

Заключение диссертационного совета 31.1.002.01, созданного на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ), Российская Федерация, по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «25» июня 2026 г. № 9

О присуждении Закировой Лилии Ильдусовне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Особенности формирования гальванотермического покрытия системы цинк-олово с высокой защитной способностью на деталях из углеродистых сталей» по специальности 2.6.17. «Материаловедение» принята к защите «16» апреля 2026 г. (протокол заседания № 5) диссертационным советом 31.1.002.01, созданным на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, приказ Минобрнауки России от 24.10.2022 г. № 1363/нк «О выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Соискатель Закирова Лилия Ильдусовна, «19» июня 1978 г.р. В 2006 году соискатель окончила государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный вечерний металлургический институт» присвоена квалификация инженер по

специальности «Металловедение и термическая обработка металлов». В 2024 году окончила аспирантуру федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по научной специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Закирова Лилия Ильдусовна с 2003 г. работала в должности техник 2 категории, с февраля 2017 г. в должности инженер, с мая 2021 г. в должности инженер 2 категории, с декабря 2025 г. работает инженером 1 категории в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» в лаборатории № 607 «Коррозия и защита металлических материалов».

Диссертация выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» в лаборатории № 607 «Коррозия и защита металлических материалов».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Лаптев Анатолий Борисович – главный научный сотрудник лаборатории № 620 «Лаборатория климатических, микробиологических исследований и пожаробезопасности материалов» федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

- Киреев Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет»;

- Шеханов Руслан Феликсович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии керамики и электрохимических производств

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет».

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в своем положительном отзыве, подписанном заведующим кафедрой «Инновационных материалов и защиты от коррозии», профессором, доктором технических наук Ваграмяном Тиграном Ашотовичем и утвержденном ректором, профессором ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», доктором химических наук Филатовым Сергеем Николаевичем, указала, что по актуальности, уровню и объему проведенных исследований, глубине анализа, научной новизне и практической значимости диссертационная работа полностью соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а также паспорту научной специальности 2.6.17. «Материаловедение», а ее автор, Закирова Лилия Ильдусовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение».

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 научных работ в рецензируемых журналах, из которых 8 включены в перечень ВАК при Минобрнауки России, 2 включены в международные базы данных Scopus и Web of Science, отражающих основное содержание работы. Получен 1 патент Российской Федерации.

В опубликованных работах содержатся основные научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе соискателя. Все работы выполнены в соавторстве. Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, сборе и интерпретации данных, разработке научно-технической документации.

Список основных трудов по теме диссертации опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Виноградов С. С., Никифоров А. А., Закирова Л. И. Замена кадмия. Этап 2 – заключительный. Гальванотермическое покрытие системы «цинк-олово» – реальная альтернатива кадмиевому покрытию // Авиационные материалы и технологии. 2019. – № 3. – С. 59-66. – DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66;

2. 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. – С. 37-46. – DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46;

3. 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. – С. 35-40. – DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40;

4. Закирова Л. И., Афанасьев-Ходыкин А. Н., Мовенко Д. А., Лаптев А. Б. Особенности формирования диффузионного слоя Sn-Zn-Fe на границе гальванотермического покрытия системы цинк-олово и стали 30ХГСА с высокой защитной способностью // Авиационные материалы и технологии. – 2022. – № 4 (69). – С. 61-71. – DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71;

5. Лаптев А. Б., Закирова Л. И., Загорских О. А., Павлов М. Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей // Труды ВИАМ. – 2022. – № 4. – С. 118-130. – DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130;

6. Закирова Л. И., Никифоров А. А., Болсуновская Т. А., Лаптев А. Б. Свойства гальванотермического покрытия системы цинк-олово на стали 30ХГСА

и 30XГCH2A. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // Металлообработка. – 2023. – №1. – С. 33-46. – DOI: 10.25960/mo.2023.1.33;

7. Закирова Л. И., Сибилева С. В., Демин С. А., Дуюнова В. А. Исследование гальванических покрытий коррозионностойких сталей для предотвращения контактной коррозии // Труды ВИАМ. – 2024. – № 9. – Ст. 05. – DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53;

8. Закирова Л. И., Сибилева С. В., Вдовин А. И., Кольцова М. А. Выбор гальванического покрытия коррозионностойких сталей с целью защиты от коррозии при контакте с алюминиевыми сплавами // Труды ВИАМ. – 2025. – № 9. – С. 63-76. – DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76;

Публикации, индексируемые базами Web of science и Scopus:

1. Виноградов С. С., Никифоров А. А., Закирова Л. И., Вдовин А. И. Сравнительная оценка защитной способности гальванотермического покрытия системы цинк-олово и кадмиевого покрытия в среде хлоридов // Коррозия: материалы, защита. – 2020. – № 5. – С. 21-29. – DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29;

2. Закирова Л. И., Афанасьев-Ходыкин А. Н., Мовенко Д. А., Лаптев А. Б. Особенности формирования гальванотермического покрытия системы цинк-олово с высокой защитной способностью на деталях из углеродистых сталей // Коррозия: материалы, защита. – 2021. – № 11. – С. 39-48. – DOI: 10.31044/1813-7016-2021-0-11-39-48;

Патент Российской Федерации:

1. Пат. РФ 2606364 МПК C25D 5/10. Способ получения защитного покрытия / Каблов Е. Н., Виноградов С. С., Никифоров А. А., Закирова Л. И. (Россия) // Заявл. 15.10.2015; Оpubл. 10.01.2017 Бюл. №1.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв на диссертацию ведущей организации (федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»),

подписан заведующим кафедрой «Инновационных материалов и защиты от коррозии», профессором, доктором технических наук Ваграмяном Тиграном Ашотовичем и утвержден ректором, профессором ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», доктором химических наук Филатовым Сергеем Николаевичем.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры «Инновационных материалов и защиты от коррозии» ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», протокол № 10 от 14 мая 2026 года. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Отсутствие сравнительных испытаний с Zn-Ni покрытием в едином цикле.

В работе приведены литературные данные по Zn-Ni, но собственных сравнительных испытаний гальванотермического (ГТП) и Zn-Ni покрытия, нанесённых в идентичных условиях на образцы из одной партии стали, не выполнено. Это затрудняет объективную оценку преимущества ГТП перед одним из наиболее распространённых коммерческих аналогов.

