

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХГН

И.А. Козлов¹, М.А. Фомина¹, С.А. Демин¹, А.С. Васильев¹

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

Аннотация. Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) покрытий обладает определенными преимуществами, такими как простота технологического процесса, экологичность, а также возможность получения покрытий с широким набором функциональных свойств (коррозионная стойкость, огнеупорность, электроизоляционные свойства и др.) путем применения различных порошковых материалов и способов их изготовления. Приведены результаты исследований в области применения порошковых материалов для нанесения покрытий, описаны композиционные порошковые материалы со сложной структурой, полученные в результате механического легирования, в том числе содержащие керамические частицы и частицы интерметаллидов.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление (ХГН), порошковые материалы, ремонтные технологии, защитные покрытия, повышение износостойкости, композиционные материалы, морфология покрытия, механическое легирование

Для цитирования: Козлов И.А., Фомина М.А., Демин С.А., Васильев А.С. Тенденции развития порошковых материалов для нанесения защитных и функциональных покрытий методом ХГН // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112.

Scientific article

TENDENCIES IN THE DEVELOPMENT OF POWDER MATERIALS FOR THE APPLICATION OF PROTECTIVE AND FUNCTIONAL COATINGS BY THE CGN METHOD

I.A. Kozlov¹, M.A. Fomina¹, S.A. Demin¹, A.S. Vasiliev¹

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

Abstract. The method of cold gas-dynamic spraying (CGS) of coatings has certain advantages, such as simplicity of the technological process, environmental friendliness, as well as the possibility of obtaining coatings with a wide range of functional properties (corrosion resistance, fire resistance, electrical insulating properties, etc.) through the use of various powder materials and ways to make them. The article presents the results of research in the field of application of powder materials for coating, describes composite powder materials with a complex structure obtained as a result of mechanical alloying, including those containing ceramic particles and particles of intermetallics.

Keywords: cold gas-dynamic spraying (CGS), powder materials, repair technologies, protective coatings, increase in wear resistance, composite materials, coating morphology, mechanical alloying

For citation: Kozlov I.A., Fomina M.A., Demin S.A., Vasiliev A.S. Tendencies in the development of powder materials for the application of protective and functional coatings by the CGN method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112.

Введение

Методом холодного газодинамического напыления (ХГН) можно наносить покрытия из ограниченного перечня материалов, однако применение отдельных конструктивных решений применительно к установке для напыления, а также модификация напыляемых порошковых материалов позволяют наносить покрытия с широким набором функциональных свойств. История развития нанесения ХГН-покрытий началась с самых распространенных и доступных металлических материалов, таких как медь, алюминий и цинк, однако с повышением интереса к данному методу расширились номенклатура и спектр применяемых материалов.

Обзор композиционных покрытий

Разработка новых порошковых материалов для нанесения композиционных покрытий – одно из наиболее развивающихся направлений в области ХГН [1–6]. Порошковые композиционные материалы состоят из матрицы, которая обычно представляет собой мягкий пластичный металл, такой как медь или алюминий, и частиц-упрочнителей с высокой твердостью. Упрочнителями служат керамические частицы, различные нитриды и карбиды металлов. В большинстве научно-технических публикаций указан довольно широкий диапазон дисперсности применяемых твердых частиц, что можно объяснить их различным функциональным назначением: мелкодисперсные частицы способны встраиваться в структуру покрытия, а крупные – обладают большей массой и, как следствие, большей кинетической энергией. Частицы-упрочнители необходимы для снижения пористости покрытий за счет механического уплотнения, а также для обеспечения адгезионных свойств благодаря созданию микрошероховатостей на поверхности [7–9].

Конечные свойства покрытий зависят не только от соотношения исходных компонентов, но и определяются их фазовым составом и структурой [10–14]. В частности, описан способ повышения стойкости ХГН-покрытий к высокотемпературному окислению [15]. Применение данного покрытия актуально для защиты деталей из жаропрочных никелевых сплавов от высокотемпературного окисления. Основой для покрытия служит матрица из алюминия, которая для обеспечения прочности дополнительно армируется частицами карбида кремния. С ростом рабочей температуры на поверхности покрытия образуется слой оксида алюминия с плотной структурой, что существенно ограничивает диффузию кислорода к поверхности детали, предотвращая ее окисление и разрушение.

В процессе эксплуатации при повышенных температурах образуется плотный слой оксида алюминия (Al_2O_3), который защищает подложку от дальнейшего окисления и разрушения [16–18].

