

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.629-647>

EDN: <https://elibrary.ru/ppejxg>

УДК 669.24-044.952:530.145.6

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC

С. Ю. Жачкин¹, Г. И. Трифонов¹✉,
О. А. Сидоркин¹, А. В. Пустоветов²

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
Военно-воздушной академии имени профессора

Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
(г. Воронеж, Российская Федерация)

² Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I

(г. Воронеж, Российская Федерация)

✉ grishakip@yandex.ru

Аннотация

Введение. Электролитическое осаждение наночастиц вызывает все больше интереса с увеличением их востребованности в сфере восстановления поверхностных слоев деталей машин и механизмов. Для создания композиционных покрытий необходимо решить две основные задачи: обеспечить достаточное количество частиц в покрытии и предотвратить их агломерацию в растворах для нанесения. При этом полученные покрытия с содержанием наночастиц являются износостойкими и применяются, например, в создании автомобильных и тракторных двигателей. В данном исследовании изучается процесс электролитического получения композиционных покрытий на основе никелевой матрицы с микронными и субмикронными частицами карбида кремния (SiC) из растворов никеля Уоттса, а также изучается сопротивление износу скольжения композиционных покрытий никеля.

Цель исследования. Провести детальное исследование влияния размера и количества частиц, находящихся в растворе для покрытия, на количество кодепонированных частиц. Изучить, как размер частиц влияет на процесс кодепонирования частиц неброуновского типа.

Материалы и методы. Для нанесения композиционных покрытий на основе никеля с добавлением SiC использовался обычный электролит для никелирования. У каждого раствора, используемого для нанесения покрытия, была измерена численная плотность частиц. Предполагалось, что частицы имеют одинаковый размер и форму сферы. Концентрация частиц в растворах для нанесения покрытия варьировалась от 0,28 до 104 г/л. Электроосаждение проводилось на вертикальных электродах, а раствор для нанесения покрытия перемешивался магнитной мешалкой. Были измерены микротвердость по Виккерсу с нагрузкой 30 г и проведены испытания на износ при однонаправленном и двунаправленном скольжении.

© Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Сидоркин О. А., Пустоветов А. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Получены результаты исследования сопротивления износу композиционных покрытий никеля при скольжении. Представлены результаты кодепонирования и модель, основанная на плотности кодепонированных частиц. Дано заключение о влиянии кодепонированных частиц на сопротивление износу композиционных покрытий Ni-SiC.

Обсуждение и заключение. Определено, что наилучшая износостойкость при скольжении получена в случае использования композиционных покрытий Ni-SiC, содержащих 4–5 объемных процента субмикронных частиц SiC. Исследование показало, что размер и плотность частиц SiC в растворе для покрытия имеют важное значение при получении гальванически износостойких композиционных покрытий, так как основываются на связи между плотностью осажденных частиц и плотностью частиц в растворе.

Ключевые слова: электроосаждение, композиционные покрытия, износ, карбид кремния, никель, кодепонированные частицы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC / С. Ю. Жачкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 629–647. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.629-647>

Wear Resistance of Nickel Composite Coatings with Micron-Sized and Submicron-Sized Particles of SiC

S. Y. Zhachkin^a, G. I. Trifonov^a✉,
O. A. Sidorkin^a, A. V. Pustovetov^b

^a Military Training and Research Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh, Russian Federation)

^b Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (Voronezh, Russian Federation)

✉ grishakip@yandex.ru

Abstract

Introduction. Electrolytic deposition of nanoparticles is gaining interest with their increasing demand for restoring surface layers of machine parts and mechanisms. To create composite coatings with nanoparticles, it is necessary to solve two main tasks: to ensure a sufficient number of particles in the coating and to prevent their agglomeration in the coating solutions.

These coatings with nanoparticles are wear-resistant and are used, for example, in automobile and tractor engines. In this study, there are considered the process of electrolytic production of composite coatings based on a nickel matrix with micron-sized and submicron-sized silicon carbide (SiC) particles from Watts nickel solutions and the resistance of nickel composite coatings to sliding wear.

Aim of the Study. The study is aimed at considering detailed the effect of the size and number of particles in the coating solution on the number of codeposited particles. It is also necessary to study how the particle size affects the codeposition of micron-sized and submicron-sized particles of the non-Brownian type.

Materials and Methods. A conventional nickel-plating electrolyte was used for nickel-based composite coatings with SiC. There was measured particle number density for each coating solution. It was assumed that the particles had the same size and shape of a sphere.



The concentration of particles in the coating solutions ranged from 0.28 to 104 g/l. Electrodeposition was carried out on vertical electrodes, and the coating solution was stirred with a magnetic stirrer during electrodeposition. The Vickers microhardness with a load of 30 g was measured and wear tests were performed for unidirectional and bidirectional sliding.

Results. The results of studying the wear resistance of nickel composite coatings during sliding have been obtained. The results of codeposition and a model based on the density of codeposited particles are presented. There has been made the conclusion about effect of codeposited particles on the wear resistance of Ni-SiC composite coatings.

Discussion and Conclusion. It was determined that the best sliding resistance was obtained using Ni-SiC composite coatings containing 4–5 volume percentage of submicron-sized SiC particles. The study showed that the size and density of SiC particles in the coating solution are important for producing galvanically wear-resistant composite coatings, based on the relationship between the density of deposited particles and the density of particles in solutions.

Keywords: electrodeposition, composite coatings, wear, silicon carbide, nickel, codeposited particles

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: 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>

Введение. Электроосажденные композиционные покрытия состоят из металлической или сплавной матрицы, содержащей дисперсные частицы второй фазы¹ [1]. Эти частицы могут быть твердыми оксидными или карбидными, такими как Al_2O_3 , SiC, TiO_2 , WC, SiO_2 или алмаз; твердым смазочным материалом для улучшения сопротивления износу и/или снижения трения [2; 3], таким как графит или MoS_2 . Композиционные покрытия, полученные методом электролиза и содержащие частицы микронного размера, используются как износостойкие покрытия. Например, Ni-SiC используется в производстве автомобильных и тракторных двигателей [4; 5]. С увеличением доступности наночастиц возрастает интерес к их электролитическому осаждению, так как процесс электролиза относится к «холодным» методам нанесения покрытия, не вызывающим термическую деформацию деталей. Основными трудностями при осаждении композиционных покрытий с наночастицами являются получение достаточного количества частиц в покрытии и избегание агломерации частиц, находящихся в растворах для покрытия [6].

В данной работе исследуется электролитическое получение композиционных покрытий на основе никелевой матрицы с микрон и субмикронных частиц карбида кремния (SiC) из растворов никеля Уоттса, рассматривается сопротивление износу скольжения таких композиционных покрытий, как никель.

Исследуется влияние размера частиц и их количества в покрывающем растворе на количество частиц, которые будут депонированы вместе. В статье представлены результаты этого процесса и модель, основанная на плотности частиц.

¹ Упрочнение деталей машин композиционными электроосажденными покрытиями с применением электроэрозионных диспергированных твердых сплавов : моногр. / В. И. Серебровский [и др.]. Курск : Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, 2022. 93 с. EDN: YTTWHA

Рассматривается влияние размера частиц на процесс кодепонирования микрон и субмикронных частиц неброуновского типа. Обсуждается влияние кодепонированных субмикронных частиц на сопротивление износу композиционных покрытий Ni-SiC.

