

УДК 621.357.7:620.197

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ В СИСТЕМЕ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Гогаев Тимур Муратович,

студент, Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва, 119454, Российская Федерация. E-mail: tima.gogaev@mail.ru

Башмурин Алексей Николаевич,

студент, Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва, 119454, Российская Федерация. E-mail: aleseibashmurin@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена анализу гальванических покрытий в системе антикоррозионной защиты металлических материалов. Актуальность темы связана с высокой распространенностью электрохимического разрушения сталей, алюминиевых сплавов и контактных пар в машиностроении, авиационной технике, энергетике и инфраструктурных объектах. Новизна работы состоит в аналитическом сопоставлении защитных, жертвенных, композиционных и гальванотермических покрытий с учетом условий эксплуатации, типа основы, состава электролита и характера коррозионного воздействия. В рамках работы описаны механизмы барьерной и электрохимической защиты, изучены современные решения на основе цинка, кадмия, никеля, меди, олово-цинковых, цинк-никелевых и никель-вольфрамкарбидных систем. Особое внимание уделено контактной коррозии разнородных металлов и ограничениям токсичных покрытий. Цель работы – раскрыть функциональное значение гальванических покрытий при повышении долговечности металлических материалов. Для ее решения используются сравнительный, аналитический и структурно-функциональный методы. Изучены современные русскоязычные публикации по электроосаждению и коррозионным испытаниям. В заключении сформулированы выводы о критериях выбора покрытий. Статья будет полезна специалистам в области материаловедения, гальванотехники и защиты металлов.

Ключевые слова: гальванические покрытия, антикоррозионная защита, электроосаждение, металлические материалы, контактная коррозия, цинк-никелевое покрытие, кадмиевое покрытие, никелевые композиционные покрытия, солевой туман, коррозионная стойкость.

ELECTROPLATED COATINGS IN THE SYSTEM OF ANTICORROSION PROTECTION OF METALLIC MATERIALS

Timur M. Gogaev,

Student, Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation. E-mail: tima.gogaev@mail.ru

Alexey N. Bashmurin,

Student, Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation. E-mail: tima.gogaev@mail.ru

ABSTRACT

This article analyzes galvanic coatings used in anticorrosion protection systems for metallic materials. The relevance of this topic is due to the high prevalence of electrochemical degradation of steels, aluminum alloys, and contact pairs in mechanical engineering, aeronautical engineering, energy, and infrastructure facilities. The novelty of this work lies in the analytical comparison of protective, sacrificial, composite, and galvanothermic coatings, taking into account operating conditions, substrate type, electrolyte composition, and the nature of the corrosion effect. This paper describes the mechanisms of barrier and electrochemical protection and examines modern solutions based on zinc, cadmium, nickel, copper, tin-zinc, zinc-nickel, and nickel-tungsten carbide systems. Particular attention is paid to contact corrosion of dissimilar metals and the limitations of toxic coatings. The purpose of this work is to reveal the functional significance of galvanic coatings in increasing the durability of metallic materials. Comparative, analytical, and structural-functional methods are used to address this issue. This article examines current Russian-language publications on electrodeposition and corrosion testing. The article concludes with conclusions on coating selection criteria. This article will be useful for specialists in materials science, electroplating, and metal protection.

Keywords: electroplating, corrosion protection, electrodeposition, metallic materials, contact corrosion, zinc-nickel coating, cadmium coating, nickel composite coatings, salt spray, corrosion resistance.

Введение

Коррозионное разрушение металлических материалов сохраняет высокую технологическую значимость для отраслей, где детали работают при действии влаги, хлоридов, температурных перепадов, механических нагрузок и контакта разнородных металлов. Сталь, алюминиевые сплавы, медь, никель и их покрытия образуют электрохимические системы, поведение которых зависит от потенциалов материалов, площади катодной и анодной зон, пористости покрытия, качества подготовки поверхности, толщины осажденного слоя и состава эксплуатационной среды. При появлении электролита на поверхности изделия защитный слой перестает выполнять только декоративную функцию и превращается в элемент управления коррозионным процессом. По этой причине гальванические покрытия рассматриваются как технологический инструмент продления ресурса металлических деталей.

