

Научная статья

УДК 669.058

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ СИСТЕМЫ ЦИНК–АЛЮМИНИЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

*И.А. Козлов<sup>1</sup>, А.А. Никифоров<sup>1</sup>, С.А. Демин<sup>1</sup>, А.И. Вдовин<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** В машиностроении нанесение покрытий методом холодного газодинамического напыления (ХГН) чаще всего применяется для устранения механических повреждений (трещины, царапины) и дефектов, а также для обеспечения противокоррозионной защиты на стальных деталях. Повышение эффективности защитных покрытий, наносимых методом ХГН, за счет создания новых порошковых материалов является основной задачей исследований в этой области.

**Ключевые слова:** цинковые покрытия, алюминиевые покрытия, механическое легирование, Димет-405, холодное газодинамическое напыление

**Для цитирования:** 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98.

Scientific article

## USE OF METAL POWDER COMPOSITION OF THE ZINC–ALUMINUM SYSTEM FOR APPLICATION OF A PROTECTIVE COATING BY THE METHOD OF COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

*I.A. Kozlov<sup>1</sup>, A.A. Nikiforov<sup>1</sup>, S.A. Demin<sup>1</sup>, A.I. Vdovin<sup>1</sup>*

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

**Annotation.** In mechanical engineering, coating by cold gas-dynamic spraying (CGN) is most often used to eliminate mechanical damage (cracks, scratches) and defects, as well as to provide corrosion protection on steel parts. Improving the effectiveness of protective coatings applied by the CGN method by creating new powder materials is the main task of research in this area.

**Keywords:** zinc coatings, aluminum coatings, mechanical alloying, Dimet-405, cold gas dynamic spraying

**For citation:** 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. 7 (113), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98.

### Введение

Для получения антикоррозионных покрытий стальных деталей методом холодного газодинамического напыления (ХГН) в основном применяют порошковые материалы на основе алюминия и цинка, а также их смесей и сплавов [1–3]. Цинковые покрытия обеспечивают протекторный характер защиты стали за счет более отрицательного значения потенциала при контакте с коррозионно-активными средами. Так, при наличии в покрытии сколов, пористости и прочих дефектов происходит торможение коррозионных процессов стали и активное растворение цинкового покрытия [4–7]. Цинковые покрытия характеризуются высокой скоростью коррозионных процессов из-за большой разницы значений стационарного потенциала в системе цинк–сталь и повышенной растворимостью продуктов коррозии цинка, препятствующей созданию диффузионных ограничений для проникновения коррозионно-активной среды [8–10].

Покрытия на основе алюминия обладают более высокой коррозионной стойкостью (по сравнению с цинковыми покрытиями) за счет склонности к пассивации вследствие образования плотных оксидных пленок. Значение электрохимического потенциала покрытия при этом приближается к значению потенциала стали, что приводит к потере протекторного характера защиты покрытий [11–15].

В рамках проведенных исследований оценена защитная способность покрытий, нанесенных методом ХГН на стальные образцы. Для придания коррозионной стойкости ХГН-покрытиям и повышения эффективности противокоррозионной защиты конструкционных сталей предлагается использование смеси порошков алюминия и цинка [16–18].

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

### Материалы и методы

Исследования микроструктуры защитных покрытий проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения при увеличении  $\times 500$ .

Для оценки эффективности защитных покрытий проведены ускоренные коррозионные испытания в камере солевого тумана (КСТ) в соответствии с ГОСТ 9.308–85 (метод 1) с непрерывным распылением 5 %-ного раствора хлористого натрия в течение 720 ч.

