

Ni-SiC COMPOSITE COATING PLANT

*Svetlana Kamilevna Kiseleva^{1, 2a}, Linar Dinarovich Akhmerov^{1, 2},
Vasily Vasilievich Lukyanov^{1, 2}, Irek Vilevich Kandarov^{1, 2}*

¹ Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov st., 450064 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

² Scientific and Industrial Association "Technopark of Aviation Technologies", Bldg 1, 5 Tramvaynaya st., 450027 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

^a kiseleva_s2018@mail.ru

ABSTRACT

This paper discusses the features of the process of forming a composite coating based on Ni-SiC by the electrodeposition method. A model of the action of electrostatic, gravitational and centrifugal forces on SiC particles in an electrolyte solution for electrodeposition is presented. Based on the proposed model, an installation was designed on which the technological process of applying a composite Ni-SiC coating to flat samples of aluminum alloy AK7, simulating a sector of an axisymmetric part, was successfully tested. Due to the fact that the cylindrical bath with the processed sample fixed on it can take both vertical and horizontal positions, coatings with different structures were obtained. With a vertical arrangement of the cylindrical bath, a nickel-based coating with a thickness of $25 \pm 3 \mu\text{m}$ was formed during the electrodeposition process. With a horizontal arrangement of the bath, a composite nickel coating with a uniform distribution of reinforcing SiC particles with a volume fraction of 30% and a thickness of $32 \pm 3 \mu\text{m}$ was formed during the electrodeposition process. The nickel coating with a uniform distribution of SiC particles is characterized by a maximum microhardness value of $690 \pm 8 \text{HV}$, increased roughness $Ra = 6,80 \pm 0,50$ and a low groove width $b = 67 \pm 3 \mu\text{m}$ after the scratch test, which indicates good adhesion to the substrate material.

KEYWORDS

Composite coatings; electrodeposition; roughness; wear resistance; silicon carbide; microhardness; microstructure.

УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ
КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ Ni-SiC

*Светлана Камильевна Киселева^{1, 2a}, Линар Динарович Ахмеров¹,
Василий Васильевич Лукьянов^{1, 2}, Ирек Вилевич Кандаров^{1, 2}*

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Республика Башкортостан, 450064 г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

² Научно-производственная ассоциация «Технопарк авиационных технологий», Россия, Республика Башкортостан, 450027 г. Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1

^a kiseleva_s2018@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрены особенности процесса формирования композитного покрытия на основе Ni-SiC методом электроосаждения. Представлена модель действия электростатической, гравитационной и центробежной сил на частицы SiC, находящиеся в растворе электролита для электроосаждения. На основании предложенной модели была спроектирована установка, на которой был апробирован технологический процесс нанесения композитного покрытия Ni-SiC на плоские образцы из алюминиевого сплава АК7, имитирующие сектор осесимметричной детали. Благодаря тому, что цилиндрическая ванна с закрепленным на ней обрабатываемым образцом принимает как вертикальное, так и горизонтальное положение, были получены покрытия с различным строением. При вертикальном расположении цилиндрической ванны установки в процессе электроосаждения формируется покрытие на основе никеля толщиной 25 ± 3 мкм. При горизонтальном расположении цилиндрической ванны установки в процессе электроосаждения формируется композитное никелевое покрытие с однородным распределением упрочняющих частиц SiC с объемной долей 30% и толщиной 32 ± 3 мкм. Никелевое покрытие с однородным распределением частиц SiC характеризуется максимальным значением микротвердости 690 ± 8 HV, повышенной шероховатостью $Ra = 6,80 \pm 0,50$ и низкой шириной борозды $b = 67 \pm 3$ мкм после скретч-теста, что свидетельствует о хорошей адгезии с материалом подложки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Композиционные покрытия; электроосаждение; шероховатость; износостойкость; карбид кремния; микротвердость; микроструктура.

Введение

К числу приоритетных направлений развития машиностроительной отрасли относится увеличение ресурса техники и снижение затрат на ее эксплуатацию. Преждевременный выход из строя техники происходит по причине износа узлов трения, что сопровождается снижением надежности и долговечности машин и механизмов.

Как известно, для снижения потерь от износа трущихся деталей применяют технологические приемы поверхностной инженерии, в частности нанесение различных покрытий, основная задача которых заключается в получении поверхностных слоев с высокими эксплуатационными характеристиками, прочно сцепленных с основой [1].

К группе перспективных противоизносных покрытий относятся покрытия с металлической матрицей, например на основе Cr, Ni и их сплавов [2–4]. Однокомпонентные

покрытия на основе металлической матрицы больше подвержены износу. Дополнительное повышение функциональных свойств достигается за счет внедрения в матрицу твердых частиц, таких как SiC, Al_2O_3 , WC, TiO_2 [5–8]. Для данных покрытий характерны низкая плотность, повышенные прочность, твердость, износостойкость, а также стабильность линейных размеров изделия при высоких температурах [9]. В автомобильной и авиационной промышленности положительно себя зарекомендовало композитное покрытие на основе системы Ni-SiC, широко используемое для снижения износа деталей двигателя [10, 11].

