

Научная статья

УДК 629.7.023.22

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-126-136

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ТЕРМОДИФфуЗИОННОГО АЛЮМИНИЙ-ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ

Д.А. Софронова¹, В.Н. Ярошевская¹, М.А. Кольцова¹,
С.Л. Лонский¹, А.В. Князев¹, Е.В. Куршев¹

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

Аннотация. Исследовано влияние состава порошковой смеси и режимов термообработки на формирование термодиффузионных алюминий-цинковых покрытий. Установлено, что при температуре формирования 450 °С покрытия имеют внешний слой на основе алюминия. При температуре 380 °С заметной дифференциации слоев в покрытии не наблюдается, содержание алюминия в цинковой матрице составляет 10 %. Явного влияния состава смеси и режима термообработки на плотность тока и потенциал коррозии не установлено. В среде 3%-ного раствора NaCl плотность тока и потенциал коррозии составляют 10^{-6} А/см² и 0,9 В соответственно.

Ключевые слова: термодиффузионные покрытия, цинк, алюминий, сталь, коррозия, защитные покрытия

Для цитирования: Софронова Д.А., Ярошевская В.Н., Кольцова М.А., Лонский С.Л., Князев А.В., Куршев Е.В. Влияние состава порошковой смеси и продолжительности термообработки на свойства термодиффузионного алюминий-цинкового покрытия // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-126-136.

Scientific article

THE IMPLICATION OF POWDER MIXTURE COMPOSITION AND HEAT TREATMENT DURATION ON THE PROPERTIES OF THERMAL DIFFUSION ALUMINIUM-ZINC COATING

D.A. Sofronova¹, V.N. Yaroshevskaya¹, M.A. Koltsova¹,
S.L. Lonskii¹, A.V. Knyazev¹, E.V. Kurshev¹

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 influence of the composition of the powder mixture and of the heat treatment modes upon the formation of thermodiffusional aluminium-zinc coatings has been investigated. It was found that at a temperature of 450 °C the coatings have aluminium based outer layer, at a temperature of 380 °C the aluminum content in the zinc is about 10 %. The obvious influence of the composition of the mixture and of the heat treatment regime on the corrosion properties has not been established, the corrosion current is in the order of 10^{-6} A/cm², and the corrosion potential is about 0,9 V in 3 % NaCl solution.

Keywords: thermodiffusion coatings, zinc, aluminium, steel, corrosion, protective coatings

For citation: Sofronova D.A., Yaroshevskaya V.N., Koltsova M.A., Lonskii S.L., Knyazev A.V., Kurshev E.V. The implication of powder mixture composition and heat treatment duration on the properties of thermal diffusion aluminium-zinc coating. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-126-136.

Введение

Важнейшими задачами государственной промышленной политики в области авиастроения являются разработка и производство конкурентоспособных изделий гражданской вертолетной техники [1–4]. Однако в настоящее время для изготовления конструкций изделий вертолетной техники применяется существенная доля импортных материалов. В силу текущей санкционной политики в отношении Российской Федерации необходимо снизить зависимость авиационной промышленности от разработок и поставок материалов и полуфабрикатов иностранного производства [2, 3].

В Российской Федерации для защиты от коррозии стальных деталей в изделиях авиационной техники в основном применяют кадмиевое и цинковое покрытия, наносимые гальваническим способом [4–6]. Однако с экологической точки зрения гальванические покрытия являются опасными вследствие высокого содержания ионов тяжелых металлов, неорганических кислот и щелочей в промывных и сточных водах [7]. В последние годы в мировой практике большое внимание сосредоточено на получении защитных покрытий путем термодиффузионного насыщения [8, 9]. Данный метод позволяет обеспечить коррозионную стойкость деталей, свести к минимуму экологически опасные гальванические процессы на производстве, снизить трудоемкость нанесения покрытий, а также расходы на хранение и утилизацию отработанных электродов [10]. Кроме того, из-за бурного развития аддитивных технологий возникает необходимость повторного использования отходов порошков после селективного лазерного сплавления [11]. Одним из способов решения этой проблемы является применение металлических порошкообразных отходов в целях нанесения термодиффузионных покрытий.