Коррозионные свойства оценивали путем измерения электрохимических характеристик в 3 %-ном растворе хлорида натрия при температуре  $20 \pm 5$  °С. Для измерений использовали прижимную трехэлектродную ячейку объемом 250 мл с площадью контакта  $S = 1$  см<sup>2</sup>. Исследуемые образцы использовали в качестве рабочих электродов. Потенциал рабочего электрода измеряли относительно хлоридсеребряного (Ag/AgCl) электрода сравнения  $E = +197 \pm 3$  мВ/н.в.э. Противоеlectродом служила платиновая сетка. Исследование проводили на потенциостате/гальваностате Solartron 1287 под управлением программного обеспечения CorrWare, обработку результатов производили с помощью программы CView.

Цель данной работы – изучение коррозионного поведения покрытий, наносимых методом ХГН, в зависимости от способа получения и состава исходной напыляемой порошковой смеси.

### Результаты и обсуждение

#### *Технология нанесения ХГН-покрытий*

Основными покрытиями, применяемыми для защиты от коррозии стальных деталей в изделиях авиационной техники, являются кадмиевое и цинковое покрытия, наносимые гальваническим способом. Ремонтировать такие покрытия достаточно

трудоемко из-за необходимости демонтажа узла с деталью, удаления старого покрытия, нанесения нового и проведения операции обезводороживания.

Альтернативной технологией нанесения защитных покрытий может являться метод ХГН, позволяющий наносить высококачественные покрытия на основе легкоплавких металлов (цинк, алюминий).

К преимуществам технологии ХГН следует отнести: отсутствие вредных и агрессивных газов, окисления металла частиц и подложки, излучений и других опасных факторов, а также технологическую простоту нанесения покрытий за счет компактности установки.

Метод нанесения ХГН-покрытий при восстановлении противокоррозионной защиты не приводит к деформации изделия, возникновению внутренних напряжений, структурных превращений металла изделия и может быть использован для локального восстановления при устранении дефектов деталей, а также нанесения различных функциональных покрытий – в частности, для защиты от воздействия коррозионно-активных сред.

Однако в настоящее время отсутствуют четкие представления о влиянии технологии формирования покрытий методом ХГН на механические свойства сталей, применяемых в авиационной промышленности.

Напыление покрытий происходит благодаря приданию металлическим частицам ускорения до сверхзвуковой скорости и последующей их пластической деформации при соударении с материалом подложки.

На рис. 1 представлено изображение порошкового материала для напыления покрытий методом ХГН.



Рис. 1. Порошковый материал для напыления покрытий методом холодного газодинамического напыления

Порошковый материал для напыления покрытий методом ХГН представляет собой смесь металлических порошков, формирующих основную структуру покрытий, с порошком корунда. Порошок корунда необходим для создания микрошероховатостей на поверхности подложки, обеспечивающих повышение адгезионных свойств покрытий, а также для механического уплотнения металлической матрицы покрытия, что в итоге приводит к снижению их пористости. В случае применения мягких металлических материалов возможно внедрение частиц корунда в структуру покрытия.

Технология нанесения покрытий методом ХГН эффективна для антикоррозионной защиты и позволяет наносить покрытия на сложнопрофильные детали, а также на локальные участки поверхности с коррозионными поражениями (рис. 2).