В современном мире технологии играют ключевую роль в развитии машиностроительной индустрии. Для нанесения композиционных покрытий используются технологии холодного газодинамического напыления, метод плазменного напыления,

газотермического напыления, сверхзвукового и микроплазменного напыления [12, 13]. Также широко известна технология электролитического осаждения, которая является базовой и характеризуется простотой, невысокой температурой обработки, низкой стоимостью и доступностью исходных компонентов [14–16].

Качество композиционного покрытия Ni-SiC зависит от сочетания таких параметров, как состав электролита, содержание частиц карбида кремния, температура обработки, плотность тока и скорость перемешивания. Так, отмечается [17], что повышение температуры электролита приводит к увеличению размера кристаллов и повышению объемной доли упрочняющих частиц в формируемом покрытии. Содержание частиц SiC в покрытии повышается с увеличением концентрации взвешенных частиц в растворе электролита [18]. Увеличение плотности тока приводит к повышению микротвердости покрытий за счет увеличения скорости роста кристаллов и формированию менее упорядоченной структуры с большей внутренней напряженностью [19].

Размер частиц карбида кремния – еще один важный фактор, влияющий на качество покрытия. Анализ литературы показал, что большинство работ сконцентрировано на снижении размера частиц [19–21] вплоть до наноразмерного диапазона [22–24]. Показано, что при переходе к субмикронному диапазону происходит измельчение размера зерен никелевой матрицы и возрастает микротвердость. Возможность внедрения частиц в диапазоне размеров 10–20 мкм и то, какие при этом будут свойства у сформированных покрытий, не рассматриваются. Сложность встраивания крупных частиц становится более очевидной при переходе от плоских образцов к осесимметричным изделиям, например цилиндрам.

В связи с этим целью данной работы является исследование возможностей формирования покрытия на основе никелевой ма-

трицы, содержащей крупные частицы SiC, на плоских образцах из алюминиевого сплава АК7, имитирующих сектор осесимметричной детали и разработка на этой основе технологической установки.

1. Материал и методы исследования

Покрyтия наносились на плоские образцы размером 20×10×4 мм из литейного алюминиево-кремниевого сплава АК7 (Al – 7% Si, ГОСТ 1583-93). Микротвердость сплава составляет 58 HV, шероховатость поверхности $Ra = 0,20 \pm 0,05$.

В связи с поставленной выше целью покрытие должно быть сформировано на плоских образцах, имитирующих сектор осесимметричной детали. При разработке установки были учтены следующие моменты:

1) покрытие необходимо наносить на одну сторону плоского образца, имитируя тем самым обработку внутренней поверхности осесимметричной детали (например, цилиндр);

2) расположение никелевого катода необходимо выдерживать параллельно обрабатываемому образцу.

С целью обеспечения качественного сцепления покрытия с материалом основы перед электрохимической обработкой поверхность образцов необходимо тщательно подготовить. Для этого алюминиевые образцы помещали в ультразвуковую ванну с ацетоном, далее промывали теплой дистиллированной водой и подвергали операции травления в растворе плавиковой (HF) и азотной кислот (HNO_3). С целью исключения образования на воздухе тонкой оксидной пленки образцы не сушили, а сразу после двойной промывки в дистиллированной воде комнатной температуры крепились на установке.

Экспериментальная часть работы проведена на установке, показанной на рис. 1. Подробное описание установки будет представлено ниже при обсуждении полученных результатов.

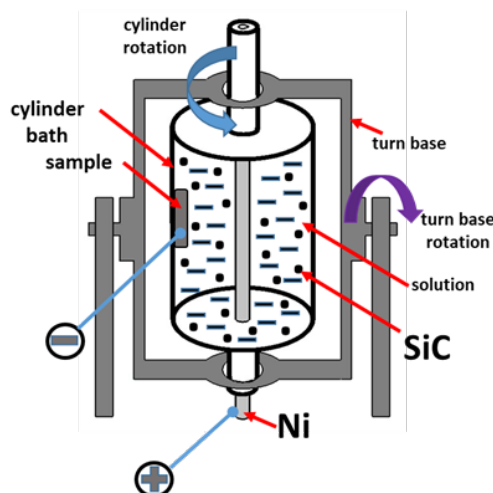


Рис. 1. Установка для нанесения покрытия методом электроосаждения

Fig. 1. Electrodeposition coating plant

Состав электролита и режим электрохимической обработки были выбраны исходя из патентной проработки [25] и представлены в табл. 1. Диапазон скорости перемешивания составляет от 1 до 500 оборотов в минуту.