Метод ХГП позволяет наносить покрытия из магнитных материалов, которые обладают повышенной хрупкостью. Магнитный материал системы «неодим–железо–бор» ($Nd_2Fe_{14}B$) в виде порошка смешивали с порошком Al для получения смесей, содержащих от 20 до 80 % (объемн.) $Nd_2Fe_{14}B$. Для получения композитного покрытия $Nd_2Fe_{14}B/Al$ сжатый воздух предварительно разогревали в диапазоне температур 200–480 °С. В ходе исследований показано, что магнитные частицы разрушаются при ударе о напыляемую подложку, однако мягкая матрица, состоящая из частиц алюминия,

способствует захвату и включению магнитных частиц в структуру покрытия. Магнитные свойства соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ остались неизменными благодаря относительно невысокой температуре напыления. Улавливание частиц $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ внутри композитного покрытия может быть увеличено за счет более высоких температур распыления и применения более мелких размеров частиц $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ [19].

Для повышения термостойкости ХГН-покрытий проведены исследования по нанесению никелевого покрытия с добавлением частиц кобальта [20]. Покрытие наносили на образцы из низколегированной стали. Благодаря применению никеля удалось добиться пластической деформации порошкового материала, а внедрение частиц кобальта обеспечило модуль упругости >6 ГПа [20].

Обзор металлокомпозитных материалов

Интерес к нанесению покрытий из интерметаллидных сплавов обусловлен тем, что эти материалы обладают повышенными прочностными, жаростойкими и антикоррозионными свойствами. За счет подбора режима термообработки и вариации состава интерметаллидных соединений можно получать покрытия с заданными свойствами [21–25].

Возможность нанесения интерметаллидов для защиты от коррозии деталей из магниевых сплавов описана в работе [26]. За основу порошковой смеси взят интерметаллид состава $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, содержание которого доходило до 75 % (объемн.). В качестве матрицы применялся алюминий 99%-ной чистоты. В покрытии частицы интерметаллида $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ обладают повышенной твердостью в качестве твердых армирующих керамических частиц. Анализ структуры покрытия показал, что содержание частиц интерметаллида составляет не более 10 % (объемн.), однако при этом увеличивается твердость покрытия с 47,5 НВ до 58,3 НВ (при нагрузке 1 Н), а прочность сцепления значительно выше, чем у покрытия из чистого алюминия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что добавление твердых частиц в порошковую смесь для напыления может существенно уменьшить пористость покрытия, что позволит применять данное покрытие для защиты магниевых сплавов от коррозии.

Одним из важных направлений использования ХГН является техническое обслуживание и капитальный ремонт деталей, изготовленных из титановых сплавов, применяемых в аэрокосмической отрасли. Титан и его сплавы обладают высокой удельной прочностью и превосходной коррозионной стойкостью, однако из-за ограниченной способности к пластической деформации эти сплавы хуже поддаются нанесению покрытий методом ХГН. В качестве решения данной проблемы предложено использование сплава состава Ti-6Al-4V , что обусловлено наиболее высокими значениями пластичности среди титановых сплавов и, как следствие, способностью образовывать адгезионную связь с подложкой благодаря пластической деформации. Напыление проводили в среде гелия, чтобы избежать окисления частиц порошкового материала, а подложку предварительно нагревали до температуры 400 °С. В работе [27] сообщается о высоких адгезионных свойствах (до 250 МПа), низкой пористости (~5 %), а также высокой эффективности осаждения полученного покрытия (~85 %).

Порошковые материалы, содержащие частицы интерметаллидов, могут применяться для повышения стойкости деталей из жаропрочных никелевых сплавов, эксплуатируемых при повышенных температурах. Один из примеров реализации данного подхода – нанесение износостойкого покрытия на основе смеси порошков Ti/Al [28].

Анализ структуры (рис. 1) показывает наличие в покрытии хорошо видимой границы между алюминием и титаном, что свидетельствует об отсутствии признаков сплавления частиц при нанесении покрытия. Показано, что последующая термическая

обработка при температуре 630 °С в течение 5 ч приводит к образованию интерметаллидов состава $TiAl_3$, распределенных в алюминиевой матрице. Данное покрытие может применяться для защиты материалов от высокотемпературного окисления – покрытие не разрушается после 150 циклов испытаний при температуре 950 °С. Анализ микроструктуры окисленного композитного покрытия показал, что в процессе окисления образуется оксид алюминия (Al_2O_3) со сложной структурой, который обладает высокими теплозащитными свойствами.

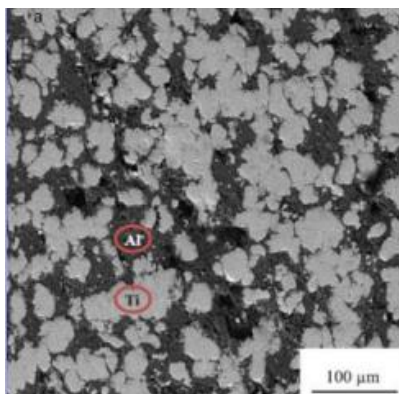


Рис. 1. Структура композиционного покрытия на основе порошковой смеси Ti/Al на жаропрочном никелевом сплаве

На основе систем покрытий «титан–алюминий» также описан способ получения покрытий с регулируемой структурой [29]. Технический результат изобретения – получение интерметаллидного покрытия строго определенной толщины и стехиометрического состава создаваемого интерметаллидного соединения, что достигается путем вариации скорости напыления и перемещения сопла для напыления. Покрытие наносят послойно, затем производят его локальное расплавление с помощью сканирующего лазерного луча, за счет чего после затвердевания формируется интерметаллидное покрытие заданного химического состава, в котором прилегающий к подложке слой состоит преимущественно из алюминия, а верхний слой, отвечающий за трибологические свойства, обогащен интерметаллидным соединением на основе титана.