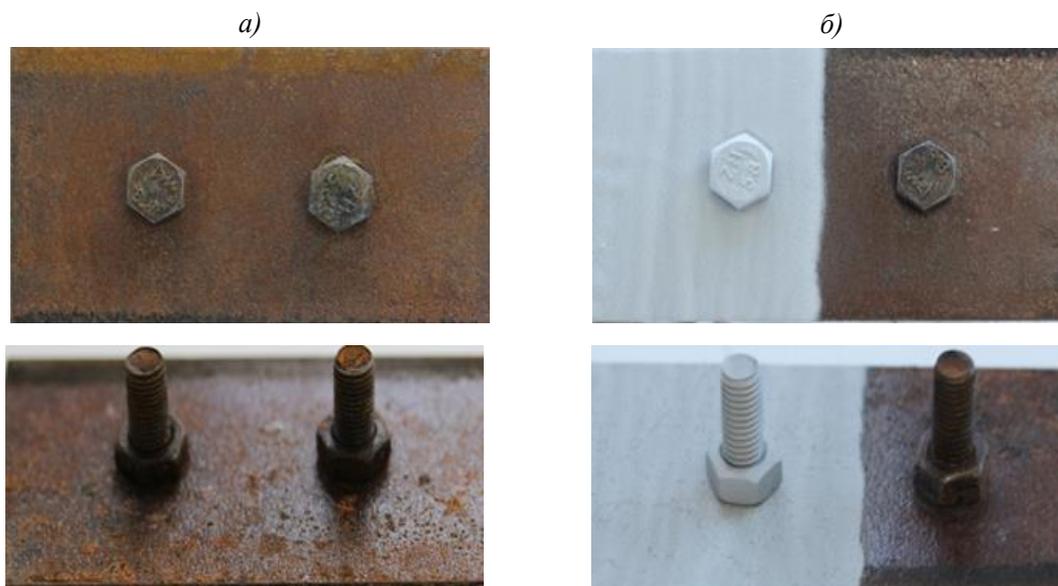


Рис. 2. Пример реализации технологии нанесения защитных покрытий методом холодного газодинамического напыления на стальную деталь сложного профиля – внешний вид детали с коррозионными поражениями до нанесения покрытия (а) и после нанесения покрытия из порошковой смеси Al–Zn (б)

Проведен выбор технологических приемов изготовления экспериментальных порошков на основе алюминия для нанесения антикоррозионного покрытия методом ХГН на образцы из низколегированных сталей типа 30ХГСА, и методом ускоренных коррозионных испытаний исследовано влияние состава экспериментальных порошков на защитную способность ХГН-покрытий.

Цель данного исследования – изучение возможности легирования порошковых материалов на основе алюминия порошком цинка для придания ХГН-покрытиям повышенной коррозионной стойкости с сохранением протекторного действия по отношению к стали. Механическое легирование порошка алюминия цинковым порошком проводили в шестикамерной лабораторной системе Multi-Tank Attritor System 01-HD с применением размольных шаров из нержавеющей стали при скорости вращения 600 об/мин.

Покрытие наносили на установке Димет-405 с применением сопла из нержавеющей стали диаметром 5 мм, давления 0,6 МПа и температуре воздушного потока 75 °С.

Структура покрытий, нанесенных методом ХГН, в зависимости от состава порошковой смеси приведена на рис. 3.

По результатам исследований структуры покрытий, нанесенных методом ХГН, установлено, что применение порошков на основе материала АСД-4 позволяет формировать сплошные покрытия с высокими адгезионными свойствами к стальной подложке. В структуре цинковых покрытий наблюдаются включения частиц корунда. Структура покрытия на основе смеси порошков алюминия с цинком, которая является матрицей для частиц цинка, сформирована из частиц алюминия.