В процессе электрохимической обработки сформированы покрытия на поверхности плоских образцов:

- тип 1 – на основе никеля «Ni»;
- тип 2 – на основе никеля с частицами карбида кремния «Ni-SiC».

Микроструктуру покрытий исследовали с использованием оптического микроскопа «Olympus GX51» при увеличении $\times 200$.

Испытания покрытия на износостойкость выполняли двумя методами: царапание и шарик по диску.

Царапание проводили при помощи скретч-тестера «CSM Micro-Scratch Tester». Использовали алмазный конический индентор с радиусом закругления вершины 20 мкм. Нарастающая нагрузка изменялась от 0,05 до 20 Н, скорость увеличения нагрузки составила 33,25 Н/мин. Длина одной полосы царапание составила 3 мм, выполнялось три прохода с интервалом 0,7 мм друг от друга.

Метод «шарик-по-диску» осуществляли на трибометре «Nanovea» при комнатной температуре. Параметры испытаний были следующими: 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 $\varnothing 6,3$ мм.

Таблица 1. Состав электролита и режим электрохимической обработки

Table 1. Electrolyte composition and electrochemical processing mode

Состав электролита / Electrolyte composition					Режим обработки / Processing mode
Одиночная соль никеля / Single nickel salt $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Борная кислота / Boric acid (H_3BO_3)	Хлорид никеля / Nickel chloride (NiCl_2)	Лаурилсульфат натрия / Sodium laurisulfate ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$)	Карбид кремния (SiC) / Silicon carbide	Плотность тока 10 А/дм ² / Current density 10 A/dm ² ; Продолжительность 60 минут / Duration 60 minutes; Температура 60 °C / Temperature 60 °C
300 гр/л / 30 gr/l	30 гр/л / 30 gr/l	30 гр/л / 30 gr/l	1,5 гр/л / 1,5 gr/l	150 гр/л / 150 gr/l	

Оценку микротвердости проводили на микротвердомере «DuraScan 50» с приложением нагрузки 200 гр в течении 10 секунд на поперечном сечении покрытия.

Шероховатость Ra определяли с помощью профилометра «Mitutoyo Surftest».

2. Результаты

В результате электрохимической обработки были получены покрытия на плоских образцах алюминиевого сплава АК7. Покрытия не отслаиваются от материала подложки. Морфология поперечного сечения покрытия изображена на рис. 2. Сформированное покрытие характеризуется отсутствием трещин, качественный анализ свидетельствует об хорошем сцеплении с основным металлом. Дефекты в виде пор между материалом основы и покрытия не отмечаются.

Покрытие тип 1, представленное на рис. 2, *а* было получено при вертикальном расположении цилиндрической ванны в процессе обработки (тип 1). Несмотря на то, что в состав электролита входит карбид кремния, условия обработки не позволили им встроиться в покрытие. В результате на

подложке из алюминиевого сплава АК7 образуется металлический слой на основе никеля со средней толщиной 25 ± 3 мкм. Шероховатость поверхности покрытия составляет $Ra = 1,40 \pm 0,20$.

Тип 2 – был получен при горизонтальном расположении ванны. На рис. 2, *б* видно, что покрытие состоит из равномерно распределенных частиц карбида кремния в никелевой матрице. Объемная доля твердых частиц SiC – 30%; форма частиц – осколочная, неправильная; средний размер – 17 ± 2 мкм. Средняя толщина покрытия – 32 ± 3 мкм. Шероховатость поверхности покрытия – $Ra = 6,80 \pm 0,50$.

Механические характеристики такие как микротвердость и адгезия определяют эксплуатационные характеристики покрытия.

Численные показатели микротвердости приведены в табл. 2. Композиционное покрытие на основе «Ni-SiC» (тип 2) имеют повышенную величину HV по сравнению с чистым Ni (тип 1), что можно объяснить механизмом дисперсионного упрочнения никелевой матрицы включениями износостойких частиц SiC, являющимися барьерами для движения дислокаций [26–28].

