ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве

2026; 18 (5):
580–590

Nanobuild.ru

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья / Original article
УДК 621.793.3
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-5-580-590

CC BY 4.0

Масштабирование процесса нанесения металломатричного композиционного покрытия «Ni–SiC»

Светлана Камильевна Киселева[1,2]*, **Линар Динарович Ахмеров**[1,2], **Алияна Зенфировна Хуснутдинова**[1,2], **Ирек Вилевич Кандаров**[1,2]

[1] Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Российская Федерация

[2] Научно-производственная ассоциация «Технопарк Авиационных Технологий», 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: kiseleva_s2018@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день металломатричные композиционные покрытия являются широко востребованными благодаря возможности сочетания в себе свойств как металлической основы, так и упрочняющих их частиц. Наиболее простым и технологичным способом нанесения покрытия является электроосаждение. Одним из фундаментальных параметров, определяющим качество формируемого покрытия и скорость электроосаждения, является плотность тока. В литературе имеются противоположные мнения о влиянии плотности тока на качество композитного покрытия. Основным критерием выбирают содержание объемной доли упрочняющих частиц. Использование наночастиц (размером менее 100 нм) в качестве упрочнителя позволяет значительно повысить твердость и износостойкость матрицы за счет дисперсионного твердения, однако они обладают высокой склонностью к агломерации и требуют более тщательного контроля режимов электроосаждения. Немаловажно при электроосаждении сформировать покрытие с равномерным распределением частиц в металлической матрице по всей рабочей площади заготовки для обеспечения стабильности механических и функциональных свойств, что в дальнейшем будет определять долговечность работы деталей. С этой точки зрения представляет интерес масштабирование процесса электроосаждения и переход на модельные образцы, длинновой размер которых имитирует максимальную высоту реальной осесимметричной детали, например цилиндр, что позволит воспроизвести условия нанесения покрытия, приближённые к производственным. Цель работы – исследование однородности структуры и свойств покрытия «Ni–SiC», содержащего фракцию частиц размером более 2 мкм и сформированного на длинномерных заготовках (площадью 0,2 дм^2) в процессе электроосаждения в зависимости от плотности тока. **Методы и материалы.** В качестве материала подложки для формирования композиционного покрытия «Ni–SiC» использовали литейный алюминиевый сплав АК7. Размеры образцов подложки 70×20×4 мм. Режим электроосаждения: плотность тока 0,5 А/дм^2, 10 А/дм2, 20 А/дм^2; продолжительность 60 минут; температура 60 °С. Микроструктуру покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа «JSM-6490 LV» при увеличении ×500. Микротвердость оценивали с использованием микротвердомера «TBM Tochline» при нагрузке 50 г. Испытания на износостойкость проводили на трибометре «Nanovea» методом «шарик-по-диску». **Результаты и обсуждение.** Проведена отработка технологии электроосаждения матричного композиционного покрытия «Ni–SiC» на длинномерные плоские образцы (0,2 дм^2) из алюминиевого сплава АК7 и подбор оптимальных параметров процесса. Продемонстрирована возможность формирования однородного покрытия на основе никелевой матрицы, содержащей крупные частицы SiC на плоских длинномерных образцах (0,2 дм^2) из алюминиевого сплава АК7, имитирующих сектор осесимметричной детали. **Выводы.** Металломатричное композитное покрытие «Ni–SiC», сформированное на плоских длинномерных образцах (площадью 0,2 дм^2) из алюминиевого сплава АК7 в результате электроосаждения, характеризуется однородностью толщины, объемной долей частиц карбида кремния и микротвердости в трех контрольных зонах для каждой плотности тока. Чем выше плотность тока при электроосаждении, тем выше толщина формируемого металломатричного композитного покрытия «Ni–SiC», объемная доля упрочняющих частиц и микротвердость.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металломатричные композиционные покрытия, электроосаждение, микротвердость, карбид кремния, унос массы

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Работа проводилась в рамках реализации Стратегического проекта «Новые технологии, технические и интеллектуальные системы в машиностро-

© Киселева С.К., Ахмеров Л.Д., Хуснутдинова А.З., Кандаров И.В., 2026

ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве

2026; 18 (5):
580–590

Nanobuild.ru

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ении» программы развития ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на 2021–2030 годы в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку проекта.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Киселева С.К., Ахмеров Л.Д., Хуснутдинова А.З., Кандаров И.В. Масштабирование процесса нанесения металломатричного композиционного покрытия «Ni–SiC». *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(5):580–590. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-5-580-590. – EDN: SJSTWL.

Scaling up the application process of "Ni–SiC" metal-matrix composite coating

Svetlana K. Kiseleva[1, 2*], Linar D. Akhmerov[1, 2], Aliyana Z. Khusnutdinova[1, 2], Irek V. Kandarov[1, 2]

[1] Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Kosmonavtov str. 1, 450064, Russian Federation
[2] Scientific and Production Association "Technopark of Aviation Technologies", Ufa, Tramvaynaya str. 5, building 1, 450112, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: kiseleva_s2018@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Today, metal-matrix composite coatings are widely in demand due to the possibility of combining the properties of both the metal base and their reinforcing particles. The simplest and most technologically advanced method of coating is electrodeposition. One of the key parameters that determines the quality of the coating formed and the electrodeposition rate is current density. The literature presents opposing views on how current density affects the quality of composite coatings. The primary criterion is the volume fraction of reinforcing particles. The use of nanoparticles (less than 100 nm in size) as a hardener makes it possible to significantly increase the hardness and wear resistance of the matrix due to dispersion hardening, however, they have a high tendency to agglomeration and require more careful control of electrodeposition modes. It is important during electrodeposition to form a coating with a uniform distribution of particles in the metal matrix over the entire working area of the workpiece to ensure stability of mechanical and functional properties, which will subsequently determine the durability of the parts. From this point of view, it is of interest to scale the electrodeposition process and switch to model samples, the long size of which imitates the maximum height of a real axisymmetric part, for example, a cylinder, which will allow reproducing coating conditions close to production ones. The aim of the research is to study the homogeneity of the structure and properties of the Ni–SiC coating containing a fraction of particles larger than 2 μm and formed on long workpieces (with an area of 0.2 dm^2) in the process of electrodeposition depending on the current density. **Methods and materials.** Cast aluminum alloy AK7 was used as the substrate material for forming the Ni-SiC composite coating. The dimensions of the substrate samples were 70×20×4 mm. Electrodeposition mode: current density of 0.5 A/dm^2, 10 A/dm2, 20 A/dm^2; duration 60 minutes; temperature 60 °C. The microstructure of the coatings was examined using a JSM-6490 LV scanning electron microscope at a magnification of ×500. Microhardness was estimated using a TBM Tochline microhardness tester at a load of 50 g. Wear resistance tests were performed on a Nanovea tribometer using the ball-on-disk method. **Results and discussion.** The technology of electrodeposition of the matrix composite coating "Ni–SiC" on long flat samples (0.2 dm^2) of aluminum alloy AK7 was developed and the optimal process parameters were selected. The possibility of forming a homogeneous coating based on a nickel matrix containing large SiC particles on flat long samples (0.2 dm^2) of aluminum alloy AK7, simulating a sector of an axisymmetric part, was demonstrated. **Conclusion.** The metal-matrix composite coating "Ni–SiC", formed on flat long samples (with an area of 0.2 dm^2) of aluminum alloy AK7 as a result of electrodeposition, is characterized by uniformity of thickness, volume fraction of silicon carbide particles and microhardness in three control zones for each current density. The higher the current density during electrodeposition, the higher the thickness of the formed Ni–SiC metal matrix composite coating, the volume fraction of reinforcing particles and the microhardness.

