

Научная статья

УДК 621.357.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-121-132

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ,
РАБОТОСПОСОБНЫХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ДО 600 °С***А.С. Васильев¹, А.И. Вдовин¹, Л.И. Закирова¹, М.А. Кольцова¹*

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

Аннотация. Представлен обзор зарубежной научно-технической литературы в области гальванических защитных покрытий, применяемых при температурах до 600 °С. Согласно обзору, более 60 % исследований посвящено получению композиционных покрытий на основе никеля и его сплавов. Выявлены наиболее распространенные системы легирования композиционных электролитических покрытий на основе никеля. Отмечено, что получение никель-кобальтовых композитов методом электроосаждения является перспективным направлением, но в основном ограничивается лабораторными экспериментами, а масштабирование для промышленного массового производства остается серьезным препятствием.

Ключевые слова: гальванические покрытия, высокотемпературная коррозия, композиционные электролитические покрытия, функциональные покрытия

Для цитирования: 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 (158). С. 121–132. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-121-132.

Scientific article

**MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT
OF GALVANIC PROTECTIVE COATING
THAT CAN OPERATE AT TEMPERATURES UP TO 600 °C***A.S. Vasiliev¹, A.I. Vdovin¹, L.I. Zakirova¹, M.A. Koltsova¹*

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

Abstract. This article presents a review of international scientific and technical literature on galvanic protective coatings used at temperatures up to 600 °C. According to the review, over 60 % of the research is devoted to the production of composite coatings based on nickel and its alloys. The most common alloying systems for composite electrolytic coatings based on nickel are identified. It is noted that the production of nickel-cobalt composites by electrodeposition is a promising approach, but it is primarily limited to laboratory experiments, and scaling up for industrial mass production remains a significant obstacle.

Keywords: galvanic coating, high-temperature corrosion, composite electrolytic coating, functional coating

For citation: Vasiliev A.S., Vdovin A.I., Zakirova L.I., Koltsova M.A. Modern trends in the development of galvanic protective coating that can operate at temperatures up to 600 °C. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 121–132. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-121-132.

Введение

Процессы электроосаждения широко используются для всевозможных отраслей промышленности – от пищевой до аэрокосмической. Гальванические покрытия служат различным целям – от технологических до декоративных. Нанесение гальванических покрытий – давно освоенная технология, но благодаря растущим требованиям к эксплуатационным характеристикам она вызывает неподдельный интерес к исследованиям в данной области. Применение новых составов и методов при гальваническом способе осаждения позволяет выявить нюансы и раздвинуть привычные рамки этого процесса.

Интерес к гальваническим покрытиям обусловлен их значительным теоретическим и практическим потенциалом, что обеспечивает неизменное внимание исследователей на протяжении многих лет. В последнее время в рамках гальванотехники сформировалось активно развивающееся направление, связанное с синтезом композиционных покрытий. Такие материалы представляют собой металлическую матрицу, усиленную диспергированными частицами различной химической природы. Основным методом модификации является введение в раствор электролита микро- и наноразмерных частиц (оксидов, карбидов, нитридов, полимеров), которые в процессе электроосаждения включаются в формирующееся покрытие, что позволяет целенаправленно изменять его структуру и состав, а также придавать новые эксплуатационные характеристики.

Типы и виды гальванических покрытий

В системе защиты металлических конструкций от атмосферной коррозии одно из ведущих мест принадлежит защитным покрытиям. По своей природе они делятся на органические (лакокрасочные, полимерные) и неорганические (металлические, оксидные, солевые), причем теоретические основы и технологии их нанесения имеют фундаментальные различия.

Критериями для выбора метода нанесения служат физико-химические свойства основного металла и покрытия, требуемая толщина, а также ряд технико-экономических факторов. Среди наиболее распространенных методов можно выделить:

- горячий метод (погружение в расплав), применимый для покрытий с температурой плавления на десятки градусов ниже, чем у основного металла;
- электролитический метод, который обладает преимуществами при создании покрытий из тугоплавких металлов.

В то же время диффузионные методы, напыление из расплава и вакуумное испарение находят ограниченное применение [1].

Широкое применение гальванических покрытий в промышленности обусловлено рядом ключевых преимуществ:

- технологическая и экономическая эффективность – простота процесса, низкая себестоимость, легкая автоматизация и контроль;
- гибкость и универсальность – возможность точного регулирования состава, толщины и свойств покрытия; нанесение на детали сложной формы; локальное наращивание и ремонт слоя;
- функциональность – возможность получения покрытий с особыми свойствами (композиционные, аморфные, нанокристаллические);
- разнообразные области применения – покрытия с повышенной износостойкостью (хром), защита от коррозии (цинк, кадмий, олово, никель), декоративная отделка (никель, хром, золото, серебро), создание поверхностей с высоким коэффициентом отражения (серебро, хром, кадмий), локальная защита от цементации (медь).

Гальванический метод является безальтернативным для нанесения тугоплавких металлов (вольфрам, хром, молибден) и их сплавов (например, вольфрам-железо, вольфрам-кобальт). Таким образом, одной из важнейших задач в этой области является

разработка технологий получения высокофункциональных покрытий (износо-, жаро- и коррозионностойких) и их активное внедрение в производство деталей машин [2].

