

ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ

**Е. В. Овчинников¹, А. Ч. Свистун², А. И. Веремейчик³, Н. В. Лебедев⁴,
В. М. Хвиевич⁵, В. Ю. Фалёса⁶, Е. И. Амирханов⁷, А. Е. Овчинников⁸**

¹ Д. т. н., доцент, заведующий кафедрой архитектуры и строительства, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ovchin@grsu.by

² К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: svistun_ach@grsu.by

³ К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

⁴ Д. х. н., главный научный сотрудник ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. Академика С. В. Лебедева», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: n.lebedev@fgupniisk.ru

⁵ К. т. н., доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisovich@bstu.by

⁶ Директор ООО «Центр диагностики, экспертизы и сертификации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: efdec@yandex.ru

⁷ Заместитель директора ООО «Центр диагностики, экспертизы и сертификации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: efdec@yandex.ru

⁸ Студент инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: hugaralex@mail.ru

Реферат

В настоящее время для увеличения эксплуатационного ресурса машин и механизмов применяются различного типа покрытия. Представлено новое направление создания гибридных покрытий на основе сочетания процессов электроискрового легирования металлических поверхностей и последующей обработке в растворах поверхностно-активных фторсодержащих соединений. Целью исследований является изучение морфологии и физико-механических характеристик гибридных покрытий, формируемых путем совмещения процессов электроискрового формирования твердых покрытий и последующей обработке в растворе фторсодержащего поверхностного активного вещества. В качестве подложки для формирования покрытий использовали сталь Р6М5. Для формирования покрытий применяли электроды W, Т15К6. Для модифицирования электроискровых покрытий при модифицировании подложки использовали фолеокс Ф-5 структурной формулой $Rf-CONHR_2$. Исследования проводили с использованием современных методов: растровая электронная и оптическая микроскопия, микродюраметрический анализ, ИК-спектроскопия НПВО, профилометрия, методы коррозионных испытаний. Показано, что процесс формирования гибридных покрытий позволяет существенно увеличить физико-механические характеристики как исходных металлических субстратов, так и модифицируемых электроискровых покрытий. Данный эффект увеличения эксплуатационных характеристик выражается в возрастании значений микротвердости и коррозионной стойкости гибридных покрытий. Наблюдается возрастание значений микротвердости гибридных покрытий на 12–15 % по отношению к традиционным электроискровым покрытиям. Процесс возрастания значений микротвердости стальных субстратов и электроискровых покрытий при обработке фторсодержащими олигомерами обусловлен залечиванием микродефектов на поверхности исследуемых образцов и образованием прочного хемосорбционного соединения между подложкой (сталь, ЭИЛ-покрытия) и фторорганическими слоями. Формирование данных гибридных покрытий позволит существенно снизить коэффициент трения и интенсивность изнашивания разработанных гибридных покрытий.

Ключевые слова: гибридные покрытия, электроискровое легирование, морфология, фторсодержащие олигомеры, микротвердость, коррозионная стойкость.

ELECTROSPARK FLUORINE-CONTAINING COATINGS

**E. V. Ovchinnikov, A. Ch. Svistun, A. I. Verameichyk, N. V. Lebedev, V. M. Khvisevich,
V. Yu. Falyosa, E. I. Amirkhanov, A. E. Ovchinnikov**

Abstract

Currently, various types of coatings are used to increase the service life of machines and mechanisms. A new direction in the creation of hydride coatings is presented based on a combination of the processes of electrospark alloying of metal surfaces and subsequent treatment in solutions of surface-active fluorine-containing compounds. The aim of the research is to study the morphology and physical and mechanical characteristics of hybrid coatings formed by combining the processes of electrospark formation of hard coatings and subsequent treatment in a solution of a fluorine-containing surface-active substance. Steel P6M5 was used as a substrate for the formation of coatings. Electrodes W, T15K6 were used to form the coatings. Foleox F-5 with the structural formula $Rf-CONHR_2$ was used to modify electrospark coatings when modifying the substrate. The studies were carried out using modern methods: scanning electron and optical microscopy, microdurametric analysis, NTR IR spectroscopy, profilometry, corrosion testing methods. It is shown that the process of hybrid coating formation allows to significantly increase the physical and mechanical characteristics of both the original metal substrates and the modified electric spark coatings. This effect of increasing the performance characteristics is expressed in the increase in the microhardness and corrosion resistance of the hybrid coatings. An increase in the microhardness of hybrid coatings by 12–15 % is observed in relation to traditional electric spark coatings. The process of increasing the microhardness of steel substrates and electric spark coatings when treated with fluorine-containing oligomers is due to the healing of microdefects on the surface of the samples under study and the formation of a strong chemisorption compound between the substrate (steel, EIL coating) and the organofluorine layers. The formation of these hybrid coatings will significantly reduce the friction coefficient and wear rate of the developed hybrid coatings.