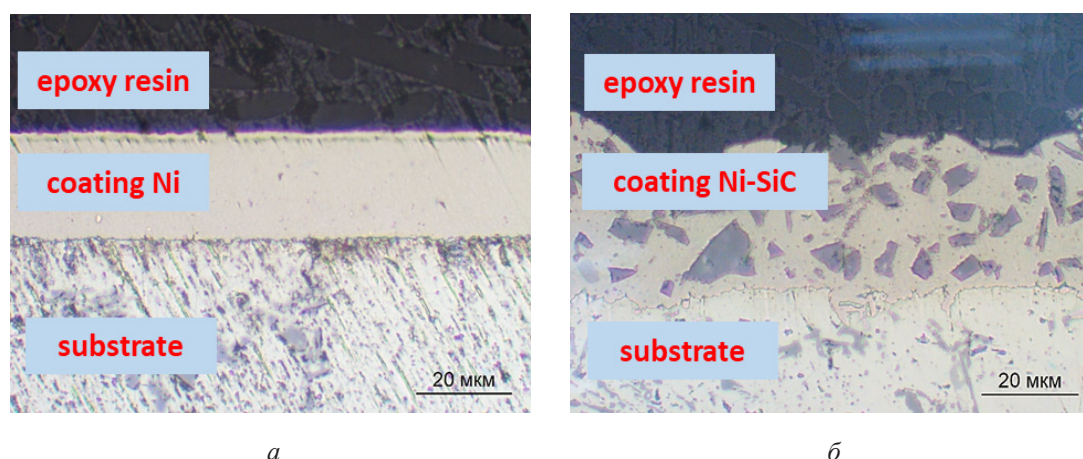


Рис. 2. Микроструктура покрытия:
а – тип 1; *б* – тип 2

Fig. 2. Coating microstructure:
а – type 1; *б* – type 2

Таблица 2. Механические свойства покрытия

Table 2. Mechanical coating properties

Характеристика / Characteristic	Тип 1 / Type 1	Тип 2 / Type 2
Микротвердость, HV / Microhardness, HV	265±5	690±8
Глубина проникновения индентора по всему пути/ на последней 1/3пути, мкм / Indenter penetration depth on the last 1/3 of the path, μm	14±1 / 21±1	21±1 / 29±2
Ширина борозды <i>b</i> , мкм / Groove width <i>b</i> , μm	100±7	67±3

Скретч-тестирование применяется для оценки адгезии покрытий к поверхности подложки. Результаты показали, что отслоения и разрушения покрытия при заданном типе индентора не происходит для двух типов покрытий, что свидетельствует о высокой их адгезии к алюминиевой основе. Результаты скретч-тестирования продемонстрировали влияние типа сформированного покрытия на характер распределения глубины проникновения индентора по всей длине протяженности. В то же время, деформация покрытия из чистого никеля (рис. 3, а) проявляется однородно и сопровождается минимальными колебаниями глубины погружения.

Деформация покрытия с твердыми частицами протекает неоднородно, характеризуясь колебаниями и временными «провалами» в глубине погружения (см. рис. 3, б).

Этот факт подтверждается количественной оценкой глубины проникновения индентора, как для всего полного пути, так и для последней наиболее нагруженной части (табл. 2).

Зависимость глубины погружения от пройденного пути соответствует оценке шероховатости. Для покрытия типа 2, которое характеризуется значительными провалами, зафиксирована высокая величина $Ra = 6,80 \pm 0,50$. Обращает внимание и связь ширины борозды (*b*, мкм) с микротвердостью (табл. 2, рис. 3). Наименьшая ширина наблюдается для покрытия на основе никеля – тип 2, имеющего максимальное значение HV; наибольшая – для покрытия на основе чистого никеля тип 1. Таким образом, равномерное распределение частиц SiC в никелевой матрице способствует значительному снижению износа покрытия.

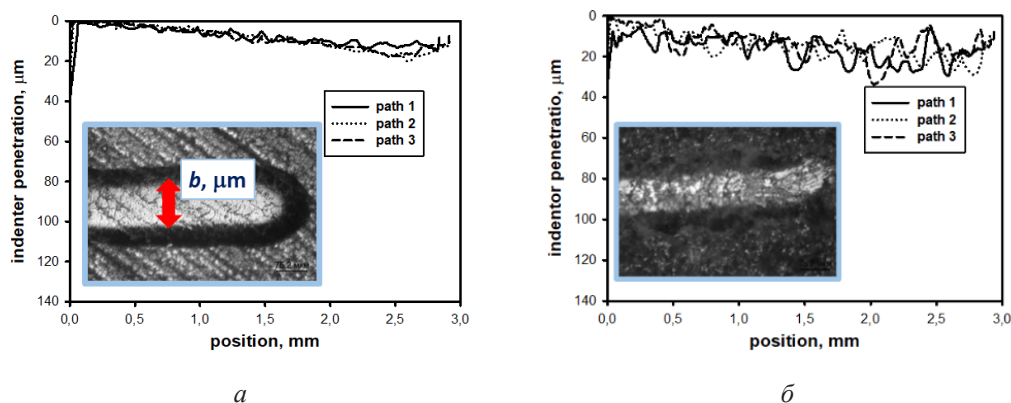


Рис. 3. Скретч-тест: а – тип 1; б – тип 2

Fig. 3. Scratch test: а – type 1; б – type 2



Рис. 4. Изображение дорожки износа на покрытии:
a – тип 1; б – тип 2

Fig. 4. Appearance of the track after tribological testing:
a – type 1; б – type 2

Как известно, после трибологических испытаний на поверхности испытуемых образцов остаются следы взаимодействия, которые называются дорожкой износа [29]. Она представляет собой углубление или канавку, которая образуется в результате трения и износа между двумя контактирующими поверхностями. Изучение внешнего вида дорожки износа позволяет оценить степень изнашивания. Основной величиной, характеризующей износостойкость покрытия, является убыль массы образца. На рис. 4 представлено изображение дорожки износа после трибологических испытаний. Визуально видно, что покрытие тип 1 подвержено большему износу. Убыль массы покрытия тип 1 составила 2,1 мг; тип 2 – 0,2 мг.