Цель исследования заключается в глубоком анализе влияния размера и количества частиц, присутствующих в покрывающем растворе, на объем закодированных частиц. Также выяснено, как размер частиц влияет на процесс кодирования неброуновских частиц.

Обзор литературы. Исходные никель-фосфорные покрытия характеризуются относительно низким уровнем механических свойств и микротвердости, которая составляет от 400 до 500 HV. Однако, согласно проведенным исследованиям [7–9], добавление карбидов, нитридов или оксидов переходных металлов в состав покрытия приводит к повышению его твердости до 800 HV [10–12]. В работах [13–15] объясняется, что данный эффект возникает при добавлении дополнительных присадок в никелевое покрытие, так как частицы закрепляются на границах уже существующих зерен и объемов [16; 17]. Содержание фосфора (до 7 %) в исходном состоянии существенно влияет на пластичность и прочность покрытия. Дальнейшее увеличение концентрации фосфора приводит к незначительным изменениям. Аналогичные результаты были получены в исследовании [18]. В указанных исследованиях за основу было взято добавление 2 г/л фосфористой кислоты, что привело к кратному повышению такого показателя качества покрытия, как твердость. Причем, если брать во внимание количество фосфора непосредственно в электролите, было определено, что при достижении показателя в 10 г/л фосфор никак не влияет на показатель твердости наносимого покрытия [19; 20].

Рассматривая параметры никелевого покрытия без добавок и наполнителей, узнали [21], что его модуль упругости может достигать порядка 210 ГПа. Однако проведенные исследования и результаты научных трудов ведущих ученых в области покрытий и методов их нанесения не дают четкого понимания о влиянии на сплав добавления 3–6 массовых процента фосфора, при этом известно, что 9 массовых процента фосфора в сплаве дают хорошие предпосылки для повышения модуля упругости до 210 ГПа.

Проведя анализ перечня научных работ, выявили, что при использовании карбида кремния в качестве наполнителя в составе наносимого сплава модуль упругости достигает значения до 230 ГПа.

Рассматривая отдельным аспектом карбид титана в работе², обосновали его крайне экстремальный характер в ходе поднятия уровня твердости покрытия. Так, при показателе в 1,5 г/л твердость покрытия может составлять 593 HV. Если содержание присадки увеличивается до 2,0 г/л, то твердость снижается. Эту зависимость авторы объясняют влиянием дисперсионного упрочнения, поскольку происходит образование сегрегаций, что негативно сказывается на качестве формируемого покрытия.

² Механические свойства алюмоматричных композитов с добавлением карбида титана / В. Е. Адас [и др.] // Уральская горная школа – регионам : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (4 – 13 апреля 2022 г., г. Екатеринбург). Екатеринбург, 2022. С. 67–68. EDN: QTQNH

В соответствии с результатами исследователей³, ввиду относительно высокой плотности дислокаций и их геометрических показателей, различные фазовые границы более эффективно препятствуют движению дислокаций. Образование кристаллов никеля может вызвать сжатие объема, что приводит к возникновению внутренних напряжений и трещин, влияющих на значения микротвердости. В работе⁴ приводится аргумент в пользу того, что введение в покрытие упрочняющей фазы способствует укреплению структуры и созданию препятствий для дислокационного движения. Результаты исследования [22] уточняют эту гипотезу, указывая на наличие тесной взаимосвязи между концентрацией второй фазы, микротвердостью и, как следствие, износостойкостью покрытий.

Однако в открытых источниках нет данных, четко связывающих размер и концентрацию наполнителей второй фазы композитных покрытий с их износостойкостью.

Материалы и методы. Для осаждения композиционных покрытий на основе никеля и содержащих SiC использовался стандартный электролит никелирования. Состав электролита приведен в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Электролит для получения композиционных покрытий
Electrolyte for the production of composite coatings

Компонент / Component	Концентрация, г/л / Concentration, g/l	Назначение компонента / The purpose of the component
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	250	Основная соль, поставщик ионов никеля / Basic salt, supplier of nickel ions
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50	Депассиватор анода / Anode Depassivator
H_3BO_3	50	Буферная добавка / Buffer additive

Режимы нанесения покрытия были выбраны из условия получения максимальной адгезии его к основе и составили $\text{pH} \div 3,8$. Температура электролита – 50 °С. Плотность тока – 2 А/дм². Время осаждения покрытия – 75 мин. Обеспечение седиментационной устойчивости электролита – магнитное перемешивание. Катод – латунь площадью 12 см². Анод – никель площадью 12 см².

Характеристика частиц наполнителя композиционного покрытия на основе никелевой матрицы представлена в таблице 2.

³ Движения дислокаций при высокой скорости деформации / Д. С. Воронин [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXIX Междунар. симпозиума имени А. Г. Горшкова (15 – 19 мая 2023 г., г. Кременки). М., 2023. С. 77–78. EDN: [USVKXZ](#); Полухин Д. С. Структура и свойства композитного никель-фосфорного покрытия, термообработанного по разным режимам : дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2023. EDN: [MZGDWP](#)

⁴ Бирюков В. П. Влияние упрочняющей фазы на механические и триботехнические характеристики покрытий, полученных лазерной наплавкой // Трибология – машиностроению : тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения А. П. Семёнова (12 – 14 октября 2022 г., г. Москва). М., 2022. С. 46–49. EDN: [LHBFWY](#)

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Характеристика наполнителя никелевой матрицы в электролите

Characteristics of the filler of the nickel matrix in the electrolyte

Плотность частиц n_s , частиц/м ³ / Particle density n_s , particles/m ³	Концентрация частиц, г/л / Concentration, g/l	Диаметр частиц, мкм / Particle diameter, μm
$5 \cdot 10^{12}$	1,04	5
10^{13}	2,10	5
10^{14}	20,80	5
$5 \cdot 10^{14}$	104,00	5
$5 \cdot 10^{14}$	0,28	0,7
10^{15}	0,57	0,7
10^{16}	5,71	0,7
$5 \cdot 10^{16}$	0,56	0,3
10^{17}	57,10	0,7
$5 \cdot 10^{17}$	5,62	0,3
$5 \cdot 10^{18}$	56,20	0,3

У каждого из растворов для нанесения покрытия рассчитали численную плотность частиц, n_s (табл. 2), исходя из предположения, что частицы являются монодисперсными и сферическими. Концентрация частиц в растворах для нанесения покрытия варьировалась от 0,28 до 104 г/л. Каждый раствор для нанесения покрытия перемешивали магнитным перемешиванием в течение 24 ч, а затем ультразвуковым перемешиванием в течение 30 мин непосредственно перед нанесением гальванического покрытия. Электроосаждение осуществлялось на вертикальных электродах, а раствор для нанесения покрытия перемешивали во время электроосаждения магнитной мешалкой.