Keywords: hybrid coatings, electric spark alloying, morphology, fluorine-containing oligomers, microhardness, corrosion resistance.

Введение

Электроискровое легирование является одной из распространенных технологий повышения ресурса различных деталей.

Для повышения эксплуатационных свойств модифицируемых деталей более чем в 2 раза необходимо осуществлять выбор материала электрода, при котором обеспечивается создание в поверхностном

слое метастабильных структур, способных в зоне фрикционного контакта к многократным фазовым превращениям. Для поиска такого материала электрода разработан алгоритм, основанный на методе последовательного приближения [1]. Методом электроискрового легирования получены Ti-Ta покрытия толщиной 30,9–39,1 мкм [2]. Данное покрытие позволяет увеличить жаростойкость титанового сплава в 5,9 раз, микротвердость поверхности – от 4,72 до 4,91 ГПа [2]. Проведены исследования по изучению суммарного привеса катода и суммарной эрозии анода от времени нанесения покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ) при различных режимах работы, а именно от частоты и продолжительности при использовании электродов на основе $\text{W}_4\text{C}+\text{Cu}$ в среде аргона [3]. Установлено, что при различных режимах ЭИЛ наблюдался устойчивый рост суммарного привеса катода за весь период легирования [3], а также улучшение физико-механических характеристик поверхностей. Поверхностный слой представляет собой композит из материала подложки и электрода. Привес на подложке увеличивается за счёт переноса массы электрода при повышении энергии разряда [4]. Высокое значение микротвёрдости полученного покрытия приводило к тому, что в процессе трения материал переносится на образец и возникает эффект взаимного влияния трущихся поверхностей [4]. Проведены исследования по изучению особенностей поведения как чистых металлов и сплавов (сталь, никель, титан), так и электроискровых покрытий из никеля и титана, сформированных на стали в кислых, нейтральных и щелочных средах [5]. Исследования показали, что при нанесении электроискровых покрытий режимы нанесения, материал электрода, материал подложки приводят к уменьшению скорости коррозии в 6,7 раза, в воде – до 210 раз, в 20 % растворе хлорида натрия – до 160 раз, а в 20 % растворе едкого натра – до 1,8 раза [5]. Создана механизированная установка для обработки цилиндрических ЭИЛ-покрытий. Результаты показали эффективность использования разработанного механизированного способа для формирования электроискровых покрытий, а также повышение эффективности нанесения ЭИЛ-покрытия при обдуве зоны легирования воздухом при давлении 1,5 МПа [6]. В результате исследований технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнений без использования защитного газа была подтверждена возможность выбора и регулировки параметров ЭИЛ-путем изменения силы тока, напряжения, емкости конденсаторной батареи [7].