Один слой состоит из одного металла интерметаллидной композиции, а второй слой – из другого металла выбранной интерметаллидной композиции.

Для управления структурой покрытия и получения монофазного интерметаллидного сплава системы «алюминий–титан» заданного состава в работе [30] описан способ получения порошкового материала, заключающийся в предварительном смешивании порошков алюминия и титана в соотношении 1:3. После смешения порошки уплотняют и отжигают в вакууме с нагревом в высокочастотном магнитном поле до температуры 1300 °С [30].

Несмотря на достигнутые успехи, в настоящее время продолжают работы по совершенствованию технологий нанесения и улучшению свойств интерметаллидных покрытий – в частности, по снижению их хрупкости, повышению пластичности и износостойкости.

Обзор нанопорошковых материалов

Частицы субмикронного размера, соударяющиеся с подложкой, могут прилипать к подложке под действием ван-дер-ваальсовых электростатических сил, поэтому это не может рассматриваться как ХГН, которое характеризуется прочным сцеплением между подложкой и частицами. Кроме того, в связи с высокой стоимостью наноматериалов и

их низкой кинетической энергией при соударении, обусловленной недостаточной массой частиц, необходимо применять их в комбинации с матричными, более крупными частицами. Вместе с тем легирование наноструктурированными порошками может придать ценные свойства покрытиям на их основе и позволит применять материалы, нехарактерные для метода ХГН.

Возможность получения износостойких покрытий на основе соединений вольфрама описано в работе [31]. Изучено композитное покрытие системы карбид вольфрама в матрице на основе кобальта (WC/Co). Для нанесения покрытия использована смесь газов азота и гелия для увеличения кинетической энергии напыляемых частиц. После осаждения покрытия не было отмечено фазовых превращений и/или обезуглеживания карбида вольфрама (WC). Следовательно, применение наноразмерных порошков карбида вольфрама позволяет существенно повысить его содержание в структуре покрытия, что связано с более высокой скоростью наночастиц в потоке газа по сравнению с более крупными частицами (рис. 2).

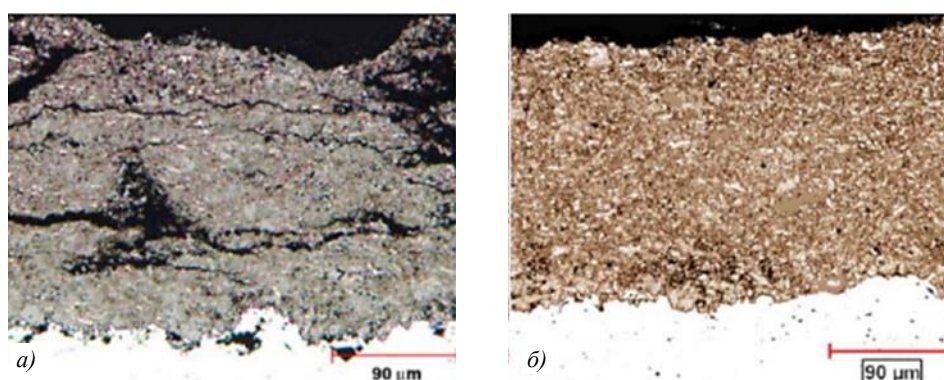


Рис. 2. Структура покрытия системы «карбид вольфрама–кобальт» (WC/Co): *а* – образование дефектов в покрытии при нанесении в среде сжатого воздуха; *б* – нанесение покрытия при использовании смеси газов азота и гелия

Полученное наноструктурированное покрытие системы «карбид вольфрама–кобальт» обладает повышенной твердостью (2050 HV).

Одно из перспективных направлений развития ХГН-покрытий – нанесение систем покрытий «металл–полимер». В частности, применение в этом качестве фторполимеров, которые отличаются химической инертностью, термической стабильностью до температуры 350 °С и придают покрытию антипригарные и супергидрофобные свойства. Описан ряд работ [32] по созданию порошковых материалов с применением наноразмерных частиц фторполимеров. Подчеркивается, что для успешного включения частиц в структуру покрытия необходимы предварительный разогрев материала подложки до температуры 300 °С и напыление покрытия в инертной среде азота.