- Недостаточная детализация методики расчёта коэффициентов диффузии. В разделе 4.5.1 для расчёта коэффициентов диффузии используется формула (12), но не указано, как именно определялся угол α наклона зависимости $\lg(C) = f(x^2)$. Отсутствуют значения коэффициентов корреляции. Кроме того, применение этой модели к системе с жидкой фазой требует оговорок.

- Термин «гальванотермическое покрытие» – авторский. Не противоречит ли он существующему ГОСТ 9.306 (классификация гальванических покрытий)? Возможно, при последующей стандартизации стоит предложить уточнение «многослойное диффузионно-легированное покрытие».

- Отсутствие методики оценки пористости покрытия. В работе неоднократно упоминается, что термообработка снижает пористость (стр. 50, 104), однако нет прямых количественных измерений пористости (например, методом «кляссеров» или электрохимическим методом). Без этого трудно отделить вклад барьерных свойств от анодной защиты.

- Отсутствие рекомендаций по контролю качества в производстве. Технологическая схема (стр. 67) приведена, но нет указаний на критические

параметры процесса, которые должны контролироваться в обязательном порядке (например, точность поддержания температуры на второй ступени термической обработки (ТО), допустимый разброс толщины слоёв, периодичность анализа электролитов). Для внедрения на серийных предприятиях это необходимо.

2. Отзыв на диссертацию официального оппонента - Киреева Сергея Юрьевича, доктора технических наук, профессора, декана факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет».

Имеются замечания:

- В разделе 3.6.3 адгезионная прочность ГТП (1537,6 Мпа) рассчитана по модели Бенджамина – Вивера. Ее применение к пластичным цинк-оловянным покрытиям требует обоснования, поскольку модель разработана для хрупких пленок с четко фиксируемым адгезионным отслоением. При скретч-тестировании мягких покрытий в диапазоне 0,05 - 8 кг происходит преимущественно пластическое деформирование без признаков разрушения, что исключает корректное определение критической нагрузки. Соискателю необходимо прокомментировать применимость выбранной методики к исследуемой системе.

- В разделе 4.5.1 коэффициенты диффузии рассчитаны по уравнению, основанному на линейной аппроксимации зависимости $\lg C = f(x^2)$ – аналитическом решении второго закона Фика для полубесконечного твердого тела. Однако при режиме ТО 210 °С, 240 мин температура превышает точку эвтектики системы Sn-Zn (198,5 °С), что сопровождается появлением жидкой фазы в объеме покрытия. Применение к данным условиям модели твердофазной диффузии физически некорректно, поскольку коэффициенты массопереноса в расплавах на 3-4 порядка превышают значения для твердых растворов. Вероятно, этим обусловлено аномальное возрастание D_{Fe} с $0,039 \cdot 10^{-10}$ до $0,477 \cdot 10^{-10}$ см²/с при монотонном снижении D_{Zn} и D_{Sn} до $\sim 0,005 \cdot 10^{-10}$ см²/с в том же интервале. Соискателю рекомендуется либо ограничить область применимости расчетной модели твердофазной стадией, либо

представить обоснование корректности единого кинетического подхода для условий с участием жидкой фазы.

- В разделах 4.5 и 4.5.1 формирование диффузионного интерметаллидного слоя системы Fe-Zn-Sn толщиной ~ 2 мкм на границе «покрытие-стальная подложка» обосновано исключительно данными микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Данный метод позволяет определить лишь локальный элементный состав, но не идентифицирует фазовый состав анализируемой области. В тексте диссертации упоминается проведение рентгенофазового анализа, однако соответствующие дифрактограммы с индексацией рефлексов и расчетными параметрами кристаллических решеток не приведены. Кроме того, вывод об образовании «твердых растворов внедрения» в системе Zn-Sn (со ссылкой на [75, 97]) вступает в противоречие с диаграммой состояния Sn-Zn, согласно которой данные элементы характеризуются ограниченной взаимной растворимостью и формируют эвтектическую смесь, а не твердые растворы внедрения вследствие значительной разницы атомных радиусов. В отсутствие прямого рентгеноструктурного подтверждения утверждение о формировании конкретных интерметаллидных фаз в переходной зоне носит гипотетический характер и требует дополнительной экспериментальной верификации с применением методом РФА и электронной дифракции.

- В разделе 4.3 при описании механизма формирования структуры ГТП в ходе второй ступени ТО (210 °C) автор, утверждает, что «кристаллизация начинается с переохлаждения не менее 100 °C и пересыщения жидкости оловом и цинком, с последующим спиноидальным распадом пересыщенного жидкого раствора». Данное утверждение требует пояснения: спиноидальный распад представляет собой механизм фазового расслоения в неустойчивом состоянии твердого пересыщенного раствора и принципиально отличается от кристаллизации из жидкости. Следует уточнить физический механизм формирования структуры и привести его обозначение в соответствии с принятой терминологией.

- Пункт 2 «Научной новизны» декларирует «управляемое коррозионное поведение: продукты коррозии цинка в составе эвтектики уплотняют покрытие в глубине». По результатам ЭДА поверхности ГТП Ц4.О4.Ц2.т.хр после 26000 ч КСТ (раздел 4.3) содержание кислорода составляет 45-73 % (по массе), цинка – 68%, олова – 3%, что свидетельствует о значительном окислении цинка в виде $Zn(OH)_2$ и ZnO . Данный механизм принципиально важен для научной новизны работы, однако остается на уровне качественного описания. Для его обоснования необходима оценка молярных объемов продуктов коррозии $Zn(OH)_2$ и ZnO в сравнении с молярным объемом металлического цинка ($V_M = 9,2 \text{ см}^3/\text{моль}$). Отношение объемов продукт/металл, аналогичное числу Пиллинга-Бедворта, позволило бы количественно обосновать «уплотнение» покрытия и связать его со структурными данными, полученными на рисунках 45 и 47.