Важной особенностью термодиффузионного метода является возможность получения сплошного и равномерного по толщине покрытия на изделиях любой формы [12, 13]. Принцип термодиффузии заключается в химическом и структурном насыщении поверхности подложки атомами осаждаемой смеси из газовой (паровой) фазы или контактно при термической обработке. В дальнейшем происходят диффузия этих атомов в структуру нагретого материала подложки, а также последующее формирование и развитие новых фаз, твердых растворов [14]. Соответствующие химические реакции осуществляются в закрытой камере, содержащей порошковую смесь, детали, инертный наполнитель, не позволяющий порошку спекаться, и, как правило, активатор, служащий переносчиком атомов диффундирующего элемента от порошковой смеси к поверхности насыщаемой детали. В качестве активатора выбирают вещества, легко разлагающиеся при повышенной температуре, вступающие в реакцию с насыщающим веществом с образованием газообразных продуктов реакции. Образовавшиеся новые фазы обладают необходимыми эксплуатационными свойствами: повышенная химическая стабильность, высокая твердость и другие, которые способствуют коррозионной стойкости и износостойкости [15].

Следует отметить, что покрытия из смеси алюминия и цинка обладают более высокой коррозионной стойкостью, чем цинковые [16]. При этом для их формирования требуется существенно более низкая температура, чем для термодиффузионных алюминиевых покрытий [17]. Так, термодиффузионное цинкование проводят в интервале температур от 350 до 450 °С, а алюмоцинкование – от 380 до 500 °С [18]. Данные температуры соответствуют температурам отпуска некоторых конструкционных сталей [19], что позволяет наносить алюминий-цинковые покрытия на стали, для которых неприменимо термодиффузионное алитирование ввиду чрезмерно высокой температуры процесса.

Выбор алюминия и цинка в качестве компонентов защитного покрытия неслучаен. Оба металла обеспечивают анодную защиту основного металла (в данном случае – железа), так как обладают высоким отрицательным значением окислительно-восстановительного потенциала [20, 21]. Кроме того, в случае слоистой структуры алюминий будет оказывать анодное защитное действие на цинк, предотвращая его растворение, что увеличит протекторную способность покрытия.

Таким образом, смеси на основе порошков цинка и алюминия являются наиболее приемлемыми для нанесения термодиффузионных покрытий на конструкционные стали.

Материалы и методы

На образцах из стали 45 диаметром 25 мм и толщиной 3 мм методом термодиффузионного нанесения формировали покрытия из порошковой смеси на основе порошков цинка и алюминия с добавлением корунда в качестве инертного наполнителя и хлорида аммония в качестве активатора. Исследованы смеси порошков 1 и 2 с соотношением цинка и алюминия 7:3 и 8:2 соответственно.

Для формирования термодиффузионного покрытия образцы засыпали порошковой смесью в стальном тигле с герметично закручивающейся крышкой так, чтобы они не касались друг друга и стенок тигля. Затем проводили термическую обработку в муфельной печи при температурах 380 и 450 °С. Для этого тигли с образцами помещали в разогретую до заданной температуры печь и выдерживали в течение 4–8 ч. По окончании термообработки тигли с образцами извлекали из печи и охлаждали на воздухе. После полного охлаждения образцы, очищали от остатков порошковой смеси и готовили к исследованиям.

Микроструктуру покрытий исследовали с помощью инвертированного металлографического микроскопа при увеличении $\times 50$ в светлом поле. Перед металлографическими исследованиями изготавливали микрошлифы поперечного сечения образцов с покрытиями, проводили металлографическое травление. Для выявления микроструктуры, определения толщины покрытия и его структурных составляющих металлографическое травление проводили в реактиве «Ниталь» (5%-ный раствор азотной кислоты в этаноле) [9, 22] в течение 3–5 с.

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ элементного состава образцов с термодиффузионным покрытием (с различным составом порошковой смеси и продолжительностью термообработки) осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа с системой энергодисперсионного микроанализа в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ по ГОСТ 22309–2015.