Разработана технология, позволяющая получать порошковые композиции с включением в структуру наночастиц в высокоскоростных дезинтеграторных установках [33]. Сущность технологии сводится к обработке вращающимися навстречу друг другу со скоростями до 24000 об/мин ударными роторами. Скорости обработки материалов при этом превышают 10 скоростей звука. Предпочтительно использовать фракцию частиц размером от 10 до 60 мкм в качестве матричного материала и проводить поверхностное легирование наночастицами с дисперсностью от 10 до 100 нм (рис. 3). В качестве примера можно привести процесс армирования порошков алюминия наночастицами корунда при следующем режиме: рядность роторов 5, частота вращения роторов 200 с⁻¹, количество проходов 1. Степень армирования матричного порошка при использовании данной технологии составляет >60 %.

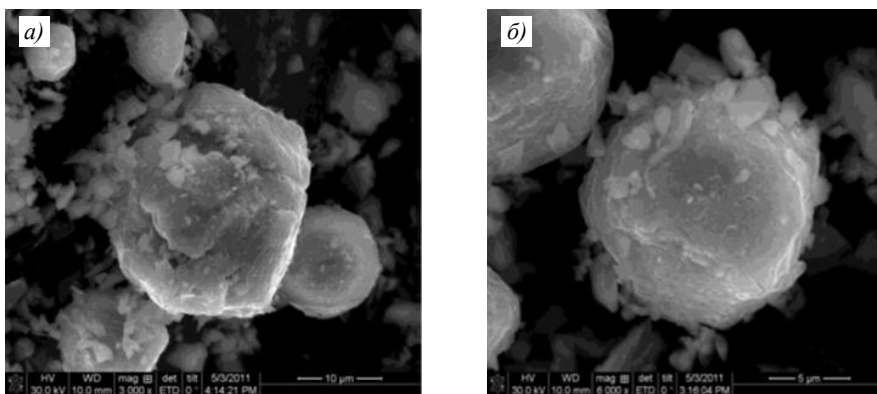


Рис. 3. Фотографии наноструктурированных композиционных порошковых материалов, прошедших обработку в дезинтеграторной установке при частоте вращения ротора 200 с^{-1} при одном (а) и двух (б) проходах соответственно

Отмечено, что создание сложных наноструктурированных армированных частиц позволяет получать практически беспористые покрытия с высокими значениями износостойкости и микротвердости. За счет вариации концентрации корунда в слоях покрытия становится возможным создание функциональных и функционально-градиентных покрытий.

В научно-технической литературе описано применение твердых частиц для модификации ХГН-покрытий и придания им износостойкости, однако в процессе нанесения порошковой смеси пластичных металлов с твердыми частицами возникла проблема эрозионного износа покрытия. Одним из методов решения проблемы является применение твердых наноразмерных частиц, которые вследствие небольшой массы не обладают высокой кинетической энергией. В качестве матричного материала предложен сплав алюминия, цинка и олова с размером частиц не более 20 мкм [34]. Для повышения твердости в покрытие добавляют наноразмерный порошок карбонитрида титана, полученный плазмохимическим синтезом, с диаметром частиц, равным 68 нм . Для удаления оксидной пленки и обеспечения адгезии покрытия в смесь дополнительно вводят порошок оксида кремния с размером частиц 40 мкм . Соотношение «матричный материал/карбонитрид титана/оксид кремния» в исходной смеси составляет $45/50/5 \%$ (по массе) соответственно. Для гомогенизации смеси и внедрения частиц карбонитрида титана в структуру матричного сплава проводят смешение в высокоэнергетической истирательной установке при скорости вращения валов до 2000 об/мин . Продолжительность обработки варьируется от 20 до 30 мин . Для порошкового напыления оптимальна фракция с размером частиц от 60 до 80 мкм , в связи с чем порошковый материал подвергают рассеиванию. Покрытие, сформированное из указанной порошковой смеси, имеет значение твердости не менее 600 HV и пористость $<1 \%$.

Обзор механически легированных материалов

Механическое легирование представляет собой технологию обработки порошка в твердом состоянии, включающую многократную холодную сварку, дробление и повторную сварку частиц порошка в шаровой мельнице с высокой энергией. Шаровое измельчение выполняется с использованием однофазного компонента, в то время как для механического легирования необходимо присутствие по крайней мере двух компонентов. Данный способ получения порошковых материалов позволяет синтезировать порошковые материалы с уникальными функциональными свойствами (с повышенной твердостью и износостойкостью) или для антикоррозионных покрытий с повышенной защитной способностью.

Анализ источников [35–39] показывает, что в настоящее время одним из наиболее эффективных способов повышения прочностных и эксплуатационных свойств ХГН-покрытий является их упрочнение дисперсными частицами, осуществляемое с помощью реакционного механического легирования в высокоэнергетических шаровых мельницах – атриторах.

Металлические композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов, армированные керамическими частицами (например, карбидом кремния), обладают требуемым сочетанием высокой удельной прочности и низкой плотности, а также высокими показателями малоциклового и многоциклового усталости, что делает данную группу материалов перспективной для применения в деталях ГТД.