Таким образом, в результате электрохимической обработки плоских образцов из литейного сплава АК7 на поверхности были сформированы покрытия, различающиеся строением и механическими свойствами.

3. Обсуждение результатов

Электроосаждение – это способ получения металлического покрытия на проводящей поверхности основного материала из водных растворов под действием электрического тока [30, 31]. Процесс состоит в погружении двух электродов в сосуд, например, в виде гальванической ванны. Один электрод – покрываемое изделие подключается к отрицательному полюсу, другой – противоэлектрод к положительному. При приложении внешнего электрического поля на катоде происходит восстановление ионов до метал-

ла, который и образует металлический слой на поверхности основного материала.

Как отмечают авторы ряда публикаций [32–36] при введении в электролит твердых частиц происходит адсорбция на их поверхности катионов осаждаемого никеля, частицы приобретают требуемый положительный заряд, что позволяет им продвигаться к катоду и легче встраиваться в покрытие. Однако при переходе к крупной фракции (более 10 мкм) возникают сложности с их внедрением. При размере частиц 3–7 мкм, как пишут авторы статьи [37], теряется агрегативная устойчивость электролита, и, добавление, как решение, поверхностно-активных веществ для стабилизации становится невозможным. Применение ультразвукового перемешивания, ротационных мешалок, вращение покрываемой детали – все эти методы также применялись только по отношению к мелкой фракции частиц до 1 мкм.

Твердые частицы в электролите находятся под действием нескольких сил – электростатической F_{el} , гравитации F_{gr} и центробежной F_{centr} (рис. 5). Движение крупных частиц SiC за счет электростатической силы недостаточно, внедрение их в никелевую матрицу за счет центробежной силы, как оказалось также не представляется возможным (рис. 5, *a*). Интенсивное перемешивание или не позволяет крупным конгломератам формироваться, или они стремительно разрушаются, не давая возможность частицам приобрести требуемый положительный заряд и внедрится в никелевую матрицу. Основную роль для доставки крупных частиц карбида кремния к обрабатываемым поверхностям

играет сила гравитации (F_{gr}). Поэтому, при горизонтальном положении образца F_{gr} способствует легкому оседанию частиц на поверхность (рис. 5, б).

На основании представленной модели (рис. 4) была спроектирована установка для электроосаждения (рис. 1). С практической точки зрения целью работы является рассмотрение потенциала формирования композитного покрытия на плоских образцах, имитирующих сектор осесимметричной детали. Полученные результаты станут технологической базой для разработки установки нанесения композиционного покрытия на рабочую полость цилиндра.

При конструировании установки были приняты следующие вводные параметры. Электрохимической обработке должна подвергаться исключительно только одна поверхность плоского образца. Тем самым моделируется процесс нанесения покрытия на внутреннюю рабочую поверхность осесимметричной детали. Никелевый катод необходимо располагать параллельно рабочей части цилиндрической ванны для обеспечения однородности формирования покрытия. Следовательно, и плоские образцы-имитаторы следует располагать параллельно катоду.

На рис. 1 представлена установка для электроосаждения. Она состоит из цилиндрической ванны, которая установлена на

поворотное основание. На установке можно проводить электрохимическую обработку как плоских образцов, так и в дальнейшем – осесимметричных деталей типа цилиндр. Перемешивание электролита достигается за счет вращения цилиндрической ванны вокруг никелевого катода, расположенного в центре основания цилиндра (голубая стрелка на рис. 1). В случае использования плоских образцов цилиндрическая ванна служит местом их крепления, или – деталью на внутреннюю рабочую поверхность, которой следует нанести покрытие. Установка имеет еще один элемент вращения, благодаря чему возможен поворот цилиндрической ванны с закрепленным образцом и катодом из вертикального положения в горизонтальное и наоборот (фиолетовая стрелка на рис. 1).

При горизонтальном положении ванны удастся получить на плоских образцах композитное покрытие, состоящее из металлической матрицы и крупных частиц карбида кремния (рис. 2, б). Однородному распределению частиц в матрице способствует непрерывное перемешивание электролита за счет вращения цилиндрической ванны вокруг оси цилиндра в процессе электроосаждения. Если необходимо сформировать покрытие только на основе никеля, установка поворачивается в вертикальное положение (рис. 2, а).