Гальванические покрытия обладают различными технологическими характеристиками. Наиболее распространенными гальваническими покрытиями являются: медь, цинк, никель, хром, кадмий, олово, золото, серебро, палладий. Гораздо реже в качестве самостоятельного покрытия используются покрытия на основе кобальта и родия.

В таблице представлены сводные данные по допустимым рабочим температурам гальванических покрытий, а также их основные недостатки [3–6].

Допустимые рабочие температуры и основные недостатки гальванических покрытий

Тип покрытия	Рабочая температура, °С	Недостатки
Цинк	≤250	Низкая коррозионная стойкость
Кадмий	≤250	Токсичность
Олово	≤200	Низкая износостойкость
Медь	≤300	Низкая коррозионная стойкость
Хром	≤450	Токсичность, низкая рассеивающая способность
Никель	≤650	Пористость
Серебро	≤700	Высокая стоимость
Палладий	≤300	
Золото	≤200	

Защитными гальваническими покрытиями с рабочей температурой, близкой к 600 °С, являются хромовое, никелевое и серебряное. Однако серебряное покрытие из-за своей высокой стоимости используется нечасто, поэтому наиболее распространенными гальваническими покрытиями, работающими при температуре ~600 °С, являются никелевое и хромовое.

Гальванические покрытия, работающие при повышенных температурах до 600 °С

Хромовые и никелевые покрытия – одни из наиболее распространенных металлических покрытий для функциональных целей, которые применяются в различных отраслях промышленности благодаря своим выдающимся свойствам, таким как высокая коррозионная стойкость, износостойкость и твердость. Такие покрытия используются для продления срока службы различных деталей, а также для гальванического покрытия шестеренок, рулевых валов, корпусов двигателей, компонентов топливной системы и тормозных колодок [7].

В процессе получения качественных *хромовых покрытий* необходимо нагревание электролитов, но из-за токсичности паров хрома, наряду с другими недостатками, такими как многоступенчатый процесс для получения покрытия нужной толщины, низкая выравнивающая способность (в некоторых случаях возможно даже усугубление дефектов поверхности), наличие высокого напряжения на границе раздела между хромированным покрытием и подложкой, их применение нежелательно.

Таким образом, наиболее подходящим покрытием является *никелевое гальваническое покрытие*, которое также не лишено недостатков, однако основной недостаток такого покрытия – пористость. Ее можно уменьшить благодаря использованию дисперсной фазы и получению композиционных электрохимических покрытий (КЭП). Специально разработанные КЭП, обеспечивающие защиту от коррозии, гидрофобность, электропроводность, износостойкость и трибологические характеристики, нашли разнообразное применение в таких секторах промышленности, как аэрокосмическая и текстильная, а также в автомобилестроении и общем машиностроении [8].

Анализ источников ВИНТИ и Scopus 2000–2018 гг.

Мировые тенденции показывают стойкий интерес к данному виду покрытий благодаря широкому выбору металлических матриц и дисперсных фаз. На рис. 1, а представлены данные о распределении публикаций в научных журналах за период 2000–2018 гг. в зависимости от природы металлической матрицы. Так, 60 % исследований посвящено получению КЭП на основе никеля и его сплавов, что свидетельствует о большей применимости и актуальности данной металлической матрицы.

На рис. 1, б представлены данные о распределении исследований КЭП с дисперсной фазой различной природы. Очевидно, что приоритеты отданы оксидам, карбидам и различным модификациям углерода. Вероятно, такое распределение связано не только с их доступностью и изученностью, но и с тем, что они наиболее эффективно влияют на коррозионную стойкость, износостойкость и микротвердость получаемых гальванических покрытий.

В большинстве анализируемых научных работ из заявленных целей исследований следует, что улучшение именно этих показателей являлось приоритетным.

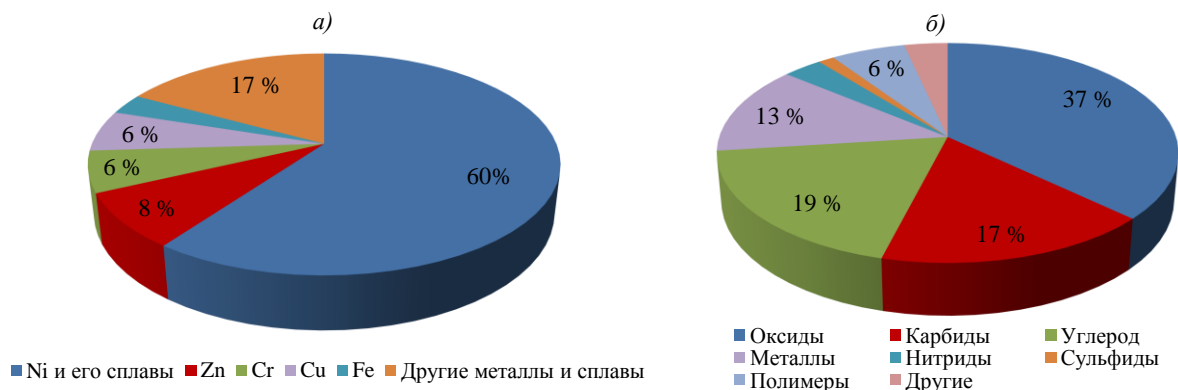


Рис. 1. Данные о распределении публикаций в научных журналах за период 2000–2018 гг. в зависимости от природы металлической матрицы (а) и дисперсной фазы (б)