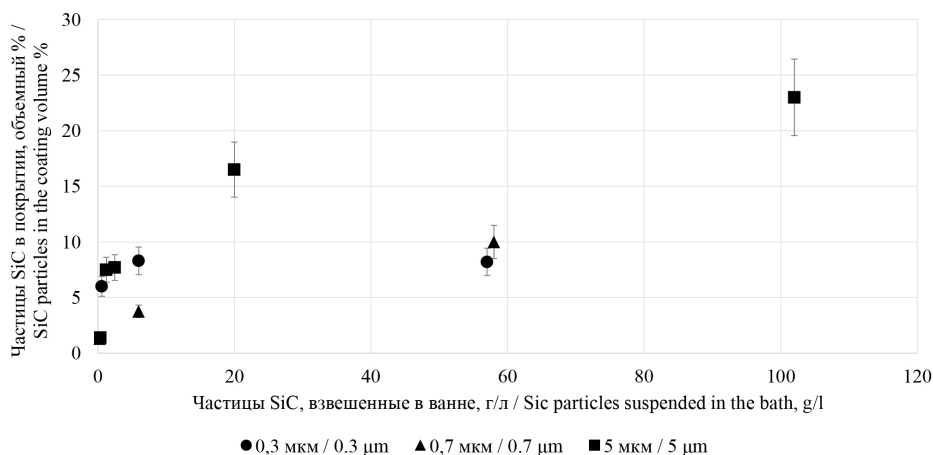
После нанесения покрытия образцы были вырезаны и залиты эпоксидной смолой. Металлографические шлифы для наблюдения были отшлифованы и отполированы без использования наждачной бумаги SiC, чтобы избежать шаржирования.

Количество частиц SiC, включающихся в покрытиях, оценивалось методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на полированных поперечных сечениях.

Измерения микротвердости по Виккерсу (нагрузка 30 г) также проводились на этих полированных поперечных сечениях. Испытания на износ при однонаправленном и двунаправленном скольжении проводились на дисках с покрытием. Испытания на износ при однонаправленном скольжении шариком по диску проводились при нормальной нагрузке 10 Н и скорости скольжения 0,1 м/с. Количество оборотов диска составило 15 000. Испытания на износ с шариковым диском двунаправленного скольжения проводились при нормальной нагрузке 5 Н, частоте колебаний 10 Гц и амплитуде тангенциального смещения 500 мкм. Количество циклов составило 50 000. Все испытания на износ проводились на 10-миллиметровых корундовых шариках без смазки при температуре 22 °С. Коэффициент трения непрерывно регистрировался во время испытаний на износ. Объемные потери материала определялись методом лазерной профилометрии после завершения испытаний на износ.

Далее образцы очищали в этаноле с использованием ультразвукового перемешивания в течение 15 мин. Для сравнения однонаправленных и двунаправленных испытаний износ выражался как объемный коэффициент износа ($\text{см}^3/\text{Нм}$). Этот коэффициент был рассчитан путем деления общей объемной потери износа на общее расстояние скольжения и приложенную нагрузку.

Результаты исследования. Количество совместно осажденного SiC показано на рисунке 1 для трех типов частиц SiC. Объемный процент совместно осажденного SiC в покрытиях растет с увеличением концентрации частиц в растворе для покрытия, что согласуется с литературой [23–25].



Р и с. 1. Объемный процент частиц SiC в композиционном гальваническом покрытии на основе никеля в зависимости от различной концентрации и размеров частиц SiC в растворах для нанесения покрытий

Fig. 1. Volume percentage of SiC particles in nickel-based composite electroplating, depending on different concentrations and sizes of SiC particles in coating solutions

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

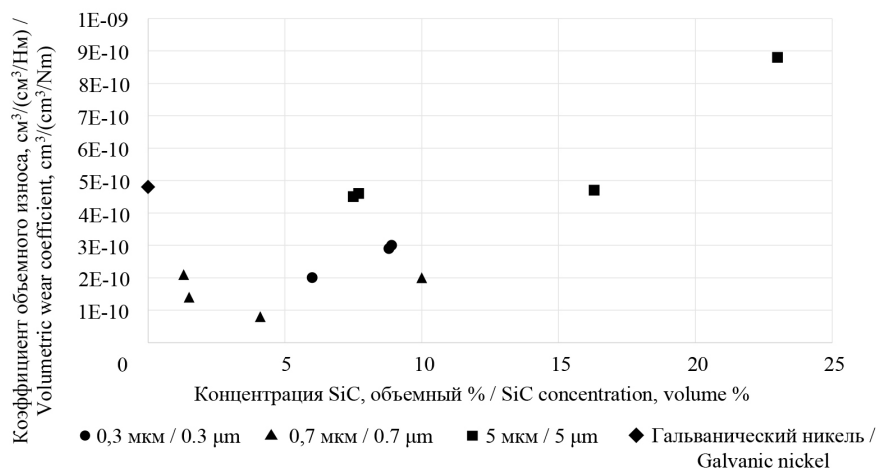
Source: hereinafter in this article all figures are compiled by the authors of the article.

Наибольший объемный процент содержания SiC достигается при осаждении крупных частиц размером 5 мм. На ряду с этим авторы⁵ [26] считают, что разнородные фазовые границы более эффективно подавляют движение дислокаций за счет большей несовместимости деформаций и плотности геометрически необходимых дислокаций. Таким образом, наименьший объемный процент достигается при использовании частиц размером 0,7 мм. Совершенно неожиданно для частицы SiC размером 0,3 мм объемный процент оказался больше, чем частицы размером 0,7 мм. Причину авторы видят в различном состоянии поверхности этих частиц SiC, полученных от разных производителей. Другой причиной может быть повышенная агломерация частиц размером 0,3 мм в растворе для нанесения покрытия.

⁵ Движения дислокаций при высокой скорости деформации / Д. С. Воронин [и др.]; Полухин Д. С. Структура и свойства композитного никель-фосфорного покрытия, термообработанного по разным режимам.

После проведения испытаний на одно- и двунаправленное скольжение композиционные покрытия состава Ni-SiC показывают следы износа черного цвета, которые имеют царапины, параллельные направлению движения. Для всех испытанных композитных покрытий Ni-SiC коэффициент трения составляет приблизительно 0,5 в течение первых нескольких циклов скольжения. После фазы обкатки коэффициент трения никелевых покрытий, содержащих включения 0,7 или 0,3 мкм частиц SiC, составляет приблизительно 0,29. Этот коэффициент трения ниже значения 0,34, наблюдаемого для никелевых покрытий, содержащих частицы SiC диаметром 5 мкм при сопоставимом объемном проценте совместно нанесенных частиц. С другой стороны, для каждого исследованного образца коэффициент трения возрастает с увеличением объемного процента частиц SiC в покрытиях приблизительно от 0,34 до 0,47 (в случае частиц SiC размером 5 мкм) и от 0,28 до 0,30 (в случае частиц размером 0,7 мкм).