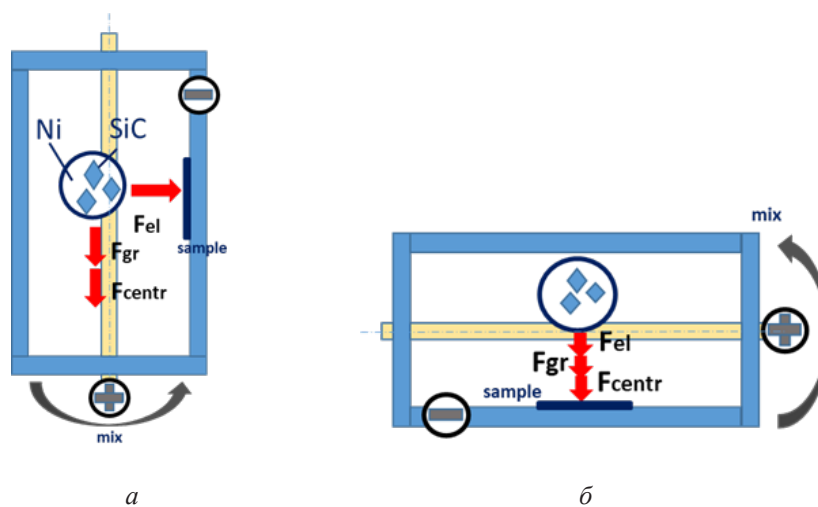


Рис. 5. Модель действия сил на частицы SiC в растворе электролита

Fig. 5. Forces action on SiC particles in an electrolyte solution model

При формировании покрытия, состоящего только из никелевой основы, отмечаются низкие значения HV и Ra по сравнению с композитным покрытием. Результаты скретч-теста демонстрируют однородное колебание глубины погружения индентора при деформации. Дисперсионное упрочнение никелевой матрицы за счет встраивания твердых частиц SiC в процессе электроосаждения приводит к росту значений микротвердости. При этом наблюдается образование выступов на поверхности, что отражается на изменении характера распределения глубины проникновения индентора (рис. 3, б). Снижение износа для композитного покрытия подтверждается оценкой ширины борозды при скретч-тесте, а также уносом массы покрытия и внешним видом дорожки износа при трибологических испытаниях.

Таким образом подтверждается связь между структурой покрытия с микротвердостью и шероховатостью. Для более корректной оценки взаимосвязи между структурой и глубиной погружения индентора при скретч-тесте необходимо обеспечить одинаковое значение Ra за счет дополнительной подготовки поверхности, так как при испытаниях на износ идет контакт с поверхностью покрытия.

На основании результатов, представленных в данном исследовании в дальнейшем будет проводиться отработка технологии нанесения композитного покрытия $Ni-SiC$ на внутреннюю рабочую поверхность цилиндрических заготовок.

Выводы

1. Положение обрабатываемого образца относительно дна цилиндрической ванны установки электроосаждения влияет на строение покрытия.

2. Для получения композитного покрытия на основе никелевой матрицы содержащей частицы карбида кремния со средним размером 17 ± 2 мкм требуется горизонтальное положение обрабатываемой поверхности.

3. Композитное покрытие $Ni-SiC$, сформированное на плоских образцах из алюминиевого сплава АК7 характеризуется значением микротвердости $690 \pm 8 HV$, шероховатостью $Ra = 6,80 \pm 0,50$ и низкой шириной борозды $b = 67 \pm 3$ мкм после скретч-теста, что свидетельствует о хорошей адгезии с материалом подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyak M.S. Technology of hardening. Technological methods of hardening. Vol. 1. Moscow: Mechanical Engineering, 1995. 688 p. (in Russian). [Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. Т. 1. М.: Машиностроение, 1995. 688 с.].
2. Ogihara H., Wang H., Saji T. Electrodeposition of $Ni-B/SiC$ composite films with high hardness and wear resistance // Applied Surface Science. 2014. Vol. 296. P. 108–113. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.01.057.
3. Baosong Li, Weiwei Zhang, Wen Zhang, et al. Preparation of $Ni-W/SiC$ nanocomposite coatings by electrochemical deposition // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 702. P. 38 – 50. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.239.
4. Oraon B., Majumdar G., Ghosh B. Improving hardness of electroless $Ni-B$ coatings using optimized deposition conditions and annealing // Materials and Design. 2008. Vol. 29. P. 1412–1418. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.09.005.
5. Steinbach J., Ferkel H. Nanostructured $Ni-Al_2O_3$ films prepared by dc and pulsed dc electroplating // Scripta Materialia. 2001. Vol. 44. P. 1813–1816. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)00799-0.
6. Zoikis-Karathanasis A., Pavlatou E.A., Spyrellis N. Pulse electrodeposition of $Ni-P$ matrix composite coatings reinforced by SiC particles // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 494(1–2). P. 396–403. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.01.057.
7. Sheu H.-H., Huang P.-Ch., Tsai L.-Ch. et al. Effects of plating parameters on the $Ni-P-Al_2O_3$ composite coatings prepared by pulse and direct current plating // Surface & Coatings Technology. 2013. Vol. 235. P. 529–535. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.08.020.
8. Mohajeri S., Dolati A., Rezagholibeiki S. Electrodeposition of Ni/WC nano composite in sulfate solution // Materials Chemistry and Physics. 2011. Vol. 129(3). P. 746–750. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.04.053.
9. Ogihara H. Electrodeposition of $Ni-B/SiC$ composite films with high hardness and wear resistance // Applied Surface Science. 2014. Vol. 296. P. 108–113. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.01.057.