Авторами работы [9] выбрано шесть параметров, которые наиболее важны для характеристики покрытий и зависят от природы металлической матрицы и дисперсной фазы. К ним отнесены: коррозионно-защитные характеристики, износостойкость, микротвердость, жаростойкость, жаропрочность, структурные характеристики, пористость и адгезия (рис. 2).

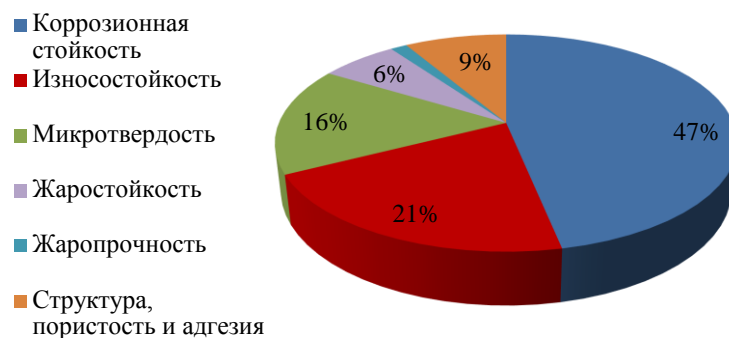


Рис. 2. Данные о распределении публикаций в научных журналах за период 2000–2018 гг. в зависимости от исследуемых свойств композиционных электрохимических покрытий

Анализ представленных в научно-технической литературе сведений показал перспективность исследований в области электрохимического осаждения КЭП, а также выявил отсутствующие сведения по исследованиям свойств получаемых гальванических покрытий (жаростойкость, жаропрочность, адгезия и др.) и их влиянию на свойства основного материала.

Никелевые композиционные электрохимические покрытия

Никелевые композиционные покрытия, полученные методом электроосаждения и содержащие армирующие элементы в виде керамических частиц, таких как SiC, Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, Si₃N₄, нитриды TiN, AlN, карбиды TiC и т. д., являются одними из наиболее распространенных гальванических покрытий.

Эти покрытия можно использовать отдельно или в сочетании с разными керамическими частицами для формирования многослойных, а также композитных покрытий с несколькими армирующими элементами (например, Ni–SiC–Al₂O₃, Ni–Cr–SiC, Ni–Zn–TiO₂ и т. д.), которые обладают огромным потенциалом для создания покрытий с желаемыми свойствами, что является сложной задачей при использовании других методов их нанесения. Кроме того, использование многослойных покрытий на основе никеля улучшило общую структуру и обеспечило стабильность покрытий, которые при увеличении толщины разрушались из-за недостаточной адгезии и концентрации напряжений. Многослойные покрытия состоят из базового слоя с более высокой адгезией, чем у подложки, и последующих слоев, обладающих такими желательными свойствами, как повышенная износ- и коррозионная стойкость, твердость, химическая стабильность, теплопроводность, прочность и многими другими (по сравнению с однослойными покрытиями той же толщины).

Кроме того, возможность формирования на поверхности нанопокровтий методом электроосаждения – это передовая технология нанесения покрытий благодаря своей простоте и экономичности.

Так, в статьях [10–15] рассмотрены некоторые важные свойства и применение различных КЭП на основе никеля. На рис. 3 и 4 указаны данные по применению и распределению различных никелевых КЭП в промышленности с указанием дисперсной фазы.

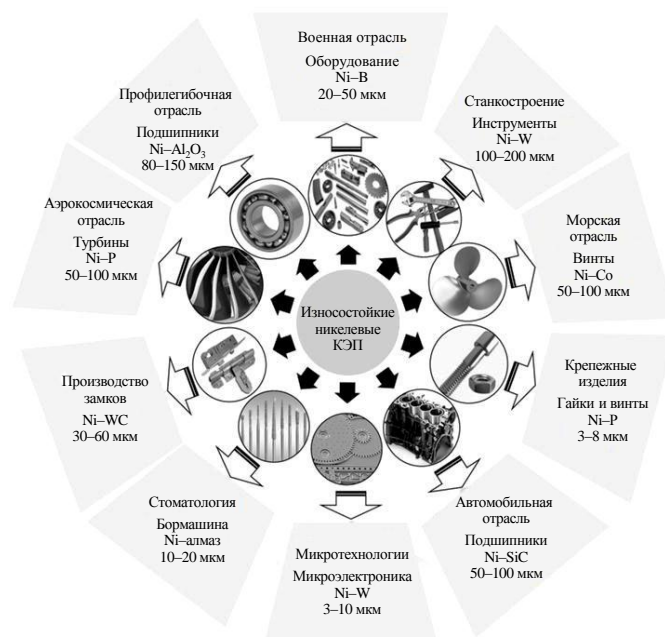


Рис. 3. Применение различных никелевых композиционных электрохимических покрытий (КЭП) в промышленности [16]