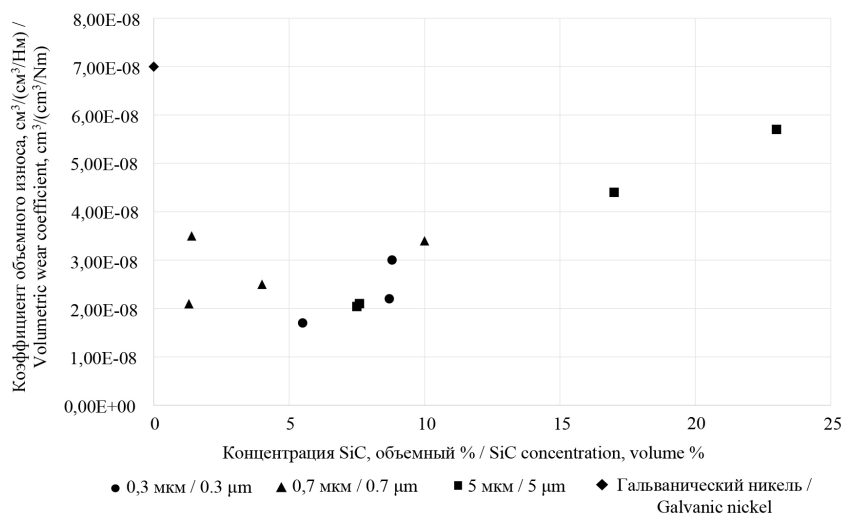
Износ на композитных покрытиях Ni-SiC, содержащих частицы SiC различного размера, после скольжения по корундовым шарикам в одно- и двунаправленных испытаниях на износ показан на рисунках 2 и 3 соответственно. Объемный износ на чистых никелевых покрытиях и композитных покрытиях Ni-SiC в однонаправленных испытаниях на скольжение примерно на два порядка меньше, чем отмеченный в двунаправленных испытаниях на скольжение. Это соответствует данным по износу при скольжении на твердых керамических покрытиях, показывающих более низкую скорость износа при однонаправленных, чем при двунаправленных испытаниях на скольжение. При однонаправленном скольжении композитные никелевые покрытия, содержащие частицы SiC диаметром 5 мкм, обладают более низкой стойкостью к износу с увеличением количества SiC, по сравнению с чистыми никелевыми покрытиями (рис. 2).



Р и с. 2. Коэффициент объемного износа при однонаправленном скольжении по чистому гальваническому никелю и по композиту, имеющему различное объемное содержание частиц SiC трех разных размеров

F i g. 2. Volumetric wear coefficient for unidirectional sliding on pure galvanic nickel and on a composite containing different volumetric content of SiC particles of three different sizes

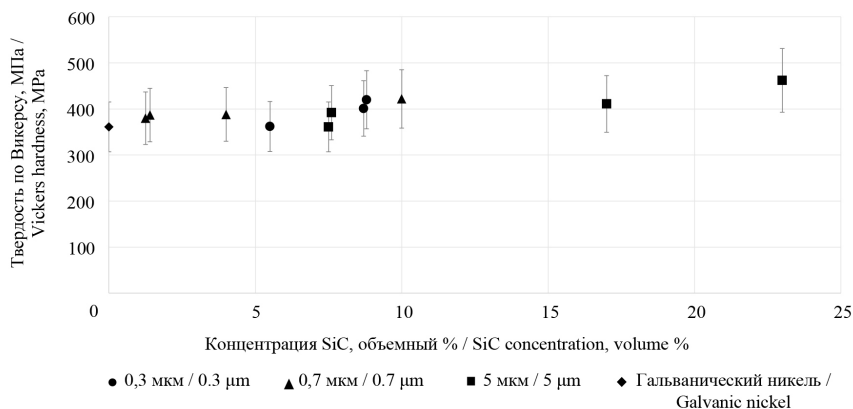
Напротив, композитные никелевые покрытия, содержащие частицы SiC диаметром 0,3 или 0,7 мкм, изнашиваются меньше в однонаправленных испытаниях на скольжение, чем чистый никель. Лучшие результаты достигаются при примерно 4 об. % частиц SiC диаметром 0,7 мкм. При двунаправленном скольжении объемный износ на всех композитных покрытиях Ni-SiC ниже, чем износ, измеренный на чистых никелевых покрытиях, электроосажденных при аналогичных условиях (рис. 3).



Р и с. 3. Объемный износный фактор при двунаправленном скольжении по чистому никелю и композитному покрытию Ni-SiC в зависимости от концентрации и размеров наполнителя
F i g. 3. Volumetric wear factor in bidirectional sliding on pure nickel and Ni-SiC composite coating depending on the concentration and size of the filler

Наименьший объемный износ при двунаправленном скольжении достигается с композитными никелевыми покрытиями, содержащими примерно 5 об. % частиц SiC диаметром 0,3 мкм. В попытке прояснить износостойкость испытанных композитных покрытий Ni-SiC была измерена твердость Виккерса. Твердость Виккерса построена как функция объемного процента осажденных частиц SiC (рис. 4).

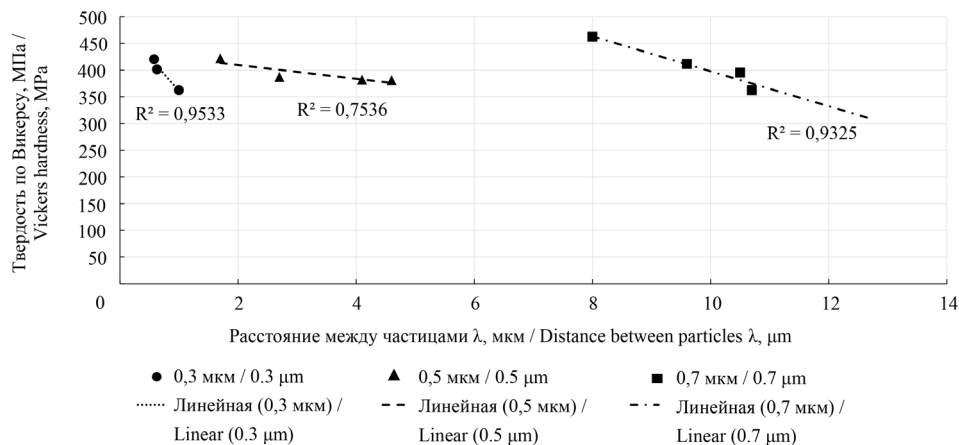
Для трех исследованных размеров частиц SiC твердость Виккерса возрастает с увеличением количества частиц SiC в никелевой матрице. Твердость Виккерса всех исследованных покрытий Ni-SiC выше, чем у чистого электроосажденного никеля. Для достижения высокого значения твердости требуется меньший объемный процент субмикронных частиц SiC, чем в случае с частицами SiC диаметром 5 мкм. Механические свойства металлических композитов, такие как твердость, зависят от количества и размера дисперсной фазы, а также от механических характеристик матрицы. Так, два вида механизмов упрочнения в металлических композитных материалах – дисперсионное упрочнение и упрочнение частицами – определяются количеством и размером частиц. Дисперсионно укрепленный композит отличается наличием мелких частиц, которые имеют диаметр в диапазоне от 0,01 до 1 мкм и составляют от 1 до 15 объемных процентов.



Р и с. 4. Твердость по Виккерсу чистого никеля и композитных покрытий Ni-SiC, содержащих частицы SiC в зависимости от объемного процента совместно нанесенных частиц SiC и их размеров

Fig. 4. Vickers hardness of pure nickel and Ni-SiC composite coatings containing SiC particles depending on the volume percentage of co-deposited SiC particles and their sizes

Наивысшая производительность процесса осаждения была обнаружена при расстоянии между частицами (λ) от 0,5 до 5 мкм. В этом случае матрица несет нагрузку, а мелкие частицы затрудняют движение дислокаций. Композит, укрепленный частицами, содержит более 20 объемных процентов частиц размером более 1 мкм. При расстоянии между частицами больше 5 мкм нагрузка несетя как матрицей, так и частицами. Упрочнение достигается за счет того, что частицы ограничивают деформацию матрицы. Какой из этих механизмов активен в композитных покрытиях Ni-SiC в данной работе, становится очевидным при построении зависимости твердости Виккерса этих покрытий от расстояния между частицами (рис. 5).