- В разделе 4.7 в качестве обоснования испытаний в климатической камере указано, что «олово при температуре ниже 13,2 °С может переходить из β в α - модификацию, т. е. становиться серым и хрупким». Вместе с тем в открытой литературе хорошо установлено, что $\beta \rightarrow \alpha$ – превращение олова («оловянная чума») практически полностью подавляется в сплавах с содержанием Zn уже от 0,5% (по массе) вследствие стабилизации β - фазы. В составе ГТП после двухступенчатой ТО олово присутствует исключительно в виде сплавов Sn-Zn эвтектического и заэвтектического составов, что практически полностью исключает аллотропное превращение при минус 40 °С. Постановка раздела 4.7 создает впечатление, что риск «оловянной чумы» был реальным для ГТП, хотя он заведомо несущественен. Следовало бы сформулировать цель этих испытаний корректнее, например: проверка механической целостности и защитных свойств покрытия при циклическом термоударе (от + 100 до минус 40 °С) как эксплуатационного воздействия.

- В пункте 1 «Научной новизны» утверждается, двухступенчатый режим ТО 150 °С, 2 ч + 210 °С, 4 ч «принципиально отличает разработанное покрытие от аналогов», а ЗС является «рекордной». Вместе с тем при сопоставлении систем в таблице 23 кадмиевое покрытие Кд9.фос.окс.нхр демонстрирует

ЗС 26000 ч – тот же показатель, что и ГТП Ц4.О4.Ц2.т.хр. Утверждение о «рекордной» ЗС справедливо лишь для покрытий - заменителей кадмия, но не для всей совокупности антикоррозионных покрытий. Кроме того, в таблице 23 присутствует покрытие Ц2.О1.Ц2.О1.хр с ТО при 200 °С, 2 ч, обеспечивающее ЗС 15000 ч, - принципиальное преимущество двухступенчатого режима перед этим вариантом в тексте количественно обосновано недостаточно. Соискателю целесообразно четко разграничить, что именно является новым: режим ТО, достигнутый уровень ЗС для данного класса покрытий-заменителей кадмия или формируемая гетерофазная структура, - и подкрепить каждое из этих утверждений ссылочным анализом приоритетных работ.

3. Отзыв на диссертацию официального оппонента - Шеханова Руслана Феликсовича, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры технологии керамики и электрохимических производств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Ивановского государственного химико-технологического университета.

Имеются замечания:

- В методической части не указаны марки и модели приборов, с помощью которых проводили измерения толщины, микротвердости, шероховатости, структуры и химического состава покрытий, рН растворов, поляризационные исследования.

- В п. 3.2.1 автор проводит сравнение различных способов химического и электрохимического обезжиривания поверхности образцов и на С. 54 делает вывод, что «после обезжиривания во всех исследованных растворах и режимах обезжиривания (строки 1-7, таблица 6) поверхность стальных образцов полностью смачивается водой, разрыва водяной плёнки не наблюдается в течение 30 с, что свидетельствует о качественном обезжиривании поверхности». Но далее на С. 56 делается выбор в пользу электрохимического обезжиривания на катоде, хотя применение этого способа приводит к дополнительному наводороживанию стали.

- П.п. 3.3 и 3.4 посвящены выбору электролитов для осаждения цинкового и оловянного слоев покрытия, однако составы выбранных электролитов в работе отсутствуют, есть лишь общая характеристика – аммонийный и станнатный.

- На С. 58 формула 10 для расчета выхода по току ошибочно названа законом Фарадея. При этом не представляется возможным оценить, с какой точностью определялся выход по току, поскольку в работе отсутствуют сведения о приборах для измерения силы тока при электролизе.

- Представляется странной возрастающая зависимость выхода по току от плотности тока при электроосаждении олова из пирофосфатного электролита комнатной температуры (табл. 9, С. 59). Какова причина этого явления?

- На С. 60 автор приводит методику определения скорости растворения цинкового покрытия по убыли массы образцов после погружения в различные электролиты оловянирования. Однако при таком подходе не учитывается масса олова, осаждающегося на поверхности в результате протекания контактного обмена с цинком. Поэтому значения скорости растворения цинка, приведенные в табл. 10, представляются заниженными.

- В п. 3.8 автор вводит не вполне корректное понятие «суммарной рассеивающей способности электролитов». Учитывая, что рассеивающая способность кислого электролита цинкования меньше рассеивающей способности станнатного электролита было бы более полезно сравнить соотношение количества соосажденных металлов на разных участках разборного катода.

- В п. 3.9 автор приводит технологическую схему нанесения гальванотермического покрытия системы цинк-олово. В указанной технологической схеме отсутствуют технологические операции улавливания цинка, олова, хрома.

- На С. 89 приведены электродные потенциалы цинка и олова относительно хлоридсеребряного электрода, обозначенные как E^0 . Однако обычно такое обозначение используют для стандартных потенциалов реакций, приведенных по водородной шкале.

- На С. 90 значения в 4 колонке табл. 25 автор сначала называет плотностью тока обмена, а затем – плотностью тока коррозии $i_{кор}$. Однако ток обмена характеризует скорость обменного процесса на электроде в состоянии равновесия. Здесь же имеет место коррозионный процесс, т.е. система отклонена от равновесия.

- В тексте имеются опечатки и неудачные выражения, например: «Окисление компенсируется уменьшением содержания кислорода, растворенного в растворе. То восстановление содержания растворенного кислорода может быть достигнуто с помощью реакции (8) $O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 4OH^-$ » (последний абзац на С. 95). На С. 84, рис. 46 ионы трехвалентного хрома обозначены Cr^{3-} . В списке использованных источников в ряде работ [21, 25, 38, 51, 52, 53, 62] отсутствуют авторы, в книге [77] неправильно указано количество страниц.

Отзывы на автореферат:

1. Акционерное общество «Научно-исследовательский институт стали» (АО «НИИ стали»), подписан советником директора АО «НИИ стали» доктором технических наук, профессором Бебешевым Владимиром Тимофеевичем, утвержден исполнительным директором кандидатом экономических наук Спириным Александром Владимировичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- При определении оптимального режима осаждения цинкового покрытия не приводятся значения целевой функции, ограничений и диапазона изменяемых параметров.

- При описании процессов формирования гальванотермического покрытия системы цинк-олово с высокой защитной способностью на деталях из углеродистых сталей отсутствуют требования к качеству поверхности стали 30ХГСА.