10. Roos J.R., Celis J.P., Fransaer J., Buelens C. The development of composite plating for advanced materials // JOM. 1990. Vol. 42. P. 60–63. DOI: 10.1007/BF03220440.
11. Hui Wang, Hongbin Zhang, Jindong Wang, Shuxin Chen, Yang He, Chunyang Ma Ni–SiC composite coatings with improved wear and corrosion resistance synthesized via ultrasonic electrodeposition // Ceramics International. 2021. Vol.47. P.9437–9446. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.12.076.
12. da Silva F.S., Cinca N., Dosta S Cano., I.G., Guilemany J.M., Benedetti A.V. Cold gas spray coatings: Basic principles, corrosion protection and applications // Eclética Química Journal. 2017. Vol. 42. P. 9–32. DOI: 10.26850/1678-4618eqj.v42.1.2017.p09-32.
13. Tarancon S., Tejado E., Richou M., Pastor J.Y. Evaluation of tensile and elastic properties of W/Cu cold-spray coatings for application to the FGM DEMO divertor concept // Fusion Engineering and Design. 2021. Vol. 171. Art. 112719. DOI:10.1016/j.fusengdes.2021.112719.
14. Vinokurov E.G., Margolin L.N., Farafonov V.V. Electrodeposition of composite coatings // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya Khimicheskaya Tekhnologiya. Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2020. Vol. 63(8). P. 4–38. (In Russian). [Винокуров Е.Г., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. Электроосаждение композиционных покрытий // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2020. Т. 63(8). С. 4–38]. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6212.
15. Tianyu Guan, Nan Zhang. Recent Advances in Electrodeposition of Nickel Based Nanocomposites Enhanced with Lubricating Nanoparticles // Nanomanufacturing and Metrology. 2024. Vol. 7(25). P. 1–38. DOI: 10.1007/s41871-024-00245-6.
16. 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 // Transactions of the IMF. 2014. Vol. 92(2). P. 83–98. DOI: 10.1179/0020296713Z.00000 0000161.
17. Ramesh Babu G.N.K., Jayakrishnan S. Development and characterization of electrodeposited Nickel–Titanium Carbo Nitride (TiCN) metal matrix nanocomposite deposits // Surface and Coatings Technology. 2012. Vol.206. P. 2330–2336. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.09.078.
18. Raghavendra C.R., Basavarajappa S., Sogalad I., Kumar S. A review on Ni based nano composite coatings // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 39(1). P. 6–16. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.810.
19. Kholkin O.S., Kurbatov A.P., Sokolov A.Yu. Influence of conditions of electrodeposition of nickel on the physico-chemical and corrosion properties of the coatings // Chemical Bulletin of Kazakh National University. 2014. Vol. 75. No. 3. P. 33–42. (In Russian) [Холкин О.С., Курбатов А.П., Соколов А.Ю. Влияние условий электроосаждения никеля на физико-химические и коррозионные свойства покрытий // Вестник КазНУ. Серия химическая. 2014. Т. 75. № 3. С. 33–42]. DOI: 10.15328/chemb_2014_333-42.
20. Özkan S., Napçı G., Orhan G., Kazmanli K. Electrodeposited Ni/SiC nanocomposite coatings and evaluation of wear and corrosion properties // Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 232. P. 734–741. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.089.
21. Garcia I., Fransaer J., Celis J.-P. Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 48(2–3). P. 171–178. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01336-6.
22. Lampke Th., Leopold A., Dietrich D., Alisch G., Wielage B. Correlation between structure and corrosion behaviour of nickel dispersion coatings containing ceramic particles of different sizes // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201(6). P. 3510–3517. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.073.
23. Pinate S., Ispas A., Leisner P., Zanella C. Electrocodeposition of Ni composites and surface treatment of SiC nano-particles // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 406. Art. 126663. DOI:10.1016/j.surfcoat.2020.126663.
24. Lingzhong Dua, Binshi Xub, Shiyun Dong, Hua Yang, Weiyi Tu. Study of tribological characteristics and wear mechanism of nano-particle strengthened nickel-based composite coatings under abrasive contaminant lubrication // Wear. 2004. Vol. 257(9–10). P. 1058–1063. DOI: 10.1016/j.wear.2004.07.003.
25. Patent No. CN1072466A China, IPC C25D15/02. Cylinder inner wall electronickelling-carborundum craft No. 199911306315.5; filed on 05.11.1990; published 18.11.1991 / Rongcheng city internal combustion engine factory.
26. Neman 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. Vol. 180. Art. 111114. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111114.
27. Feixiang Wang, Xiuqing Fu, Moqi Shen, et al. Preparation of Ni–P–SiC composite coatings by magnetic field enhanced jet electrodeposition // International Journal of Electrochemical Science. 2020. Vol. 15. P. 10432–10452 (). DOI:10.20964/2020.10.13.
28. Qingdong Lv, Xiuqing Fu, Xinxin Chen, et al. Investigating the Effects of the current density on the properties of Ni-P-La2O3 composite coatings //