Рис. 4. Распределение различных никелевых композиционных электрохимических покрытий в промышленности [17]

Исследования показали, что армирование никелевой матрицы частицами Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 , WC , TiO_2 , $Ni-AlN$, $Ni-TiN$ для получения композитных никелевых покрытий может значительно улучшить их функциональные свойства. Кроме того, для придания противоизносных и антикоррозионных свойств используются материалы с многослойным армированием в виде $Ni-SiC-Al_2O_3$, $Ni-Cr-SiC$, $Ni-Zn-TiO_2$, $Ni-TiC-TiN$.

Никелевые композитные покрытия обладают огромным потенциалом для придания изделиям различных эксплуатационных свойств. Кроме того, никелевые КЭП сравнительно просты и экономичны в использовании, позволяют подбирать комбинации различных материалов в качестве упрочняющих элементов для покрытий, а с развитием технологий использование наноматериалов в качестве покрытий только увеличило этот потенциал. Проводятся многочисленные исследования по оптимизации покрытий на основе никеля, что открывает множество новых областей их применения. Одно из таких исследований – повышение прочности сцепления покрытия с поверхностью путем предварительной и последующей обработки поверхности, в том числе предварительной подготовки поверхности с помощью механического истирания и улучшения микроструктуры за счет предварительной и последующей криогенной обработки подложки.

Несмотря на определенные ограничения никелевых КЭП (от контроля входных переменных до недостаточной адгезии по сравнению с другими методами нанесения покрытий), исследования в области разработки композитных покрытий на основе никеля с высокими износостойкостью и коррозионной стойкостью, а также с адгезионными свойствами, твердостью и термостойкостью, сравнимыми с другими популярными методами нанесения покрытий (такими как PVD, CVD и т. д.), имеют огромную ценность [16, 17].

Однако для улучшения жаростойкости и жаропрочности покрытий перспективно осаждение КЭП на основе никель-кобальта, так как кобальт обладает превосходной износ- и термостойкостью и широко используется в различных областях промышленности в качестве компонента жаропрочных сплавов [18].

Так, в области некремниевой микроэлектроники никель (благодаря разработанному методу получения и превосходным механическим свойствам) – один из широко используемых конструкционных материалов для типичных технологических систем, таких как литография и гальванопластика. Однако в связи с быстрым развитием данной области материалы из чистого никеля больше не могут удовлетворять современным требованиям.

В качестве альтернативы, никель-кобальтовые композиционные материалы обладают превосходными механическими свойствами, термо- и коррозионной стойкостью, а также хорошей адаптируемостью к технологии обработки, поскольку кобальт имеет уникальные преимущества в качестве упрочняющей фазы, включая отличную износ- и термостойкость, коррозионную стойкость и высокую твердость [19].

Никель-кобальтовые композиционные электрохимические покрытия

На рис. 5. приведены основные области применения никель-кобальтовых КЭП.