KEYWORDS: metal matrix composite coatings, electrodeposition, microhardness, silicon carbide, mass loss

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: This work was conducted as part of the Strategic Project "New technologies, technical, and intelligent systems in mechanical engineering" of the Ufa State Petroleum Technological University Development Program for 2021–2030 in accordance with the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors are grateful for the financial support of this project.

FOR CITATION:
Kiseleva S.K., Akhmerov L.D., Khusnutdinova A.Z., Kandarov I.V. Scaling up the application process of "Ni–SiC" metal-matrix composite coating. *Nanotechnologies in Construction.* 2026;18(5):580–590. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-5-580-590. – EDN: SJSTWL.

ISSN 2075-8545 (online)

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день металломатричные композиционные покрытия (ММКП) являются широко востребованными благодаря возможности сочетания в себе свойств как металлической основы, так и упрочняющих их частиц. Внедрение армирующих частиц позволяет повысить механические свойства покрытий, их коррозионную стойкость и расширить сферы применения [1, 2].

Разработка различных методов внедрения частиц в металлическую матрицу приобретает высокую значимость благодаря возможности синтезирования широкого спектра материалов с уникальными функциональными свойствами. Наиболее простым и технологичным способом нанесения покрытия является электроосаждение [3], при котором происходит процесс восстановления ионов металла из электролита на основе растворов солей под действием электрического тока. Заготовка действует как катод и подключается к отрицательному полюсу источника питания, тогда как анод, обычно представляющий собой электрод в растворе электролита из того же металла, подключается к положительному полюсу. Физико-химические принципы электроосаждения, как известно, используются в гальваностегии.

Особый интерес среди ММКП, полученных путем электроосаждения, представляют никелевые композиционные покрытия. Введение твердых частиц SiC [4], Al_2O_3 [5], ZrO_2 [4], WC [6] и TiO_2 [7] приводит к существенному улучшению механических свойств покрытий, таких как прочность, твердость и сопротивление износу и определяющих их потенциальное применение.

Наиболее обширные исследования проводились на композитах с никелевой матрицей, содержащей внедренные частицы карбида кремния SiC. Для деталей, работающих в условиях интенсивного трения, механического воздействия и применения в автомобилестроении, аэрокосмической и обрабатывающей промышленности, система «Ni–SiC» являются незаменимой в качестве защитного покрытия [8, 9]. Ранее в таких деталях, как алюминиевые цилиндры и поршневые кольца, для упрочнения поверхности использовали гальваническое хромирование, однако переход к покрытию типа «Ni–SiC» позволяет снизить загрязнение окружающей среды и избежать негативного воздействия на здоровье человека [10].

Как известно, преимуществом процесса электроосаждения покрытия «Ni–SiC» является возможность контроля структуры и свойств путем изменения таких технологических параметров, как состав электролита, температура, скорость перемешивания и содержание частиц [1, 9], а также взаимное расположение катода и анода в процессе электроосаждения [11, 12]. Последний параметр становится наиболее значимым при разработке технологии электроосаждения покрытия, содержащего крупную фракцию частиц размером более 2 мкм. Авторы [12] отмечают, что горизонтальное положение обрабатываемой поверхности позволяет стабильно получать композитное покрытие «Ni–SiC», характеризующееся хорошей адгезией. Стоит отметить, что в данных работах покрытие формировали на плоских образцах площадью 0,1 дм^2. Еще одним из фундаментальных параметров, определяющим качество формируемого покрытия и скорость электроосаждения, является плотность тока ρ. Отмечается [13] существование оптимального диапазона ρ, при котором формируется покрытие с максимальным содержанием частиц. Так, к примеру, для наноразмерных частиц SiC этот диапазон находится от 40 до 60 mA/см^2.

Немаловажно при электроосаждении сформировать покрытие с равномерным распределением частиц в металлической матрице по всей рабочей площади заготовки для обеспечения стабильности механических и функциональных свойств, что в дальнейшем будет определять долговечность работы деталей. С этой точки зрения представляет интерес масштабирование процесса электроосаждения и переход на модельные образцы, длинновой размер которых имитирует максимальную высоту реальной осесимметричной детали, например цилиндр, что позволит воспроизвести условия нанесения покрытия, приближенные к производственным.

Таким образом, целью данной работы является исследование однородности структуры и свойств покрытия «Ni–SiC», содержащего фракцию частиц размером более 2 мкм и сформированного на длинномерных заготовках (площадью 0,2 см^2) в процессе электроосаждения в зависимости от плотности тока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходный материал

В качестве материала подложки для формирования композиционного покрытия «Ni–SiC» использовали литейный алюминиевый сплав АК7 (ГОСТ 30620-98). Микротвердость – 58HV. Размер плоских образцов был выбран в соответствии с линейным размером сектора осесимметричной детали типа цилиндр и составил в длину 70 мм, ширину 20 мм и толщину 4 мм.

Оценку содержания химических элементов материала подложки проводили с использованием рентгеновского микроанализатора «INCA-Energy» и энергодисперсионного спектрометра «Inca X-Act», которым оснащен растровый электронный микроскоп (РЭМ) «JSM-6490 LV». Анализ пяти спектров,

ISSN 2075-8545 (online)

снятых с поверхности образца, показал следующее среднее содержание компонентов (мас. %): Al – 81,0; Si – 18,0; Mg – 0,1.