2. Акционерное общество «ОДК-Климов» (АО «ОДК-Климов»), подписан начальником испытательной лаборатории по исследованию материалов, кандидатом технических наук Музафаровой Светланой –Викторией Рустамовной. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Не указаны допуски на режимы термообработки для серийного производства. В диссертации приведён оптимальный режим ТО: 150°C, 2 ч + 210°C, 4 ч. Однако в реальных условиях возможны колебания температуры в печах (особенно при загрузке большого количества деталей). Не исследовано, как отклонения температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$ или времени на ± 30 мин влияют на защитную способность.

- В работе подробно исследована сталь 30ХГСА, однако не рассмотрено влияние исходной шероховатости поверхности (R_a) на итоговую защитную способность ГТП после двухступенчатой ТО. Было бы интересно увидеть математическую корреляцию между шероховатостью и временем до появления первых питтингов.

3. Акционерное общество «Казанский вертолетный завод» (АО «КВЗ»), подписан главным металлургом АО «КВЗ» кандидатом технических наук Шигаповым Алмазом Ильгизовичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- По области применения. В работе исследована сталь 30ХГСА – одна из основных конструкционных сталей авиастроения. Однако на предприятии также широко используются стали 30ХГСН2А, 20ХГСНМА, ВКС-9 и др. Не ясно, распространяются ли полученные закономерности на другие марки сталей, используемые в авиастроении, или требуются дополнительные исследования.

- В эксплуатации авиационные детали могут длительно работать при повышенных температурах (до 150°C в зоне двигателя). В работе исследована коррозия в топливе (до 120°C) и термоциклирование в климатической камере (кратковременные циклы). Однако нет испытаний на термическое старение (например, 1000 ч при 150°C на воздухе) – не изменится ли структура покрытия, не произойдёт ли охрупчивание или отслаивание.

4. Акционерное общество «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД» (АО «ММЗ «АВАНГАРД»), составлен и подписан заместителем

генерального директора по качеству АО ММЗ «АВАНГАРД», кандидатом технических наук Фурашовым Алексеем Сергеевичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Необходимо уточнить, какое значение рассеивающей способности считается достаточным для стабильного нанесения покрытия на детали с глухими отверстиями и внутренними полостями (например, на крепеж).

- По трибологическим характеристикам (стр. 19-20). Указано, что износ ГТП примерно в 2 раза выше, чем у кадмиевого покрытия, но износ контртела значительно ниже. Для крепежных изделий, эксплуатируемых в условиях вибрационных нагрузок, важно понимать, как повышенный износ самого покрытия влияет на долговечность резьбовых соединений. В автореферате этот вопрос освещен недостаточно полно.

- По натурным испытаниям (стр. 17-18). Приведены убедительные результаты 4,5 лет экспозиции в Геленджике. Однако не указано, проводился ли количественный анализ (потеря массы, глубина коррозионных поражений) или оценка проводилась только визуально. Для более строгого обоснования вывода о превосходстве ГТП желательно привести количественные данные.

5. Акционерное общество «ОДК-Пермские моторы» (АО «ОДК - Пермские моторы»), подписан главным металлургом АО «ОДК - Пермские моторы» Павловым Денисом Александровичем, первым заместителем главного металлурга — начальником экспериментально-металлургического цеха, к.т.н. Романовым И.Д., заместителем главного металлурга, к.т.н. Загорских О.А. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- В автореферате не приведены результаты испытаний ГТП в средах, специфичных для авиадвигателей: авиационный керосин с добавками, масла (включая синтетические), гидравлические жидкости типа НГЖ-5У, а также в условиях трения с медными сплавами (втулки, подшипники). Было бы полезно оценить электрохимическую совместимость ГТП с другими конструкционными материалами двигателя (титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы,

алюминиевые сплавы). Однако это не является недостатком, так как задача работы была более сфокусирована.

- Желательно было бы указать в выводах максимальную рабочую температуру длительной эксплуатации ГТП. Поскольку вторая ступень ТО проходит при 210 °С, можно предположить, что покрытие выдерживает нагрев до 200 °С, но прямое подтверждение в автореферате отсутствует.

- На рисунке 4 (стр. 17) приведены фото после 26000 ч испытаний – хотелось бы видеть количественную оценку площади поражения коррозией для ГТП (хотя визуально оно выглядит значительно лучше кадмия).

6. Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), подписан доцентом кафедры Материаловедение МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидатом технических наук Пучковым Юрием Александровичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Из автореферата не ясно, как именно оценивалась рассеивающая способность электролитов (47,5%) и какой метод при этом использовался. Желательно было указать методику измерения.

- На рисунке 4 (с. 17) приведены сравнительные фотографии образцов, однако отсутствует шкала или визуальные маркеры, позволяющие оценить долю пораженной поверхности для кадмиевого покрытия после 26000 ч в КСТ.

7. Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн» (ПАО «ОДК-Сатурн»), подписан ведущим инженером-технологом отдела аддитивных технологий, кандидатом технических наук Поляковым Сергеем Алексеевичем и утвержден директором опытного завода Леонидовым А.А. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Автором не указывается модель/производитель, характеристики оборудования для определения прочности ГТП на стали, работы камеры соляного тумана, испытательного оборудования на трение, замера микротвердости.

- Не приводится сравнений по результатам испытаний и характеристикам ГТП с другими типами покрытий, например, с системами Zn-Ni, Zn-Co.

- Не указан такой параметр режима двухступенчатой термической обработки, как скорость нагрева и охлаждения нанесенного покрытия.

- В чем заключается различие операций хроматирования (хр.) для покрытия цинк-олово и наполнения в растворе хроматов (нхр.) для заменяемого кадмиевого покрытия?

- В автореферате не приводится методика контроля качества для разных этапов технологии получаемого покрытия, а также количественной оценки его пористости и поражения коррозией после испытаний.

- Помимо указанных элементов резьбовых соединений (болты, гайки), на какие еще типы деталей из углеродистых сталей также может получить распространение данное покрытие в самолето- и двигателестроении?

- Какова максимальная рабочая температура полученного ГТП системы цинк-олово?