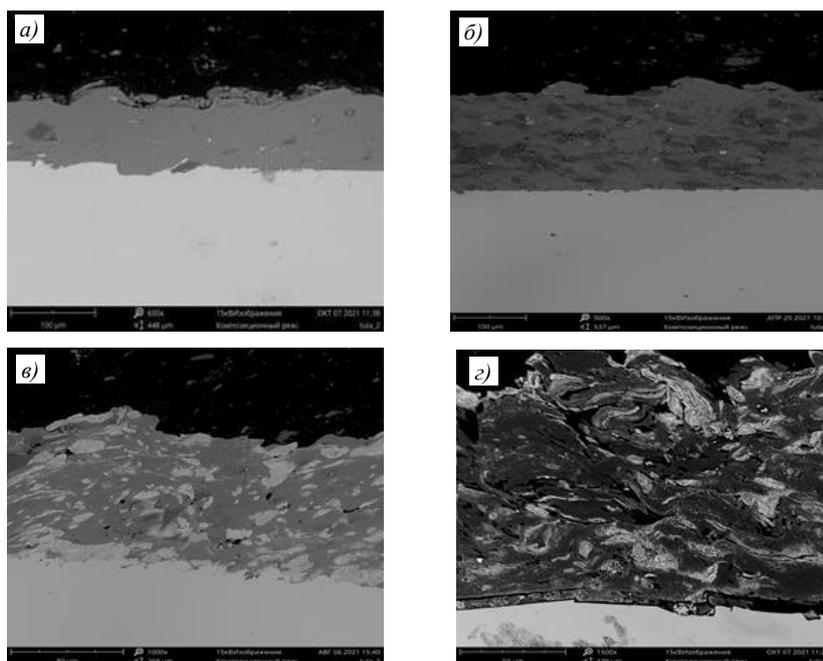


Рис. 3. Структура покрытий, нанесенных методом ХГН, в зависимости от состава порошковой смеси на основе материалов АСД-4 (а) и ПЦВД-0 (б), а также смеси алюминий–цинк без легирования (в) и с механическим легированием (г)

Проведение предварительного механического легирования порошка алюминия порошком цинка способствует формированию сложной структуры ХГН-покрытий, состоящей из смеси слоев цинка и алюминия с повышенным содержанием алюминия (рис. 4).

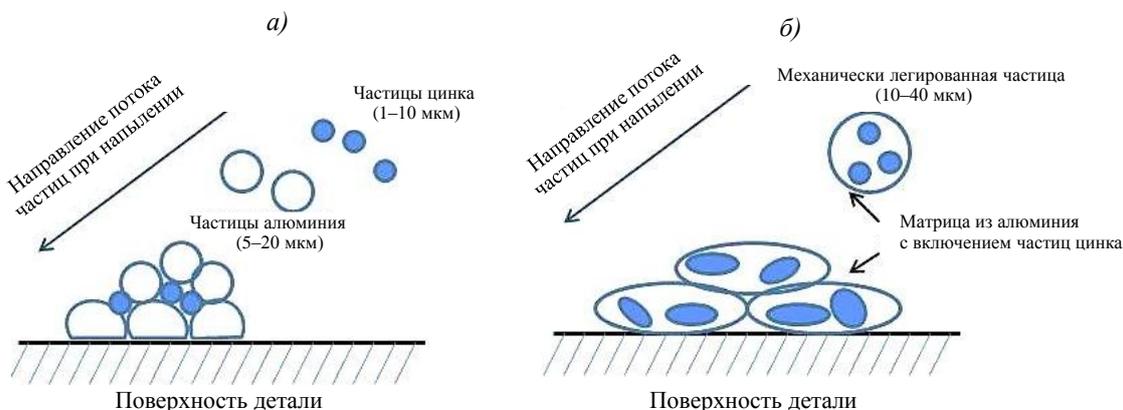


Рис. 4. Схема формирования покрытий на основе смеси порошков алюминия с цинком – структура покрытий на основе механической смеси порошков (а) и порошков после механического легирования (б)

При соударении частиц порошковой смеси алюминий–цинк со стальной подложкой наблюдается значительная деформация частиц. При дальнейшем формировании покрытия деформация частиц в более мягкой матрице значительно менее выражена – это приводит к образованию структуры, состоящей из алюминия с четкими включениями частиц цинка.

Проведение предварительного механического легирования порошкового материала приводит к укрупнению частиц. Более крупные частицы обладают большей массой и, как следствие, большей кинетической энергией. При соударении таких частиц наблюдается пластическая деформация частиц, приводящая к появлению слоистой структуры.

**Коррозионное поведение ХГН-покрытий**

Для определения влияния особенностей структуры на коррозионное поведение ХГН-покрытий проведены ускоренные коррозионные испытания в камере солевого тумана и электрохимические исследования потенциодинамическим методом (рис. 5–7).