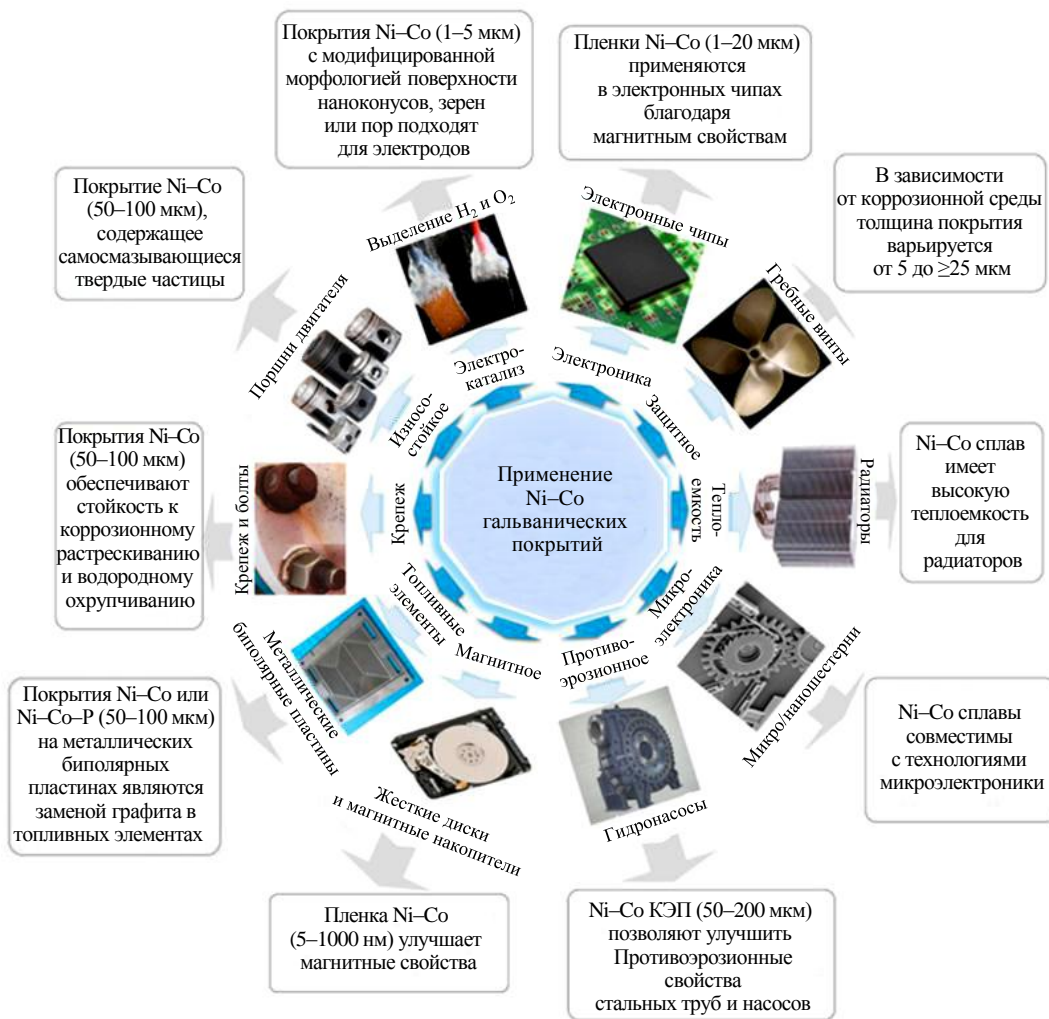


Рис. 5. Применение никель-кобальтовых композиционных электрохимических покрытий (КЭП) [20]

С развитием технологий никель-кобальтовые сплавы могут не в полной мере соответствовать определенным требованиям, предъявляемым к их применению, по таким свойствам, как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д. Введение в никель-кобальтовые сплавы дисперсных фаз (таких как углеродные нанотрубки, керамические частицы, металлические наночастицы и т. д.) может придать таким композитным покрытиям характеристики, отличающиеся от характеристик гальванических сплавов [19].

Так, рядом ученых рассмотрено влияние различных дисперсных фаз, а также параметров электроосаждения на функциональные свойства никель-кобальтовых КЭП [21–28]. В статьях для полученных покрытий представлены данные по коррозионной стойкости, износостойкости, коэффициенту трения и микротвердости. Помимо влияния размера дисперсных фаз на КЭП, различного содержания никеля и кобальта в составе покрытия, отмечается положительное влияние реверсивного режима электроосаждения на морфологию и распределение дисперсных фаз в покрытии.

В настоящее время получение никель-кобальтовых композитов методом электроосаждения в основном ограничивается экспериментами в лабораторных условиях, а масштабирование для промышленного массового производства остается серьезным препятствием из-за ряда трудностей – например, возникновение остаточных напряжений в покрытии, которое приводит к его разрушению, а также неравномерность распределения дисперсных фаз в металлической матрице в объеме КЭП. Для решения этих проблем необходимо провести дальнейшие исследования в области управления остаточными напряжениями и предотвращения агломерации частиц, особенно для некремниевой микроэлектроники.

Преодоление этих препятствий приведет к более широкому использованию композитного электроосаждения в промышленности, что позволит повысить эксплуатационные характеристики материалов для различных задач [19].

Исследования ВИАМ в области композиционных электрохимических покрытий и покрытий сплавами

В статье [29] показано, что работы по исследованию КЭП на основе Cr, Ni, Zn и сплавов систем Ni–Co [30], Ni–Cu, Zn–Ni и Zn–Co с добавлением дисперсных фаз на основе оксидов и карбидов, проводимые еще с 1992 г., позволили значительно улучшить эксплуатационные характеристики (микротвердость и коррозионную стойкость) гальванических покрытий. Однако в исследованиях покрытий заметно отсутствие данных по жаростойкости, адгезии и т. д.

В статье [31] также указаны основные направления развития материалов до 2030 г., в том числе композиционных материалов с комплексными защитными свойствами. Так, в статьях [32, 33] представлены данные о разработке и исследовании КЭП на основе никеля с добавлением карбидов кремния и вольфрама. Это объясняет постоянный интерес к развитию и исследованию композиционных материалов, в том числе и КЭП.

В статье [6] исследованы микротвердость, термостойкость и жаростойкость стандартного хромового покрытия и покрытия, легированного молибденом, при различных температурах. Данные исследования показывают критическое уменьшение (на 70 %) микротвердости хромового нелегированного молибденом покрытия в процессе нагрева до температуры 650 °С. Микротвердость покрытия, легированного молибденом, снижается на 30 %. Однако при проведении исследований на жаростойкость все образцы показывают относительно низкий привес окислы. Таким образом, допустимая температура при легировании молибденом повышается с 400 до 650 °С.

В статье [34] установлено, что введение нанопорошка Al_2O_3 в электролит никелирования не оказывает значительного влияния на рассеивающую способность, однако уменьшает выход по току по сравнению с электролитом без дисперсной фазы. Введение нанопорошка Al_2O_3 в электролит никелирования позволяет повысить рабочую плотность тока и улучшить однородность покрытия путем уменьшения размера зерен никелевого покрытия.