- Планируется ли работа с другими углеродистыми сталями для нанесения покрытия, помимо 30ХГСА?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

- Декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта ФГБОУ ВО «Пензенского государственного университета». доктор технических наук, профессор Киреев Сергей Юрьевич является признанным специалистом в области электрохимического формирования гальванических покрытий металлами и сплавами. Он автор более 200 научных публикаций, более 30 учебно-методических пособий и 17 патентов РФ на изобретения. Под руководством и при непосредственном участии Киреева С.Ю. разработаны уникальные технологии высокоскоростного электрохимического осаждения функциональных многокомпонентных покрытий и композитных структур, которые позволили решить ряд задач оборонной техники, судостроения, авиационной и ракетно-космической техники.

- Профессор кафедры технологии керамики и электрохимических производств ФГБОУ ВО «Ивановского государственного химико-

технологического университета», доктор технических наук, доцент Шеханов Руслан Феликсович является одним из ведущих специалистов в области технологии электрохимических производств, гальванотехники и разработки функциональных металлических покрытий. Шеханов Р.Ф. является автором более 100 научных публикаций и ряда патентов РФ на изобретения. Его научные труды сосредоточены на электрохимии и совершенствовании гальванических технологий. Используя разработанные полилигандные электролиты на основе дикарбоновых кислот и их солей Шеханов Р.Ф. получил высокие значения поляризации при электроосаждении сплавов. Вследствие этого происходит торможение процессов разряда ионов металлов из комплексных соединений.

- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (ФГБОУ ВО «РХТУ им. Менделеева») является одним из ведущих образовательных и научных центров Российской Федерации по исследованиям и разработкам в области новых технологий и, материалов для оборонно-промышленного комплекса и высокотехнологичных отраслей промышленности. В РХТУ им. Менделеева сосредоточены старейшие и ведущие в стране научные школы по разработке технологий модификации поверхностей. Ученые университета создают покрытия для экстремальных условий: от глубокого космоса до агрессивных сред в нефтехимии. Исследования в данной области отражены в публикациях сотрудников ведущей организации.

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации за последние 5 лет:

1. Шелухин М.А., Хохряков А.Р., Подшибнев М.А., Григорян Н.С., Аснис Н.А., Абрашов А.А., Ваграмян Т.А. Электроосаждение сплава цинк-никель из щелочного аминсодержащего электролита // Практика противокоррозионной защиты. 2025. Т. 30. № 2. С. 40-55.

2. Калинкина А.А., Чжо Т.В., Жирухин Д.А., Куликова В.Ю., Ваграмян Т.А. Исследование микрорассеивающей способности щелочного электролита

меднения // Успехи в химии и в химической технологии. 2025. Т. 39. № 5 (296). С. 136-138.

3. Abrashov A.A., Kolesnikova A.V., Sukhorukova V.A., Grigoryan N.S., Asnis N.A., Grafov O.Yu., Vagramyan T.A. Anticorrosive passivating conversion coatings containing rare earth metals for galvanized surfaces // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2025. Т. 14. № 1. С. 179-193.

4. Zheludkova E.A., Abrashov A.A., Sukhorukova V.A., Grigoryan N.S., Sukhorukova V.A., Grafov O.Yu., Vagramyan T.A. Passivation of galvanized steel in a solution based on cerium and lanthanum compounds // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2024. Т. 13. № 2. С. 775-789.

5. Абрашов А.А., Желудкова Е.А., Петрушина А.А., Григорян Н.С., Сундукова А.В., Ваграмян Т.А., Графов О.Ю. Защитные конверсионные нанопокрывтия на горячеоцинкованной стали // Практика противокоррозионной защиты. 2023. Т. 28. № 3. С. 7-17.

6. Сундукова А.В., Абрашов А.А., Григорян Н.С., Ваграмян Т.А., Желудкова Е.А. Пассивирующее покрытие на основе соединений редкоземельных металлов для оцинкованной стали // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37. № 2 (264). С. 91-93.

7. Abrashov A.A., Sukhorukova V.A., Grigoryan N.S., Sukhorukova V.A., Grafov O.Yu., Vagramyan T.A. Passivation of galvanized steel in a solution based on hexafluorozirconic acid // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2023. Т. 12. № 3. С. 1347-1364.

8. Золототрубова А.А., Мазурова Д.В., Григорян Н.С., Ваграмян Т.А. Раствор низкотемпературного аморфного фосфатирования // Успехи в химии и в химической технологии. 2022. Т. 36. № 10 (259). С. 27-29.

9. Адудин И.А., Орлова К.А., Шелухин М.А., Григорян Н.С., Ваграмян Т.А. Исследование влияния концентрации компонентов раствора на состав гальванического покрытия сплавом цинк-никель // Успехи в химии и в химической технологии. 2021. Т. 35. № 5 (240). С. 12-13.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан и оптимизирован технологический процесс получения ГТП системы цинк-олово на деталях из углеродистой стали 30ХГСА, включающий механическую подготовку поверхности, электрохимическое обезжиривание, активацию в ингибированном растворе соляной кислоты с уротропином, послойное электрохимическое осаждение цинка из слабокислого аммонийного электролита и олова из станнатного электролита, двухступенчатую термическую обработку (150 °С, 2 ч + 210 °С, 4 ч) и финишное хромирование. Суммарная рассеивающая способность процесса составляет 47,5 %, что превосходит показатели традиционных кислых электролитов (20–30 %) и обеспечивает равномерность распределения покрытия по поверхности деталей сложной конфигурации.

Предложен нетрадиционный научно-методологический подход к формированию защитного покрытия, основанный на двухступенчатой термической обработке, позволяющей разделить два ключевых процесса: на первой ступени (ниже температуры эвтектики Sn-Zn) сохраняется слоистая структура и инициируется твердофазная взаимная диффузия, на второй ступени (выше температуры эвтектики) целенаправленно создается объемная эвтектическая матрица с управляемыми включениями заэвтектической фазы и формируется тройной диффузионный слой Fe-Zn-Sn на границе со сталью. Данный подход принципиально отличается от известных аналогов, использующих одноступенчатый отжиг, который приводит к неконтролируемому образованию дефектных фаз и снижению защитной способности.