International Journal of Electrochemical Science. 2020. Vol. 15. P. 11250–11264. DOI: 10.20964/2020.11.76.

29. Neman V., Chatterjee S. Effect of silicon carbide incorporation and heat treatment on tribological properties of electroless Ni–B–W alloy coating // *Materials Chemistry and Physics*. 2024. Vol. 311. Art. 128500. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128500.

30. Wenqing Liu, Kedi Jiang¹, Qiang Li, et al. Jet Pulse Electrodeposited Ni–SiC Thin Coatings by Using Experimental System Designed for Potential Industrial Application // *International Journal of Electrochemical Science*. 2021. Vol. 16. No. 4. Art. 21044. DOI: 10.20964/2021.04.23.

31. Tianyu Guan, Nan Zhang. Recent Advances in Electrodeposition of Nickel Based Nanocomposites Enhanced with Lubricating Nanoparticles // *Nanomanufacturing and Metrology*. 2024. Vol. 7. Art. 25. DOI: 10.1007/s41871-024-00245-6.

32. Tseluikin V.N., Yakovlev A.V. On the electrochemical deposition and properties of nickel-based composite coatings // *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashchita Materialov*. 2020. Vol. 56 No. 2. P. 197–201. (In Russian) [Целуйкин В.Н., Яковлев А.В. Об электрохимическом осаждении и свойствах композиционных покрытий на основе никеля // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020. Т. 56. № 2. С. 197–201]. DOI: 10.31857/S004418562002028X

33. Tseluikin V.N., Vasilenko E.A., Nevernaya O.G., Tseluikina G.V., Surmenko E.L. Physico-mechanical properties of composite coatings on the basis of nickel-chromium alloy // *Condensed Matter and Interphases*. 2013. Vol. 15. No. 2. P. 156–159. (In Russian) [Целуйкин В.Н., Василенко 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*. 2013. Т. 15. № 2. С. 156–159].

34. Tseluikin V.N., Dzhumieva A.S., Yakovlev A.V., Mostovoy A.S. Electrochemical deposition and properties of nickel-chromium-graphene oxide composite

coatings // *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashchita Materialov*. 2021. Vol. 57. No. 6. P. 660–664. (In Russian) [Целуйкин В.Н., Джумиева А.С., Яковлев А.В., Мостовой А.С. Электрохимическое осаждение и свойства композиционных покрытий никель-хром-оксид графена // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2021. Т. 57. № 6. С. 660–664]. DOI: 10.31857/S004418562106019X.

35. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Garbuzova A.K. Electrodeposition, structure and properties of a composite covering “nickel - titanium carbide” // *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*. 2015. No. 1(214). P. 154–164. (In Russian) [Галевский Г.В., Руднева В.В., Гарбузова А.К. Электроосаждение, структура и свойства композиционного покрытия «никель - карбид титана» // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2015. № 1(214). С. 154–164]. DOI: 10.5862/JEST.214.18.

36. Kiseleva S.K., Akhmerov L.D., Mustafin R.F., Lukyanov V.V., Astanin V.V. Formation of composite coating “nickel-silicon carbide” // *Materials. Technologies. Design*. 2025. Vol. 7. No. 1(20). P. 36–44. (In Russian) [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. Т. 7. № 1(20). С. 36–44. DOI: 10.54708/26587572_2025_712036.

37. Krasikov A.V., Markov M.A., Krasikov V.L., Kravchenko I.N., Staritsyn M.V., Bykova A.D., Belyakov A.N. Influence of vibration parameters during electrodeposition of Ni–SiC composite coatings from a vibration stabilized suspension // *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2022. No. 4. P. 21–27. (In Russian) [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 надежности машин*. 2022. № 4. С. 21–27]. DOI: 10.31857/S0235711922040113.