Так, в статье [35] указано, что повышение свойств гальванических покрытий может быть достигнуто за счет корректировки технологии нанесения покрытий, их модифицирования частицами. Однако информации по свойствам (твердость, адгезия и др.) получаемых гальванических покрытий и их влиянию на свойства основного материала в научно-технической литературе недостаточно. Таким образом, дальнейшие исследования в данном направлении целесообразно направить на подбор оптимального состава, разработку технологии нанесения высокотемпературных гальванических покрытий и оценку полного перечня их свойств.

Заключения

Ранее исследования гальванических покрытий часто преследовали цель – улучшить коррозионную стойкость, износостойкость и механические свойства материалов, но не получили широкого применения для защиты деталей, работающих при высоких температурах, что связано с ограничением рабочей температуры данных покрытий.

Анализ научно-технических зарубежных и российских литературных источников показал, что >60 % исследований посвящено получению КЭП на основе никеля и его сплавов, что показывает применимость и перспективность данного направления исследований.

При этом улучшение эксплуатационных свойств гальванических покрытий может быть достигнуто путем корректировки технологии нанесения покрытий, а также создания КЭП. Следует отметить, что информации по свойствам (структура, адгезия, жаростойкость и др.) получаемых гальванических покрытий, включая КЭП, и их влиянию на свойства основного материала в научно-технической литературе все еще недостаточно и требуются дальнейшие исследования.

Список источников

1. Емец Н.Е., Белова И.В., Михалко Л.В., Маркова С.А. Технология материалов и покрытий: в 2 ч: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГТУ, 2013. Ч. 2. 111 с.
2. Лобанов М.Л., Кардолина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия. учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.
3. Giurlani W., Zangari G., Gambinossi F. Electroplating for Decorative Applications: Recent Trends in Research and Development // *Coatings*. 2018. No. 8. P. 260.
4. ГОСТ 9.303–84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору. М.: Стандартиформ, 2008. 34 с.
5. ОСТ 90171–83. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Выбор видов и толщин. М.: Опытно-полиграфическое предприятие ЦНИИТЭИлегпрома, 1983. 95 с.
6. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б. Термостойкость электролитических хромовых покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.
7. Okonkwo B.O., Jeong C., Jang C. Advances on Cr and Ni Electrodeposition for Industrial Applications – A Review // *Coatings*. 2022. No. 12. P. 1555.
8. Walsh F.C., Wang S., Zhou N. The electrodeposition of composite coatings: Diversity, applications and challenges // *Current Opinion in Electrochemistry*. 2020. No. 20. P. 8–19.
9. Винокуров Е.Г., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. Электроосаждение композиционных покрытий // *Химия и химическая технология*. 2020. Т. 63. С. 4–38.
10. Saini A., Singh G., Mehta S. et al. A review on mechanical behaviour of electrodeposited Ni-composite coatings // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2023. No. 17. P. 2247–2258.
11. Zellele D.M., Yar-Mukhamedova G.S., Rutkowska-Gorczyca M. A Review on Properties of Electrodeposited Nickel Composite Coatings: Ni–Al₂O₃, Ni–SiC, Ni–ZrO₂, Ni–TiO₂ and Ni–WC // *Materials*. 2024. No. 17. P. 5715.
12. Petukhova P.M., Bushueva E.G., Novgorodtseva O.N., Kizimov V.D. Electrodeposition of Ni–WC composite coatings: formation, structure and properties // *Chimica Techno Acta*. 2024. Vol. 11 (4). P. 1–7. DOI: 10.15826/chimtech.2024.11.4.08.
13. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Сидоркин О.А., Пустоветов А.В. Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т. 34. № 4. С. 629–647.
14. Parida G., Chaira D., Basu A. Ni–ZrO₂ Composite Coating by Electro-Co-Deposition // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2013. No. 66 (1). P. 5–11.
15. Bhogal S.S., Kumar V., Dhama S.S., Pabla B.S. Preparation and properties of electrodeposited Ni–TiO₂ composite coating // *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2015. No. 5 (1). P. 37–45.