Доказано, что разработанное ГТП с двухступенчатой термической обработкой и финишным хромированием по защитной способности, трибологическим и механическим характеристикам не уступает фосфатированному кадмиевому покрытию с хроматным наполнением и может служить его экологически безопасной заменой:

- защитная способность в камере соляного тумана превышает 26 000 ч (более 3 лет), в том числе около 19 000 ч (около 2 лет) на образцах с надрезом до стальной основы, что соответствует показателям фосфатированного кадмиевого покрытия;

- стационарный потенциал ГТП составляет $-0,99 \pm 0,02$ В (х.с.э.), что на 0,25 В отрицательнее потенциала кадмия и обеспечивает анодный характер защиты стали;

- коэффициент трения ГТП составляет менее 0,5, что ниже показателя кадмиевого покрытия, при этом износ контртела не превышает 15 %;

- технология нанесения ГТП не вызывает водородного охрупчивания стали 30ХГСА: образцы выдерживают базу испытаний на замедленное хрупкое разрушение 840 ч при напряжении $0,8 \cdot \sigma_b$, что существенно превышает нормативные 480 ч;

- по результатам натурных испытаний в приморской атмосфере в течение 4,5 лет ГТП продемонстрировало превосходство над кадмиевым покрытием, на котором зафиксированы продукты коррозии стали на 40 % поверхности, тогда как на образцах с ГТП коррозия стали отсутствовала.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны закономерности формирования структуры и фазового состава гальванотермического покрытия системы цинк-олово на стали 30ХГСА в зависимости от режимов термической обработки; установлены тенденции формирования структуры покрытий в зависимости от количества и толщин слоев цинка и олова и последующей термической обработки; выявлена причинно-следственная связь между режимом термической обработки, формированием гетерофазной структуры (эвтектика + фазы на основе цинка и олова) и коррозионной стойкостью стальных образцов.

При работе над диссертационным исследованием Закировой Л.И. **использован** комплекс современных взаимодополняющих методов исследования, включая растровую электронную микроскопию, энергодисперсионный микроанализ, гравиметрию, толщинометрию,

склерометрию, потенциодинамическую поляризацию, ускоренные коррозионные испытания в камере соляного тумана и натурные климатические испытания, а также трибологические и механические испытания. Стандартизованные методики позволили достоверно оценить кинетику диффузии, фазообразование и защитную способность покрытий. Такой подход обеспечил воспроизводимость результатов и обоснованность выводов.

Изложены научные положения о механизме защитного действия разработанного покрытия: установлено, что защитное действие носит анодный характер, а продукты коррозии цинка в составе эвтектической матрицы уплотняют покрытие в глубине, что не только не ослабляет его, но и повышает барьерные свойства, обеспечивая рекордную долговечность; изложены результаты исследования влияния технологических режимов (количество, толщина и последовательность слоев, температура и продолжительность термической обработки) на формирование и функциональные свойства покрытия (адгезия, коэффициент трения, износ, защитная способность, электрохимические свойства).

Раскрыты существенные противоречия, связанные с проблемой замены токсичных кадмиевых покрытий: установлено, что существующие альтернативы (гальванические сплавы Zn-Ni, Zn-Sn, Zn-Co, многослойные системы) не обеспечивают сопоставимого уровня защитной способности в среде хлоридов, а также не обладают требуемыми трибологическими характеристиками и стойкостью к эксплуатационным факторам, что обусловило необходимость разработки нового подхода на основе гальванотермического покрытия системы цинк-олово.

Изучены кинетика диффузии и фазообразования в системе цинк-олово-железо при различных режимах термической обработки; установлены коэффициенты диффузии цинка, олова и железа; выявлены закономерности формирования диффузионного слоя Fe-Zn-Sn на границе покрытия со сталью в зависимости от режима термической обработки; определены зависимости

изменения функциональных свойств от количества, толщин слоев и последующей термической обработки.

Проведена модернизация существующих представлений о защитных покрытиях для замены кадмия: предложена новая стратегия формирования высокоэффективного многослойного покрытия за счет послойного электрохимического осаждения цинка и олова с последующей двухступенчатой термической обработкой (150°C , 2 ч + 210°C , 4 ч), позволяющая совместить два ключевых процесса – упрочнение покрытия и начальную диффузию на первой ступени и формирование диффузионного слоя на границе со сталью толщиной около 2 мкм и создание объемной эвтектической матрицы с включениями фаз заэвтектического состава на второй ступени, что принципиально отличает разработанное покрытие от известных аналогов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработаны и внедрены** на предприятиях ПАО «Туполев» и АО «ОДК-Климов» (ЛД № 693-19-26 от 16.07.2019, № 846-21-28 от 13.10.2019) технологическая рекомендация ТР 1.2.2449-2015 «Нанесение гальванотермического покрытия на детали из углеродистых сталей» и технологический процесс нанесения гальванотермического покрытия системы цинк-олово, включающий механическую подготовку, обезжиривание, активацию в ингибированном растворе соляной кислоты, послойное цинкование и оловянирование, двухступенчатую термическую обработку (150°C , 2 ч + 210°C , 4 ч) и финишное хромирование.

Определены пределы и перспективы практического использования разработанного покрытия как экологически безопасной и высокоэффективной замены кадмиевого покрытия для защиты деталей из углеродистых сталей: в камере соляного тумана защитная способность превышает 26000 часов (более 3 лет), в том числе 19000 часов (около 2 лет) для образцов с надрезом до стальной основы; в натурных условиях приморской атмосферы (г. Геленджик) в течение 4,5 лет покрытие продемонстрировало превосходство над кадмиевым; в

промышленной атмосфере г. Москвы в течение 7,5 лет образцы с обоими типами покрытий сохранили целостность; покрытие обладает анодным характером защитного действия, сопоставимыми с кадмиевым покрытием коэффициентом трения, износом контртела и величиной крутящего момента при откручивании гаек.