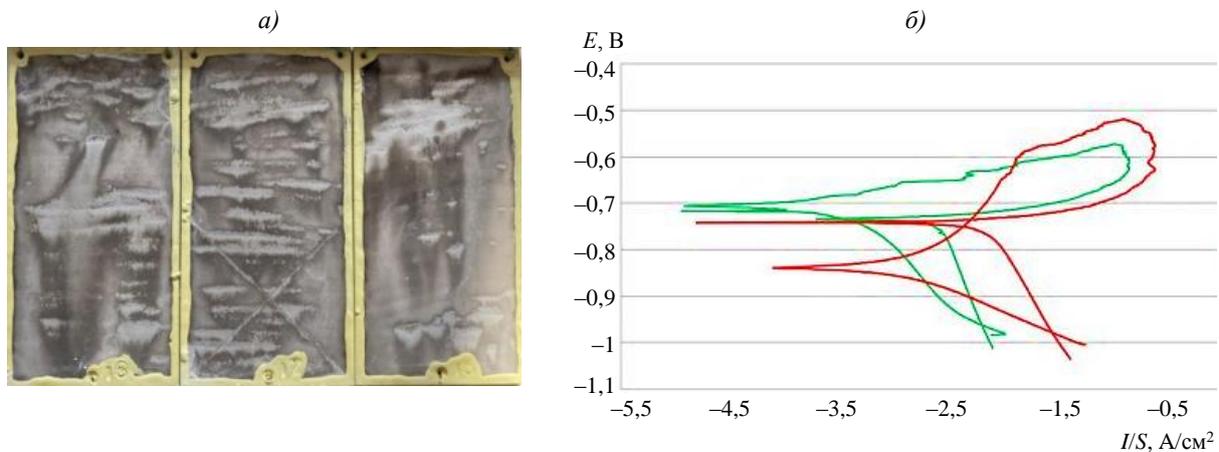


Рис. 5. Коррозионное поведение стальных образцов с покрытием на основе алюминиевого порошка: *a* – внешний вид образцов после 2500 ч в камере солевого тумана; *б* – потенциодинамические кривые, полученные при скорости развертки потенциала 1,0 мВ/с на образцах из стали с ХГН-покрытием после их выдержки в 3 %-ном растворе NaCl в течение 1 (—) и 24 ч (—)