Подготовка поверхности образцов перед нанесением покрытия

Подготовку поверхности проводили с целью улучшения сцепления покрытия с материалом подложки. Она включала в себя несколько этапов:

- обезжиривание в ультразвуковой ванне с ацетоном 2 мин.;
- промывку в теплой дистиллированной воде;
- травление в растворе плавиковой (HF) и азотной кислот (HNO_3) 3 мин.;
- двукратную промывку в дистиллированной воде при комнатной температуре.

После промывки плоские образцы незамедлительно устанавливали в установку, чтобы не допустить высыхания поверхности подложки и повторного образования естественной оксидной пленки за счет взаимодействия с кислородом воздуха.

Электроосаждение

Для нанесения покрытия использовали сульфаматный электролит Уоттса, состав которого представлен в таблице 1 [14].

Электролит для осаждения Ni–SiC готовили в следующей последовательности. В стеклянной емкости, заполненной дистиллированной водой до $^3/_4$ необходимого объема, при температуре до 70 °C последовательно растворяли борную кислоту, хлорид никеля, никель сернокислый и лаурилсульфат натрия. После этого уровень электролита доводили до необходимого объема и добавляли карбид кремния.

В качестве анода использовали пруток из электролитического никеля марки НПА2 (ГОСТ 492-2006).

Устройство для электроосаждения композитного покрытия представлено на рис. 1 и состоит из ванны 1 цилиндрической формы, двух торцевых крышек 2 и 3 воронкообразной формы, закрывающих торцы ванны с размещенным в них цилиндрическим никелевым анодом 4. К внутренней стенке ванны крепится плоский образец. Ванна с крышками установлены в подвижную раму 6 с возможностью вращения вокруг оси симметрии для передачи центробежных сил на электролит (7 на рис. 1) с частицами SiC (8 на рис. 1). Неподвижная рама 9 позволяет изменять положение ванны 1 относительно вектора силы гравитационного поля притяжения земли. Образец 5 из алюминиевого сплава, который является катодом, и цилиндрический никелевый анод 4 подключают к источнику постоянного тока.

Таблица 1. Состав электролита и параметры электроосаждения

Компоненты	Концентрация, гр/л
Одиночная соль никеля ($Ni_2SO_4 \cdot 7H_2O$)	300
Хлорид никеля ($NiCl_2$)	30
Борная кислота (H_3BO_3)	30
Лаурисульфат натрия ($C_{12}H_{25}SO_4Na$)	1,5
Карбид кремния (SiC)	150
Параметры электроосаждения	**Значение**
Температура (°C)	60±1
Ph	3,5…4,0
Длительность обработки τ, мин.	60
Скорость перемешивания n, об/мин.	от 1 до 300
Плотность тока j, А/дм^2	0,5; 10,0; 20,0

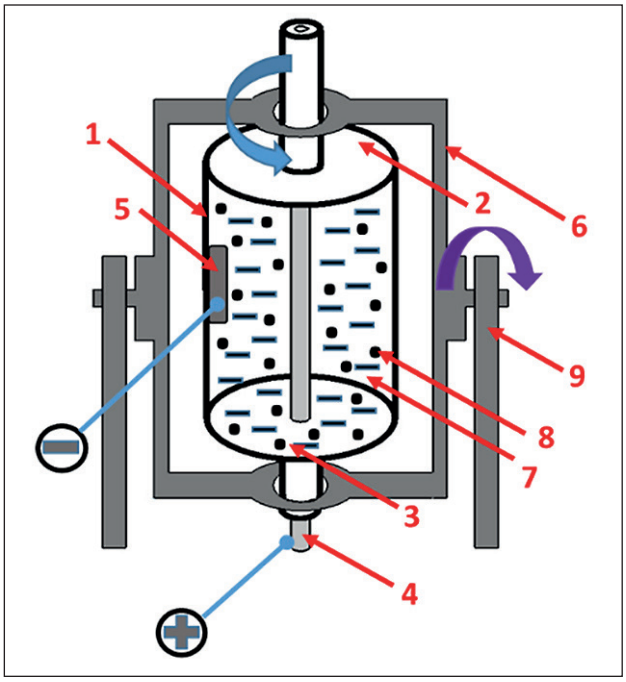


Рис. 1. Устройство для электроосаждения «Ni–SiC» покрытия

Режим электроосаждения был выбран на основании экспериментальных результатов, полученных ранее [11, 12]: температура электролита 60 °C, скорость перемешивания варьировались в зависимости от положения ванны относительно вектора силы гравитационного поля притяжения земли (от 1 до 300 об/мин), длительность обработки 60 минут (таблица 1).

Подготовка образцов для исследований

Электроосаждение композиционного покрытия проводили на трех образцах. Режимы электро-

ISSN 2075-8545 (online)

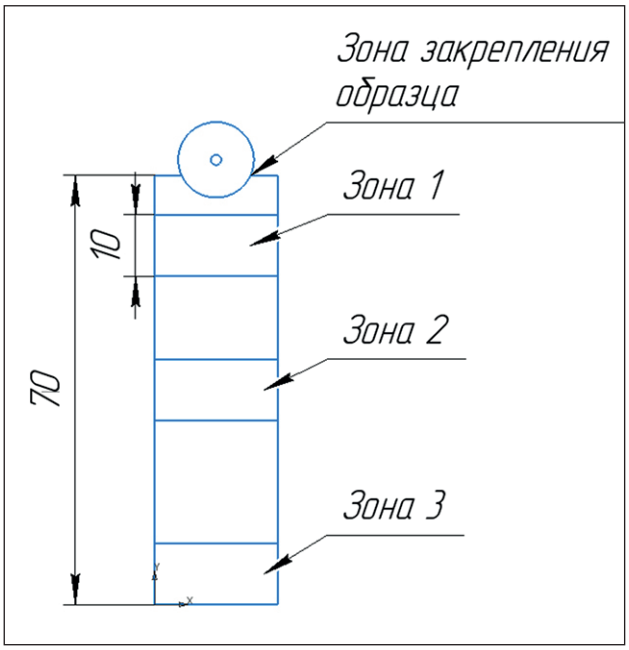


Рис. 2. Схема вырезки образцов для исследования

осаждения отличались плотностью тока согласно таблице 1. Для проведения металлографических исследований готовились микрошлифы в следующей последовательности: разрезка на электро-искровом станке заготовок под поперечные микрошлифы; механическая шлифовка с использованием абразивных материалов с размером зерна до Р2000 (10 мкм) и последующая полировка с использованием полировальных суспензий на шлифовально-полировальном оборудовании.

