
Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-3-11

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

И.Ю. Мухина¹, В.А. Дуюнова¹, А.А. Леонов¹, М.С. Токарев¹, А.В. Трапезников¹, К.А. Власова¹

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

Аннотация. Представлены результаты научно-технических исследований в области составов и технологий изготовления порошковых композиций для проведения газодинамического напыления на отливки из алюминиевых и магниевых сплавов. Проведенные исследования включают изыскания зарубежных и российских ученых в области технологий улучшения характеристик сплавов путем нанесения функциональных покрытий, а также локального ремонта изделий. Интерес представляют технологии, которые не оказывают негативного воздействия на наносимую поверхность, устраняют дефекты без дополнительных нагревов.

Ключевые слова: магниевые и алюминиевые сплавы, газодинамическое напыление, состав порошка, поверхностные дефекты, металлопорошковые композиции

Для цитирования: Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Леонов А.А., Токарев М.С., Трапезников А.В., Власова К.А. Тенденции развития в области составов и технологий изготовления порошковых композиций для алюминиевых и магниевых сплавов. Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-3-11.

Scientific article

DEVELOPMENT TRENDS IN COMPOSITIONS AND MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR POWDER COMPOSITIONS FOR ALUMINUM AND MAGNESIUM ALLOYS

I.Yu. Mukhina¹, V.A. Duyunova¹, A.A. Leonov¹, M.S. Tokarev¹, A.V. Trapeznikov¹, K.A. Vlasova¹

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

Abstract. This paper presents the results of scientific and technical research on the compositions and manufacturing technologies of powder compositions for cold spraying on castings of aluminum and magnesium alloys. The conducted research includes investigations by foreign and Russian scientists in the field of technologies for improving the characteristics of alloys through the application of functional coatings, as well as local repair of products. Technologies that do not adversely affect the applied surface and eliminate defects without additional heating are of particular interest.

Keywords: magnesium and aluminum alloys, cold spraying, powder composition, surface defects, metal powder compositions

For citation: Mukhina I.Yu., Duyunova V.A., Leonov A.A., Tokarev M.S., Trapeznikov A.V., Vlasova K.A. Development trends in compositions and manufacturing technologies for powder compositions for aluminum and magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-3-11.

Введение

Повышение требований к качеству и надежности изделий из металлов и сплавов стимулирует поиск эффективных методов устранения дефектов и восстановления поврежденных поверхностей. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является газодинамическое напыление. Этот метод позволяет наносить покрытия с высокими адгезионными свойствами, обеспечивая плотное прилегание при ремонте и повышение износостойкости [1].

Международные симпозиумы и обширная научно-техническая литература свидетельствуют о значительном развитии магниевой промышленности в Китае, Японии и Южной Корее, в частности, в области разработки и совершенствования составов и технологий производства литейных магниевых сплавов [2].

Как правило, технологические процессы плавки и литья обеспечивают получение качественных магниевых отливок, однако при серийном производстве сложноконтурных разностенных отливок переменного сечения возможно появление дефектов в виде раковин, надрывов, заворотов, незаливов и шлаковых включений, которые выявляются после механической обработки. Указанные металлургические дефекты на российских предприятиях устраняют аргоно-дуговой сваркой, в результате которой при нагреве происходят интенсивное окисление сплава и локальное изменение микроструктуры, в шве и околошовной зоне возможен рост зерна и снижение прочности и относительного удлинения шва заварки на 0,3–0,4 % соответственно [3].

В настоящее время наиболее перспективным и востребованным направлением является сохранение свойств магниевых сплавов с помощью устранения дефектов методом напыления. Локальный ремонт без демонтажа – наиболее перспективный и востребованный метод. Приоритет отдается технологиям, не повреждающим обрабатываемую поверхность.

Методом исправления дефектов магниевых литых изделий, впервые опробованным в производственных условиях, является метод холодного газодинамического напыления (ХГН) специальных тонкодисперсных порошков без нагрева. Данный метод особенно перспективен при производстве сложноконтурных крупногабаритных отливок переменного сечения, подвергающихся в дальнейшем трудоемким операциям термической и механической обработки, а также сложным способам контроля качества [4, 5].