Представлены технологические решения, защищенные патентом РФ № 2606364 «Способ получения защитного покрытия», а также технологическая рекомендация ТР 1.2.2449-2015, предназначенные для использования в авиационной, судостроительной и других отраслях промышленности при выборе малотоксичного антикоррозионного покрытия для стальных деталей, взамен кадмиевого покрытия.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что: **для экспериментальных работ** результаты получены на современном аттестованном оборудовании (гальваническая мини линия барабанного типа, сканирующий автоэмиссионный электронный микроскоп, толщиномер с вихревыми токами, скретч-тестер СТ-01, вертикальный копер «Константа У-2М», потенциостат/гальваностат, трибометр, климатическая камера, анализатор водорода) в строгом соответствии с действующими российскими и международными стандартами и методиками (ГОСТ 9.302-88, ГОСТ 9.305-84, ГОСТ 9.308-85, ГОСТ 9.906-83, ГОСТ 9450-76, ГОСТ 4765-73, DIN EN ISO 2178, ASTM B499, ASTM G-5, ASTM G-102); обеспечена воспроизводимость результатов (испытания проводились не менее чем на 3-х параллельных образцах для каждой точки, измерения выполнялись многократно с последующей статистической обработкой данных), относительная погрешность гравиметрического метода составляет $\pm 10\%$, точность измерения толщины – ± 1 мкм.

Теория, построена на известных, проверяемых данных и фундаментальных принципах материаловедения, электрохимии и диффузионной кинетики; установленные закономерности формирования структуры и защитной способности гальванотермического покрытия системы цинк-олово согласуются с

опубликованными экспериментальными данными по диффузии в системах Zn-Sn и Fe-Zn-Sn, а также с известными примерами коррозионного поведения цинковых и оловянно-цинковых покрытий в хлоридсодержащих средах.

Идея базируется на анализе научно-технической литературы и патентных источников (103 наименования), обобщении передового опыта в области создания бескадмиевых антикоррозионных покрытий, а также на результатах предшествующих разработок НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ и РХТУ им. Д.И. Менделеева по гальванотермическим покрытиям системы цинк-олово.

Использовано сравнение экспериментальных данных с данными, полученными ранее по рассматриваемой тематике, что позволило объективно оценить научную новизну и преимущества разработанного гальванотермического покрытия перед известными аналогами.

Установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике: значения стационарных потенциалов ($-0,99 \pm 0,02$ В по ХСЭ) соответствуют литературным данным для пары Zn(II)/Zn ($E^\circ = -0,988$ В); защитная способность покрытий коррелирует с известными зависимостями от толщины и режимов термообработки; коэффициенты диффузии цинка и олова в железе согласуются с литературными данными для аналогичных систем.

Личный вклад соискателя заключается в постановке целей и задач на основе литературного обзора; методической постановке работы, планировании и проведении экспериментов; личном участии при проведении опытов и экспериментов (подготовка образцов, отработка режимов нанесения гальванотермического покрытия, проведение термической обработки, коррозионных, электрохимических, трибологических и механических испытаний); построении графиков, установлении зависимостей, интерпретации результатов, формулировании выводов; подготовке к публикации результатов исследований (17 научных работ, из которых 8 включены в перечень ВАК, 2 включены в международные базы данных Scopus и Web of Science, получен 1

патент РФ); представлении основных положений и результатов исследования на всероссийских и международной конференциях.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Вот температура, вы везде пишете $150^{\circ}\text{C} + 210^{\circ}\text{C}$, какой допуск температуры, на практике это имеет большое значение? Это температура в термостате или температура на детали? Какая минимальная температура 150°C плюс минус 10°C или плюс минус 5°C , этот интервал должны оговорить в своей рекомендации, если в термостате более мелкие детали — это понятно, они практически сразу прогреются, но могут быть и крупные, если деталь с большой массой, как идет контроль температуры в термостате или в термокамере или, когда прогреется деталь? Может температуру на самой детали нужно мерить или допуска должны быть плюс 5°C минус 10°C . Отклонение пишут плюс минус $0,1^{\circ}\text{C}$. На практике важно где температура на детали или в шкафу. В производстве сложно, если вы указываете температуру без интервала.

2. Поясните, на 8 слайде показаны исследованные системы покрытий, перечислены 8 шт., я правильно понимаю, что цифры - это толщина покрытий? Почему именно такие значения выбраны? Почему толщина слоев не 3 и 6 мкм, это где-то в литературе указано? На 11 слайде приведены исследования и описываются другие покрытия, по 5 мкм? А на исследованных материалах как происходят процессы, здесь приведено для другой системы? В качестве примера?

3. На 11 слайде приведены режимы ТО, вы сами температуру выбирали умозрительно или с какой-то научной обоснованностью? Почему выбраны температуры 185°C , 170°C , 160°C , 150°C или есть какая-то связь между структурой в процессе ТО формирующейся, то есть прогнозировали или просто брали температуру и выбирали что лучше? Со структурами вы сравнивали, что происходит в процессе различных температур ТО?

4. На 3 слайде, у американцев есть покрытие цинк-олово и у вас цинк –олово, разный ресурс: у них 1000 ч, а у вас десятки тысяч ч, чем объясняется отличие, в чем разница?

5. Покрытие гетерофазное, несколько фаз, какая из фаз является защитной? Какая из фаз больше влияет на защитную способность? Какой химический состав или формула? В процессе работы идет реакция со средой фазы у которой много цинка? А оловянная фаза? Ресурс покрытия определяется стабильностью цинковой фазы?

6. На 5 слайде в научной новизне 3 пункт перекрывает 1 пункт или в чем тогда особенность, чем тогда эта причинно- следственная связь отображается?

7. На 6 слайде в практической значимости написано, что смотрели устойчивость образцов с надрезом до стальной основы 19000 ч, расскажите, как испытывали, как получили результаты, как смотрели ширину распространения коррозии в надрезе по известному ГОСТу или как-то еще?

Соискатель Закирова Л.И. согласилась с замечаниями на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию:

1. Согласна, у меня не указан интервал допуска, согласна, что большая деталь должна нагреться. Здесь указана температура в термостате, в сушильном шкафу или муфельной печи. Интервал допуска для мелких деталей составляет для 150°C плюс минус 5°C и для 210 тоже плюс минус 5°C . Если массивная, то допуск для 150°C плюс минус 10°C , а для 210°C остается плюс минус 5°C , т.к. это температура выше эвтектики, при температуре выше 210°C , будет температура ближе к плавлению олова и может образоваться структура не та которая нужна. Мы выпустили ТР, в которой указан диапазон плюс минус сколько градусов, а здесь представлено научное исследование, указана температура ТО строго $150^{\circ}\text{C} + 210^{\circ}\text{C}$ в пределах погрешности сушильного шкафа.