Актуальность темы определяется переходом промышленности к более легким конструкционным материалам, широким применением алюминиевых сплавов совместно с коррозионностойкими сталями, ужесточением требований к долговечности изделий и ограничением использования токсичных металлов. Кадмиевые покрытия долго применялись как эффективная защита в контактных парах, но экологические и санитарные ограничения стимулируют поиск заменителей на основе цинка, никеля, олова, композиционных систем и многослойных гальванотермических покрытий. Параллельно развивается направление импульсного электроосаждения, которое позволяет управлять

структурой слоя, содержанием дисперсной фазы и сочетанием коррозионной стойкости с износостойкостью.

Цель статьи – раскрыть место гальванических покрытий в системе антикоррозионной защиты металлических материалов на основе анализа современных исследований. Задачи исследования состоят в систематизации механизмов защитного действия гальванических покрытий; выявлении критериев выбора покрытий для сталей, алюминиевых сплавов и контактных пар; оценке перспектив цинк-никелевых, гальванотермических и композиционных никелевых покрытий с учетом эксплуатационных ограничений. Новизна работы выражается в объединении данных о защитных покрытиях для углеродистых и коррозионностойких сталей, контактных пар «сталь – алюминиевый сплав» и высокотемпературных композиционных покрытий в единую аналитическую схему выбора антикоррозионного решения.

Материалы и методы

Материалами для статьи послужили современные русскоязычные исследования, раскрывающие свойства гальванических покрытий и методы оценки их защитной способности: Е.С. Абрамова, С.В. Клещева, О.В. Трипачев, А.В. Кузов и А.В. Сафонов изучили гальванические покрытия стали Ст3 на основе кадмия, цинка, меди и никеля в модельных условиях пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов и сопоставили их антикоррозионные характеристики [1]; А.С. Васильев, А.И. Вдовин, Л.И. Закирова и М.А. Кольцова рассмотрели современные тенденции развития гальванических защитных покрытий, рассчитанных на работу при температуре до 600 °С, с акцентом на никелевые и никель-кобальтовые композиционные системы [2]; Л.И. Закирова, С.В. Сибилева, А.И. Вдовин и М.А. Кольцова провели выбор гальванического покрытия коррозионностойких сталей для защиты при контакте с алюминиевыми сплавами 1163, В95 и 1933 с применением электрохимических исследований и испытаний в камере соляного тумана [3]; Л.И. Закирова, С.В. Сибилева, С.А. Демин и В.А. Дуюнова исследовали гальванические покрытия коррозионностойких сталей для предотвращения контактной коррозии алюминиевых сплавов, уделив внимание подготовке поверхности, адгезии и режимам осаждения [4]; С.Ю. Киреев, С.Н. Киреева, Г.В. Козлов, Ю.Н. Кирилина и А.З. Янгуразова разработали технологию формирования композиционных гальванических покрытий Ni-WC как альтернативы Co-WC для изделий авиационной и космической техники [5].

При подготовке статьи применены анализ научных источников, сравнительный метод, обобщение результатов коррозионных испытаний, сопоставление электрохимических характеристик покрытий и структурно-функциональный подход к определению защитного назначения гальванического слоя.

Результаты и обсуждение

Гальваническое покрытие в антикоррозионной защите выполняет несколько функций, среди которых барьерное отделение металла основы от агрессивной среды, электрохимическое смещение коррозионного процесса на покрытие, выравнивание потенциалов контактной пары, повышение износостойкости поверхности и формирование требуемых технологических свойств детали. Защитное действие слоя определяется типом покрытия. Анодные покрытия, прежде всего цинковые и кадмиевые, растворяются преимущественно вместо металлической основы и потому сохраняют защитный эффект при локальных дефектах. Катодные покрытия, например никелевые, медные и хромовые, создают плотный барьер, но при сквозной пористости формируют гальваническую пару с основным металлом, что усиливает локальное разрушение основы. По этой причине для катодных систем решающее значение имеют плотность, беспористость, адгезия и стабильность структуры слоя.