Наиболее эффективно для ХГН использование пластичных металлов – например, никеля, меди, алюминия и их сплавов. Это связано с необходимостью пластической деформации частиц при ударе для образования прочных металлических связей.

Включение керамических наполнителей (например, карбида кремния или корунда) в металлопорошковые смеси повышает адгезию к подложке, активируя ее поверхность, и приводит к образованию более плотных, менее пористых покрытий.

Металлопорошковые композиции позволяют локально исправлять дефекты, что расширяет возможности восстановления геометрической формы и размеров деталей. Благодаря низкой пористости и газопроницаемости эти покрытия успешно используются для герметизации и устранения течей в трубопроводах, теплообменниках и другом оборудовании. В связи с этим активно ведется разработка новых порошковых материалов и технологий их напыления.

Таким образом, при проведении информационного поиска уделялось внимание составам и технологиям изготовления порошковых композиций, при использовании которых дефект, исправленный методом ХГН, по свойствам приближен к характеристикам основного материала. Отобраны наиболее значимые патенты ведущих стран мира: России, Китая, США, Канады, Южной Кореи и Японии [6, 7].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Результаты и обсуждение

Способы получения порошков и их нанесения на основу сплава

Существующие способы получения порошков разнообразны, что позволяет варьировать их свойства и придавать изделиям требуемые физические и механические свойства, а также обеспечивать защиту от коррозии.

Методы производства металлопорошковых композиций разделяются на физико-химические и механические. Физико-химические методы включают процессы, при которых исходное сырье подвергается физико-химическим превращениям, что приводит к значительному изменению химического состава конечного порошка по сравнению с исходным материалом. К таким методам относятся восстановление металлов из оксидов, электролиз расплавленных солей, термическая диссоциация и гидрогенизация.

Механические методы, напротив, позволяют получить порошок без изменения его химического состава путем измельчения исходного материала в шаровых, вихревых или других мельницах, а также распылением жидких металлов в инертной газовой среде. Порошки, полученные физико-химическими методами, отличаются высокой степенью дисперсности и чистоты. В зависимости от размера частиц порошки классифицируются на ультратонкие (до 0,5 мкм), очень тонкие (0,5–10 мкм), тонкие (10–40 мкм), средней тонкости (40–150 мкм) и крупные (150–500 мкм).

Далее рассмотрены работы китайских исследователей.

Известен способ распыления покрытия методом ХГН на поверхность основы из магния, разработанный компанией Verrier Pierre [8]. Способ включает последовательное нанесение на поверхность магния покрытия путем химического преобразования хромата, который реагирует с оксидом магния, содержащимся на поверхности. Далее на поверхность наносят покрытие с помощью холодного напыления.

Представлено также устройство и способ производства порошка металлического магния сферического типа. Устройство состоит из режущего вала, который снабжен режущим узлом, включающим режущую головку и нож, установленный по окружности режущей головки. Съёмная режущая головка установлена так, что угол между ней и основной частью инструмента регулируется [9].

Известен метод ремонта поверхностной коррозии магниевых сплавов холодным напылением, включающим предварительную обработку дефектов поверхности – напыление порошка состава, % (по массе): (2,5–3,5) Zn, (2,6–2,8) Mg, (1,9–2,2) Si, (1,4–1,6) Ta, (0,7–0,9) Cd, (0,2–0,3) Ba, остальное – алюминий. Обработка ремонтного слоя завершается шлифованием, температура рабочего газа 230–250 °С, скорость струйной очистки составляет 40–60 мм/с [10].

Компания Univ Shandong Technology предлагает [11] способ подготовки к холодному напылению покрытия из высокоэнтропийного сплава системы Co–Cr–Fe–Ni, порошок которого получают газовым распылением. Рабочими газами являются азот и гелий. Подробно указаны технологические параметры процесса. Способ подходит для массового производства, защиты и восстановления деталей из магниевых сплавов в области автомобилестроения, аэрокосмической промышленности, машиностроения, специальных (военных) транспортных средств.

Известен способ получения покрытия из цинка или цинкового сплава на поверхности магниевого сплава методом ХГН [12]. Полученный материал обладает хорошими механическими и антикоррозионными свойствами, а также перспективен для биомедицинского применения.