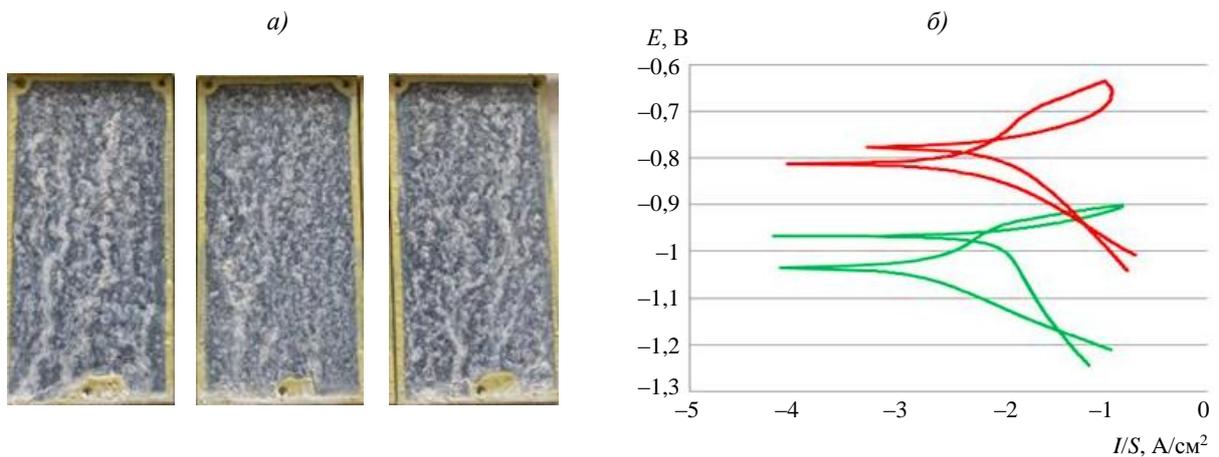


Рис. 6. Коррозионное поведение стальных образцов с покрытием на основе цинкового порошка: *a* – внешний вид образцов после 2500 ч в камере солевого тумана; *б* – потенциодинамические кривые, полученные при скорости развертки потенциала 1,0 мВ/с на образцах из стали с ХГН-покрытием после их выдержки в 3 %-ном растворе NaCl в течение 1 (—) и 24 ч (—)

Коррозионное поведение покрытия на основе алюминиевого порошка проявляется в виде питтинговой коррозии, характерной для алюминиевых сплавов. Протекторное действие покрытия по отношению к стали незначительно проявляется в начальный период коррозионных испытаний при значении потенциала  $E_{исх} = -0,712$  В, однако при воздействии коррозионной среды наступает активация покрытия и происходит снижение значения стационарного потенциала –  $E_{24 ч} = -0,840$  В, что проявляется уже через 24 ч выдержки в коррозионно-активной среде.

При ускоренных коррозионных испытаниях появление первых объемных продуктов коррозии алюминия белого цвета наблюдается уже через 48 ч экспозиции, что свидетельствует о низкой коррозионной стойкости покрытия.

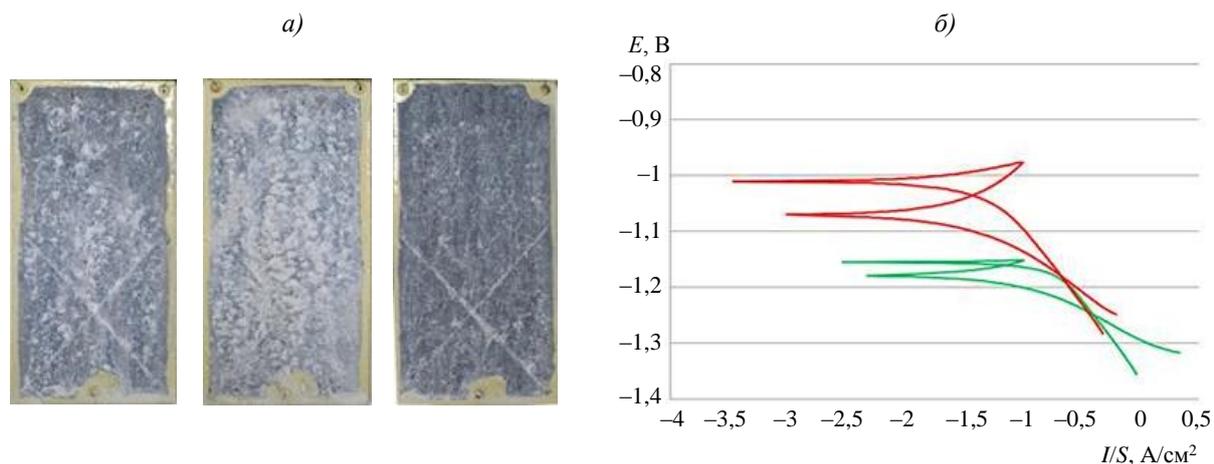


Рис. 7. Коррозионное поведение стальных образцов с покрытием на основе смеси алюминиевого и цинкового порошков: *a* – внешний вид образцов после 2500 ч в камере солевого тумана; *б* – потенциодинамические кривые, полученные при скорости развертки потенциала 1,0 мВ/с на образцах из стали с ХГН-покрытием после их выдержки в 3 %-ном растворе NaCl в течение 1 (—) и 24 ч (—)

Для порошковых материалов на основе цинка на потенциодинамических кривых наблюдаются зависимости, характерные для анодного растворения цинка без питтинговой коррозии и самопассивации. Наблюдается активное растворение цинка, о чем свидетельствует значение стационарного потенциала –  $E_{исх} = -1,057$  В.