Одним из перспективных направлений в создании электроискровых покрытий является использование наноразмерных частиц, вводимых в зону электроискрового легирования [8–10]. Данный подход позволяет существенно увеличить трибологические свойства пар трения субстрат с ЭИЛ-покрытием – металл, субстрат с ЭИЛ-покрытием – композит (керамика на основе кремния, титана и т. п.). Таким образом, применение электроискровых покрытий является эффективным способом повышения триботехнических, прочностных характеристик различного типа металлов, применяемых при изготовлении изделий и деталей различного типа техники, применяемой в машиностроении и строительстве. Однако при использовании данного метода возникает проблема, связанная с интенсивным износом контртела. Это явление обусловлено двумя причинами: высоким коэффициентом трения при контакте электроискровых покрытий, полученных на основе твердосплавных соединений с другими материалами; высокая твердость получаемых покрытий по сравнению с контактирующими изделиями, что обуславливает интенсивный износ контртела. Данные проблемы можно решить путем разделения контактирующих материалов «третьим телом», имеющим низкие значения сдвиговых напряжений в слоях материала. Обычно для применения в качестве «третьего тела» используют различные слоистые материалы (графит, малослойный графен и т. д.), полимерные материалы и жидкие смазки, модифицированные данными соединениями [8, 11]. Однако в качестве разделительного слоя можно применять фторсодержащие соединения, наносимые на поверхность ЭИЛ-покрытия или твердого субстрата из раствора. Такие разделительные слои обеспечивают снижение коэффициента трения для различного типа материалов и покрытий с существенным снижением значений интенсивности изнашивания [11–15].

Целью исследований является изучение морфологии и физико-механических характеристик гибридных покрытий, получаемых на основе электроискрового легирования сверхтвердыми материалами и созданием фторсодержащих слоев по растворной технологии на поверхности ЭИЛ-соединений.

Методика эксперимента

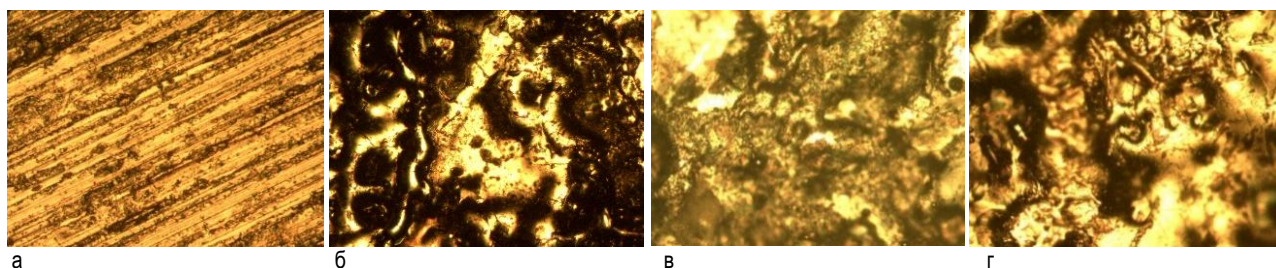
Композиционные электроискровые покрытия на базе нитридов, карбидов, силицидов титана и алюминия наносили методом электроискрового легирования на установке UR-121, позволяющей обеспечить качество нанесения покрытий на металлический субстрат. В качестве подложки для формирования покрытий использовали сталь Р6М5. Для формирования покрытий применяли электроды W, T15K6. Покрытия наносили на металл в состоянии поставки, которую шлифовали до 9–10 класса чистоты на оригинальной установке электроискрового легирования. Для определения оптимального режима, при котором максимальное количество порошка могло попасть в зону действия разряда, частота вибрации обрабатываемого электрода медленно варьировалась от 100 до 30 Гц. Процесс ЭИЛ проводили в диапазоне значений энергии разряда от 0,3 до 10,0 Дж. Изучались электроискровые покрытия, сформированные с применением только одного электрода, так и с применением двух электродов. В случае изучения многослойных покрытий первый слой формировали с применением вольфрамового катода, затем проводилось формирование покрытий с использованием катода T15K6. Формирование фторсодержащих покрытий осуществляли на металлических и керамических субстратах путем окунания их в 1–2 масс.% раствор фторсодержащего олигомера (ФСО) в хладоне-113. В данной работе при модифицировании подложки использовали фолеокс Ф-5 со структурной формулой R-CONHR_2 . Для изучения молекулярной и надмолекулярной структуры фторсодержащих электроискровых покрытий применяли ИК-спектроскопию НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения). Исследования проводили на ИК Фурье-спектрометре Bruker Tensor 27. Анализ особенностей морфологии и структуры композиционных покрытий и их модификаций, подвергнутых различным видам обработки, осуществляли на универсальном металлографическом комплексе ЗАО «Спектроскопические системы». Для измерения микротвердости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер HWMMT-X7. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка, полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой. Морфологию покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе «MIRA3 TESCAN». Топографию защитных слоев определяли на профилометре «Surftec SJ-210». Коррозионные испытания проводили в камере солевого тумана согласно требованиям ГОСТ 9.311-87.