Применение армирующих частиц карбида кремния микронного размера обеспечивает высокую технологичность процесса механического легирования из-за отсутствия эффекта слипания и комкования частиц армирующего компонента, который наблюдается у наноразмерных частиц за счет развитой поверхности, что, в свою очередь, обеспечивает равномерное распределение армирующего компонента в получаемом порошке. При использовании армирующих частиц размером <2 мкм повышается содержание кислорода в порошке, а также наблюдаются эффекты слипания и комкования частиц. При использовании армирующих частиц размером >10 мкм происходит их неравномерное измельчение в процессе механического легирования, что ведет к снижению равномерности их распределения в получаемом порошке.

Предварительная вакуумная сушка порошков матричного сплава и карбида кремния проводится при температуре 180–220 °С, так как в данном интервале температур происходит наиболее интенсивное испарение влаги с поверхности частиц порошков, что позволяет снизить уровень содержания кислорода и водорода в получаемом металлическом композиционном материале. При температуре <180 °С снижается эффективность удаления влаги с поверхности частиц, при температуре >220 °С могут происходить структурные изменения в материале алюминиевого сплава.

Проведение механического легирования в течение 40–90 ч позволяет получать композиционный порошок с равномерным распределением карбида кремния в алюминиевой матрице с заданным гранулометрическим составом композиционных частиц, так как данный интервал времени соответствует установившейся стадии процесса механического легирования, при котором происходит разрушение крупных агломератов со слоистой структурой [40].

В работе [41] описан способ получения ХГН-покрытий, обладающих повышенными гидрофобными свойствами. Основу для покрытия наносят из порошкового титана с размером частиц 50 мкм, в который добавляют этиловый спирт с политетрафторэтиленом. Содержание политетрафторэтилена варьируется от 3 до 5 % (по массе), а затем смесь равномерно перемешивается в течение не менее 8 ч. Полученную порошковую смесь наносят с использованием метода ХГН в среде азота при температуре предварительного нагрева 600 °С и давлении 2,5 МПа. В результате формируется износостойкое супергидрофобное покрытие. Краевой угол смачивания покрытия, получаемого с использованием этого метода, может достигать 180 градусов, а угол скатывания капли составляет <10 градусов, что свидетельствует о супергидрофобности покрытия.

Одна из важных сфер применения покрытий, наносимых методом ХГН, – обеспечение защиты в условиях воздействия повышенной влажности, растворов хлоридов и других электролитов. Для стальных деталей особенно эффективно применение покрытий на основе цинка, которые обеспечивают протекторный характер защиты. Однако вследствие высокой химической активности (особенно в хлоридсодержащих средах) и хорошей растворимости продуктов коррозии, цинковые покрытия быстро

теряют защитную способность. Покрытия на основе алюминия более устойчивы в коррозионных средах за счет плотной оксидной пленки на поверхности, но быстро теряют протекторные свойства из-за склонности алюминия к пассивации.

Одним из решений данной проблемы может являться создание порошкового материала со сложной структурой, где алюминий (как более мягкий материал) может служить матрицей для частиц цинка.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан порошковый материал марки ВПХ-1 на основе алюминия, механически легированный порошком цинка, который может применяться для противокоррозионной защиты стальных деталей [42]. Структура порошкового материала приведена на рис. 4.

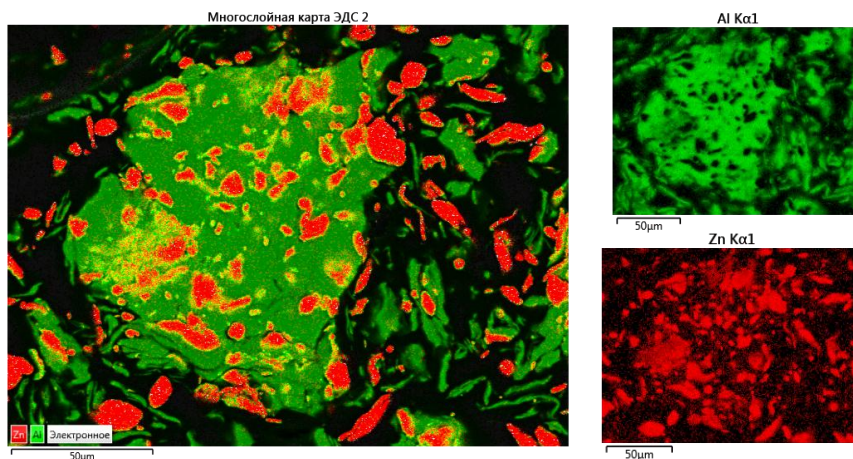


Рис. 4. Микрофотография и карты распределения элементов (картирование) порошковой смеси алюминий-цинк после 10 мин смешения в атриторе

Анализ микрошлифов порошкового материала свидетельствует о деформации алюминиевых частиц и включении в их структуру частиц цинкового порошка вследствие механического легирования при их смешении в атриторе.

На рис. 5 представлены результаты ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана после 2500 ч экспозиции при воздействии 3%-ного солевого раствора.