Предложен способ получения магниевого сплава с покрытием системы Al–Si–Mg [13], который включает напыление порошка этого сплава с последующим отжигом. Нанесенное покрытие уменьшает пористость, улучшают прочность и пластичность.

Изобретение [14] направлено на изготовление алюминиевых композиций в виде порошков, а также чистого алюминия, пропорционально смешанного с частицами Al_2O_3 . Диапазон размеров частиц Al_2O_3 составляет 50–150 мкм, а чистого алюминия: 20–50 мкм.

Авторами патента [15] предложен способ изготовления модифицированного алюминиевого порошка для ХГН, заключающийся в том, что в спиртовую эмульсию алюмоциркониевого порошка добавляют порошок цинка и алюминия (фракции 20–60 мкм). Полученную смесь измельчают, центрифугируют, удаляя оставшийся спирт, просушивают при температуре 50–70 °С в течение 1,5–2,5 ч. Затем к просушенной смеси добавляют гексаметафосфат натрия и фторид алюминия и измельчают в шаровой мельнице до достижения размеров частиц порошка 20–35 мкм, просушивают под вакуумом в течение 0,5–14 мин. Полученная смесь позволяет получить плотную структуру покрытия на поверхности основного металла.

В работе [16] для повышения коррозионной стойкости предлагается использовать смесь порошка меди и алюминия в соотношении 4:2,2. Используют особый способ подготовки поверхности, двукратное нанесение порошковой композиции и отжиг в течение 1,2–1,5 ч при температуре 220–320 °С.

Во многих научно-технических публикациях рассматривается изготовление порошковых композиций, используемых в качестве антикоррозионных и износостойких покрытий. Так, предлагается способ изготовления смеси порошков для ХГН в соотношении, % (по массе): 88Al + 6,5Ni + 5,5Y, имеющих сферическую форму и размер частиц 5–30 мкм, а также 200 г порошка карбида кремния (SiC) или оксида алюминия (Al_2O_3) с размером частиц 5–25 мкм. Рабочим газом при напылении порошка является гелий [17].

Рассмотрено также изготовление композиций порошка Cu– Al_2O_3 [18]. Его компонентами являются порошок дендритной меди и α - Al_2O_3 при массовом соотношении 1:(0,2–1); рабочий газ – сжатый воздух с расходом 0,3–0,4 мм³/мин. Полученную композицию наносят на алюминиевую подложку с образованием медного слоя высокой плотности. Метод исключает образование хрупких интерметаллидов, которые появляются при подварке дефектов, и окисление алюминия, как при использовании гальваники.

Авторами патента [19] описан способ получения и нанесения коррозионностойкого износостойкого покрытия – порошка алюминия с цинком. Рабочий газ – гелий с температурой подачи 270–310 °С при давлении 0,35 МПа. Применяется порошок алюминиевого сплава марки 2024 состава, % (по массе): Al + (4,3–4,5) Cu + (0,5–0,6) Mn + (1,3–1,5) Mg. Порошковую композицию сплава 2024 смешивают с коричневым корундовым песком, рабочий газ – азот с температурой подачи 470–490 °С. Использование композиции сплава 2024 со схожими характеристиками с основным материалом позволяет сохранять аэродинамические характеристики изделия без значительного увеличения массы [20].

Предложен способ изготовления и нанесения покрытий из алюминиевых сплавов серий 7075, 6061 и 2024, что способствует увеличению механических свойств [21]. Китайскими разработчиками описан способ получения порошка с редкоземельными

элементами (РЗЭ), такими как Се, La и др. Покрытие, модифицированное РЗЭ, эффективно защищает от окисления, повышая износостойкость и твердость [22].

Предложен способ изготовления оптимизированной композиции на основе алюминия для ХГН состава, % (по массе): (0,2–0,35) Cu, (0,26–0,28) Mg, (0,19–0,22) Si, (0,35–0,4) Ni, (0,05–0,15) Co, (0,15–0,25) Sn, (0,05–0,15) Cr, (0,3–0,45) Zr, (0,06–0,09) В, остальное – алюминий. Для нанесения изготовленного порошка поверхности деталей подвергают пескоструйной обработке и обрабатывают спиртом; рабочий газ при ХГН – аргон с температурой 150–200 °С и давлением 3–4 МПа [23]. Фирма Global Technjlogy LLC использует напыление на подложку из магния материала, содержащего порошок олова [24]. Далее напыляют алюминиевый порошок, чтобы создать верхний защитный слой. В этом способе снижена температура, необходимая для металлургического связывания алюминия с подложкой за счет пониженной температуры плавления промежуточного оловянного барьерного слоя.