Результаты исследований

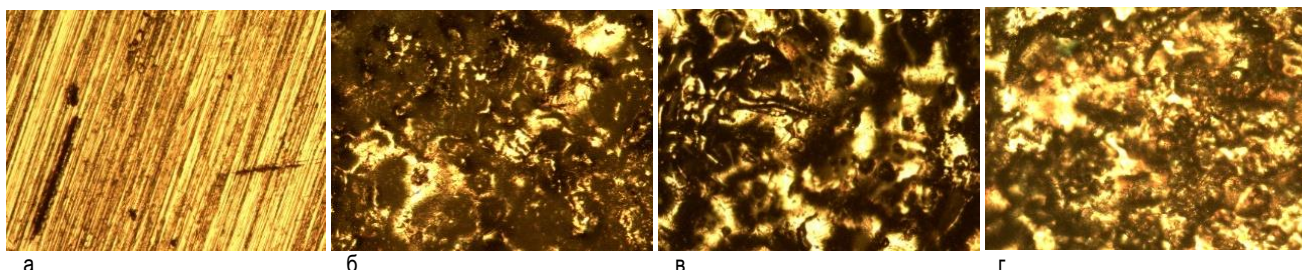
Проведен морфологический анализ покрытий, полученных методом электроискрового осаждения на стали Р6М5 с применением катодов W, T15K6, W+T15K6. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

Согласно полученным данным, формирование электроискровых покрытий приводит к образованию развитого рельефа на подобие «шагреневой кожи». На поверхности покрытия виды сплеты-места контакта электрода с поверхностью. Данная морфологическая картина характерна и для композиционных покрытий, сочетающих слой из материала T15K6 и слой из материала W. На рисунке 2 приведены результаты морфологического анализа электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами.

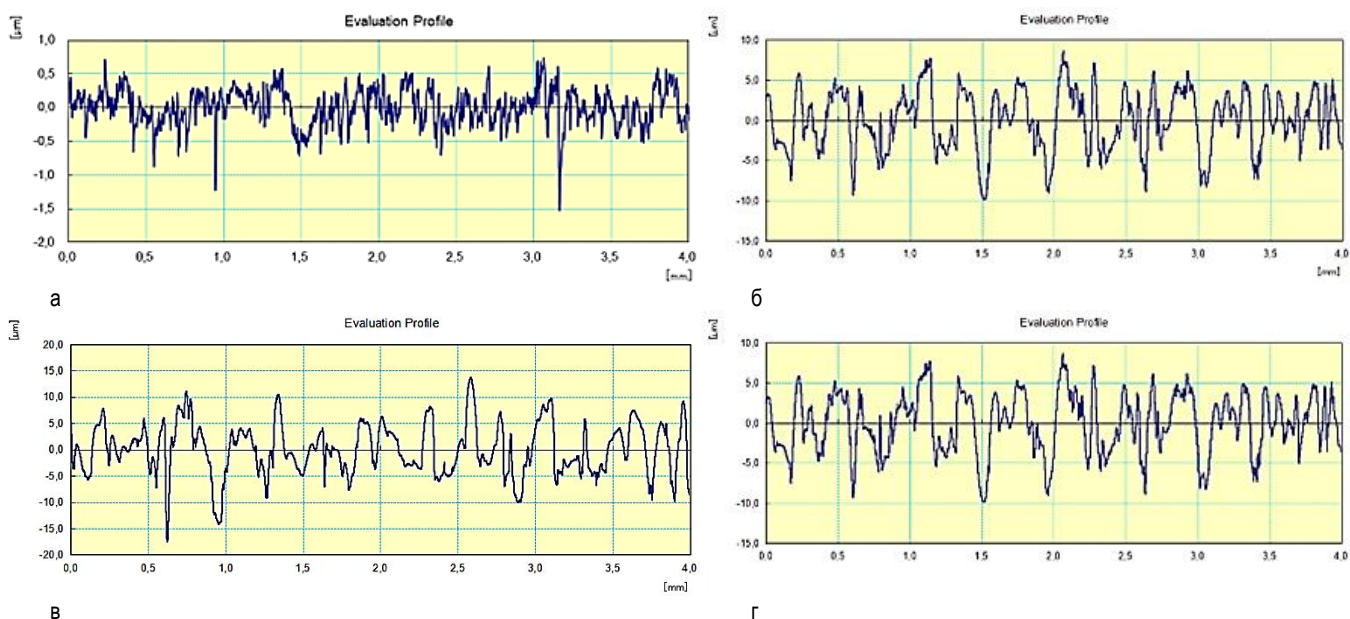
Однократная обработка металлического субстрата в 5 %-ном растворе фторсодержащего олигомера Ф-5 приводит к сглаживанию исходного рельефа исходной стали Р6М5, но для исследуемых электроискровых покрытий, сформированных на данном стальном субстрате, параметры шероховатости возрастают после обработки в растворе фторсодержащего олигомера. Данный результат подтверждают профилометрические исследования как исходных образцов, так и гибридных покрытий (рисунок 3).