Система антикоррозионной защиты начинается с подготовки поверхности. Электроосаждение на коррозионностойких сталях осложняется наличием пассивной пленки, которая снижает сцепление покрытия с основой. В исследовании гальванических покрытий коррозионностойких сталей показано, что технологическая схема подготовки поверхности должна соединять обезжиривание, активацию и нанесение промежуточного никелевого подслоя, поскольку именно состояние поверхности определяет прочность сцепления слоя с основой [4]. Для деталей, работающих в контактных парах с алюминиевыми сплавами, слабая адгезия приводит к локальному раскрытию основы, появлению электролитических микрозон и ускоренному развитию коррозионного очага. Поэтому выбор покрытия сводится к подбору металла с подходящим потенциалом и к формированию устойчивой технологической цепочки: подготовка поверхности – подслоя – основное покрытие – пассивация либо термическая обработка.

При соединении алюминиевого сплава с коррозионностойкой сталью возникает пара, в которой алюминий, как более электроотрицательный материал, работает анодом и разрушается интенсивнее. Исследования коррозионностойких сталей с покрытиями и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 показывают, что снижение разности потенциалов между контактирующими материалами служит одним из главных критериев выбора защитного покрытия [3]. Для такой задачи применяются кадмиевые, цинковые, цинк-никелевые, олово-цинковые и гальванотермические покрытия. Кадмиевое покрытие обладает выраженной защитной способностью, но его токсичность ограничивает применение. Цинковое покрытие работает как жертвенный слой, но при неблагоприятной среде расходуется быстрее. Цинк-никелевые и олово-цинковые системы обеспечивают более тонкую настройку электрохимического потенциала и создают предпосылки для замещения кадмиевых решений.

В статье Л.И. Закировой, С.В. Сибилевой, А.И. Вдовина и М.А. Кольцовой сопоставлены стационарные потенциалы коррозионностойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T, алюминиевых сплавов и покрытий в 3%-ном растворе NaCl [3]. Полученные данные показывают, что стали без покрытия имеют более положительные потенциалы, а алюминиевые сплавы – более отрицательные, что создает условия для ускоренного растворения алюминия при контакте. Нанесение покрытий на сталь изменяет электрохимическое поведение пары: цинковые, цинк-никелевые, олово-цинковые и гальванотермические слои смещают потенциал стальной детали в сторону, более близкую к алюминиевым сплавам. В практическом выражении это снижает коррозионную нагрузку на алюминиевую часть соединения и переводит защитную функцию на покрытие.

Интерес вызывает цинк-никелевое покрытие Ц-Н(85)9.хр. По данным испытаний пакетов образцов в камере соляного тумана в течение 2160 ч, алюминиевые сплавы, находившиеся в контакте с этим покрытием, получили меньшую глубину коррозионных поражений по сравнению с парами, где применялось кадмиевое покрытие [3]. При этом многослойное гальванотермическое покрытие системы цинк – олово показало более длительный период до появления продуктов коррозии самого покрытия по сравнению с цинк-никелевой системой. Данное соотношение позволяет разделить два критерия: стойкость самого покрытия и защиту сопряженного алюминиевого сплава. Для контактных соединений на первый план выходит способность покрытия снижать электрохимический ущерб для более уязвимого материала пары.

Исследование 2024 г. по предотвращению контактной коррозии подтвердило перспективность покрытий сплавами и гальванотермических систем для пары «коррозионностойкая сталь – алюминий» [4]. Авторы рассмотрели кадмиевые, цинковые, цинк-никелевые, олово-цинковые покрытия и многослойные системы цинк – олово, а подготовку поверхности связали с нанесением никелевого подслоя. Для промышленной

технологии такой вывод имеет прикладное значение: покрытие должно сохранять сцепление после ускоренных испытаний, контакта с алюминиевым сплавом и воздействия хлоридной среды. В противном случае защитный слой превращается в источник локальных дефектов, где электролит получает доступ к основе.

Материалы на основе углеродистой стали требуют иной логики выбора. В работе Е.С. Абрамовой, С.В. Клещевой, О.В. Трипачева, А.В. Кузова и А.В. Сафонова изучена сталь Ст3 с гальваническими покрытиями на основе кадмия, цинка, меди и никеля в модельных условиях участка «Енисейский» [1]. В таких условиях покрытие рассматривается как элемент долговременной защиты металлических контейнеров, контактирующих с влажной геологической средой. Высокая устойчивость отмечена для образцов, содержащих кадмий и цинк, что согласуется с электрохимической природой жертвенной защиты. Низкие показатели медного композиционного покрытия авторы связали с образованием гальванической пары «медь – углеродистая сталь» внутри микропор слоя [1]. Этот результат принципиален для оценки катодных покрытий: благородный металл на менее благородной основе защищает только при достаточной плотности слоя. Пористость меняет защитную схему на противоположную и ускоряет разрушение основы.