Японские ученые предлагают процесс приготовления пористого магниевое покрытие с использованием полимолочной кислоты в заданном соотношении (60–90 % кислоты), на конечном этапе предусмотрено спекание [25]. Используются также порошки из магниевых сплавов марок AZ91D, AZ61A, AZ63 и AZ81A. Способ изготовления порошка из сплава AZ91D и других осуществляется путем типичной технологии напыления.

Анализ отобранных статей, монографий и охранных документов показал, что ведущими странами в области составов и технологий изготовления порошковых композиций для проведения ХГН на алюминиевых и магниевых сплавах являются Китай, Россия, США, Южная Корея, Япония и Канада. Основные решаемые технические задачи – получение порошковых композиций с минимальным содержанием примесей, повышенной экологичностью, регулированием получаемой фракции, хорошим контактом с поверхностью во время процесса ХГН.

Основные тенденции в области разработки порошковых сплавов для холодного газодинамического напыления

На основе анализа зарубежных публикаций, патентной документации и научно-технических источников выделены следующие основные тенденции в области разработки составов и технологий производства порошковых композиций для ХГН на алюминиевых и магниевых сплавах:

- использование в качестве рабочего газа не только воздуха, но и гелия, азота или аргона;
- применение шаровой мельницы для перемешивания и измельчения порошковых смесей;
- введение в состав порошков частиц карбида кремния и/или корунда для улучшения характеристик покрытий;
- добавление в порошковые композиции таких элементов, как Zn, Ni, Cu и Ti, которые могут вводиться как в чистом металлическом виде, так и в форме лигатур или сплавов, а также Zr, Mn, Sn, Co и Cr в виде лигатур;
- использование РЗЭ, таких как Се, La и другие, в составе порошков;
- проведение термической обработки порошков в вакуумной печи;
- применение как чистых порошков сплавов, так и их комбинаций с дисперсными керамическими частицами;
- плакирование алюминиевых порошков керамическим упрочнителем для повышения их эксплуатационных свойств.

Эти тенденции отражают стремление к улучшению функциональных характеристик покрытий и оптимизации технологических процессов.

Основными методами производства алюминиевых и магниевых порошков являются:

- распыление (диспергирование) расплавленного металла струей сжатого газа (аргона, азота, гелия). Порошки под действием поверхностного натяжения имеют сферическую или каплевидную форму со средним размером частиц 50–100 мкм;
- дробление/размол твердых материалов (стружки, обрезков) чешуйчатой формы с размером частиц от 2 мм до 0,1 мкм.

Для повышения механических свойств и адгезии покрытий основное значение при проведении ХГН имеют форма и размер частиц порошка. Особенность метода ХГН заключается в формировании покрытий из частиц, которые не подвергаются расплавлению, но разгоняются до высоких скоростей (100 м/с и более) в сверхзвуковых аэродинамических установках. Размер таких частиц обычно составляет от 50 до 0,01 мм. Порошки систем Al–Ni и Al–PЗМ, а также соединений AlO_2 и ZnMg и чистого Zn имеют адгезию к лакокрасочному покрытию 1–2 балл, соотношение прочностей $\sigma_{в.нап}/\sigma_{в.осн} \geq 0,85$.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Заключения

На основе изучения зарубежных публикаций, документации и научно-технических материалов выделены следующие тенденции в области разработки составов и технологий производства порошковых композиций для ХГН на алюминиевые и магниевые сплавы:

- улучшение характеристик сплавов и возможность локального ремонта изделий без демонтажа конструкции с использованием ХГН порошковых композиций на поверхность основы сплава представляют собой перспективное и востребованное направление;
- основные задачи включают получение порошков с минимальным содержанием примесей и неметаллических включений, контроль размеров фракций, повышение экологичности производства, а также обеспечение высокой адгезии в процессе ХГН;
- использование гелия, азота или аргона в качестве рабочего газа при ХГН;
- введение в состав порошков частиц корунда или карбида кремния;
- добавление в порошковые композиции таких элементов, как Zn, Ni, Cu и Ti, а также PЗЭ – La, Ce и других;
- применение Zr, Mn, Sn, Co и Cr в виде лигатур;
- использование как чистых порошков сплавов, так и их комбинаций с дисперсными керамическими частицами.