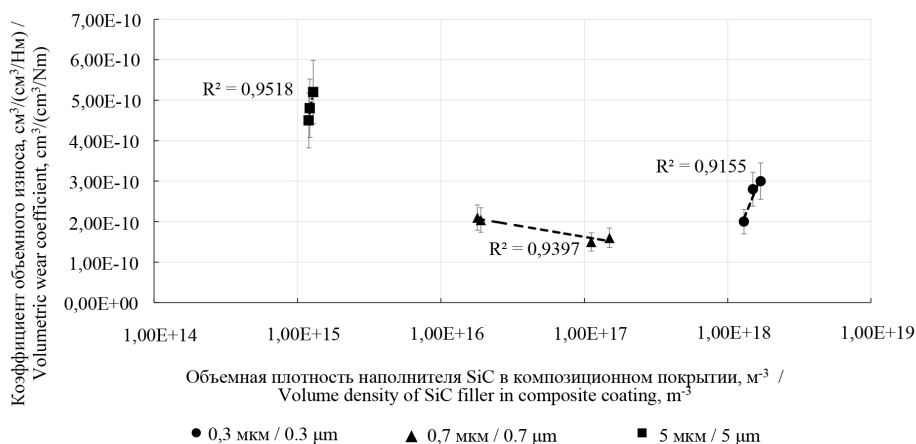


Р и с. 5. Зависимость твердости по Виккерсу композитных покрытий с частицами Ni-SiC в соответствии с размером частиц и расстоянием между ними в покрытии

Fig. 5. Vickers hardness dependence of composite coatings with Ni-SiC particles, depending on the particle size and the distance between them in the coating

Это расстояние было рассчитано с учетом того, что частицы SiC монодисперсны, сферически и равномерно распределены в покрытиях. В никелевых покрытиях, содержащих частицы SiC диаметром 5 мкм, расстояние между ними больше 5 мкм даже при наивысшем объемном проценте частиц (7,5–23 объемных процента) (рис. 4). Увеличение твердости, отмеченное в этих композиционных покрытиях, содержащих микронные частицы SiC, может быть связано с эффектом упрочнения частицами. Напротив, в композитных никелевых покрытиях, содержащих 2–10 объемных процента субмикронных частиц SiC, расстояние между частицами меньше 5 мкм.

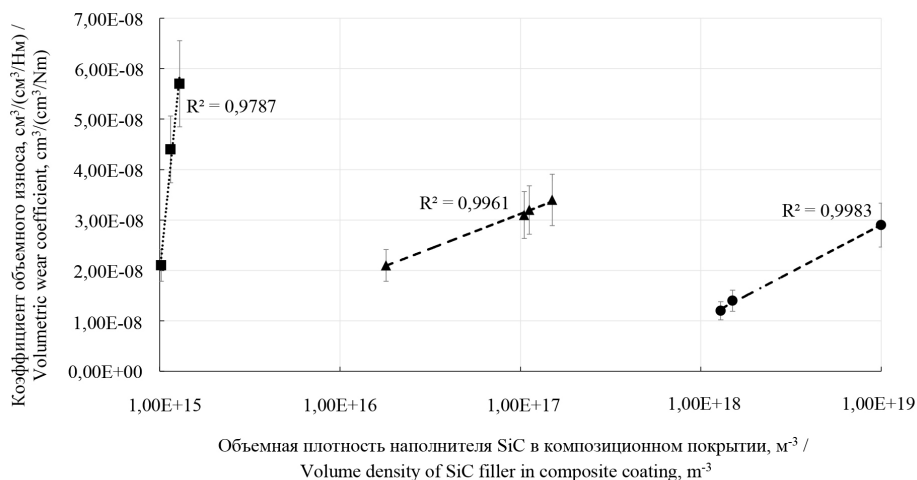
Таким образом, увеличение твердости в этих композитных покрытиях можно связать с эффектом упрочнения дисперсной фазы. Это указывает на важность достижения равномерного распределения неагломерированных субмикронных частиц для получения эффекта упрочнения. Расстояние между частицами дисперсной фазы как параметр, который зависит не только от объемного процента осажденных частиц, но и от их размера, более подходит для анализа механических свойств и, следовательно, износа, чем представление, основанное исключительно на объемном проценте. При использовании в качестве параметров плотность и размер частиц вместо объемного процента и размера частиц сравниваются независимые параметры. Данные об износе композитных покрытий Ni-SiC, представленные на рисунках 2 и 3, становятся более информативными, когда предстают в виде графиков по отношению к плотности осажденных частиц (рис. 6, 7).



Р и с. 6. Коэффициент объемного износа при однонаправленном скольжении по композиту в зависимости от объемной плотности наполнителя SiC различных размеров

F i g. 6. The coefficient of volumetric wear during unidirectional sliding on the composite, depending on the volumetric density of the SiC filler of various sizes

Опираясь на данные рисунков 6 и 7, делаем вывод, что объемный коэффициент износа увеличивается при одно- и двунаправленных испытаниях на износ скольжения с увеличением плотности осажденных частиц SiC для трех размеров частиц в большинстве случаев.



Р и с. 7. Коэффициент объемного износа при двунаправленном скольжении по композиту в зависимости от объемной плотности наполнителя SiC различных размеров

F i g. 7. The coefficient of volumetric wear during bidirectional sliding on the composite, depending on the volumetric density of the SiC filler of various sizes

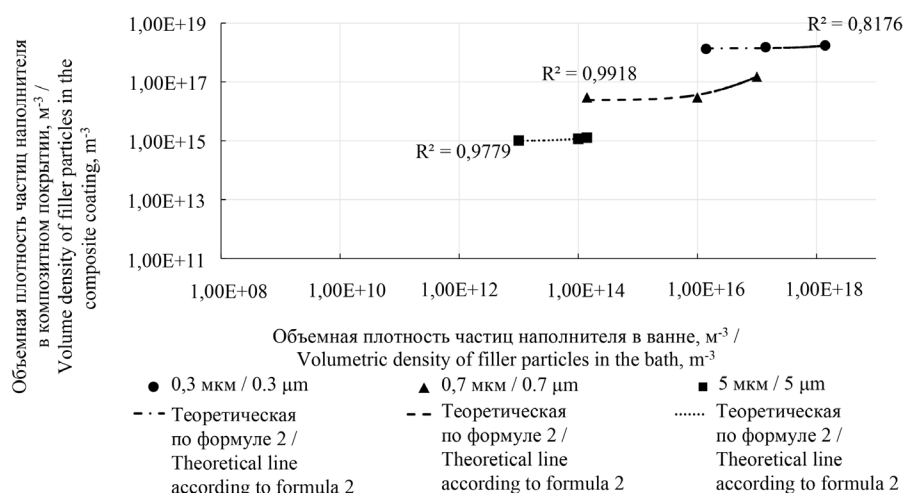
Объемный коэффициент износа сокращается в большинстве случаев с уменьшением размера частиц. Это означает, что низкий объемный процент субмикронных частиц SiC в композитных покрытиях Ni-SiC приводит к такой же стойкости к износу, как и покрытие, содержащее более высокий объемный процент микронных частиц.