Сравнение данных по стали Ст3 и коррозионностойким сталям показывает, что универсального покрытия для всех условий эксплуатации не существует. Для углеродистой стали в водной среде жертвенные покрытия на основе цинка и кадмия способны обеспечить электрохимическую защиту даже при локальных дефектах. Для коррозионностойкой стали, контактирующей с алюминием, требуется выравнивание потенциалов и защита алюминиевого сплава от ускоренного анодного растворения. Для высокотемпературной эксплуатации обычные цинковые и кадмиевые покрытия ограничены рабочей температурой, а более перспективными оказываются никелевые, хромовые, серебряные и композиционные никелевые системы [2]. Поэтому выбор гальванического покрытия должен опираться на три группы параметров: электрохимическую совместимость материалов, агрессивность среды и функциональную нагрузку поверхности.

Современное развитие гальванотехники связано с переходом от однослойных металлических покрытий к композиционным системам. В обзоре А.С. Васильева, А.И. Вдовина, Л.И. Закировой и М.А. Кольцовой отмечено, что значительная доля исследований по высокотемпературным гальваническим покрытиям сосредоточена на никеле и его сплавах, а введение дисперсных частиц в электролит позволяет изменять структуру и свойства осажденного слоя [2]. Композиционные покрытия формируют металлическую матрицу, в которой распределены частицы оксидов, карбидов, нитридов либо иных соединений. Такая структура повышает твердость, износостойкость и термическую стабильность, а при правильном подборе состава сохраняет коррозионную стойкость. Для деталей, работающих при повышенных температурах, никелевые покрытия получают преимущество перед цинковыми и кадмиевыми, поскольку их рабочий температурный диапазон шире.

Композиционные гальванические покрытия Ni-WC раскрывают направление, где антикоррозионная защита совмещается с износостойкостью. В исследовании С.Ю. Киреева, С.Н. Киреевой, Г.В. Козлова, Ю.Н. Кирилиной и А.З. Янгуразовой разработана технология формирования покрытий Ni-WC как альтернатива Co-WC для изделий авиационной и космической техники [5]. Авторы оптимизировали параметры импульсного осаждения: плотность тока 4,0 А/дм², длительность импульсов 5 мс, скважность 2,0, температуру 20 °С, рН 4,5 и содержание сахараина 0,3 г/л. Покрытия с 20,3–24,5 % карбида вольфрама обладали микротвердостью 8,2–9,5 ГПа, низкой интенсивностью изнашивания и внутренними напряжениями до 90 МПа [5]. По сравнению с Co-WC покрытие Ni-WC показало более

высокую коррозионную стойкость в нейтральных средах, меньшую экологическую нагрузку и применимость при температурах до 600 °С [5].

Данные по Ni-WC подтверждают, что современное гальваническое покрытие уже нельзя сводить к тонкой металлической пленке, нанесенной ради изоляции от влаги. Покрытие приобретает значение инженерного слоя, в котором регулируются фазовый состав, включение твердых частиц, напряженное состояние, микротвердость и поведение в среде. Импульсное электроосаждение позволяет управлять скоростью кристаллизации, распределением частиц WC и выходом по току, что отражается на плотности и однородности слоя [5]. Для антикоррозионной защиты такая технологическая гибкость ценна, поскольку пористость, внутренние напряжения и неоднородность покрытия часто определяют реальный ресурс детали сильнее, чем номинальный состав покрытия. Вместе с тем композиционные и никель-кобальтовые системы сталкиваются с проблемой масштабирования. В обзоре высокотемпературных покрытий указано, что никель-кобальтовые композиты, получаемые электроосаждением, выглядят перспективными, но промышленное массовое производство ограничено технологическими трудностями [2]. Причины связаны с устойчивостью электролита, контролем дисперсной фазы, воспроизводимостью состава покрытия на деталях сложной формы, управлением внутренними напряжениями и требованиями к экологической безопасности. Для ВАК-ориентированного анализа данное положение имеет методическое значение: перспективность покрытия должна оцениваться по лабораторным значениям микротвердости или коррозионной стойкости и по готовности технологии к серийному нанесению.