Коррозионные свойства оценивали по значениям электрохимических характеристик в 3%-ном растворе хлорида натрия при нормальных условиях. Для измерений использовали классическую трехэлектродную ячейку, в качестве рабочего электрода – образцы из стали 45 с термодиффузионными покрытиями. Потенциал рабочего электрода измеряли относительно хлоридсеребряного (Ag/AgCl) электрода сравнения с потенциалом $E = +(197 \pm 3)$ мВ (здесь и далее – относительно нормального водородного электрода). Противозатокном служила платинированная титановая сетка. Исследование и обработку данных проводили с помощью потенциостат-гальваностата с комплектом программного обеспечения. Электрохимические измерения осуществляли путем определения потенциала разомкнутой цепи (E_{PC}), а также методом линейной вольтамперометрии при регистрации кривых в области потенциалов от -250 до $+250$ мВ относительно E_{PC} [23].

Результаты и обсуждение

Образцы с термодиффузионным покрытием имеют серый цвет и шероховатую поверхность, металлический блеск отсутствует, покрытие равномерно распределено по всей поверхности, включая ребра (рис. 1).

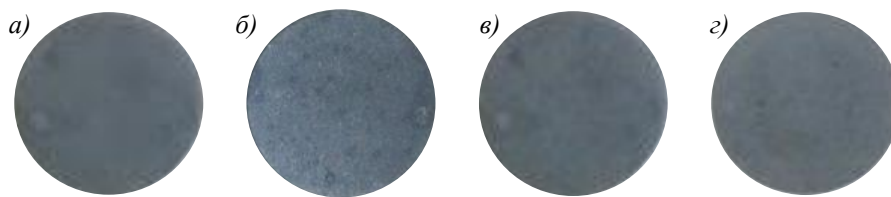


Рис. 1. Внешний вид образцов из стали 45 с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 380 (а, б) и 450 °С (в, з), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, з)

Согласно полученным при исследовании микроструктуры данным, покрытие имеет слоистую структуру толщиной ~45 мкм. В зависимости от состава порошковой смеси и режима термообработки варьируются толщина, структура и состав покрытия (рис. 2).

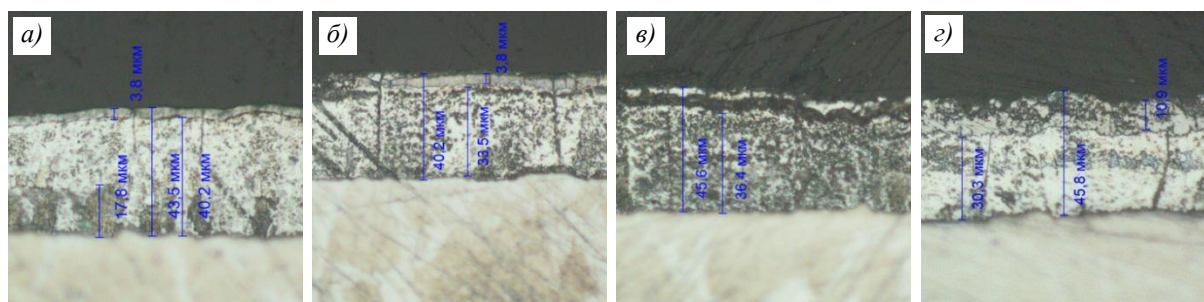


Рис. 2. Микроструктуры образцов из стали 45 с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 450 (а, б) и 380 °С (в, з), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, з)

На всех образцах четко прослеживается слоистое строение покрытия – на границе подложки и покрытия обнаружена тонкая прослойка фазы, согласно работам [8, 15, 23], представляющая собой гамма-фазу, содержащую 75 % (атомн.) цинка и 25 % (атомн.) железа. Средний, более протяженный и неоднородный слой представлен преимущественно сплавом на основе цинка и имеет столбчатую структуру. Внешний, относительно тонкий слой представлен сплавом на основе алюминия.

С помощью метода энергодисперсионного рентгеновского микроанализа получены карты распределения элементов в разрезе шлифа покрытия, которые подтверждают сделанные ранее предположения о составе термодиффузионного покрытия (рис. 3).

Анализ карт распределения элементов показал, что термодиффузионное покрытие, сформированное при температуре 450 °С, имеет четко выраженные зоны (слои) с наличием прилегающего к подложке слоя на основе цинка и внешнего слоя на основе алюминия. Содержание алюминия в цинковом слое пренебрежимо мало, как и содержание цинка в слое на основе алюминия. Содержание железа больше во внешнем слое покрытия (на основе алюминия), чем в прилегающем к подложке слое покрытия на основе цинка. Покрытия, сформированные при температуре 380 °С, не имеют четко выраженных протяженных зон (слоев), обогащенных алюминием, и представляют собой покрытие на основе цинка, содержащее небольшое количество алюминия на внешней поверхности.