Абразивный износ, наблюдаемый в следах износа после испытаний на скольжение, свидетельствует о том, что выкрашивающиеся частицы SiC оказывают негативное воздействие, когда остаются в зоне контакта скольжения. Таким образом, существует альтернатива между положительным увеличением твердости из-за укрепляющих частиц SiC, осажденных в никелевых покрытиях, и их негативным абразивным эффектом. Показатель твердости металломатричных композитов и их абразивный износ увеличивается при росте количества и размера абразивных частиц. Следовательно, уменьшение размера осажденных частиц в обоих случаях является положительным для формирования композитного покрытия. Однако увеличение показателя плотности частиц приводит к двум противоположным эффектам: 1) повышению твердости и механической прочности; 2) увеличению износа при абразивном воздействии.

На рисунке 8 показаны данные по плотности частиц в растворе для покрытия, n_s , и в покрытии, n_c .

Учитывая вышеизложенное, становится ясно, что плотность осажденных частиц SiC в 1–100 раз больше, чем плотность частиц в растворе для покрытия. Эффективность осаждения, определенная как отношение между плотностью частиц в покрытии и в растворе для покрытия, увеличивается для каждого размера частиц SiC с уменьшением плотности частиц в растворе для покрытия. Более важным является тот факт, что эффективность осаждения значительно увеличивается с уменьшением размера частиц. На рисунке 8 можно заметить скачок в плотности

осажденных частиц при заданной плотности частиц в растворе для покрытия, но при разном размере частиц. Следовательно, в отличие от очевидного результата (рис. 1), эффективность осаждения не снижается с уменьшением размера частиц. Напротив, при заданной плотности частиц в растворе для покрытия эффективность осаждения увеличивается с уменьшением размера частиц. Несмотря на то, что использованные различные частицы SiC были высокой чистоты, нельзя исключить, что частицы не только различаются по размеру, но и имеют разную поверхностную химию из-за своего происхождения. Таким образом, результаты на рисунке 8 могут быть либо вызваны различием в поверхностной химии, либо зависимостью осаждения от размера.



Р и с. 8. Зависимость плотности наполнителя в композитном покрытии от плотности частиц в растворе для нанесения покрытия

F i g. 8. Dependence of the filler density in the composite coating on the density of particles in the coating solution

Для различения между двумя альтернативными гипотезами была разработана модель, объясняющая результаты на основе эффекта размера. Предполагается, что плотность частиц, застрявших в покрытии за единицу объема, n_c , пропорциональна количеству частиц, n_s^* , которые застревают в покрытии за единицу времени, деленной на увеличение объема, ΔV , покрытия за единицу времени:

$$n_c = \frac{n_s^*}{\Delta V}. \quad (1)$$

Увеличение объема происходит из закона Фарадея, учитывая вклад осажденных частиц, предполагая, что они монодисперсные и сферические:

$$\Delta V = \frac{Mi}{n\rho F} + \frac{\pi}{6}d^3n_s^*,$$

где F – постоянная Фарадея; n – валентность ионов металла; M – атомная масса металла; ρ – плотность металла; i – плотность тока; d – диаметр осажденных частиц.

Количество частиц n_s^* , которые застревают в покрытии, можно связать с плотностью частиц в растворе для покрытия n_s , введя коэффициент передачи A и вероятность P :

$$n_s^* = PAn_s,$$

где A – общий объем частиц, которые сталкиваются с электродом за единицу времени; P – вероятность того, что частицы останутся на поверхности покрытия и будут включены в катодное осаждение.

Этот коэффициент передачи A и вероятность P , очевидно, зависят от перемешивания ванны и гидродинамики. Подставив ΔV и n_s^* в уравнение (1), получаем плотность осажденных частиц:

$$n_c = \frac{PAn_s}{\frac{Mi}{n\rho F} + \frac{\pi}{6}d^3PAn_s^*}. \quad (2)$$

Уравнение (2) содержит только один зависимый параметр, а именно PA , который связывает количество частиц, достигающих катода (A), и вероятность того, что эти частицы останутся на катоде (P).

Тот факт, что наши результаты соответствуют уравнению (2) с одним значением для PA (рис. 8), указывает на то, что положительный эффект связан с размером частиц, а не с изменением химии поверхности. Экстраполируя уравнение (2) к частицам SiC размером 0,1 мм, можно увидеть, что плотность осажденных частиц в покрытии будет более чем на два порядка больше, чем для частиц размером 0,7 мм. Это открывает интересные перспективы для достижения дисперсионного упрочнения в электролитических композиционных покрытиях, которые будут иметь повышенные износостойкие свойства.