2. Да это толщина слоев покрытий, обозначение в соответствии с ГОСТ 9.306, мы брали толщину цинка больше чем олова, т.к. цинк к стали имеет анодный характер защитного действия, и цинк наносится первым слоем, который в любом случае будет защищать сталь, даже если нарушится покрытие. Самые лучшие результаты соотношения толщин цинка к олову это 2 к 1 или 3 к 2.

На 11 слайде для исследования как проходит диффузия между слоями покрытий, мы взяли покрытия с увеличенными толщинами слоев до 5 мкм. Смотрели как проходит диффузия в зависимости от режима ТО, а защитные свойства представлены для исследованных систем, например, Ц2.О2.Ц2.О1, Ц4.О4.Ц2. Да, системы Ц5.О5.Ц5.О5 с разными ТО представлены для примера, как проходит диффузия.

3. Так как по ГОСТ 9.305, температура обезводороживания цинковых и кадмиевых покрытий 190°C плюс минус 10°C . Мы начали с 200°C , при этой температуре образуется шероховатая поверхность, защитная способность (ЗС) низкая, поэтому снижали температуру каждый раз на $5-10^{\circ}\text{C}$, смотрели образцы с разным временем выдержки при каждой температуре. Снизив до 150°C , это все при одноступенчатой термообработке (ТО). Обнаружили, что при 150°C , то есть при минимальном времени выдержки – 2 ч, получается наибольшая ЗС. Так же мы попробовали двухступенчатую ТО. По образу и подобию взяли двухступенчатую ТО, для разработанного ранее нашими коллегами двухслойного покрытия цинк-олово контактное для защиты высокопрочных сталей. То есть на первой ступени 150°C - 2ч, это как обезводороживание, по ГОСТ 9.305, для многослойных покрытий выбирается температура более легкоплавкого металла, у нас олово, поэтому 150°C , 2ч плюс 210°C , 4 ч, чтобы усилить диффузию, посмотреть, что произойдет, какая будет структура покрытия, ЗС.

Да, структуры сравнивала.

4. Здесь предложенный американцами покрытие цинк-олово, является гальваническим сплавом, это когда из одного электролита, содержащего соли цинка и олова осаждается сразу сплав цинк-олово с защитной способностью согласно их исследованию порядка 1000 ч в КСТ при толщине покрытия 8 мкм. У нас тоже вид легирования цинкового покрытия, только в виде послойного нанесения, цинк-олово-цинк. Эти покрытия отличаются по технологии нанесения.

5. Здесь обе фазы работают (эвтектическая и заэвтектическая). Включения заэвтектического состава, темные включения в покрытии на рисунке слайда 12. Элементный состав показал, что в этой фазе (точка 2) цинка

24,7 вес. %, это больше эвтектики, где цинка 8%, поэтому - заэвтектический состав. В позиции 1, в светлой области покрытия, цинка - 5,8%, а олова - 92,2% – это состав ближе к эвтектике. Получается на поверхности покрытия, фаза с большим содержанием цинка, растворяется быстрее, образуя продукты коррозии цинка, и эвтектика (мелкие зерна цинка и олова), мелкие зерна цинка в составе эвтектики тоже растворяются, образуются продукты коррозии цинка, которые уплотняют покрытие в глубине. Фаза с большим содержанием олова, менее активна, но она тоже корродирует, образует продукты коррозии, но продуктов коррозии цинка в виде гидроксидов и оксидов больше, которые уплотняют и заполняют поры и дефекты покрытия. Чем дольше испытывается, тем плотнее и толще покрытие, выше ЗС.

Да, ресурс покрытия определяется стабильностью цинковой фазы. Например, более тонкое покрытие Ц2.О2.Ц2.О1 тоже показало хорошие результаты в КСТ, но при надрезе до стальной основы, хуже защищает чем покрытия Ц4.О4.Ц2.О1 и Ц4.О4.Ц2, видимо из-за того, что цинка в покрытии меньше, в покрытии его не хватает как протектора. А в покрытиях Ц4.О4.Ц2 и Ц4.О4.Ц2.О1 цинка в 2 раза больше (в первом слое), поэтому защищает с надрезом до 19000 ч в КСТ.

6. Да, в какой-то степени п.3 относится к п.1.

7. Мы сначала испытывали образцы без надреза в течение 6000 ч в КСТ, далее на образцах систем покрытий без продуктов коррозии стали делали надрезы до стальной основы крест-накрест, а также царапали острым предметом, в диссертации есть фотографии и описание. Далее начинали отсчет до появления первых продуктов коррозии стали в надрезе, смотрели через металлографический микроскоп, степень залечивания этих надрезов, было видно, что продукты коррозии цинка, образующиеся в покрытии, закрывают стальную основу и мелкие точки коррозии стали в надрезах, которые не видны невооруженным глазом. Происходит процесс самозалечивания, после 19000 ч надрезы были поражены коррозией на 5-6%, аналогично у кадмия.

В диссертационной работе все заимствованные источники представлены со ссылками на автора или источник.

На заседании «25» июня 2026 г. диссертационный совет принял решение о том, что в диссертации Закировой Л.И. решена важная научно-техническая задача – разработка экологически безопасного высокоэффективного гальванотермического покрытия системы цинк-олово в качестве замены токсичному кадмиевому покрытию для защиты деталей из углеродистых сталей от коррозии в хлоридсодержащих средах, имеющая существенное значение для развития материаловедения и авиационной промышленности. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата технических наук, и принял решение присудить Закировой Л.И. степень кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

При проведении электронного тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 4 доктора технических наук по специальности 2.6.17. – «Материаловедение», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 13, против – 0.

Председательствующий:

Заместитель председателя

диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета



подпись

подпись

Славин

Андрей Вячеславович

фамилия, имя, отчество
(полностью)

Горбовец

Михаил Александрович

фамилия, имя, отчество
(полностью)

Дата оформления заключения: «25» июня 2026 г.