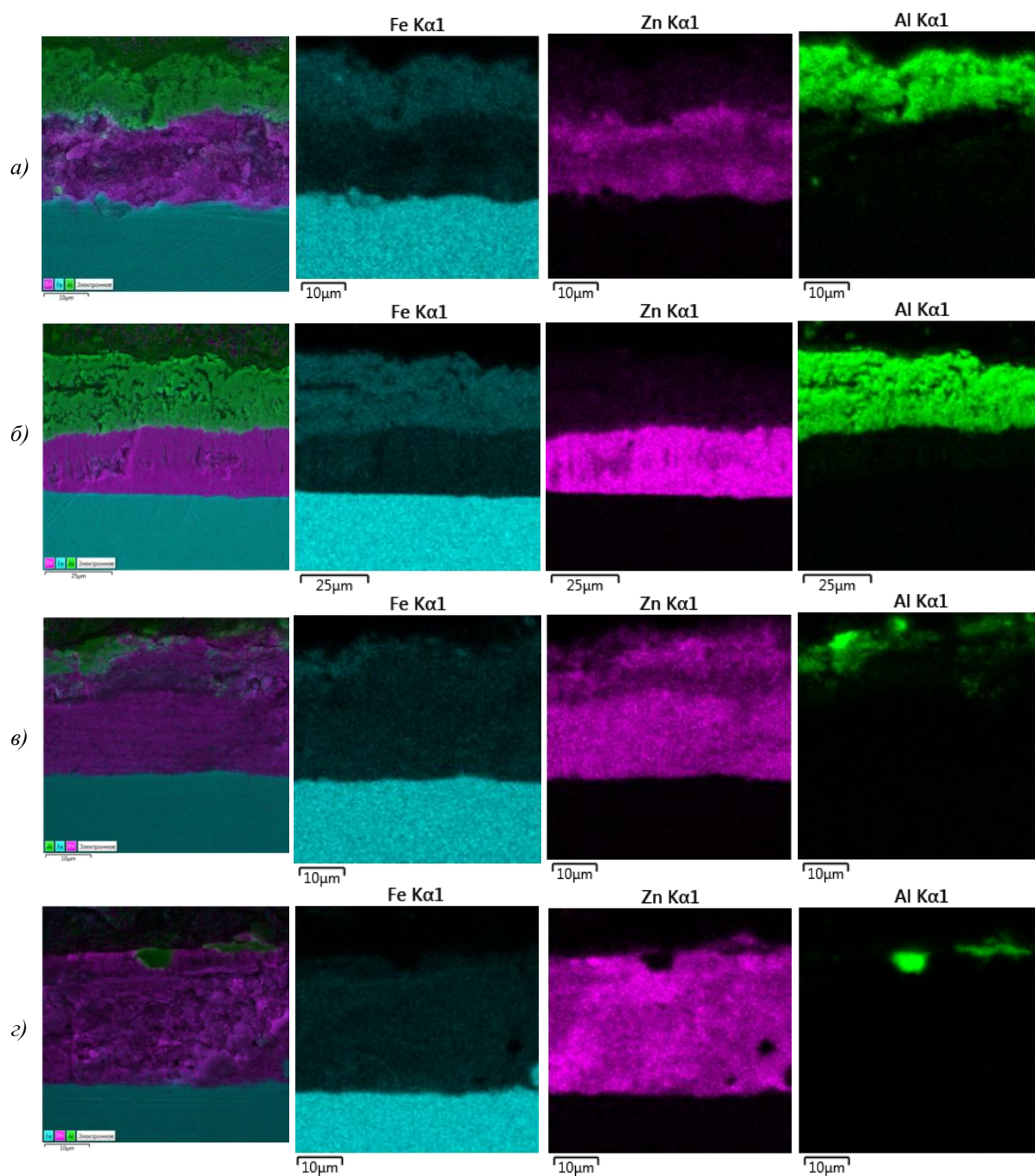


Рис. 3. Карты распределения элементов в образцах с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 450 (а, б) и 380 °С (в, г), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, г)

