

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF FRICTION OF REST AND SLIDING OF THE FRICTION PAIR "PC-STEEL"

### Abstract

In the work, the coefficients of friction of rest and sliding of the friction pair "PC-steel" were determined under conditions of lapping a composite material to an artificially aged steel counterbody. These parameters were obtained for materials intended for use in the manufacture of piles and can be used in calculations and modeling.

*Key words:* polymer composite materials, static friction coefficient, sliding friction coefficient, steel

УДК 621.45.038.7

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-271

Е.В.Овчинников<sup>1</sup>, В.В.Михайлов<sup>2</sup>, Х.Худойназаров<sup>3</sup>, В.Ч. Белаш<sup>1</sup>, А.Ч.Свистун<sup>1</sup>,  
Г.Нарзуллаев<sup>3</sup>, Е.В.Матук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гродненский государственный университет  
им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ovchin@grsu.by

<sup>2</sup>Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова

<sup>3</sup>Самаркандский государственный университет, Узбекистан

## АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СВЕРХТВЕРДЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### Аннотация

В работе рассмотрены триботехнические характеристики электроискровых покрытий (ЭИЛ), сформированных по бесконтактной технологии. Данный технологический подход позволяет уменьшить дефектность формируемых ЭИЛ покрытий, а также получать антифрикционные слои из непроводящих материалов, в частности из оксидной керамики. Исследовали покрытия различной природы происхождения, полученные на титановых субстратах. Установлено, что формирование многокомпонентных и многофункциональных электроискровых покрытий при взаимодействии плазмы низковольтного разряда с порошковыми материалами позволяет получить защитные слои с высокими антифрикционными свойствами, обеспечивающими снижение значений коэффициента трения на 30-35% и интенсивности изнашивания в 1.5-2 раза по сравнению с исходным материалом ВТ1-0.

*Ключевые слова:* покрытие, плазма, морфология, трение, титан, диоксид кремния, карбид титана

### Введение

В связи с экономическими требованиями дальнейшего повышения эффективности производственных процессов, важно использовать весь потенциал применения сверхтвердых покрытий. TiN, TiCN, TiC и покрытия на их основе

широко используются в качестве защитного материала для режущих инструментов, форм и механических компонентов в машиностроительной промышленности. Низкая химическая активность этих твердых покрытий при нанесении на обрабатываемый инструмент резко снижает адгезионное взаимодействие в процессе формоизменения изделия и, тем самым, уменьшает износ. Наиболее распространенными и износостойкими покрытиями являются покрытия с химической формулой Ti-X-(N,C и B) (X = Al, Cr, C, Si, B и т. д.), которые доказали свою высокую эффективность, особенно в процессе резания, формования и штамповки. В связи с этим были разработаны наноструктурированные твердые покрытия с использованием технологии электроискрового легирования, которые широко используются в качестве износостойких, защитных покрытий.

Свойства широко распространенного покрытия TiN можно значительно улучшить введением других элементов, таких как Al или Si. Включение Al в структуру ГЦК-TiN приводит к образованию покрытий TiAlN, характеризующихся высокой твердостью (около 32 ГПа) и высокой стойкостью к окислению (до 800 °С). Учитывая уникальные свойства многокомпонентных покрытий, получаемых плазмохимическим осаждением, возможно сформировать покрытия сверхтвердые покрытия на сталях различного класса [1-3]. В работе [4] рассмотрен процесс создания композиционных покрытий на основе аддитивного производства, сочетающего лазерную наплавку и электроискровое легирование. В результате применения данного методологического подхода было достигнуто увеличение значений твердости аддитивного покрытия на 85%, возросла стойкость модифицированных металлических подложек к усталостным явлениям, достигнуто снижение значений шероховатости поверхности ( $R_a$ ) на 82%. В связи с изменением прочностных характеристик получаемых покрытий возможно предположить, что применение метода электроискрового легирования, сочетающего в себе способ возбуждения плазменного разряда путем высоковольтного поджига и поддержания разряда низковольтным разрядом позволит улучшить триботехнические характеристики модифицируемых металлических субстратов [1-8].

Целью исследований является изучение триботехнических характеристик покрытий рефракторных металлов, получаемых методами бесконтактного электроискрового разряда при различных технологических режимах.