16. Mahidashti Z., Aliofkhazraei M., Lotfi N. Review of Nickel-Based Electrodeposited Tribo-Coatings // *The Indian Institute of Metals – ИИМ*. 2017. No. 71 (2). P. 123–162.
17. Hamidouche M. Mechanical and tribological characterization of electrolytically elaborated (Ni and Ni–Co) deposits: Thesis for PhD. Sétif, 2021. P. 149.
18. Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сульянова Е.А., Мазалов И.С. Жаропрочные сплавы на основе кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). С. 3–10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-3-10.
19. Lai L., Qian F., Bi Y. et al. Advancements in the Preparation and Application of Ni–Co System (Alloys, Composites, and Coatings): A Review // *Nanomaterials*. 2025. No. 15. P. 312.
20. Karimzadeh A., Aliofkhazraei M., Walsh F.C. A review of electrodeposited Ni–Co alloy and composite coatings: Microstructure, properties and applications // *Surface & Coatings Technology*. 2019. No. 372. P. 463–498.
21. Wang G.F., Jiang S.S., Lu Z., Zhang K.F. Preparation and tensile properties of Al₂O₃/Ni–Co nanocomposites // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011. No. 21. P. 374–379.
22. Tian Y., Chengzhang P., Wei X. Ni–Co–Cr alloy co-deposition process // *Journal of Hunan University Science and Technology (Natural Sciences Edition)*. 2015. No. 30. P. 36–40.
23. Li B., Zhang W., Li D. Synthesis and properties of a novel Ni–Co and Ni–Co/ZrO₂ composite coating by DC electrodeposition // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. No. 821. P. 153258.
24. Zhang Z.Q., Jiang C.H., Ma N.H. Electrodeposition and mechanical property of Ni–Co–ZrC coatings // *Materials Research Innovations*. 2015. Vol. 19. No. 2. P. 133–139.
25. Torabinejad V., Aliofkhazraei M., Rouhaghdam A.S., Allahyarzadeh M.H. Tribological properties of Ni–Fe–Co multilayer coatings fabricated by pulse electrodeposition // *Tribology International*. 2017. No. 106. P. 34–40.
26. Kumaraguru S., Gnanamuthu R.M. An efficient corrosion protection activity of electrodeposited Ni/Ni–Co–Mn oxide composite for surface modification of steel // *Materials Letters*. 2021. No. 295. P. 129804.
27. Ghazanlou S.I., Farhood A.H.S., Hosouli S. et al. Pulse and direct electrodeposition of Ni–Co/micro and nanosized SiO₂ particles // *Materials and Manufacturing Processes*. 2018. No. 33. P. 1067–1079.
28. Xu W., Xu T., Wang X.L. et al. Effect of Diamond Particle Size on the Microstructure and Wear Resistance of Ni–Co // *Diamond Composite Coating. Equipment Manufacturing Technology*. 2015. No. 6. P. 9–11.
29. Ильин В.А. Нанотехнологии нанесения кластерных гальванических покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 2. С. 3–7.
30. Электролит никелирования: пат. 2293803С1 Рос. Федерация; заявл. 01.08.05; опубл. 20.02.07.
31. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
32. 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 (80). С. 121–134. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-121-134.
33. Квятковская А.С., Сабурова Ю.Б., Белоногов В.А., Еникеев Р.Д., Ганеев А.В., Астанин В.В., Карабаев С.О. Исследование Ni–SiC покрытий и способов их нанесения на алюминиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 128–139. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-128-139.
34. Нагаев В.В. Исследование электролитов никелирования, содержащих нанопорошки // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 1. С. 18–20.
35. Хмелева К.М., Козлов И.А., Никитин Я.Ю., Никифоров А.А. Современные тенденции защитных гальванических покрытий, работающих при повышенных температурах (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). С. 75–86. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.

References

1. Yemets N.E., Belova I.V., Mikhalko L.V., Markova S.A. *Technology of Materials and Coatings*: in 2 parts: a textbook. Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU Publ. House, 2013, part 2, 111 p.
2. Lobanov M.L., Kardonina N.I., Rossina N.G., Yurovskikh A.S. *Protective Coatings*. a textbook. Ekaterinburg: Ural Univ. Publ. House, 2014, 200 p.
3. Giurlani W., Zangari G., Gambinossi F. Electroplating for Decorative Applications: Recent Trends in Research and Development. *Coatings*, 2018, no. 8, p. 260.
4. State Standard 9.303–84. *Unified System of Protection against Corrosion and Aging. Metallic and Non-Metallic Inorganic Coatings. General Selection Requirements*. Moscow: Standartinform, 2008, 34 p.
5. Industry standard 90171–83. *Metallic and Non-Metallic Inorganic Coatings. Selection of Types and Thicknesses*. Moscow: Experimental Printing Enterprise TsNIITELlegprom, 1983, 95 p.
6. Salakhova R.K., Tikhoobrazov A.B. Thermal resistance of electrolytic chromium coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.
7. Okonkwo B.O., Jeong C., Jang C. Advances on Cr and Ni Electrodeposition for Industrial Applications – A Review. *Coatings*, 2022, no. 12, p. 1555.
8. Walsh F.C., Wang S., Zhou N. The electrodeposition of composite coatings: Diversity, applications and challenges. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, no. 20, pp. 8–19.
9. Vinokurov E.G., Margolin L.N., Farafonov V.V. Electrodeposition of composite coatings. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2020, vol. 63, pp. 4–38.
10. Saini A., Singh G., Mehta S. et al. A review on mechanical behaviour of electrodeposited Ni-composite coatings. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2023, no. 17, pp. 2247–2258.
11. Zellele D.M., Yar-Mukhamedova G.S., Rutkowska-Gorczyca M. A Review on Properties of Electrodeposited Nickel Composite Coatings: Ni–Al₂O₃, Ni–SiC, Ni–ZrO₂, Ni–TiO₂ and Ni–WC. *Materials*, 2024, no. 17, p. 5715.
12. Petukhova P.M., Bushueva E.G., Novgorodtseva O.N., Kizimov V.D. Electrodeposition of Ni–WC composite coatings: formation, structure and properties. *Chimica Techno Acta*, 2024, vol. 11 (4), pp. 1–7. DOI: 10.15826/chimtech.2024.11.4.08.
13. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V. Wear resistance of nickel composite coatings with micron and submicron SiC particles. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*, 2024, vol. 34, no. 4, pp. 629–647.
14. Parida G., Chaira D., Basu A. Ni–ZrO₂ Composite Coating by Electro-Co-Deposition. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2013, no. 66 (1), pp. 5–11.
15. Bhogal S.S., Kumar V., Dhama S.S., Pabla B.S. Preparation and properties of electrodeposited Ni–TiO₂ composite coating. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 2015, no. 5 (1), pp. 37–45.
16. Mahidashti Z., Aliofkhaezai M., Lotfi N. Review of Nickel-Based Electrodeposited Tribo-Coatings. *The Indian Institute of Metals – IIM*, 2017, no. 71 (2), pp. 123–162.
17. Hamidouche M., Walsh F.C. *Mechanical and tribological characterization of electrolytically elaborated (Ni and Ni–Co) deposits*: Thesis for PhD. Sétif, 2021, p. 149.
18. Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A., Mazalov I.S. Heat-resistant cobalt-based alloys. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), pp. 3–10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 18, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-3-10.
19. Lai L., Qian F., Bi Y. et al. Advancements in the Preparation and Application of Ni–Co System (Alloys, Composites, and Coatings): A Review. *Nanomaterials*, 2025, no. 15, p. 312.
20. Karimzadeh A., Aliofkhaezai M., Walsh F.C. A review of electrodeposited Ni–Co alloy and composite coatings: Microstructure, properties and applications. *Surface & Coatings Technology*, 2019, no. 372, pp. 463–498.
21. Wang G.F., Jiang S.S., Lu Z., Zhang K.F. Preparation and tensile properties of Al₂O₃/Ni–Co nanocomposites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, no. 21, pp. 374–379.