После 24 ч выдержки в коррозионно-активной среде значение потенциала увеличивается до значения  $E_{24 ч} = -0,8$  В, что свидетельствует о растворении активной составляющей покрытия, небольшом уменьшении значений токов коррозии и пассивации покрытия за счет активных коррозионных процессов на поверхности.

При ускоренных коррозионных испытаниях также наблюдается активное растворение покрытия, что проявляется в виде образования обильных белых продуктов гидроксидов цинка. Первые продукты коррозии появляются через 24 ч экспозиции в КСТ, через 168 ч образование продуктов коррозии наблюдается на 100 % площади образца.

Для коррозионного поведения стальных образцов с ХГН-покрытием на основе смеси алюминиевого и цинкового порошков на потенциодинамических кривых наблюдаются зависимости, характерные для анодного растворения цинка без питтинговой коррозии, что свидетельствует об отсутствии коррозионного процесса алюминиевой матрицы. Наблюдается активное растворение цинка, о чем свидетельствует значение стационарного потенциала ( $E_{исх} = -1,170$  В). После 24 ч выдержки в коррозионно-активной среде значение потенциала увеличивается до значения  $E_{24 ч} = -1,003$  В, что свидетельствует о растворении активной составляющей покрытия, уменьшении значений токов коррозии и пассивации покрытия.

При экспозиции в КСТ образцов с покрытием на основе смеси алюминиевого и цинкового порошков в начальный момент экспозиции наблюдается образование белых продуктов коррозии – не менее 50 % от площади поверхности через 72 ч испытаний. При дальнейших коррозионных испытаниях активный коррозионный процесс растворения покрытия замедляется, что связано с началом растворения алюминиевой матрицы, склонной к самопассивации.

Проведение операции механического легирования порошков цинка и алюминия для ХГН-покрытий приводит к значительному увеличению их коррозионной стойкости. Начальное значение стационарного потенциала ( $E_{исх} = -1,180$  В) соответствует стационарному потенциалу покрытий, содержащих цинк, однако слоистая структура способствует

созданию многочисленных диффузионных ограничений в покрытии для проникновения коррозионной среды. По мере развития коррозионных процессов и образования продуктов коррозии в порах покрытия концентрация кислорода в водной коррозионной среде, заполняющей сквозную пору, снижается. Наступает момент, когда кислород в зону коррозии (на дне сквозной поры) поступает только с наружной поверхности покрытия, поэтому, чем толще покрытие, тем длиннее путь, который должен пройти кислород от поверхности покрытия до дна сквозной поры.

Низкой скоростью диффузии кислорода можно объяснить высокую защитную способность ХГН-покрытий, сформированных из порошковой смеси на основе цинка и алюминия, после проведения механического легирования. Повышенную коррозионную стойкость данных покрытий можно объяснить отсутствием контакта с коррозионно-активной средой частиц цинка. Частицы цинка после проведения механического легирования распределены в матрице, состоящей из частиц алюминия, и приобретают коррозионную стойкость алюминия с сохранением значений потенциала и протекторной противокоррозионной защиты, характерной для цинковых покрытий.

### Заключения

Исследования по нанесению покрытий методом ХГН начались в России в первой половине 1980-х гг. В период с 1980 по 2022 г. получено более 200 патентов на различные конструктивные модификации установок для напыления, а также в области нанесения металлических покрытий различного функционального назначения.

Наилучшими покрытиями для низколегированных сталей традиционно считаются цинковые покрытия, которые обеспечивают протекторный характер защиты, однако они характеризуются низкой коррозионной стойкостью в хлоридсодержащих средах. Покрытия на основе алюминия существенно более стойки за счет склонности алюминия к самопассивации, однако обладают значительно менее выраженным протекторным действием по отношению к стали.