### Методы и материалы

В качестве объекта исследований использовали образцы титана VT1. Защитные слои формировали на оригинальной установке электроискрового легирования, позволяющей осуществить бесконтактный режим формирования покрытий, разработанной в Институте прикладной физики (г. Кишинев, Молдова). Составы и режимы покрытий сформированных покрытий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Составы и режимы покрытий

№ образца	Состав покрытия	Режим формирования
1	VT1 (подложка)	0,3 Дж
2	TiC+Al	0,3 Дж
3	SiO <sub>2</sub>	0,3 Дж
4	TiN	0,3 Дж
5	Al+C	0,3 Дж

Изучение триботехнических характеристик покрытий проводили на машине трения УМТ-200. Схема трибоконтакта «сфера-плоскость», нормальная нагрузка на

контртело (сталь ШХ15, Ø5 мм) сферической формы составляло 30 Н. Время испытаний варьировали от 20 до 40 секунд, что позволяло оценить линейную интенсивность изнашивания с относительной погрешностью не более 10%. Частота вращения сферического контртела 200 оборотов в минуту. Морфологию поверхностей трения изучали методом оптической микроскопии на металлографическом комплексе производства ЗАО «Спектроскопические системы».

### Результаты и обсуждение

Согласно проведенных исследований формирование ЭИЛ покрытий приводит к снижению значений коэффициента трения в сравнении с исходным субстратом, изготовленным из сплава ВТ1-0 (рис.1). Исходя из полученных данных формирование покрытий на металлическом субстрате приводит к снижению коэффициента трения на 30-35%. Увеличение времени испытаний в два раза до 40 секунд уменьшает значения коэффициента трения до значений 0,86 пары трения ШХ15-ВТ1-0. Для образцов с покрытием наблюдается возрастание значений коэффициента трения до значений 0,8-0,85 (рисунок 2). Возможно предположить, что при данных временах эксплуатации исследуемых образцов происходит удаление покрытия из зоны трения и наблюдается возрастание значений коэффициента трения до величин характерных, как у исходного субстрата.

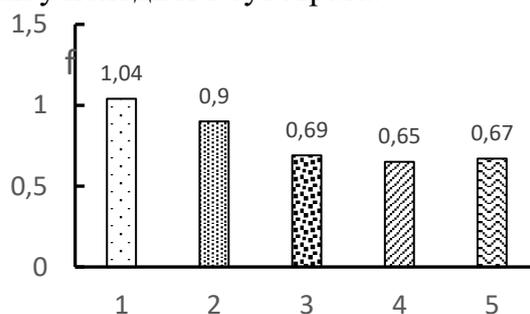


Рисунок 1 – Коэффициент трения электроискровых покрытий, сформированных на металлической подложке ВТ1-0. Время испытаний 20 секунд.

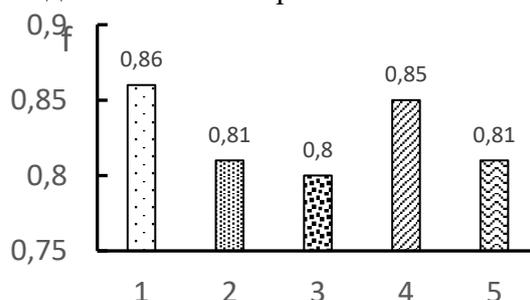


Рисунок 2 – Коэффициент трения электроискровых покрытий, сформированных на металлической подложке ВТ1-0. Время испытаний 40 секунд.

Исследование морфологии поверхностей трения металлических образцов с электроискровыми покрытиями показало наличие глубоких полос резания на поверхности металлического субстрата для пары трения «сталь ШХ15-ВТ1-0», что свидетельствует о сильном адгезионном взаимодействии в зоне трения (рисунок 3-4).