Линейные профили распределения элементов в образцах с термодиффузионным покрытием (с различным составом порошковой смеси и продолжительностью термообработки) позволили количественно охарактеризовать наблюдаемые при картировании явления (рис. 4). Так, показано, что толщина слоя на основе цинка во всех рассмотренных случаях находится в пределах 20–25 мкм. Слой на основе алюминия наиболее выражен для образцов, обработанных при температуре 450 °С, его толщина колеблется от единиц до нескольких десятков микрометров. Содержание железа в слое на основе цинка изменяется в пределах 18–20 % (атомн.) и повышается в слое на основе алюминия до 20–25 % (атомн.).

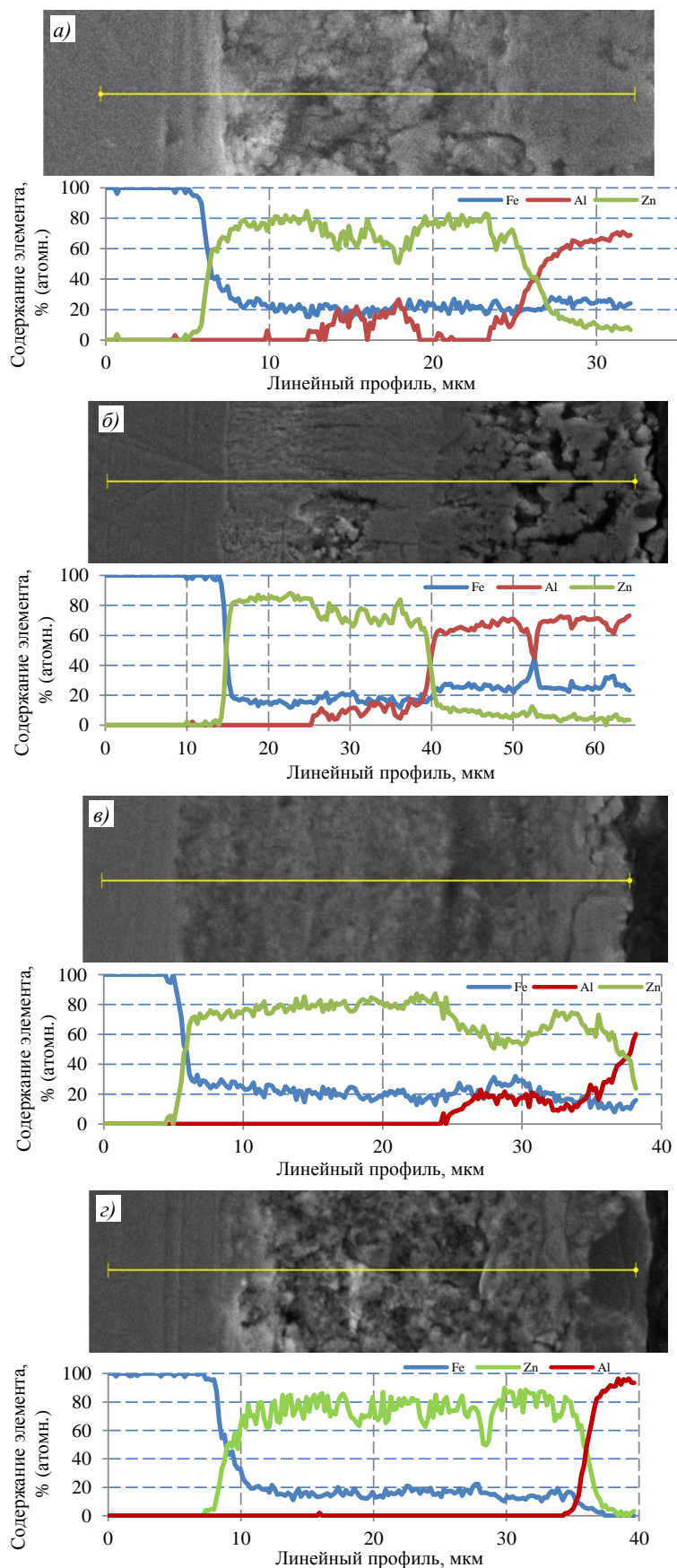


Рис. 4. Линейные профили распределения элементов в образцах с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 450 (а, б) и 380 °С (в, г), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, г)