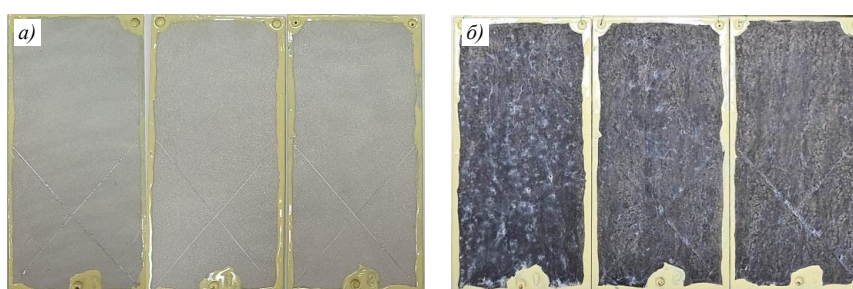


Рис. 5. Внешний вид образцов с антикоррозионными ХГН-покрытиями на основе порошка после перемешивания в атриторе: *а* – исходное состояние; *б* – после 2500 ч испытаний в камере солевого тумана

По результатам испытаний установлено образование продуктов коррозии покрытия белого цвета: смешанных гидроксидов и гидроксихлоридов алюминия и цинка, а также отсутствие продуктов коррозии стали, в том числе в области локального нарушения покрытия (крестообразный надрез до стальной основы), что может свидетельствовать о реализованном механизме протекторной защиты покрытия.

Заключения

В настоящее время активно ведутся исследования в области способов получения и модификации материалов для нанесения покрытий методом ХГН и придания им широкого набора функциональных свойств, что позволит существенно расширить сферу их применения.

Анализ научно-технических литературных данных также показал возможность использования технологии ХГН в качестве нанесения не только противокоррозионных, но и функциональных покрытий, с высокими значениями износостойкости и микротвердости, при этом такие свойства обеспечиваются с применением стандартного технологического оснащения ХГН-оборудования. В перспективе компактность установок позволит проводить ремонтные работы на готовых изделиях. Очень важное значение имеет изучение основных механизмов формирования покрытий и особенностей получения исходного сырья – порошковых материалов. В дальнейшем при заметно меньших затратах усовершенствованная технология ХГН найдет новое применение.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Косарев В.Ф., Алхимов А.П. Технология, оборудование, инструменты // Обработка металлов. 2003. № 3. С. 28–30.
2. Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 1. С. 204–209.
3. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
4. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // ДАН СССР, 1990. Т. 315. № 5. С. 1062–1065.
5. Пескова А.В., Бакрадзе М.М., Тихонов М.М., Куко И.С. Исследование влияния оксидного слоя на поверхности частиц металлопорошковых композиций медно-хромистых сплавов на их технологические свойства // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-28-38.
6. Козлов И.А., Фомина М.А., Демин С.А., Бенариев И., Хмелева К.М. Использование металлопорошковых композиций для устранения дефектов деталей из сплава ВАС-1 методом холодного газодинамического напыления // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106.
7. Ходыкин Л.Г., Няфкин А.Н., Косолапов Д.В., Жабин А.Н. Лазерная сварка металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного тугоплавкими частицами SiC (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
8. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.
9. Dykhuizen R.C., Smith M.F. Gas dynamic principles of cold spray // Journal of Thermal Spray Technology, 1998. Vol. 7. No. 2. P. 205–212.
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.

12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
13. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
14. Коновалов В.В., Дубинский С.В., Макаров А.Д., Доценко А.М. Исследование корреляционных зависимостей между механическими свойствами авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
15. Замалетдинов И.И. Коррозия и защита металлов. Коррозия порошковых материалов: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. С. 18–19.
16. Каблов Е.Н., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В., Виноградов С.С. Перспективные покрытия для защиты от коррозии углеродистых сталей // *Сталь*. 2016. № 6. С. 70–81.
17. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
18. Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 04.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
19. Абиев Р.Ш., Бибик Е.Е., Власов Е.А. и др. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия. СПб.: Профессинал, 2004. 838 с.
20. Moridi A., Azadi M., Farrahi G.H. Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effects // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 243. P. 91–99.
21. Richer P., Zúñiga A., Yandouzi M., Jodoin B. CoNiCrAlY microstructural changes induced during cold gas dynamic spraying // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 203. P. 364–371.
22. Inoue A., Kato A., Zhang T.G.K.S., Masumoto T. Mg–Cu–Y amorphous alloys with high mechanical strengths produced by ametallic mold casting method // *Materials Transactions JIM*. 1991. Vol. 32. P. 609–616.
23. Cold gas dynamic spraying of high strength copper: pat. US7553385 B2; appl. 23.11.04; publ. 30.01.09.
24. Wang C.-C., Mao Y.-W., Shan Z.-W. et al. Real-time, high-resolution study of nanocrystallization and fatigue cracking in a cyclically strained metallic glass // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2013. P. 1–6. DOI: 10.1073/pnas.1320235110.
25. List A., Gärtner F., Schmidt T., Klassen T. Impact conditions for cold spraying of hard metallic glasses // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2012. Vol. 21. P. 531–540.
26. Zhang Y.Y., Wu X.K., Cui H., Zhang J.S. Cold-sprayprocessing of a high density nanocrystalline aluminum alloy 2009 coating using a mixture of as-atomized and as-cryomilled powders // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. Vol. 20. P. 1125–1132.
27. Novoselova T., Fox P., Morgan R., O'Neill W. Experimental study of titanium/aluminium deposits produced by cold gas dynamic spray // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 2775–2783.
28. Kong L.Y., Shen L., Lu B. et al. Preparation of TiAl₃–Al composite coating by cold spray and its high temperature oxidation behavior // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2010. Vol. 19. P. 1206–1210.
29. Lee H., Shin H., Ko K. Effects of gas pressure of cold spray on the formation of Al-based intermetallic compound // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2010. Vol. 19. P. 102–109.
30. Получение монофазного интерметаллидного сплава на основе системы алюминий–титан: пат. RU 2561952; заявл. 27.02.14, опубли. 10.09.15.
31. Liang Y., Shi B., Yang X. et al. Microstructure and nano-mechanical property of cold spray Co-base refractory alloy coating // *Acta Metall. Sin. (English Letters)*. 2011. Vol. 24. P. 190–194.