Методика микроструктурного анализа

Для определения толщины покрытия и количественной оценки содержания карбида кремния использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) «JSM-6490 LV» при увеличении ×500. Объемную долю карбида кремния в покрытии определяли методом наложения сетки [15].

Оценку содержания химических элементов покрытия проводили с использованием рентгеновского микроанализатора «INCA-Energy» и энергодисперсионного спектрометра «Inca X-Act», которым оснащен растровый электронный микроскоп (РЭМ) «JSM-6490 LV».

Методики испытания на износостойкость и микротвердость

Испытания на износостойкость в зоне 2 проводили на трибометре «Nanovea» методом «шарик-по-диску» по следующим режимам: частота вращения – 286 об/мин; радиус окружности трения – 5 мм; линейная скорость – 0,063 м/с; усилие – 2 Н; тип трения – сухое; максимальная длина трека – 1000 м; контртело – шарик стальной диаметром 6,3 мм. В качестве характеристик износа выбраны три параметра: величина массового износа образца (W), величина массового износа контртела ($W_ш$) и ширина дорожки износа (b).

Величину массового износа образца вычисляли по формуле:

$$W = (m_0 - m_k / m_0) \times 100\%, \quad (1)$$

где m_0 – масса образца до испытаний, кг;
m_k – масса образца после испытаний, кг.

Величину массового износа контртела определяли по формуле:

$$W_ш = (m_0^ш - m_k^ш / m_0^ш) \times 100\%, \quad (2)$$

где m_0^b – масса шарика до испытаний, кг;
m_k^b – масса шарика после испытаний, кг.

Оценку микротвердости (HV) в поперечном сечении проводили с использованием микротвердомера «TBM Tochline» при нагрузке 50 г, временем индентирования 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

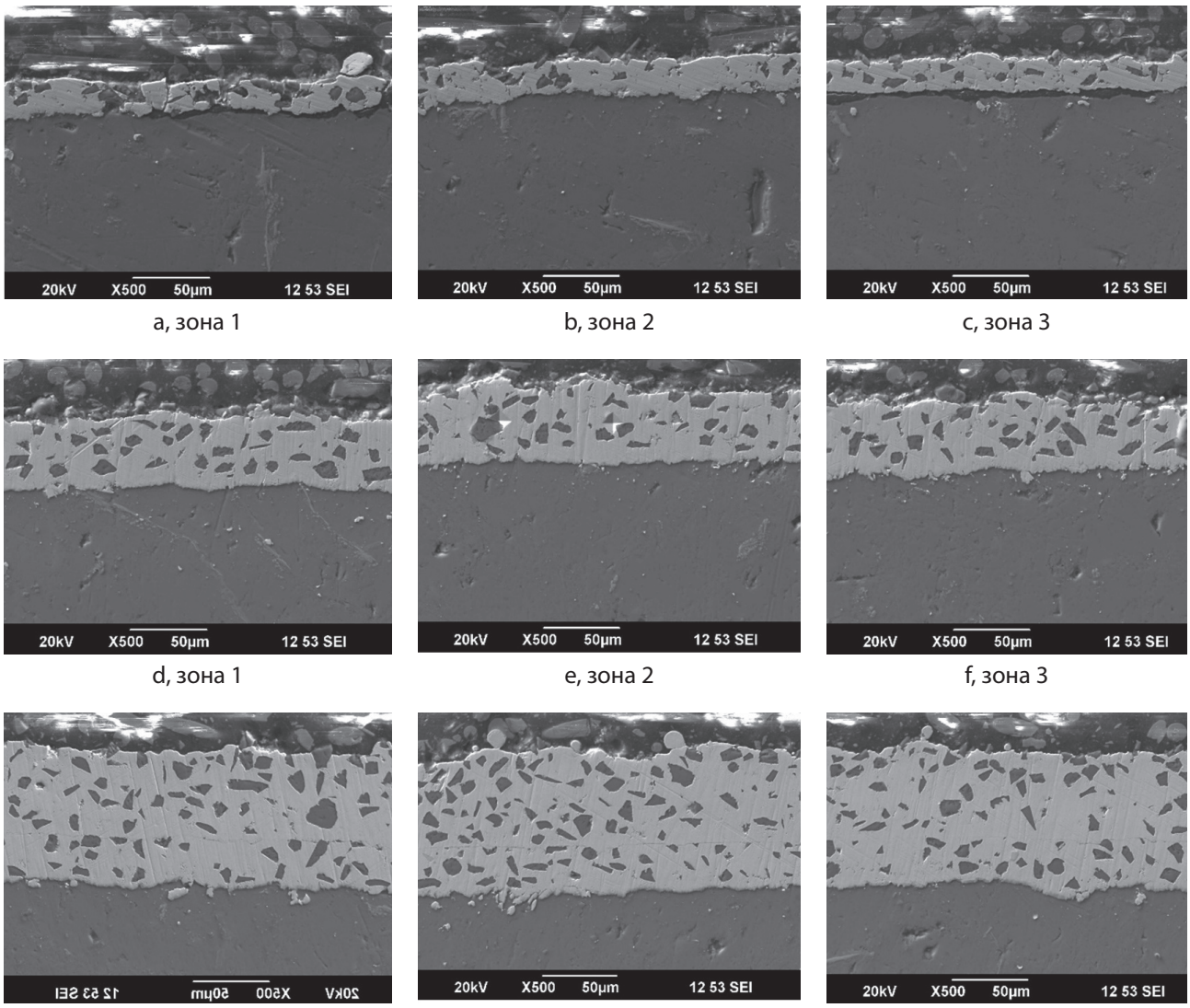
Микроструктура покрытия

В результате электроосаждения были получены покрытия на образцах из алюминиевого сплава АК18. При визуальном осмотре поверхности образцов отслоений покрытия от подложки, а также присутствие дефектов в виде несплошностей не отмечается.

Микроструктура поперечных сечений образцов после электроосаждения представлена на рисунке 3. Покрытия сформировались целые, без трещин, качественно можно отметить хорошее сцепление с подложкой материала. Наличие дефектов в виде пор вдоль переходной зоны от материала основы к покрытию не наблюдается. Покрытие состоит из никелевой матрицы и внедренных в нее частиц карбида кремния, на что однозначно указывают результаты оценки элементного состава покрытия (рис. 4).