а – исходная сталь Р6М5; б – W; в – Т15К6; г – W+Т15К6
Рисунок 1 – Морфология электрохромных покрытий, $\times 250$



а – исходная сталь Р6М5; б – исходная сталь Р6М5+покрытие ФСО Ф-5; в – Т15К6+покрытие ФСО Ф-5; г – Т15К6+W+покрытие ФСО Ф-5
Рисунок 2 – Морфология композиционных гибридных электрохромных покрытий, $\times 250$



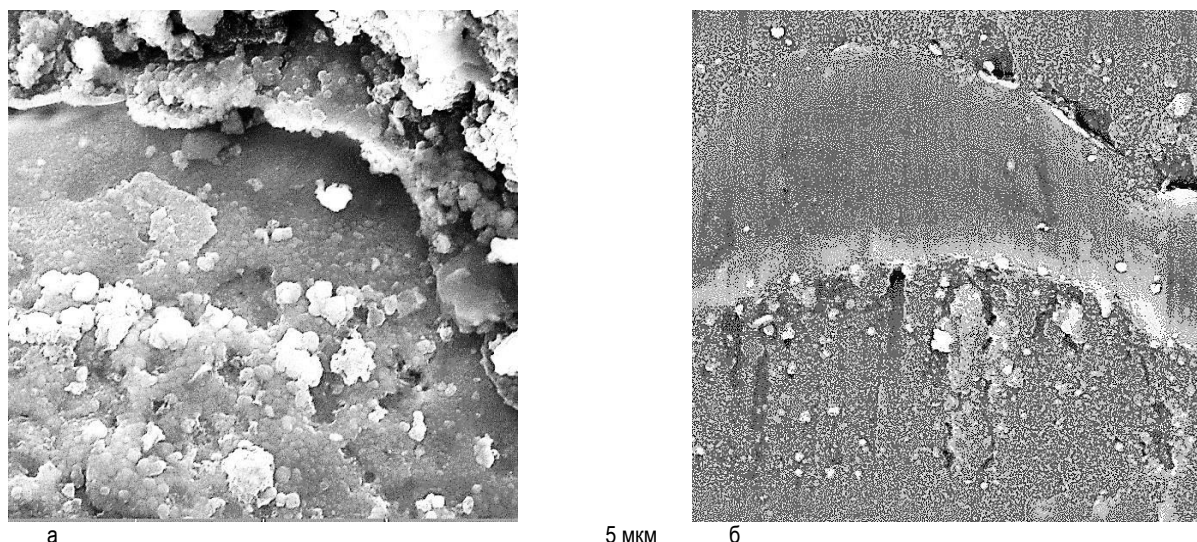
а – исходная сталь Р6М5+покрытие ФСО Ф-5, б – Т15К6+W; в – Т15К6+покрытие ФСО Ф-5; г – Т15К6+W+покрытие ФСО Ф-5
Рисунок 3 – Топография композиционных гибридных электрохромных покрытий