Обсуждение и заключение. Износостойкость композиционных покрытий Ni-SiC показала зависимость от объема, занимаемого армирующими частицами, а также от их плотности. Скольжение износа композиционных покрытий Ni-SiC, содержащих различное количество частиц, было одинаковым для одно- и двунаправленного скольжения. Лучшая износостойкость против корундовых шаров была достигнута для покрытий Ni-SiC, содержащих 4–5 об. % частиц SiC размером 0,3 и 0,7 мм. Большой объем или плотность осажденных частиц снижает износостойкость. Уменьшение размера частиц положительно влияет на износостойкость. Это обусловлено благоприятным упрочнением за счет осажденных частиц и неблагоприятным абразивным износом из-за выдернутых из покрытия частиц. Было установлено, что при заданной плотности частиц в растворе для покрытия плотность осажденных частиц SiC увеличивается с уменьшением размера частиц. Таким образом, маленькие частицы SiC осаждаются легче, чем большие частицы. Основываясь на связи между плотностью осажденных частиц и плотностью частиц в растворе для покрытия, доказали, что размер и плотность частиц SiC в растворе для покрытия являются важными параметрами в процессе получения гальванических износостойких композиционных покрытий.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серникова О. С., Серебровский В. И., Калуцкий Е. С. Исследование износостойкости электроосажденных покрытий // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6 (45). С. 77–82. URL: <https://clck.ru/3DWw32> (дата обращения: 25.06.2024).
2. Новиков В. Ю. О механизме формирования микроструктуры при вторичной рекристаллизации в материале с дисперсными частицами второй фазы // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 1 (799). С. 9–15. EDN: EWUYVJ
3. Investigation on Corrosion Behavior and Mechanical Properties of an Extruded Mg-Zn-Al-Sn-Mn Alloy / Y. Bao [et al.] // Materials Characterization. 2021. Vol. 180. Article no. 111439. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111439>
4. Electrochemical Deposition of Composite Nickel-Graphene Oxide Coatings in the Reverse Mode / V. N. Tseluykin [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2022. Vol. 58. P. 321–324. <https://doi.org/10.1134/S2070205122020198>
5. Electrodeposition and Corrosion Properties of Nickel-Graphene Oxide Composite Coatings / V. Tseluikin [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14, Issue 19. <https://doi.org/10.3390/ma14195624>
6. Dispersion and Agglomeration Behaviors of Submicron Ceria Particles in Concentrated Slurries / Q. Wei [et al.] // Colloid and Polymer Science. 2021. Vol. 299. P. 1683–1694. <https://doi.org/10.1007/s00396-021-04894-7>
7. Sun M., Pang M. Defect Formation Mechanism and Performance Study of Laser Cladding Ni/Mo Composite Coating // Coatings. 2021. Vol. 11, Issue 12. <https://doi.org/10.3390/coatings11121460>
8. Щербаков И. Н., Гасанов Б. Г. Кинетика формирования трехслойного функционального фосфорсодержащего композиционного покрытия // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18, № 4. С. 165–169. EDN: WBHVDM
9. Strong Hydrophobic and Ultraviolet Reflective Film from Fluorinated Polyisoprene with Microphase Separation via Thiol-Epoxy Click Chemistry / H. Liu [et al.] // Macromolecular Chemistry and Physics. 2022. Vol. 223, Issue 18. <https://doi.org/10.1002/macp.202200100>
10. Kanaev A. T., Sarsembaeva T. E., Gulyarenko A. A. Modernization of the Surface Layer Structure of Heavily Loaded Parts of Tillage Machines with Plasma Hardening // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. P. 363–368. <https://doi.org/10.3103/s0967091222030068>
11. Electrochemical Deposition and Properties of Nickel-Chromium-Graphene Oxide Composite Coatings / V. N. Tseluikin [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2021. Vol. 57. P. 1231–1234. <https://doi.org/10.1134/S2070205121060198>
12. Research Status of Graphene Oxide Composite Coatings on Magnesium Alloys / Y. N. Chen [et al.] // Materials Engineering. 2021. Vol. 49, Issue. 12. P. 1–13. <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2021.000291>
13. Preparation of Nickel-Coated Graphene and Evaluation of Infrared Interference Performance / K. Li [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2194. Article no. 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2194/1/012043>
14. Preparation and Electrochemical Properties of $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ Cathode Materials from Spent Electroless Nickel Plating Bath / W. Xu [et al.] // Materials Research Express. 2022. Vol. 9, No. 6. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac7a95>
15. Electrochemical Characteristics of Various Ni-P Composite Coatings in 0.6 M NaCl Solution / M. Azadi [et al.] // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2021. Vol. 74. P. 137–147. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02125-1>
16. Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями / О. Г. Девойно [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 6. С. 450–459. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>
17. Електроосадження нанокристалічного сплаву нікель-залізо з електроліту на основі нового типу йонних рідин – низькотемпературного евтектичного розчинника / В. Проценко [и др.] // Праці НТШ. Хімічні науки. 2022. Vol. LXX. P. 119–127. <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.119>

18. Microstructure, Composition and Formation Mechanism of Ultra-Black Surfaces on the Electrodeposited Nickel-Phosphorous Coatings / S. Perevovnikov [et al.] // Surfaces and Interfaces. 2022. Vol. 32. Article no. 102127. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102127>
19. Enhancement of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Electrodeposited Ni-P-TiC Composite Coatings / O. Fayyaz [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article no. 5327. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84716-6>
20. Investigating the Properties of Electrodeposited of Ni-P-ZrC Nanocomposite Coatings / O. Fayyaz [et al.] // ACS Omega. 2021. Vol. 6, Issue 49. P. 33310–33324. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03117>
21. Volosova M. A., Okunkova A. A. Study of the Influence of Silicon-Containing Diamond-Like Carbon Coatings on the Wear Resistance of SiAlON Tool Ceramics // C (Journal of Carbon Research). 2023. Vol. 9, No. 2. P. 50. <https://doi.org/10.3390/c9020050>
22. Агеев Е. В., Серебровский В. И. Разработка и исследование технологии восстановления и упрочнения изношенных деталей машин композиционными гальваническими покрытиями с применением в качестве упрочняющей фазы вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков микро- и нанодисперсий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 2. С. 42–66. URL: <https://techusgu.elpub.ru/jour/article/view/103> (дата обращения: 15.03.2024).
23. Массоперенос при гальваническом осаждении покрытий с выравнивающей добавкой / С. Ю. Жачкин [и др.] // Наука в центральной России. 2022. № 2 (56). С. 134–142. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-134-142>
24. Пластическая твердость композиционных покрытий на основе хрома / С. Ю. Жачкин [и др.] // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 1. С. 94–100. EDN: SKKMBV
25. Оксидное волокно с покрытием карбида кремния для создания композиционных материалов / В. Г. Бабашов [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). С. 94–104. EDN: ZGETNP
26. Слепцова Е. Р., Джумаев П. С., Исаев Р. Ш. Повышение коррозионной стойкости карбида кремния методом нанесения защитных покрытий // Физика конденсированных состояний : сб. тезисов III Междунар. конф., посвященной 60-летию ИФТТ РАН (29 мая – 2 июня 2023 г., г. Черноголовка) / под ред. Б. Б. Страумала. Черноголовка : Институт физики твердого тела РАН, 2023. С. 64. <https://doi.org/10.26201/ISSP.2023/FKS-3.61>

REFERENCES

1. Sernikova O.S., Serebrovsky V.I., Kalutsky E.S. Study of Wear Resistance of Electrodeposited Coatings. *Sovremennye Materialy, Tekhnika i Tekhnologii*. 2022;6(45):77–82. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3DWw32> (accessed 25.06.2024).
2. Novikov V.Yu. Mechanism of Formation of Microstructure Under Secondary Recrystallization in a Material with Disperse Particles of Second Phase. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;1(799):9–15. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EWUYVJ
3. Bao Y., Chen L., Tang J., Li Z., Zhao G., Zhang C. Investigation on Corrosion Behavior and Mechanical Properties of an Extruded Mg-Zn-Al-Sn-Mn Alloy. *Materials Characterization*. 2021;180:111439. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111439>
4. Tseluykin V.N., Zakirova S.M., Mostovoy A.S., Yakovlev A.V., Dzhumieva A.S. Electrochemical Deposition of Composite Nickel-Graphene Oxide Coatings in the Reverse Mode. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022;58:321–324. <https://doi.org/10.1134/S2070205122020198>
5. Tseluikin V., Dzhumieva A., Yakovlev A., Mostovoy A., Zakirova S., Strilets A., [et al.] Electrodeposition and Corrosion Properties of Nickel-Graphene Oxide Composite Coatings. *Materials*. 2021;14(19). <https://doi.org/10.3390/ma14195624>
6. Wei Q., Luo Z., Yang Q., Gao W. Dispersion and Agglomeration Behaviors of Submicron Ceria Particles in Concentrated Slurries. *Colloid and Polymer Science*. 2021;299:1683–1694. <https://doi.org/10.1007/s00396-021-04894-7>