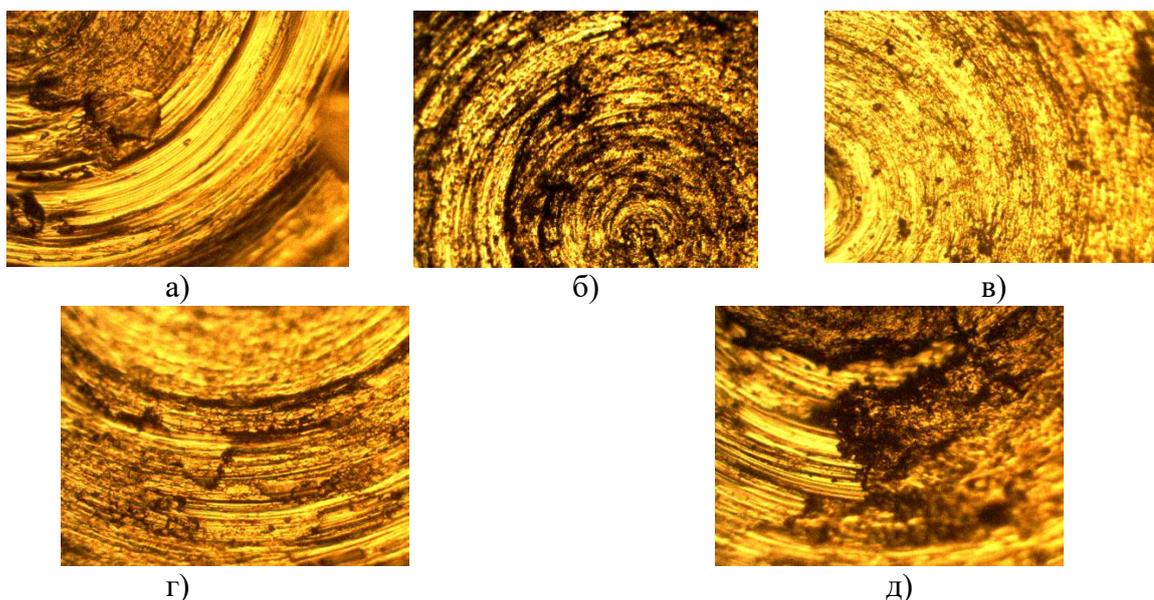


Рисунок 3 – Морфология поверхностей трения сплава ВТ1-0 с электроискровым покрытием, время испытаний 20 секунд. а-исходный образец сплав ВТ1-0, б-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №2, в- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №3, г-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №4, д- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №5. (x100)

Согласно результатам, представленным на рисунке 3 фактически для всех исследуемых образцов с ЭИЛ покрытием, наблюдается наличие защитного электроискрового слоя в зоне трения. Увеличение времени испытаний пары трения ШХ15-ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ в два раза приводит лишь к частичному удалению ЭИЛ покрытия с поверхности металлического субстрата.

Интенсивность изнашивания сплава ВТ1-0 с электроискровыми покрытиями в 1.5 – 2.5 раза меньше, чем у контрольного образца без ЭИЛ покрытий.

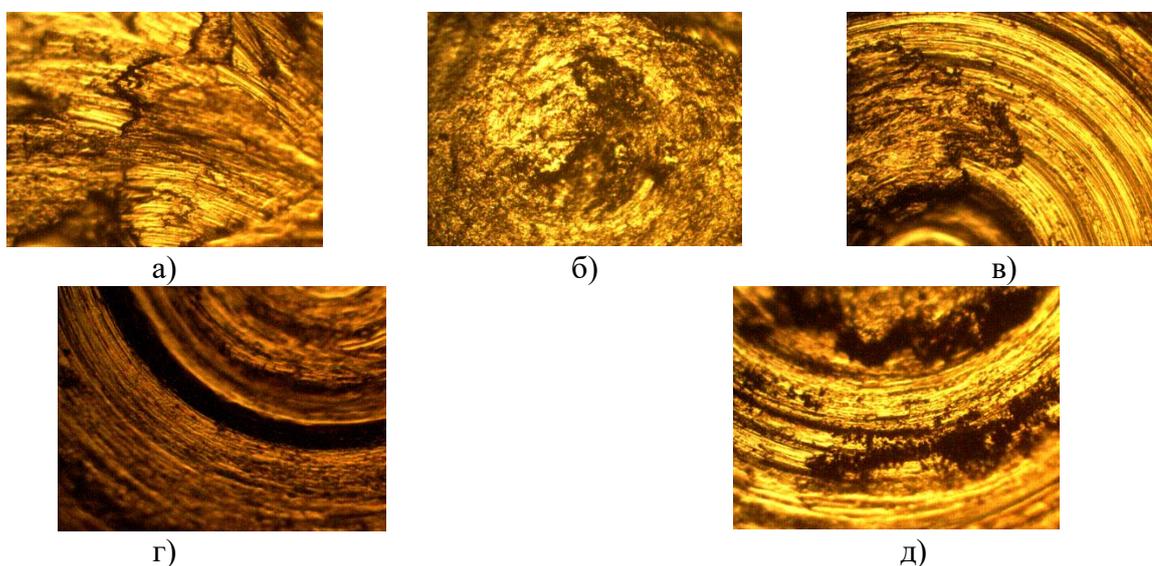


Рисунок 4 – Морфология поверхностей трения сплава ВТ1-0 с электроискровым покрытием, время испытаний 40 секунд. а-исходный образец сплав ВТ1-0, б-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №2, в- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №3, г-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №4, д- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №5. (x300)

### Заключение

Таким образом, формирование многокомпонентных и многофункциональных электроискровых покрытий при взаимодействии плазмы низковольтного разряда с

порошковыми материалами позволяет получить защитные слои с высокими антифрикционными свойствами, обеспечивающими снижение значений коэффициента трения на 30-35% и интенсивности изнашивания в 1.5-2 раза по сравнению с исходным материалом ВТ1-0.

### **Благодарности**

Исследование выполнено в рамках договора Т22МЛДГ-004, финансируемого БРФФИ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Структура и адгезионные характеристики электроискровых покрытий, получаемых по бесконтактной технологии / В. В. Михайлов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2023. – С. 206-213.