Анализ линейных профилей показал еще одну особенность – в покрытии, полученном при температуре 450 °С (рис. 4, а, б), в слое на основе цинка можно выделить две различные по химическому составу зоны. Первая – прилегает непосредственно к подложке и представляет собой двухкомпонентный сплав, содержащий ~80 % цинка и ~20 % железа; вторая – дополнительно содержит алюминий и имеет следующий состав, % (атомн.): 10 – алюминий, 70 – цинк, 20 – железо. Слой на основе алюминия содержит ~70 % (атомн.) алюминия, ~5 % (атомн.) цинка и ~25 % (атомн.) железа.

В покрытиях, полученных после обработки при температуре 380 °С (рис. 4, в, г), в основном представлен слой на основе цинка, содержащий ~20 % (атомн.) железа. Количество алюминия в наружном слое не превышает 20 % (атомн.).

Для оценки коррозионной стойкости покрытий проведены электрохимические измерения методом линейной вольтамперометрии [23]. Полученные результаты представлены на рис. 5.

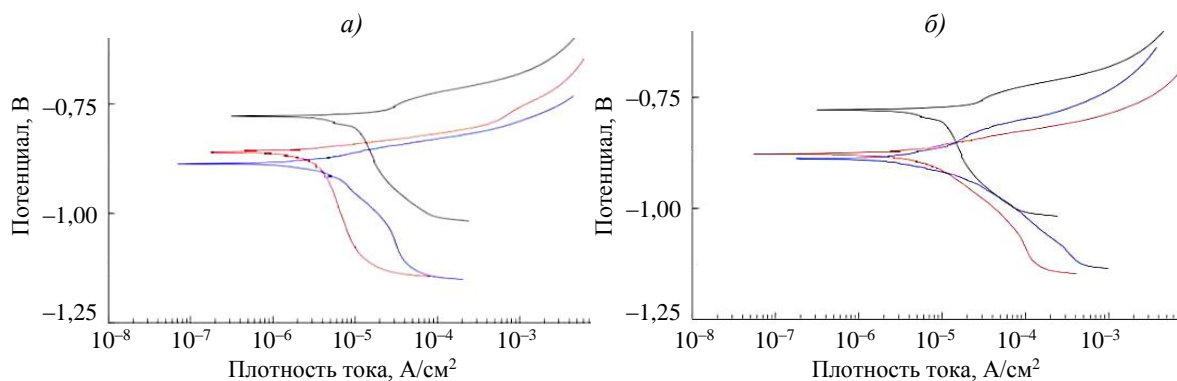


Рис. 5. Кривые, полученные методом линейной вольтамперометрии, для образцов с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 380 (а) и 450 °С (б), из смеси 1 (—) и 2 (—) в сравнении с гальваническим кадмием (—)

Для всех покрытий характерен потенциал свободной коррозии на уровне 0,9 В, что свидетельствует о более низкой коррозионной стойкости термодиффузионных покрытий в сравнении с кадмиевым покрытием (~0,8 В). Плотность тока коррозии для рассмотренных покрытий находится на одном уровне (~ $5 \cdot 10^{-6}$ А/см²), незначительно и нехарактерно различается в зависимости от состава покрытия и режима термообработки. Для кадмиевого покрытия плотность тока коррозии составляет ~ $9 \cdot 10^{-5}$ А/см². Таким образом, кадмиевое покрытие более стойкое, чем термодиффузионное, так как большое значение имеют продукты коррозии, которые могут защитить материал от дальнейшего разрушения. Более положительный потенциал кадмиевого покрытия при скорости коррозии (оцениваемой по плотности тока), сопоставимой с показателями термодиффузионных покрытий, подтверждает его высокую коррозионную стойкость. Однако менее токсичные цинк и алюминий, использованные для нанесения термодиффузионного покрытия, показывают близкий к кадмию результат.