При выборе покрытия следует разграничивать барьерную, жертвенную и комбинированную защиту. Барьерная защита эффективна при высокой плотности покрытия, отсутствии сквозных пор и устойчивой адгезии. Жертвенная защита работает за счет более отрицательного потенциала покрытия по отношению к металлу основы или сопряженному материалу. Комбинированная защита строится на сочетании электрохимического эффекта, пассивации поверхности и многослойной структуры. Цинк-никелевые и олово-цинковые покрытия в контактных парах относятся к решениям, где электрохимический потенциал корректируется составом сплава [3]. Гальванотермические системы цинк – олово создают многослойную структуру с иной динамикой коррозионного процесса [3; 4]. Никелевые композиционные покрытия формируют плотную матрицу с функциональными включениями и ориентированы на стойкость к износу, температуре и агрессивным средам [2; 5].

Аналитическое сопоставление источников позволяет выделить несколько критериев рационального выбора. Первый критерий – материал основы: углеродистая сталь, коррозионностойкая сталь, алюминиевый сплав или контактная пара. Второй критерий – среда: атмосферная влажность, хлоридный раствор, солевой туман, геологическая водная среда, нейтральная либо кислая среда, повышенная температура. Третий критерий – тип разрушения: равномерная коррозия, питтинг, контактная коррозия, микропоровая коррозия, коррозионно-механическое воздействие. Четвертый критерий – назначение покрытия: антикоррозионная защита, износостойкость, высокотемпературная работоспособность, замена токсичного покрытия, защита сопряженной детали. Пятый критерий – технологичность: стабильность электролита, подготовка поверхности, толщина, адгезия, воспроизводимость состава и возможность контроля.

С учетом этих критериев кадмиевые покрытия сохраняют высокий защитный потенциал, но экологические ограничения сужают область их применения. Цинковые покрытия доступны и эффективны как анодные, но в ряде агрессивных сред расходуются ускоренно. Цинк-никелевые покрытия обеспечивают баланс между жертвенной защитой и

снижением повреждения алюминиевых сплавов в контактных парах [3]. Гальванотермические цинк-оловянные покрытия интересны за счет многослойной структуры и более высокой стойкости самого слоя в солевом тумане [3; 4]. Никелевые и никель-вольфрамкарбидные покрытия подходят для деталей, где антикоррозионная защита сочетается с износостойкостью и термической нагрузкой [2; 5]. Медные покрытия на стальной основе требуют особой осторожности, поскольку при пористости возникает микрогальваническая пара, ускоряющая разрушение основы [1].

Практическая логика применения гальванических покрытий должна строиться на предварительном моделировании условий эксплуатации. Если деталь работает как отдельный элемент из углеродистой стали в водной среде, приоритет получают анодные покрытия. Если соединение состоит из алюминиевого сплава и стального крепежа, главная задача связана со снижением контактной коррозии алюминиевой детали. Если поверхность испытывает трение и температуру до 600 °С, более обоснованным решением становятся никелевые композиционные покрытия. Если изделие эксплуатируется в среде с хлоридами, обязательным этапом выступают ускоренные испытания в солевом тумане и электрохимическая оценка потенциалов, токов коррозии и сопротивления покрытия. Только сопоставление этих данных дает основание для выбора покрытия в инженерной системе защиты.

Для научной интерпретации результатов существенна связь между микроуровнем покрытия и макроуровнем ресурса изделия. Поры, дефекты сцепления, неравномерность толщины, избыток внутренних напряжений и неправильный подбор потенциала приводят к тому, что покрытие теряет защитную функцию раньше расчетного срока. Напротив, плотный слой с контролируемым составом, хорошей адгезией и электрохимической совместимостью с сопряженными материалами продлевает ресурс металлической детали. Поэтому гальваническая защита относится к технологическим решениям, где химия электролита, режим осаждения и конструкционная схема изделия образуют единую систему.