При выполнении технологических процессов необходимо применять перемешивание и измельчение порошковых смесей в шаровой мельнице, измельчение с использованием режущих валков, а также термическую обработку порошков.

Холодное газодинамическое напыление является перспективной технологией для улучшения эксплуатационных характеристик отливок из магниевых и алюминиевых сплавов. Благодаря отсутствию термического воздействия, высокой адгезии покрытий и возможности локального ремонта, ХГН открывает новые возможности для расширения применения магниевых сплавов в ответственных конструкциях. Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на оптимизацию составов порошков, разработку новых композиционных материалов и совершенствование технологических параметров процесса.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. Мухина И.Ю. Основы технологии плавки магниевых сплавов в защитных средах // Литейное производство. 2021. № 1. С. 2–8.
5. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевого сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
6. Мухина И.Ю., Кошелев О.В., Кошелев А.О., Устинов С.В., Бобрышев Б.Л., Бобрышев Д.В. Развитие технологий устранения металлургических дефектов сложноконтурного магниевого литья // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Наукоемкие технологии и материалы в литейном производстве». М.: ММЗ «Авангард», 2019. С. 195–220.
7. Фомина М.А., Захаров К.Е., Ямщиков Е.И., Трофимов Н.В. Подбор и исследование оптимальной рецептуры состава для локального удаления продуктов коррозии с магниевых сплавов, а также технологии его применения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.
8. Способ нанесения покрытий распылением: пат. CN213288673U; заявл. 21.08.20; опубл. 28.05.21.
9. Устройство и способ получения порошка металлического магния сферического типа: пат. CN112091330A; заявл. 30.09.20; опубл. 18.12.20.
10. Метод ремонта поверхностной коррозии магниевого сплава ХГН: пат. CN111485234A; заявл. 29.04.20; опубл. 04.08.20.
11. Способ подготовки к ХГН и покрытие из высокоэтропийного сплава: пат. CN113430513A; заявл. 28.06.21; опубл. 24.09.21.
12. Способ получения покрытия из цинка на поверхности магниевого сплава: пат. CN107675163A; заявл. 14.11.17; опубл. 09.02.18.
13. Способ получения магниевого сплава: пат. CN114214614A; заявл. 16.12.21; опубл. 22.03.22.
14. Приготовление порошков алюминиевых композиций: пат. CN109252154A; заявл. 14.07.17; опубл. 22.01.19.
15. Способ изготовления модифицированного алюминиевого порошка для ХГН: пат. CN115055677A; заявл. 17.08.22; опубл. 01.11.22.
16. Способ повышения коррозионной стойкости: пат. CN115537799A; заявл. 07.11.22; опубл. 30.12.22.
17. Способ изготовления смеси порошков для ХГН: пат. CN110616424A; заявл. 30.08.19; опубл. 27.12.19.
18. Способ изготовления композиций порошка Cu–Al₂O₃: пат. CN115283664A; заявл. 13.07.22; опубл. 04.11.22.
19. Способ получения и нанесения коррозионностойкого покрытия: пат. CN113832456A; заявл. 07.09.21; опубл. 24.12.21.
20. Состав порошка на основе сплава 2024: пат. CN114318323A; заявл. 10.12.21; опубл. 12.04.22.
21. Способ изготовления и нанесения покрытий из алюминиевых сплавов серий 7075, 6061 и др.: пат. US11215769B2; заявл. 17.02.20; опубл. 04.01.22.