Кроме того, следует помнить о слоистой структуре термодиффузионных покрытий, сформированных при температуре 450 °С. Коррозионную стойкость основных и промежуточных слоев, представленных фазами различного состава, невозможно исследовать приведенным методом. Однако такая структура будет влиять на общую коррозионную стойкость. При этом покрытия, сформированные при температуре 380 °С, в составе которых содержится ~20 % (атомн.) алюминия в цинковой матрице, будут корродировать по классическому для сплавов типу – избирательно. Какое покрытие

(сформированное при температуре 450 или 380 °С) будет наиболее стойким, можно будет установить только после исследования общей коррозии путем проведения сравнительных испытаний в камере соляного тумана или в натуральных условиях.

Заключения

Исследовано влияние температуры и продолжительности термообработки на формирование диффузионного алюминий-цинкового покрытия на стали 45.

Согласно полученным данным, на образцах с термодиффузионным покрытием прослеживается слоистая (толщиной ~45 мкм) структура: на границе подложки и покрытия выявлена тонкая прослойка гамма-фазы, которая включает 75 % (атомн.) цинка и 25 % (атомн.) железа. Центральный слой представлен в основном сплавом на основе цинка, внешний – сплавом на основе алюминия. При этом содержание железа существенно больше во внешнем слое на основе алюминия, чем в среднем слое на основе цинка. Из данных карт распределения элементов видно, что термодиффузионное покрытие, сформированное при температуре 450 °С, имеет более насыщенный алюминием внешний слой, чем образцы, обработанные при температуре 380 °С. Значительного влияния содержания алюминия в порошковой смеси на состав или толщину слоев покрытий не установлено.

Из результатов линейной вольтамперометрии следует, что образцы с термодиффузионным покрытием, сформированным при температурах 380 и 450 °С, имеют высокую коррозионную стойкость в среде 3%-ного раствора хлорида натрия и близки по этому показателю к традиционно используемому гальваническому кадмиевому покрытию. В данном случае коррозионная стойкость покрытия не зависит от содержания алюминия в порошковой смеси, что объясняется формированием идентичных структур в покрытии со схожим химическим составом поверхностного слоя, который оказывает основное влияние на результаты электрохимических измерений.

Таким образом, обработка при температуре 450 °С будет обеспечивать достаточную коррозионную стойкость алюминий-цинкового покрытия, близкую к показателю кадмиевого гальванического покрытия. В перспективе это позволит рассмотреть замену кадмиевого покрытия менее токсичным термодиффузионным алюминий-цинковым.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16–21.
2. 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. С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
4. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
5. 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.

6. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Деговец М.Л. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 2. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
7. 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.
8. Проскурин Е.В., Горбунов Н.С. Диффузионные цинковые покрытия. М.: *Металлургия*, 1972. 248 с.
9. Каблов Е.Н., Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на характеристики алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
10. Асталюхина А.С., Пикалов Е.С. Характеристика современных методов нанесения защитных цинковых покрытий // *Успехи современного естествознания*. 2015. № 11-1. С. 11–14.
11. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
12. Состав порошковой смеси для термодиффузионной обработки стальных изделий, способ термодиффузионной обработки стальных изделий: пат. RU2685841C1 Рос. Федерация; заявл. 15.10.18; опубл. 23.04.19.
13. Жигунов К.В. Общие закономерности процессов диффузионного насыщения при химико-термической обработке // *Машиностроитель*. 2004. № 1. С. 26–27.
14. Shen T.H., Tsai C.Y., Lin C.S. Growth behavior and properties of Zn–Al pack cementation coatings on carbon steels // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 306. P. 455–461.
15. Mahdavi A. Corrosion Resistance of Boronized, Aluminized, and Chromized Thermal Diffusion-Coated Steels in Simulated High-Temperature Recovery Boiler Conditions // *Coatings*. 2018. Vol. 8 (8). P. 257.
16. Sun A., Xiaoming S., Li H., Wang Q. Interface microstructure and mechanical properties of zinc–aluminum thermal diffusion coating on AZ31 magnesium alloy // *Materials & Design*. 2015. Vol. 1004–1005. P. 154–157.
17. Способ диффузионного цинкования металлических деталей: пат. RU2593252C2 Рос. Федерация; заявл. 29.12.14; опубл. 10.08.16.
18. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления; пер. с нем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: *Металлургия*, 1988. 268 с.
19. Елисеев Э.А., Севальнев Г.С., Дорошенко А.В., Дружинина М.Э. Влияние температурно-временных параметров длительных выдержек на превращения в конструкционных сталях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
20. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings // *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Elsevier Ltd., 2015. P. 737–750.
21. Xue Q., Sun C., Yu J. et al. Microstructure evolution of a Zn–Al coating co-deposited on low-carbon steel by pack cementation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 699. P. 1012–1021.
22. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник. М.: *Металлургия*, 1981. 120 с.
23. Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на коррозионные свойства алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // *Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 171–192.*