Сравнительный анализ морфологии покрытия (рис. 3) и оценка толщины в различных зонах (рис. 5а) свидетельствуют об однородном его формировании по всей поверхности образцов. При низкой плотности тока (j = 0,5 А/дм^2) толщина покрытия варьируется от 17 до 25 мкм в зависимости от зоны. При повышении плотности тока до 10 и далее до 20 А/дм^2 толщина покрытия увеличивается поч-

ISSN 2075-8545 (online)

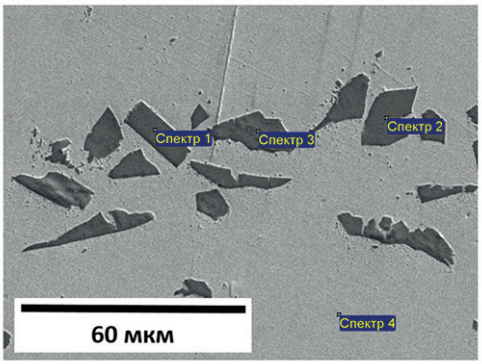


a, зона 1 b, зона 2 c, зона 3

d, зона 1 e, зона 2 f, зона 3

g, зона 1 h, зона 2 k, зона 3

Рис. 3. Микроструктура поперечных сечений образцов с покрытием, РЭМ: a, b, c – 0,5 А/дм^2; d, e, f – 10,0 А/дм^2; g, h, k – 20,0 А/дм^2



№ спектра	C	Si	Ni
спектр 1	40,7	58,2	1,0
спектр 2	41,6	57,1	1,2
спектр 3	39,8	57,7	1,3
спектр 4	-	-	100

Рис. 4. Элементный состав покрытия

ISSN 2075-8545 (online)

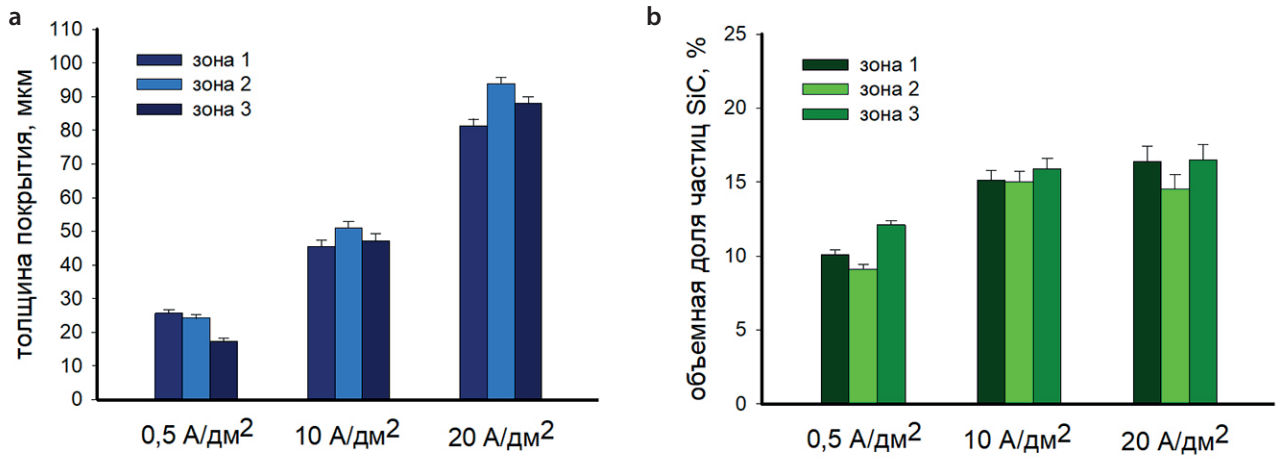


Рис. 5. Сравнительный анализ покрытий, полученных при различной плотности тока: толщина покрытия (a); объемная доля частиц SiC (b)

ти в два и четыре раза по сравнению с j = 0,5 А/дм². При этом однородность толщины сохраняется для различных зон и находится в пределах ошибки.

Объемная доля частиц карбида кремния увеличивается с повышением плотности тока (рис. 5б) от 10% при 0,5 А/дм² до 15% (j = 10,0 А/дм²) и 16% (j = 20,0 А/дм²). Несмотря на то что толщина покрытия увеличивается значительно с повышением плотности тока, такого же кратного увеличения объемной доли частиц карбида кремния не наблюдается.

Микротвердость покрытия

Микротвердость покрытия, как видно на рис. 6, зависит от плотности тока. При низкой плотности (0,5 А/дм²) микротвердость достигает величины не более чем 250HV. При повышении j до 10,0 А/дм² микротвердость увеличивается почти в три раза

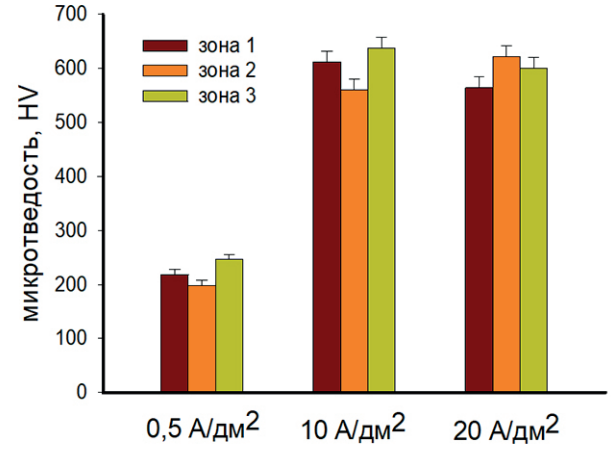


Рис. 6. Микротвердость покрытий.

(637HV для зоны 2). Дальнейшее увеличение плотности тока до 20 А/дм² не приводит к росту HV.

Для j = 0,5 А/дм² микротвердость покрытия в зонах 1, 2 и 3 (согласно схеме вырезки, на рис. 2) варьируется в пределах ошибки. Аналогичная однородность микротвердости покрытия в разных зонах образцов наблюдается для режима электроосаждения при плотностях тока 10 и 20 А/дм².

Износостойкость покрытия

Испытание на трибометре используется для оценки качества адгезии покрытий к поверхности подложки. По результатам трибологических испытаний отслоения и разрушения покрытий, сформированных при разных плотностях тока, не наблюдалось. Дорожки износа [16], образовавшиеся в ходе испытаний, представлены на рисунке 7. В таблице 2 приведены массовый износ образца (W), массовый износ контртела ($W_ш$) и ширина дорожки износа (*b*). По данным характеристикам, как известно, можно судить об интенсивности разрушения поверхности.