7. Sun M., Pang M. Defect Formation Mechanism and Performance Study of Laser Cladding Ni/Mo Composite Coating. *Coatings*. 2021;11(12). <https://doi.org/10.3390/coatings11121460>
8. Shcherbakov I.N., Gasanov B.G. Kinetics of Formation of a Three-Layer Functional Phosphorus-Containing Composite Coating. *Hardening Technologies and Coatings*. 2022;18(4):165–169. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WBHVDM
9. Liu H., Cheng Sh., Yang Ya., Wang Ch., Zhu Sh., Zhao F. Strong Hydrophobic and Ultraviolet Reflective Film from Fluorinated Polyisoprene with Microphase Separation via Thiol-Epoxy Click Chemistry. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2022;223(18). <https://doi.org/10.1002/macp.202200100>
10. Kanaev A.T., Sarsembaeva T.E., Gulyarenko A.A. Modernization of the Surface Layer Structure of Heavily Loaded Parts of Tillage Machines with Plasma Hardening. *Steel in Translation*. 2022;52:363–368. <https://doi.org/10.3103/s0967091222030068>
11. Tseluikin V.N., Dzhumieva A.S., Yakovlev A.V., Mostovoy A.S. Electrochemical Deposition and Properties of Nickel-Chromium-Graphene Oxide Composite Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021;57:1231–1234. <https://doi.org/10.1134/S2070205121060198>
12. Chen Y.N., Wu L., Chen Y.H., Cheng L., Yao W.H., Pan F.S. Research Status of Graphene Oxide Composite Coatings on Magnesium Alloys. *Materials Engineering*. 2021;49(12):1–13. <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2021.000291>
13. Li K., Wang X., Gao Ya., Dong W., Li H. Preparation of Nickel-Coated Graphene and Evaluation of Infrared Interference Performance. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2194:012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2194/1/012043>
14. Xu W., Yang H., Liu W., Qin M., Shen B., Wang W., [et al.] Preparation and Electrochemical Properties of $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ Cathode Materials from Spent Electroless Nickel Plating Bath. *Materials Research Express*. 2022;9(6). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac7a95>
15. Azadi M., Tavakoli H., Haghighatkah S., Eranegh F.A. Electrochemical Characteristics of Various Ni-P Composite Coatings in 0.6 M NaCl Solution. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021;74:137–147. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02125-1>
16. Devoino O.G., Turichin G.A., Kardapolava M.A., Kasach Y.I., Pogudo E.V., Kasyakova I.M. Tribotechnical Characteristics of Nickel-Based Composite Coatings Obtained by Hybrid Technologies. *Science and Technology*. 2023;22(6):450–459. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>
17. Protsenko V., Pavlenko L., Sukhatskyi O., Butyrina T., Danilov F. Electrodeposition of Nanocrystalline Nickel-Iron Alloy from an Electrolyte Based on a New Type of Ionic Liquids – Deep Eutectic Solvent. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Series Chemical Sciences*. 2022;LXX:119–127. (In Ukr., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.119>
18. Perevoznikov S., Tsybulskaya L., Shendyukov V., Scharnagl N. Microstructure, Composition and Formation Mechanism of Ultra-Black Surfaces on the Electrodeposited Nickel-Phosphorous Coatings. *Surfaces and Interfaces*. 2022;32:102127. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2022.102127>
19. Fayyaz O., Khan A., Shakoor R.A., Hasan A., Yusuf M.M., Montemor M.F., [et al.] Enhancement of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Electrodeposited Ni-P-TiC Composite Coatings. *Scientific Reports*. 2021;11:5327. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84716-6>
20. Fayyaz O., Radwan A.B., Sliem M.H., Abdullah A.M., Hasan A., Shakoor R.A. Investigating the Properties of Electrodeposited of Ni-P-ZrC Nanocomposite Coatings. *ACS Omega*. 2021;6(49):33310–33324. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03117>
21. Volosova M.A., Okunkova A.A. Study of the Influence of Silicon-Containing Diamond-like Carbon Coatings on the Wear Resistance of SiAlON Tool Ceramics. *C (Journal of Carbon Research)*. 2023;9(2):50. <https://doi.org/10.3390/c9020050>
22. Ageev E.V., Serebrovsky V.I. Development and Research of Technology for Restoration and Strengthening of Worn Machine Parts by Composite Electroplating Coatings Using Micro- and Nanofractions Containing Tungsten-Containing Electroerosive Powders as the Strengthening Phase. *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology*. 2021;11(2):42–66. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://techusgu.elpub.ru/jour/article/view/103> (accessed 15.03.2024).

23. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Nevstruev Yu.A., Biryukov A.V., Vlasov D.A. Mass Transfer During Galvanic Deposition of Coatings with a Leveling Additive. *Science in the Central Russia*. 2022;2(56):134–142. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-134-142>

24. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V. Plastic Hardness of Composite Coatings Based on Chrome. *Machinery Technical Service*. 2024;62(1):94–100. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **SKKMBV**

25. Babashov V.G., Varrik N.M., Maksimov V.G., Samorodova O.N. Oxide Fiber Coated with Silicon Carbide for Producing Composite Materials. *Aviation Materials and Technologies*. 2021;3(64):94–104. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ZGETNP**

26. Sleptsova E.R., Dzhumaev P.S., Isaev R.Sh. [Increasing the Corrosion Resistance of Silicon Carbide by Applying Protective Coatings]. In: Straumal B.B., ed. *Physics of Condensed States: a Collection of Abstracts of the III International Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the IFTT RAS (Chernogolovka, May 29 – June 2, 2023)*. Chernogolovka: Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences; 2023. (In Russ.) <https://doi.org/10.26201/ISSP.2023/FKS-3.61>

Об авторах:

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, Researcher ID: **AAC-7580-2022**, Scopus ID: **57210973083**, SPIN-код: **9374-2996**, zhach@list.ru

Трифонов Григорий Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>, SPIN-код: **9499-2510**, grishakip@yandex.ru

Сидоркин Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1249-0776>, sidorkinoa@rambler.ru

Пустоветов Алексей Владимирович, аспирант кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (394087, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4114-6689>, pustovetovav@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

С. Ю. Жачкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка цели и задач исследования, формирование частных и общих выводов.

Г. И. Трифонов – проведение исследования, подготовка текста, обработка экспериментальных данных и их контрфактуальный анализ.

О. А. Сидоркин – проведение анализа информационных источников, обработка изображений, корректировка общих и частных выводов.

А. В. Пустоветов – анализ и обработка итогового варианта текста, обработка экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 15.07.2024; поступила после рецензирования 05.08.2024;
принята к публикации 12.08.2024*

*About the authors:*

Sergey Yu. Zhachkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Teacher, Military Training and Scientific Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, Researcher ID: [AAC-7580-2022](https://orcid.org/0000-0002-1844-5011), Scopus ID: [57210973083](https://orcid.org/0000-0002-1844-5011), SPIN-code: [9374-2996](https://orcid.org/0000-0002-1844-5011), zhach@list.ru

Gregory I. Trifonov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher, Military Training and Scientific Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>, SPIN-code: [9499-2510](https://orcid.org/0000-0002-7739-5587), grishakip@yandex.ru

Oleg A. Sidorkin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Military Training and Scientific Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1249-0776>, sidorkinoa@rambler.ru

Alexey V. Pustovetov, Postgraduate Student of the Department of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (1 Michurina St., Voronezh 394087, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4114-6689>, pusovetovav@rambler.ru

Authors contribution:

S. Yu. Zhachkin – scientific guidance, formulation of the study basic concept, setting the goals and objectives of the study, forming particular and general conclusions.

G. I. Trifonov – conducting the study, preparing the text, processing the experimental data and their counterfactual analysis.

O. A. Sidorkin – analyzing information sources, image processing, correcting general

A. V. Pustovetov – analyzing and processing of the final version of the text, processing of experimental data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 15.07.2024; revised 05.08.2024; accepted 12.08.2024