32. King P.C., Zahiri S.H., Jahedi M.Z. Rare earth/metal composite formation by cold spray // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2008. Vol. 17. P. 221–227.
33. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий: пат. 2354749 Рос. Федерация; заявл. 12.04.07; опубл. 10.05.09.
34. Способ получения композиционного армированного порошкового материала: пат. RU 2573309 заявл. 08.07.14, опубл. 20.01.16.
35. Lee H., Shin H., Ko K. Effects of gas pressure of cold spray on the formation of Al-based intermetallic compound // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2010. Vol. 19. P. 102–109.
36. Liang Y., Shi B., Yang X., Zhang J., Meng X. Microstructure and nano-mechanical property of cold spray Co-base refractory alloy coating // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2011. Vol. 24. P. 190–194.
37. Al-Mangour B., Mongrain R., Irissou E., Yue S. Improving the strength and corrosion resistance of 316L stainless steel for biomedical applications using cold spray // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 216. P. 297–307.
38. Kang H.-K., Kang S.B. Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray // *Scripta Materialia*. 2003. Vol. 49. P. 1169–1174.
39. King P.C., Zahiri S.H., Jahedi M.Z. Rare earth/metal composite formation by cold spray // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2008. Vol. 17. P. 221–227.
40. Yang G.-J., Li C.-J., Han F. et al. Low temperature deposition and characterization of TiO₂ photocatalytic film through cold spray // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. P. 3979–3982.
41. Bu H., Yandouzi M., Lu C. et al. Cold spray blended Al+Mg 17Al 12 coating for corrosion protection of AZ91D magnesium alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 207. P. 155–162.
42. Козлов И.А., Никифоров А.А., Демин С.А., Вдовин А.И. Использование металлопорошковой композиции системы цинк–алюминий для нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98.

References

1. Kosarev V.F., Alkhimov A.P. Technology, equipment, tools. *Obrabotka metallov*, 2003, no. 3, pp. 28–30.
2. Alkhimov A.P., Gulidov A.I., Kosarev V.F., Nesterovich N.I. Peculiarities of deformation of microparticles upon impact with a solid barrier. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 204–209.
3. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice*. Moscow: Fizmatlit, 2010, 536 p.
4. Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Papyrin A.N. The method of "cold" gas-dynamic spraying. *DAN SSSR*, 1990, vol. 315, no. 5, pp. 1062–1065.
5. Peskova A.V., Bakradze M.M., Tikhonov M.M., Kuko I.S. Investigation of the influence of the oxide layer on the surface of particles metal-powder compositions of copper-chromium alloys on their technological properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May, 18 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-28-38.
6. Kozlov I.A., Fomina M.A., Demin S.A., Benarieb I., Khmeleva K.M. Use of metal powder compositions to remove defects of parts from VAS-1 alloy by cold gas-dynamic spraying method. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106.
7. Khodykin L.G., Nyafkin A.N., Kosolapov D.V., Zhabin A.N. Laser welding of metal composite materials based on aluminium alloy reinforced with refractory particles SiC (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
8. Druzhnova Ya.S. Development of methods for thermal spraying of hardening tires based on tungsten and chromium carbides (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.
9. Dykhuizen R.C., Smith M.F. Gas dynamic principles of cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, no. 2, pp. 205–212.

10. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
12. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
13. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
14. Konovalov V.V., Dubinskiy S.V., Makarov A.D., Dotsenko A.M. Research of correlation dependencies between mechanical properties of aviation materials. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
15. Zamaletdinov I.I. *Corrosion and protection of metals. Corrosion of powder materials*: textbook. Perm: Perm State Tech. Univ, 2007, pp. 18–19.
16. Kablov E.N., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Promising coatings for corrosion protection of carbon steels. *Stal*, 2016, no. 6, pp. 70–81.
17. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
18. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold spray coatings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 04, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
19. Abiev R.Sh., Bibik E.E., Vlasov E.A. et al. *New reference book of a chemist and technologist. Electrode processes. Chemical kinetics and diffusion. colloidal chemistry*. St. Petersburg: Professional, 2004, 838 p.
20. Moridi A., Azadi M., Farrahi G.H. Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effects. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 243, pp. 91–99.
21. Richer P., Zúñiga A., Yandouzi M., Jodoin B. CoNiCrAlY microstructural changes induced during cold gas dynamic spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 203, pp. 364–371.
22. Inoue A., Kato A., Zhang T.G.K.S., Masumoto T. Mg–Cu–Y amorphous alloys with high mechanical strengths produced by ametallic mold casting method. *Materials Transactions JIM*, 1991, vol. 32, pp. 609–616.
23. *Cold gas dynamic spraying of high strength copper*: pat. US7553385 B2; appl. 23.11.04; publ. 30.01.09.
24. Wang C.-C., Mao Y.-W., Shan Z.-W. et al. Real-time, high-resolution study of nanocrystallization and fatigue cracking in a cyclically strained metallic glass. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1073/pnas.1320235110.
25. List A., Gärtner F., Schmidt T., Klassen T. Impact conditions for cold spraying of hard metallic glasses. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, pp. 531–540.
26. Zhang Y.Y., Wu X.K., Cui H., Zhang J.S. Cold-sprayprocessing of a high density nanocrystalline aluminum alloy 2009 coating using a mixture of as-atomized and as-cryomilled powders. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, pp. 1125–1132.
27. Novoselova T., Fox P., Morgan R., O'Neill W. Experimental study of titanium/aluminium deposits produced by cold gas dynamic spray. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, pp. 2775–2783.
28. Kong L.Y., Shen L., Lu B. et al. Preparation of TiAl₃–Al composite coating by cold spray and its high temperature oxidation behavior. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, pp. 1206–1210.
29. Lee H., Shin H., Ko K. Effects of gas pressure of cold spray on the formation of Al-based intermetallic compound. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, pp. 102–109.

30. Obtaining a single-phase intermetallic alloy based on the aluminum-titanium system: pat. RU 2561952; appl. 27.02.14, publ. 10.09.15.
31. Liang Y., Shi B., Yang X. et al. Microstructure and nano-mechanical property of cold spray Co-base refractory alloy coating. *Acta Metall. Sin. (English Letters)*, 2011, vol. 24, pp. 190–194.
32. King P.C., Zahiri S.H., Jahedi M.Z. Rare earth/metal composite formation by cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, vol. 17, pp. 221–227.
33. Method for obtaining nanostructured functionally graded wear-resistant coatings: pat. 2354749 Rus. Federation; appl. 12.04.07; publ. 10.05.09.
34. Method for producing composite reinforced powder material: pat. RU 2573309; appl. 08.07.14, publ. 20.01.16.
35. Lee H., Shin H., Ko K. Effects of gas pressure of cold spray on the formation of Al-based intermetallic compound. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, pp. 102–109.
36. Liang Y., Shi B., Yang X., Zhang J., Meng X. Microstructure and nano-mechanical property of cold spray Co-base refractory alloy coating. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2011, vol. 24, pp. 190–194.
37. Al-Mangour B., Mongrain R., Irissou E., Yue S. Improving the strength and corrosion resistance of 316L stainless steel for biomedical applications using cold spray. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 216, pp. 297–307.
38. Kang H.-K., Kang S.B. Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray. *Scripta Materialia*, 2003, vol. 49, pp. 1169–1174.
39. King P.C., Zahiri S.H., Jahedi M.Z. Rare earth/metal composite formation by cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, vol. 17, pp. 221–227.
40. Yang G.-J., Li C.-J., Han F. et al. Low temperature deposition and characterization of TiO₂ photocatalytic film through cold spray. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, pp. 3979–3982.
41. Bu H., Yandouzi M., Lu C. et al. Cold spray blended Al+Mg 17Al 12 coating for corrosion protection of AZ91D magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 155–162.
42. Kozlov I.A., Nikiforov A.A., Demin S.A., Vdovin A.I. Use of metal powder composition of the zinc–aluminum system for application of a protective coating by the method of cold gas-dynamic spraying. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 03, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98.

Информация об авторах

Козлов Илья Андреевич, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомина Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Демин Семен Анатольевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Васильев Алексей Сергеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Илья А. Козлов, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Fomina, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Semyon A. Demin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey S. Vasiliev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.06.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.06.2023.
The article was submitted 09.06.2023; approved and accepted for publication after reviewing 13.06.2023.