Полученные данные указывают на повышение износостойкости по сравнению с материалом подложки. Максимальной износостойкостью, соответствующей наименьшей потере массы, обладает образец, полученный при плотности тока 0,5 А/дм². При увеличении плотности тока до 10 А/дм² и 20 А/дм² потеря массы возрастает, однако остается на 2,5–3,5 раза выше, чем у АК7. Минимальной шириной дорожек износа обладают образцы с плотностью тока 0,5 А/дм² и 20 А/дм², что свидетельствует о хорошей адгезионной прочности.

Таким образом, покрытия, сформированные на плоских образцах из алюминиевого сплава АК7, характеризуются однородностью по всей площади,

ISSN 2075-8545 (online)

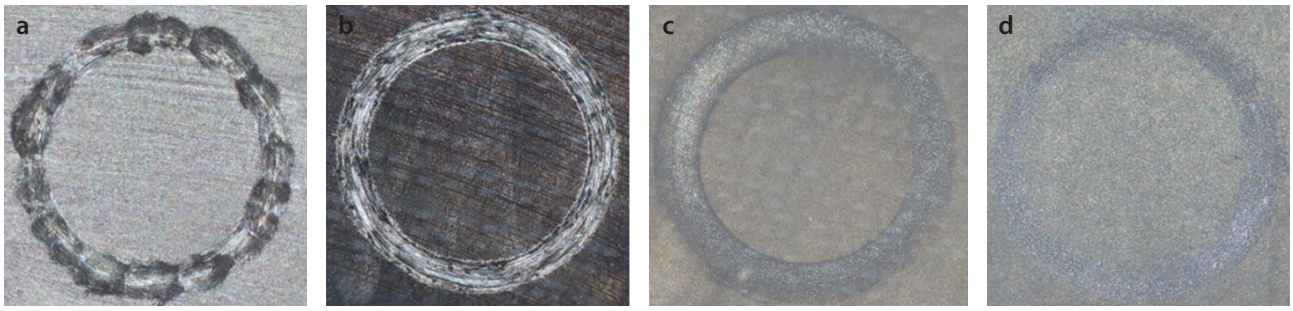


Рис. 7. Дорожки износа: АК18 (a); 0,5 А/дм^2 (b); 10 А/дм^2 (c); 20 А/дм^2 (d)

Таблица 2. Результаты трибологических испытаний

	W, %	$W_ш$, %	b, мкм
АК18	9,0·e^{-3}	0,01	452±5
покрытие (j = 0,5 А/дм^2)	1,4·e^{-3}	0,21	446±5
покрытие (j = 10 А/дм^2)	5,0·e^{-3}	0,26	566±5
покрытие (j = 20 А/дм^2)	5,0·e^{-3}	0,24	445±5

при этом их структура и свойства зависят от плотности тока.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, электроосаждение – это один из наиболее распространенных способов получения композитных покрытий на основе металлической матрицы на поверхности деталей [17]. Базовая установка для электроосаждения состоит из двух проводящих электродов, которые погружаются в ванну с электролитом. Один рабочий электрод подключается к отрицательному полюсу и служит катодом, второй – к положительному. При приложении внешнего электрического поля катионы двигаются к катоду, разряжаются и осаждаются в виде металлического слоя [18, 19]. К сегодняшнему дню уже накоплен достаточный лабораторный опыт по формированию композитных покрытий, упрочненных такими частицами, как SiC, Al_2O_3, WC, TiO_2 и др. Однако при переходе от лабораторных образцов к обработке изделий отмечается сложность, связанная, прежде всего, с необходимостью формирования покрытий исключительно на рабочих поверхностях. Немаловажно обеспечить однородность формирования покрытия.

В результате проведенных исследований продемонстрирована возможность получения композиционного покрытия «Ni–SiC» на модельных образцах, длинновой размер которых имитирует максимальную высоту цилиндра (20×70×2 мм).

Плотность тока считается ключевым фактором, который непосредственно влияет на качество формируемого композитного покрытия на подложке основного металла [20]. Механизм включения SiC в матрицу никеля, а следовательно, и скорость встраивания при низких плотностях тока определяется адсорбцией, а при высоких – транспортом частиц второй фазы [21]. В литературе имеются противоположные мнения о влиянии плотности тока на качество композитного покрытия. Основным критерием выбирают содержание объемной доли упрочняющих частиц. В большинстве случаев с увеличением плотности тока отмечается повышение доли частиц [3, 20, 22]. Однако имеются публикации, авторы которых демонстрируют противоположный эффект – снижение объемной доли с увеличением плотности тока [23]. В статье [13] отмечают, что с ростом плотности тока сначала наблюдается увеличение объемной доли частиц, а при дальнейшем повышении плотности тока – снижение. Такое разногласие может быть объяснено тем, что авторы используют разные способы перемешивания электролита, разный размер упрочняющих частиц (он наноразмерного до микронного диапазона), а также разное взаимное положение катода и анода.

Следует отметить, что при использовании наноразмерных частиц SiC наблюдается более выраженная зависимость содержания упрочнителя от плотности тока. Исследования показывают, что для наночастиц характерно снижение эффективности включения при высоких плотностях тока, что связывают с усилением конкуренции между процессами разряда ионов никеля и электрофоретическим переносом частиц [24, 25]. Кроме того, для наночастиц критически важной задачей является предотвращение их

ISSN 2075-8545 (online)

агломерации в электролите, что может достигаться применением ультразвукового перемешивания [26]. В отличие от микронных частиц, для которых определяющим механизмом доставки к катоду является конвекция, наночастицы в большей степени подвержены влиянию электрокинетических явлений и требуют более тщательного контроля параметров осаждения [27].

В текущем исследовании при повышении плотности тока наблюдается повышение как объемной доли частиц карбида кремния, так и увеличение толщины формируемого покрытия (рис. 5). Известно, что частицы карбида кремния имеют отрицательный заряд. В растворе электролита происходит адсорбция ионов никеля на поверхность частиц и благодаря получению положительного заряда они встраиваются в покрытие [28, 29, 30]. Процессы электроосаждения, как известно, подчиняются первому закону Фарадея [31]. Можно предположить, что с ростом плотности тока на частицах карбида кремния адсорбируется большая масса никеля и при дальнейшем оседании их на подложке основного металла формируется покрытие большей толщины.

