofeev Alexey A. – Junior Researcher at Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: adorofeev@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57222373498; ResearcherID KOC-6589-2024; ORCID 0000-0003-0624-6944.

Kalashnikov Yulian P. – Junior Researcher at Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: ulian1996@inbox.ru

Terentev Alexander V. – Junior Researcher at Laboratory of Plasma Processes in Metallurgy and Material Treatment of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: aterentev@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57205612529; ResearcherID (HMD-4144-2023; ORCID (0000-0002-7591-9973.

Andreeva Nadezhda A. – Researcher at Analytical Laboratory of the A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of Russian Academy of Science (Moscow, Russian Federation). E-mail: nandreeva@imet.ac.ru; Scopus Author ID 57196495509; ORCID 0000-0003-2237-1956.

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 05.09.2025; принята к публикации 07.11.2025
The article was submitted 05.09.2025; accepted for publication 07.11.2025*