References

1. Kablov E.N. Corrosion or life. *Nauka i zhizn*, 2012, no. 11, pp. 16–21.
2. 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.
3. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
4. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V. Protection against corrosion of carbon steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
5. 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.
6. Laptev A.B., Zakirova L.I., Degovets M.L. Properties of protective galvanic coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 2. Hydrogen embrittlement and frictional characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
7. Kablov E.N., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Advanced Coatings for Corrosion Protection of Carbon Steels. *Stal*, 2016, no. 6, pp. 70–81.
8. Proskurin E.V., Gorbunov N.S. *Diffusion Zinc Coatings*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 248 p.
9. Kablov E.N., Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskii S.L. The effect of heat treatment on the characteristics of aluminium-zinc coatings obtained by the cold spray method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
10. Astalyukhina A.S., Pikalov E.S. Characteristics of modern methods of applying protective zinc coatings. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2015, no. 11-1, pp. 11–14.
11. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Prager S.M., Malinin R.Yu. On the development of a universal calculation method for assessing the degradation of recycled metal powder materials, depending on the cyclicity of use in the selective laser melting process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
12. *Composition of powder mixture for thermal diffusion treatment of steel products, method of thermal diffusion treatment of steel products*: pat. RU2685841C1 Rus. Federation; appl. 15.10.18; publ. 23.04.19.
13. Zhigunov K.V. General patterns of diffusion saturation processes during thermochemical treatment. *Mashinostroitel*, 2004, no. 1, pp. 26–27.
14. Shen T.H., Tsai C.Y., Lin C.S. Growth behavior and properties of Zn–Al pack cementation coatings on carbon steels. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 306, pp. 455–461.
15. Mahdavi A. Corrosion Resistance of Boronized, Aluminized, and Chromized Thermal Diffusion-Coated Steels in Simulated High-Temperature Recovery Boiler Conditions. *Coatings*, 2018, vol. 8 (8), p. 257.
16. Sun A., Xiaoming S., Li H., Wang Q. Interface microstructure and mechanical properties of zinc–aluminum thermal diffusion coating on AZ31 magnesium alloy. *Materials & Design*, 2015, vol. 1004–1005, pp. 154–157.
17. *Method of diffusion galvanizing of metal parts*: pat. RU2593252C2 Rus. Federation; appl. 29.12.14; publ. 10.08.16.
18. Beckert M., Klemm H. *Methods of metallographic etching*. Trans. from Germ. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya, 1988, 268 p.
19. Eliseev E.A., Sevalnev G.S., Doroshenko A.V., Druzhinina M.E. Influence of time-temperature parameters of long-duration exposure on transformations in structural steels (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 07.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.

20. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Elsevier Ltd., 2015, pp. 737–750.
21. Xue Q., Sun C., Yu J. et al. Microstructure evolution of a Zn-Al coating co-deposited on low-carbon steel by pack cementation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 699, pp. 1012–1021.
22. Kovalenko V.S. *Metallographic reagents: handbook*. Moscow: Metallurgiya, 1981, 120 p.
23. Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskiy S.L. *Effect of heat treatment on the corrosion properties of aluminum-zinc coatings obtained by the CGD method*. Climate-2022: modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems: Proc. VII All-Rus. sc. and tech. conf. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022, pp. 171–192.

Информация об авторах

Софронова Дарья Андреевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ярошевская Виктория Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Лонский Станислав Леонардович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Князев Андрей Вадимович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Darya A. Sofronova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victoria N. Yaroshevskaya, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Stanislav L. Lonskii, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey V. Knyazev, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.05.2025.
The article was submitted 12.05.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.05.2025.