В данной статье исследованы образцы с покрытиями, наносимыми методом ХГН. Исследована структура покрытий на основе алюминия, цинка и их смеси. Показано, что после проведения механического легирования исходной порошковой смеси структура покрытия меняется на слоистую.

Электрохимическими исследованиями и ускоренными коррозионными испытаниями установлено, что предложенный способ механического легирования существенно повышает коррозионную стойкость и защитную способность ХГН-покрытий.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., 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.
3. 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.
4. 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: 12.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

5. 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.
6. Плохих А.И., Сафонов М.Д., Колесников А.Г., Карпухин С.Д. Механизм релаксации межслойных напряжений в многослойных стальных материалах // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 26–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-26-32.
7. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.
8. 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.
9. 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: 04.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
10. Абиев Р.Ш., Бибики 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.
11. Косарев В.Ф., Алхимов А.П. Технология, оборудование, инструменты // *Обработка металлов*. 2003. № 3. С. 28–30.
12. 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.
13. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
14. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // *ДАН СССР*. 1990. Т. 315. № 5. С. 1062–1065.
15. Баранов А.Н., Гусева Е.А., Комова Е.М. Исследование коррозионной стойкости сталей, применяемых для изготовления дражного оборудования для добычи золота // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 1 (21). С. 102–106.
16. Росляков В.И. Повышение коррозионной стойкости и надежность бытовой техники при эксплуатации // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2012. № 4 (22). С. 29–32.
17. Замалетдинов И.И. Коррозия и защита металлов. Коррозия порошковых материалов: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. С. 18–19.
18. Россина Н.Г., Попов Н.А., Жилиякова М.А., Корелин А.В. Коррозия и защита металлов: учеб.-метод. пособие в 2 ч. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2019. Ч. 1: Методы исследований коррозионных процессов. С. 108.

#### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. 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, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

5. Konovalov V.V., Dubinskiy S.V., Makarov A.D., Dotsenko A.M. Research of correlation dependencies between mechanical properties of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
6. Plokhikh A.I., Safonov M.D., Kolesnikov A.G., Karpukhin S.D. Mechanism of interlaminar stress relaxation in multilayer steel materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 26–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-26-32.
7. Kurs M.G., Nikolayev E.V., Abramov D.V. Full-scale and accelerated tests of metallic and non-metallic materials: key factors and specialized stands. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.
8. 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. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
9. 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 4, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
10. 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.
11. Kosarev V.F., Alkhimov A.P. Technology, equipment, tools. *Obrabotka metallov*, 2003, no. 3, pp. 28–30.
12. 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.
13. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice*. Moscow: Fizmatlit, 2010, 536 p.
14. Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Papyrin A.N. The method of "cold" gas-dynamic. *DAN SSSR*, 1990, vol. 315, no. 5, pp. 1062–1065.
15. Baranov A.N., Guseva E.A., Komova E.M. Investigation of the corrosion resistance of steels used for the manufacture of dredge equipment for gold mining. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 1 (21), pp. 102–106.
16. Roslyakov V.I. Improving the corrosion resistance and reliability of household appliances during operation. *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, 2012, no. 4 (22), pp. 29–32.
17. Zamaletdinov I.I. *Corrosion and protection of metals. Corrosion of powder materials: textbook*. Perm: Perm. State Tech. University, 2007, pp. 18–19.
18. Rossina N.G., Popov N.A., Zhilyakova M.A., Korelin A.V. *Corrosion and protection of metals: textbook in 2 parts*. Ekaterinburg: Ural University, 2019, part 1: Methods for studying corrosion processes, p. 108.

**Информация об авторах**

**Козлов Илья Андреевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Никифоров Андрей Александрович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Демин Семен Анатольевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Вдовин Александр Ильич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Ilya A. Kozlov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Andrey A. Nikiforov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Alexander I. Vdovin**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 19.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.05.2022.

The article was submitted 19.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.05.2022.