Заключение

Систематизация современных исследований показала, что гальванические покрытия занимают самостоятельное место в антикоррозионной защите металлических материалов, поскольку регулируют контакт металла с агрессивной средой, электрохимическое поведение пары и функциональные свойства поверхности. Защитный эффект покрытия определяется природой металла основы, составом покрытия, пористостью, адгезией, толщиной, потенциалом, структурой слоя и условиями эксплуатации.

Барьерные покрытия изолируют основу от среды, жертвенные покрытия переносят коррозионное растворение на внешний слой, комбинированные системы соединяют электрохимическое смещение потенциала с многослойной структурой и пассивацией. Катодные покрытия требуют плотности и отсутствия сквозных дефектов, поскольку поры создают локальные гальванические пары и ускоряют разрушение основы.

Для углеродистых сталей значимы жертвенная защита и устойчивость во влажной среде. Для пар «коррозионностойкая сталь – алюминиевый сплав» решающее значение имеет снижение разности потенциалов и уменьшение коррозионного поражения алюминия. Для деталей с трением и температурной нагрузкой предпочтение получают никелевые композиционные покрытия, совмещающие коррозионную стойкость, твердость и термическую работоспособность.

Цинк-никелевые системы выглядят перспективной заменой кадмиевой защите в контактных парах с алюминиевыми сплавами. Гальванотермические покрытия цинк – олово обладают преимуществами многослойной структуры. Композиционные покрытия Ni-WC расширяют границы гальванической защиты за счет соединения

антикоррозионных и износостойких свойств. Наиболее обоснованный выбор покрытия требует сочетания электрохимических измерений, ускоренных коррозионных испытаний и анализа технологической воспроизводимости.

Список литературы:

1. Абрамова Е.С., Клещева С.В., Трипачев О.В., Кузов А.В., Сафонов А.В. Гальванические покрытия стали марки Ст3 для повышения ее коррозионной стойкости в условиях ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 21–30. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-21-30.
2. Васильев А.С., Вдовин А.И., Закирова Л.И., Кольцова М.А. Современные тенденции развития гальванических защитных покрытий, работоспособных при температуре до 600 °С // Труды ВИАМ. 2026. № 4. С. 121–132. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-121-132.
3. 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 (151). С. 63–76. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76.
4. 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 (139). С. 42–53. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.
5. Киреев С.Ю., Киреева С.Н., Козлов Г.В., Кирилина Ю.Н., Янгуразова А.З. Разработка технологии формирования композиционных гальванических покрытий Ni-WC как альтернативы покрытиям Co-WC для изделий авиационной и космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3. С. 121–134. DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-121-134.

References:

1. Abramova E.S., Kleshcheva S.V., Tripachev O.V., Kuzov A.V., Safonov A.V. Galvanic Coatings of St3 Steel to Enhance Its Corrosion Resistance in PZROF Conditions // Radioactive Waste. 2024. No. 4 (29). pp. 21–30. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-21-30.
2. Vasiliev A.S., Vdovin A.I., Zakirova L.I., Koltsova M.A. Current Trends in the Development of Galvanic Protective Coatings Operable at Temperatures Up to 600°C // Proceedings of VIAM. 2026. No. 4. pp. 121–132. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-121-132.
3. Zakirova L.I., Sibileva S.V., Vdovin A.I., Koltsova M.A. Selection of a galvanic coating of corrosion-resistant steels for protection against corrosion in contact with aluminum alloys // Proceedings of VIAM. 2025. No. 9 (151). pp. 63–76. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76.
4. Zakirova L.I., Sibileva S.V., Demin S.A., Duyunova V.A. Study of galvanic coatings of corrosion-resistant steels for preventing contact corrosion // Proceedings of VIAM. 2024. No. 9 (139). P. 42–53. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.
5. Kireev S. Yu., Kireeva S. N., Kozlov G. V., Kirilina Yu. N., Yangurazova A. Z. Development of a Technology for the Formation of Composite Ni-WC Galvanic Coatings as an Alternative to Co-WC Coatings for Aviation and Space Equipment // Aviation Materials and Technologies. 2025. No. 3. P. 121–134. DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-121-134.