Фторорганическое покрытие полностью покрывает электрохромные слои, сформированные на быстрорежущей стали. Большая часть фторорганического материала расположена в различных углублениях и порах электрохромного покрытия. Данное распределение фторсодержащего олигомера на поверхности ЭИЛ-покрытий обеспечивает повышенную коррозионную стойкость. Формирование фторсодержащих соединений на поверхности электрохромных покрытий позволяет закрыть поверхностные дефекты в виде каверн, сплетов, продольных и поперечных трещин и т. п., что в конечном счете даст возможность существенно увеличить триботехнические характеристики данных гибридных покрытий в различных парах трения. Это обусловлено тем, что слои фторсодержащего олигомера имеют низкие сопротивления сдвигу, а также возможностью закрывать ювенильные поверхности сопрягаемых тел, возникающие при трении [11].

Исследования, проведенные методом растровой электронной

микроскопии, также подтверждают результаты исследований по изучению морфологии покрытий, полученных методом оптической микроскопии. Формирование электрохромных покрытий на металлическом субстрате приводит к образованию развитого рельефа с наличием в нем фаз, находящихся в нанометровом диапазоне. Последующее формирование покрытий из фторорганических соединений на модифицированных металлических субстратах приводит к сглаживанию развитой топографии покрытий по отношению к базовым электрохромным покрытиям (рисунок 4).

Формирование фторсодержащих олигомеров на поверхности металлов и керамических соединений приводит к протеканию хемосорбционного взаимодействия, о чем свидетельствует появление полос поглощения в спектре фторсодержащего олигомера в области $1640\text{--}1660\text{ см}^{-1}$. Обработка Ф-5 поверхности электрохромных покрытий приводит к координации CONHR₂-групп по типу бидентантного лиганда.



а – покрытие T15K6+W; б – покрытие T15K6+W+Ф-5
Рисунок 4 – Морфология электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащим олигомером Ф-5

Создание многослойного композиционного покрытия, получаемого по гибридной технологии, заключающейся на первой стадии получения однослойного или многослойного электроискрового покрытия, а на второй стадии осаждение фторорганического соединения приводит к существенному повышению коррозионных свойств разработанных композиционных покрытий (таблица 1).

Таблица 1 – Коррозионная стойкость электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами

Исследуемые образцы	Вид коррозионных поражений	Оценочный бал
P6M5	Г	4
W	Б	6
T15K6	Б	7
T15K6+W	Б	8
P6M5+Ф-5	А	9
W+Ф-5	А	A10
T15K6+Ф-5		A10

Установленные структурные и морфологические изменения при формировании электроискровых покрытий приводят к возрастанию физико-механических свойств исследуемых композиционных покрытий. Так, композиционные покрытия на основе W и T15K6 обладают наиболее высокими значениями микротвердости по сравнению с другими типами электроискровых покрытий. Дополнительная обработка фторсодержащими олигомерами металлических и керамических соединений позволяет увеличить значения микротвердости исследуемых покрытий на 12–15 % (таблица 2).

Таблица 2 – Микротвердость электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами

Исследуемые образцы	Значения микротвердости (H _v), ГПа (m=50 гр)
P6M5	3,2
W	4,2
T15K6	16,8
T15K6+W	19,4
P6M5+Ф-5	4,1
W+Ф-5	5,6
T15K6+Ф-5	17,6
T15K6+W+Ф-5	20,8

Заключение

Установлено, что процесс формирования гибридных покрытий позволяет существенно увеличить физико-механические характеристики как исходных металлических субстратов, так и модифицируемых электроискровых покрытий. Данный эффект увеличения эксплуатационных характеристик выражается в возрастании значений микротвердости и коррозионной стойкости гибридных покрытий. Процесс возрастания значений микротвердости стальных субстратов и электроискровых покрытий при обработке фторсодержащими олигомерами обусловлен залечиванием микродефектов на поверхности исследуемых образцов и образованием прочного хемосорбционного соединения между подложкой (сталь, ЭИЛ-покрытия) и фторорганическими слоями. Формирование данных гибридных покрытий позволит существенно снизить коэффициент трения и интенсивность изнашивания разработанных гибридных покрытий.