2. Е. В. Овчинников // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. В 2 ч. Ч. 2: сб. докладов 13-го Междунар. симпозиума, Минск, 5-7 апр. 2023 г. – Минск: Беларуская навука, 2023. – С. 255-260

3. ГОСТ Р57558-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. С.12

4. P. D. Enriquea, A.Keshavarzkermania, R.Esmaeilizadeha, S. Peterkin, H. Jahed, E. Toyserkania, N. Y. Zhou Enhancing fatigue life of additive manufactured parts with electrospark deposition post-processing Additive Manufacturing -2020-V.36 – p.1-13.

5. Kazak, N.N.; Mikhaylov, V.V.; Chekan, N.M.; Ovchinnikov, Y.V.; Eysymont, Y.I.; Kovsh, A.A. Korroziionnaya stoykost' i prochnostnyye kharakteristiki nanostrukturirovannykh pokrytiy, poluchennykh metodom elektroiskrovogo legirovaniya. In Proceedings of the International Conference Actual Strength Issues, Vitebsk, Belarus, 25–29 May 2020; pp. 320–322.

6. Овчинников Е.В., Михайлов В.В., Чекан Н.М. Технология синтеза наноструктур при электроискровом легировании В книге: Актуальные проблемы прочности. Монография. Под редакцией В.В. Рубаника . Молодечно, 2020. С. 345-358.

7. Овчинников Е.В. Физико-механические характеристики нанокomпозиционных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования/ В.В. Михайлов [и др.] // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. Сер 6, Тэхніка.- 2019.- Т.9.- № 2.- С.45-53

8. Katinas, E.; Jankauskas, V.; Kazak, N.; Mikhailov, V. Improving Abrasive Wear Resistance for Steel Hardox 400 by Electro-Spark Deposition. / J. Frict. Wear -2019. – V. 40 – p.100–106.

Y.V.Auchynnikau, V.V.Mihailov, K. Khudoynazarov,  
V.Ch. Belash, A.Ch. Svistun, G. Narzullaev E.V. Matuk

<sup>1</sup>*Yanka Kupala State University of Grodno,  
Grodno, Belarus, ovchin@grsu.by*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics, Chisinau, Moldova*

<sup>3</sup>*Samarkand State University, Uzbekistan*

## **ANTI-FRICTION ELECTRO-SPARK COATINGS BASED ON SUPERHARD COMPOUNDS**

### **Abstract**

The article examines the tribological characteristics of electrospark coatings (ESCs) formed using non-contact technology. This technological approach makes it possible to reduce the defectiveness of coatings formed by ESA, as well as to obtain antifriction layers

from non-conducting materials, in particular from oxide ceramics. Coatings of various origins obtained on titanium substrates were studied. It has been established that the formation of multicomponent and multifunctional electrospark coatings during the interaction of low-voltage discharge plasma with powder materials makes it possible to obtain protective layers with high antifriction properties, ensuring a reduction in the friction coefficient by 30-35% and wear rate by 1.5-2 times compared to the original material VT1 -0.

*Keywords:* coating, plasma, morphology, friction, titanium, silicon dioxide, titanium carbide

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-272

А.А. Ищенко И.М. Егоров, Г.В. Иванова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, nusha.dog@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНОГО КОНТУРА НА КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ ЗУБА ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА**

### **Аннотация**

Данная работа посвящена исследованию влияния исходного контура на коэффициент формы зуба при различных числах зубьев и коэффициентах смещения. Задачи, которые решались в ходе исследования:

1. Определение координат точек профилей зуба цилиндрической эвольвентной передачи.

2. Расчет коэффициента формы зуба при задании профилей зубьев координатами ряда точек.

3. Сравнение результатов расчетов для различных видов исходного контура.

Были разработаны графические схемы и зависимости для определения коэффициента формы зуба. Были проведены расчёты, наглядно показывающие значения коэффициента формы зуба и радиуса кривизны при различных числах зубьев и коэффициентах смещения в зоне опасного сечения. Анализ проводился численным методом с помощью программного обеспечения MATLAB.

В результате было проанализировано влияние параметров исходного контура на коэффициент формы зуба и радиус кривизны. На основании проведённых исследований были сделаны выводы по выбору стандартного исходного контура, который приводит к уменьшению изгибных напряжений.

*Ключевые слова:* исходный контур, зубчатое зацепление, эвольвента, изгибные напряжения, Matlab, SolidWorks.

### **Введение**

Применение материалов с высокой твёрдостью в совокупности с совершенными видами химико-технического упрочнения, позволяют существенно повысить твёрдость зубьев зубчатых колёс. В результате для достаточно большого ряда передач основным критерием работоспособности вместо контактной выносливости является изгибная прочность зубьев. В снижении изгибных напряжений большую роль играет форма зуба, в первую очередь переходная кривая