22. Способ получения порошка для ХГН с РЗЭ: пат. CN116237527A; заявл. 13.03.23; опубл. 09.06.23.
23. Способ изготовления и композиция порошка на основе алюминия: пат. CN115961182A; заявл. 21.12.22; опубл. 14.04.23.
24. Способ напыления на подложку из магния порошка олова и алюминия: пат. JP2013029177A; заявл. 29.07.11; опубл. 07.02.13.
25. Состав порошка с использованием полимолочной кислоты, сплавов марок AZ91D, AZ61A, AZ81A (8% Al – 1% Zn), способ изготовления порошка: пат. JP2019123536A; заявл. 18.01.18; опубл. 17.05.22.

References

1. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. Mukhina I.Yu. Fundamentals of the technology of smelting magnesium alloys in protective environments. *Litynoe proizvodstvo*, 2021, no. 1, pp. 2–8.
5. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
6. Mukhina I.Yu., Koshelev O.V., Koshelev A.O., Ustinov S.V., Bobryshev B.L., Bobryshev D.V. Development of technologies for eliminating metallurgical defects in complex-contour magnesium casting. *Proc. of the All-Rus. sci. and pract. conf. «High-tech technologies and materials in foundry production»*. Moscow: MMZ «Avangard», 2019, pp. 195–220.
7. Fomina M.A., Zakharov K.E., Yamshchikov E.I., Trofimov N.V. Selection and research of optimal paste formulation for local removal of corrosion products from magnesium alloys as well as the technology of it's application. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.
8. *Spray coating method*: pat. CN213288673U; appl. 21.08.20; publ. 28.05.21.
9. *Device and method for producing spherical type metallic magnesium powder*: pat. CN112091330A; appl. 30.09.20; publ. 18.12.20.
10. *Method of repairing surface corrosion of magnesium alloy CGDS*: pat. CN111485234A; appl. 29.04.20; publ. 04.08.20.
11. *Method of preparation for CGN and coating with high-entropy alloy*: pat. CN113430513A; appl. 28.06.21; publ. 24.09.21.
12. *Method for producing zinc coating on the surface of magnesium alloy*: pat. CN107675163A; appl. 14.11.17; publ. 09.02.18.
13. *Method for producing magnesium alloy*: pat. CN114214614A; appl. 16.12.21; publ. 22.03.22.
14. *Preparation of aluminum composition powders*: pat. CN109252154A; appl. 14.07.17; publ. 22.01.19.
15. *Method for manufacturing modified aluminum powder for CGDS*: pat. CN115055677A; appl. 17.08.22; publ. 01.11.22.
16. *Method for increasing corrosion resistance*: pat. CN115537799A; appl. 07.11.22; publ. 30.12.22.
17. *Method for the preparation of a powder mixture for CGDS*: pat. CN110616424A; appl. 30.08.19; publ. 27.12.19.

18. Method for the production of Cu–Al₂O₃ powder compositions: pat. CN115283664A; appl. 13.07.22; publ. 04.11.22.
19. *Method for obtaining and applying a corrosion-resistant coating*: pat. CN113832456A; appl. 07.09.21; publ. 24.12.21.
20. *Powder composition based on alloy 2024*: pat. CN114318323A; appl. 10.12.21; publ. 12.04.22.
21. *Method of manufacturing and applying coatings from aluminum alloys of series 7075, 6061, etc.*: pat. US11215769B2; appl. 17.02.20; publ. 04.01.22.
22. *Method for obtaining powder for CGDS with REE*: pat. CN116237527A; appl. 13.03.23; publ. 09.06.23.
23. *Method of manufacturing and composition of aluminum-based powder*: pat. CN115961182A; appl. 21.12.22; publ. 14.04.23.
24. *Method of spraying tin and aluminum powder onto a magnesium substrate*: pat. JP2013029177A; appl. 29.07.11; publ. 07.02.13.
25. *Powder composition using polylactic acid, alloys of grades AZ91D, AZ61A, AZ81A (8% Al – 1% Zn), powder manufacturing method*: pat. JP2019123536A; appl. 18.01.18; publ. 17.05.22.

Информация об авторах

Мухина Инна Юрьевна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дуюнова Виктория Александровна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Леонов Александр Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Токарев Максим Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Трапезников Андрей Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Власова Карина Аридановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Inna Yu. Mukhina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victoria A. Dyuunova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Leonov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim S. Tokarev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey V. Trapeznikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Karina A. Vlasova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 31.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.04.2025.
The article was submitted 31.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 02.04.2025.