Исследования выполнены при поддержке гранта ГС 01-25.

Список цитированных источников

- Алгоритм выбора материала электрода при электроискровом легировании деталей / А. А. Богданов, В. В. Процев, С. Т. Пацера [и др.] // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету : зб. наук. пр. – 2020. – Вип. 88, Т. 1. – С. 113–117.
- Электроискровое осаждение Ti-Ta покрытий на титановый сплав Ti6Al4V: жаростойкость и трибологические свойства / А. А. Бурков, С. В. Николенко, В. О. Крутикова, Н. А. Шельменок // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 159–168.
- Гомжин, В. В. Электроискровое легирование стали 12X18H8T комбинированным электродом В₄C+CU / В. В. Гомжин, В. Л. Орлов, Ж. В. Еремеева // Современные материалы, техника и технологии. – 2023. – № 1 (46). – С. 23–27.
- Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокмполитов, полученных электроискровым легированием / Д. М. Кройтору, С. А. Силкин, Н. Н. Казак [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2020. – № 56 (6). – С. 12–23.
- Коваль, А. В. Исследование коррозионного поведения покрытий, полученных на стали при электроискровом легировании ручным вибратором повышенной частоты / А. В. Коваль // Электронная обработка материалов. – 2021. – № 27 (1). – С. 44–51.
- Казанников, О. В. Исследование механизированного способа электро-искрового легирования / О. В. Казанников // Образование и право. – 2020. – № 10. – С. 225–232.