Эксплуатационные характеристики покрытий для практического применения определяются механическими свойствами, такими как микротвердость и адгезия. Эти свойства определяют качество покрытия и могут отличаться в зависимости от строения.

ММКП характеризуются более высокими значениями микротвердости по сравнению с покрытиями на основе чистого металла. Это объясняется механизмом дисперсионного упрочнения матрицы, включениями совместно соосажденных упрочняющих частиц, являющимися барьерами для движения дислокаций [32, 33, 34]. Известно, что микротвердость металломатричных композитов зависит не только от механических характеристик матричной никелевой фазы, частиц и межфазных границ, но и от количества дисперсной фазы [3, 7]. Полученные результаты подтверждают эту тенденцию. При оценке микротвердости выявлена большая согласованность с объемной долей частиц карбида кремния в составе покрытия, нежели с ее толщиной (сравнение рис. 5 и рис. 6).

Износостойкость ММКП «Ni–SiC» демонстрирует зависимость от плотности тока через толщину и объемную долю внедренных твердых частиц в покрытие. Как и для микротвердости, более явное влияние оказывает объемная доля частиц, нежели толщина покрытия. Лучшая износостойкость достигнута для покрытия, содержащего 10% SiC, полученного при плотности 0,5 А/дм^2. Повышение уноса массы и снижение тем самым износостойкости при плотности тока 10 и 20 А/дм^2 можно связать с вырыванием частиц при трении, что приводит к дополнительному изнашиванию поверхности покрытия. В литературе для описания этого процесса встречается термин – износ третьего тела [35]. При этом отмечаются царапины на дорожках износа композитного покрытия Ni–SiC и их отсутствие на дорожках износа покрытия на основе чистого никеля. С увеличением толщины покрытия объемная доля частиц возрастает, следовательно, возрастает процент вырванных из металлической матрицы частиц. Для нанокомпозитных покрытий механизмы износа могут отличаться: равномерное распределение наночастиц в матрице способствует более стабильному формированию защитного слоя и снижению абразивного изнашивания [27, 36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе показана возможность масштабирования процесса электроосаждения металломатричного композитного покрытия «Ni–SiC» на длинномерные плоские образцы из алюминиевого сплава АК7. В результате проведенных работ можно сделать следующие выводы:

1. Металломатричное композитное покрытие «Ni–SiC», сформированное на плоских длинномерных образцах (площадью 0,2 см^2) из алюминиевого сплава АК7 в результате электроосаждения, характеризуется однородностью толщины, объемной доли частиц карбида кремния и микротвердости в трех контрольных зонах для каждой плотности тока.

2. Чем выше плотность тока при электроосаждении, тем выше толщина формируемого металломатричного композитного покрытия «Ni–SiC», объемная доля упрочняющих частиц и микротвердость.

3. Унос массы при трибологических испытаниях для образца с нанесенным композиционным покрытием «Ni–SiC» ниже, чем для образца без покрытия.

ISSN 2075-8545 (online)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Saini A., Singh G., Mehta S., Singh H., Dixit S. A review on mechanical behaviour of electrodeposited Ni-composite coatings. *Int J Interact Des Manuf*. 2023;17:2247–2258.

2. Walsh F.C., Ponce de Leon C. Towards improved electroplating of metal-particle composite coatings. *Trans IMF*. 2020;98(6):288–299. https://doi.org/10.1080/00202967.2020.1819022

3. Burzyńska L., Rudnik E., Koza J., Błażc L., Szymański W. Electrodeposition and heat treatment of nickel/silicon carbide composites. *Surf Coat Technol*. 2008;202:2545–2556. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.09.020

4. Zellele D.M, Yar-Mukhamedova G.S., Rutkowska-Gorczyca M. A review on properties of electrodeposited nickel composite coatings: Ni-Al_2O_3, Ni-SiC, Ni-ZrO_2, Ni-TiO_2 and Ni-WC. *Materials*. 2024;17:5715. https://doi.org/10.3390/ma17235715

5. Steinbach J., Ferkel H. Nanostructured Ni-Al_2O_3 films prepared by dc and pulsed dc electroplating. *Scripta Mater*. 2001;44:1813–1816.

6. Mohajeri S., Dolati A., Rezagholibeiki S. Electrodeposition of Ni/WC nano composite in sulfate solution. *Mater Chem Phys*. 2011;129:746–750.

7. Yılmaz G., Hapçi G., Orhan G. Properties of Ni/nano-TiO_2 composite coatings prepared by direct and pulse current electroplating. *J. Mater Eng Perform*. 2015;24:709–720. https://doi.org/10.1007/s11665-014-1346-4

8. Jenczyk P., Gawrońska M., Dera W., Chrzanowska-Giżyńska J., Denis P., Jarząbek D.M. Application of SiC particles coated with a protective Ni layer for production of Ni/SiC co-electrodeposited composite coatings with enhanced tribological properties. *Ceram Int*. 2019;45(17B):23540–23547. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.063

9. Ariffin I.A., Kamdi Z. A review on wear behavior of nickel-silicon carbide electrodeposition coating. *Res Prog Mech Manuf Eng*. 2022;3(1):377–384.

10. Zhang F., Wang Q., Shen H., Bai C., Li C., Tian D., Wang B. Effect of SiC concentration on the microstructure and anti-wear performance of electrodeposited Ni-SiC composite coatings constructed for piston ring application. *Materials (Basel)*. 2025;18(5):1117. https://doi.org/10.3390/ma18051117

11. Киселева С.К., Ахмеров Л.Д., Мустафин Р.Ф., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Формирование композиционного покрытия «никель-карбид кремния». *Materials. Technologies. Design*. 2025;7(1):36–44. https://doi.org/10.54708/26587572_2025_712036

12. Киселева С.К., Ахмеров Л.Д., Лукьянов В.В., Кандаров И.В. Установка для нанесения композиционного покрытия Ni-SiC. *Materials. Technologies. Design*. 2025;7(3):21–31. https://doi.org/10.54708/26587572_2025_732221

13. Walsh F.C., Ponce de Leon C. A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology. *Trans IMF*. 2014;92(2):83–98.

14. Huang P.-C., Hou K.-H., Hong J.-J., Lin M.-H., Wang G.-L. *Study of fabrication and wear properties of Ni-SiC composite coatings on A356 aluminum alloy*. Patent CN № 113061890A. 2021.