22. Tian Y., Chengzhang P., Wei X. Ni–Co–Cr alloy co-deposition process. *Journal of Hunan University Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2015, no. 30, pp. 36–40.
23. Li B., Zhang W., Li D. Synthesis and properties of a novel Ni–Co and Ni–Co/ZrO₂ composite coating by DC electrodeposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, no. 821, p. 153258.
24. Zhang Z.Q., Jiang C.H., Ma N.H. Electrodeposition and mechanical property of Ni–Co–ZrC coatings. *Materials Research Innovations*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 133–139.
25. Torabinejad V., Aliofkhaezai M., Rouhaghdam A.S., Allahyarzadeh M.H. Tribological properties of Ni–Fe–Co multilayer coatings fabricated by pulse electrodeposition. *Tribology International*, 2017, no. 106, pp. 34–40.
26. Kumaraguru S., Gnanamuthu R.M. An efficient corrosion protection activity of electrodeposited Ni/Ni–Co–Mn oxide composite for surface modification of steel. *Materials Letters*, 2021, no. 295, p. 129804.
27. Ghazanlou S.I., Farhood A.H.S., Hosouli S. et al. Pulse and direct electrodeposition of Ni–Co/micro and nanosized SiO₂ particles. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, no. 33, pp. 1067–1079.
28. Xu W., Xu T., Wang X.L. et al. Effect of Diamond Particle Size on the Microstructure and Wear Resistance of Ni–Co. *Diamond Composite Coating. Equipment Manufacturing Technology*, 2015, no. 6, pp. 9–11.
29. Ilyin V.A. Nanotechnology for applying cluster galvanic coatings. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 2009, no. 2, pp. 3–7.
30. *Nickel plating electrolyte*: pat. 2293803C1 Rus. Federation; appl. 01.08.05; publ. 20.02.07.
31. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
32. Kireev S.Yu., Kireeva S.N., Kozlov G.V., Kirilina Yu.N., Yangurazova A.Z. Development of the technology for electroplating composite Ni–WC coatings as an alternative to Co–WC coatings for aerospace components. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 121–134. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 18, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-121-134.
33. Kvyatkovskaya A.S., Saburova Yu.B., Belonogov V.A. et al. The investigation of electrodeposited Ni–SiC coatings and the methods of its application on aluminum alloys. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 128–139. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 18, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-128-139.
34. Nagaev V.V. Study of nickel plating electrolytes containing nanopowders. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 2009, no. 1, pp. 18–20.
35. Khmeleva K.M., Kozlov I.A., Nikitin Ya.Yu., Nikiforov A.A. Modern trends of protective galvanic coatings working at high temperatures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), pp. 75–86. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.

Информация об авторах

Васильев Алексей Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Вдовин Александр Ильич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Закирова Лилия Ильдусовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Кольцова Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexey S. Vasiliev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Aleksander I. Vdovin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Liliya I. Zakirova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Marina A. Koltsova, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.11.2025.
 The article was submitted 21.10.2025; approved and accepted for publication after reviewing 07.11.2025.