7. Глушко, С. П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения / С. П. Глушко // *Advanced Engineering Research*. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253–259.
8. Овчинников, Е. В. Электроискровые углеродные покрытия / Е. В. Овчинников, А. Т. Волочко, А. Е. Овчинников // *Актуальные проблемы прочности : материалы LXVIII Междунар. науч. конф., Витебск, 27–31 мая 2024 г. / под ред. В. В. Рубаника*. – Минск : «ИВЦ Минфина», 2024. – С. 379–381.
9. Антифрикционные электроискровые покрытия для зубчатых передач / Е. В. Овчинников, В. И. Лунь, А. Ч. Свистун [и др.] // *Горная механика и машиностроение*. – 2024. – № 4. – С. 92–99.
10. Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials / V. Mihailov, N. Kazak, S. Ivashcu [et al.] // *Coatings*. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 1–14.
11. Овчинников, Е. В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение / Е. В. Овчинников, В. А. Струк, В. А. Губанов. – Гродно : ГГАУ, 2007. – 326 с.
12. Овчинников, Е. В. Наноструктурированные фторсодержащие покрытия / Е. В. Овчинников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 2–3. – С. 60–67.
13. Триботехнические характеристики композиционных многослойных покрытий / Е. В. Овчинников, С. Д. Лещик, В. А. Струк [и др.] // *Трение и износ*. – 2000. – Т. 21, № 2. – С. 147–155.
14. Структурно-морфологические особенности тонких пленок фторсодержащих соединений на металлических подложках / В. А. Струк [и др.] // *II Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии : матер. симп-ма, Иваново, 22–26 мая 1995 г. / ИГХТУ; редкол.: С. Я. Шнайдер [и др.] – Иваново, 1995. – С. 291.*
15. Struk, W. Besondeiheitender Struktur verschleißfester schichten fluorhaltiger oligomere an metallen und polymeren / W. Struk, E. Owtchinnikow, O. Choladilov // *Tribology – solving friction and wear problems: Proceedings of 10th International Colloquium, Esslingen, 09–10 jan. 1996 / Technische akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz. – Esslingen, 1996. – Vol. 3 – P. 1983–1988.*
5. Koval', A. V. Issledovanie korrozionnogo povedeniya pokrytij, poluchennyh na stali pri elektroiskrovom legirovanii ruchnym vibratorom povyshennoj chastoty / A. V. Koval' // *Elektronnaya obrabotka materialov*. – 2021. – № 27 (1). – С. 44–51.
6. Kazannikov, O. V. Issledovanie mekhanizirovannogo sposoba elektro-iskrovogo legirovaniya / O. V. Kazannikov // *Obrazovanie i pravo*. – 2020. – № 10. – С. 225–232.
7. Glushko, S. P. Issledovanie tekhnologii elektroiskrovogo naneseniya pokrytij, legirovaniya i uprochneniya / S. P. Glushko // *Advanced Engineering Research*. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253–259.
8. Ovchinnikov, E. V. Elektroiskrovye uglerodnye pokrytiya / E. V. Ovchinnikov, A. T. Volochko, A. E. Ovchinnikov // *Aktual'nye problemy prochnosti : materialy LXVIII Mezhdunar. nauch. konf., Vitebsk, 27–31 maya 2024 g. / pod red. V. V. Rubanika*. – Minsk : «IVC Minfina», 2024. – С. 379–381.
9. Antifrikcionnye elektroiskrovye pokrytiya dlya zubchatyh peredach / E. V. Ovchinnikov, V. I. Lun', A. CH. Svistun [i dr.] // *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. – 2024. – № 4. – С. 92–99.
10. Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials / V. Mihailov, N. Kazak, S. Ivashcu [et al.] // *Coatings*. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 1–14.
11. Ovchinnikov, E. V. Tonkie plenki ftorsoderzhashchih oligomerov: osnovy sinteza, svojstva i primeneniye / E. V. Ovchinnikov, V. A. Struk, V. A. Gubanov. – Grodno : GGAU, 2007. – 326 s.
12. Ovchinnikov, E. V. Nanostrukturirovannye ftorsoderzhashchie pokrytiya / E. V. Ovchinnikov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2013. – № 2–3. – С. 60–67.
13. Tribotekhnicheskie harakteristiki kompozicionnyh mnogoslojnyh pokrytij / E. V. Ovchinnikov, S. D. Leshchik, V. A. Struk [i dr.] // *Trenie i iznos*. – 2000. – Т. 21, № 2. – С. 147–155.
14. Strukturno-morfologicheskie osobennosti tonkih plenok ftorsoderzhashchih soedinenij na metallicheskih podlozhkah / V. A. Struk [i dr.] // *II Mezhdunarodnyj simpozium po teoreticheskoy i prikladnoj plazmohimii : mater. simp-ма, Ivanovo, 22–26 maya 1995 g. / IGHTU; redkol.: S. YA. SHnajder [i dr.] – Ivanovo, 1995. – С. 291.*
15. Struk, W. Besondeiheitender Struktur verschleißfester schichten fluorhaltiger oligomere an metallen und polymeren / W. Struk, E. Owtchinnikow, O. Choladilov // *Tribology – solving friction and wear problems: Proceedings of 10th International Colloquium, Esslingen, 09–10 jan. 1996 / Technische akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz. – Esslingen, 1996. – Vol. 3 – P. 1983–1988.*

References

1. Algoritm vybora materiala elektroda pri elektroiskrovom legirovanii detalej / A. A. Bogdanov, V. V. Prociy, S. T. Pacera [i dr.] // *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universitetu : zb. nauk. pr.* – 2020. – Vip. 88, T. 1. – С. 113–117.
2. Elektroiskrovoe osazhdenie Ti-Ta pokrytij na titanovyj splav Ti6Al4V: zharostojkost' i tribologicheskie svojstva / A. A. Burkov, S. V. Nikolenko, V. O. Krutikova, N. A. SHe'l'menok // *Fizicheskaya mezomekhanika*. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 159–168.
3. Gomzhin, V. V. Elektroiskrovoe legirovanie stali 12H18N8T kombinirovannym elektrodom V4S+CU / V. V. Gomzhin, V. L. Orlov, ZH. V. Eremeeva // *Covremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. – 2023. – № 1 (46). – С. 23–27.
4. Fiziko-mekhanicheskie i tribologicheskie svojstva uglerodsoderzhashchih poverhnostnyh nanokompozitov, poluchennyh elektroiskrovym legirovaniem / D. M. Krojtoru, S. A. Silkin, N. N. Kazak [i dr.] // *Elektronnaya obrabotka materialov*. – 2020. – № 56 (6). – С. 12–23.

Материал поступил 11.07.2025, одобрен 22.07.2025, принят к публикации 22.07.2025