15. Saltykov S. A. *Stereometric metallography*. Moscow: Metallurgiya; 1976: 270. (In Russian)

16. Nemane V., Chatterjee S. Effect of silicon carbide incorporation and heat treatment on tribological properties of electroless Ni-BW alloy coating. *Mater Chem Phys*. 2024;311:128500. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128500

17. Kamel M.M., Alzahrani E., Ibrahim I.S., et al. Electrodeposition of well-crystalline Ni-Co alloy thin films on steel substrates from aqueous solutions containing citrate anions. *Int J Electrochem Sci*. 2021;16:1–22. https://doi.org/10.20964/2021.09.18

18. Liu W., Jiang K., Li Q., Ma C., Xia F. Jet pulse electrodeposited Ni-SiC thin coatings by using experimental system designed for potential industrial application. *Int J Electrochem Sci*. 2021;16:21044. https://doi.org/10.20964/2021.04.23

19. Guan T., Zhang N. Recent advances in electrodeposition of nickel based nanocomposites enhanced with lubricating nanoparticles. *Nanomanuf Metrol*. 2024;7:25. https://doi.org/10.1007/s41871-024-00245-6

20. Kumar D., Shree G. Wear and hardness evaluation of electrodeposited Ni-SiC nanocomposite coated copper. *Int J Microstruct Mater Prop*. 2020;15(2):88–106.

21. Овчинникова К.В. *Технология композиционных электролитических покрытий никель-кобальт-оксид алюминия и никель-кобальт-алмаз* [диссертация]. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова; 2021.

22. Vaezi M.R., Sadrnezhaad S.K., Nikzad L. Electrodeposition of Ni-SiC nano composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*. 2008;315(1–3):176–182.

23. Krasikova A.V., Agafonov D.V., Markova M.A., Bykova A.D., Belyakov A.N., Kravchenko I.N., et al. Electrodeposition of a Ni–SiC composite coating from a vibration-stabilized electrolyte–suspension. *Russ Metall (Metally)*. 2023;(6):796–802. https://doi.org/10.1134/s0036029523060241

24. Dobosz I. Codeposition of SiC particles with electrolytic nickel. *Arch Met Mater*. 2011. https://doi.org/10.2478/v10172-011-0072-2

25. Rao H., Li W., Luo Z., Liu H., Zhu L., Chen H. Nucleation and growth mechanism of Ni/SiC composite coatings electrodeposited with micro- and nano-SiC particles. *J Mater Res Technol*. 2024;30:3079–3091. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.008

26. Cai C., Zhu X.B., Zheng G.Q., Yuan Y., Huang X., Cao F., Yang J.F., Zhang Z. Electrodeposition and characterization of nano-structured Ni–SiC composite films. *Surf Coat Technol*. 2011;205(11):3448–3454. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.12.002

27. Красиков А.В., Марков М.А., Красиков В.Л., Кравченко И.Н., Старицын М.В., Быкова А.Д., Беляков А.Н. Влияние параметров вибрации при электроосаждении композиционных покрытий Ni–SiC из вибрационно-стабилизированной суспензии. *Проблемы машиностроения и надёжности машин*. 2022;(4):21–27. https://doi.org/10.31857/S0235711922040113

ISSN 2075-8545 (online)

28. Мингазова Г.Г., Фомина Р.Е., Водопьянова С.В., Сайфуллин Р.С., Жиляков В.В. Физико-химические свойства никелевых композиционных покрытий. *Вестник технологического университета*. 2017;20(15):42–44.

29. Целуйкин В.Н., Яковлев А.В. Об электрохимическом осаждении и свойствах композиционных покрытий на основе никеля. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020;56(2):197–201. https://doi.org/0.31857/s004418562002028x

30. Целуйкин В. Н, Василенк Е. А., Неверная О. Г., Целуйкина Г. В., Сурменко Е. Л. Физико-механические свойства композиционных покрытий на основе сплава никель-хром. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 15(2):156–159.

31. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V. Wear Resistance of Nickel Composite Coatings with Micron-Sized and Submicron-Sized Particles of SiC. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):629–647. https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.629-647

32. Nemane V., Chatterjee S. Evaluation of microstructural, mechanical, and tribological characteristics of Ni-B-W-SiC electroless composite coatings involving multi-pass scratch test. *Materials Characterization*. 2021;180:111414. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111414

33. Wang F., Fu X., Shen M., Xu Y., Duan S., Wang Q., Cao H., Lin J. Preparation of Ni-P-SiC composite coatings by magnetic field enhanced jet electrodeposition. *Int J Electrochem Sci*. 2020;15:10432–10452. https://doi.org/10.20964/2020.10.13

34. Lv Q., Fu X., Chen X., Lin J., Cao H. Investigating the effects of the current density on the properties of Ni–P–La_2O_3 composite coatings. *Int J Electrochem Sci*. 2020;15:11250–11264. https://doi.org/10.20964/2020.11.76

35. Huang P.C., Hou K.H., Hong J.J., Lin M.H., Wang G.L. Study of fabrication and wear properties of Ni–SiC composite coatings on A356 aluminum alloy. *Wear*. 2021;476–477:203772. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203772

36. Piñate S., Ghassemali E., Zanella C. Strengthening mechanisms and wear behavior of electrodeposited Ni–SiC nanocomposite coatings. *J Mater Sci*. 2022;57:16632–16648. https://doi.org/10.1007/s10853-022-07655-1

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселева Светлана Камильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры Интеллектуальные системы и оборудование в машиностроении Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; старший научный сотрудник Центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета; научный сотрудник Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, kiseleva_s2018@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1819-247X

Ахмеров Линар Динарович – лаборант Центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; лаборант Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, linarakhmerov2@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-9825-2697

Хуснутдинова Алияна Зенфировна – инженер-исследователь Центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; инженер-металловед Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, aliyana.husnutdinova@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0006-0072-9792

Кандаров Ирек Вилевич – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедры «Интеллектуальные системы и оборудование в машиностроении» Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; ведущий инженер Центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета, директор Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0009-6330-8524

ВКЛАД АВТОРОВ

Киселева С.К. – научное руководство; разработка концепции и методологии исследования; анализ результатов исследования; написание статьи; составление итоговых выводов.

Ахмеров Л.Д. – редактирование и обработка данных.

Хуснутдинова А.З. – подготовка и написание текста раздела «Методы и материалы»; обработка данных.

Кандаров И.В. – научное руководство, научное редактирование текста, научная дискуссия.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.06.2026; одобрена после рецензирования 30.09.2026; принята к публикации 05.10.2026.