

5. Результаты ранжирования показателей точности цилиндрических зубчатых колёс после зубофрезерования в производственных и лабораторных условиях по матрицам парных и частных коэффициентов корреляции имеют некоторые особенности, часть которых описана выше, однако существенно не отличаются друг от друга.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1643–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Госстандарт СССР. М. 1981.
2. Тайц, Б. А. Точность и контроль зубчатых колёс. / Б. А. Тайц. М., «Машиностроение», 1972.
3. Кане, М. М. Характеристики процессов зубонарезания цилиндрических шестерён как случайных. / М. М. Кане//Машиностроение. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск, БНТУ, 2019. С. 54–62
4. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений/ Е. И. Пустыльник. М., Изд-во «Наука», 1968.
5. Берж, К. Теория графов и её применения. / К. Берж. Пер. с французск.. М.: Издат. иностран. литературы. 1962
6. Основы исследований и изобретательства в машиностроении: практикум: учебное пособие / М. М. Кане [и др.]; под ред. М.М. Кане.-Минск: Вышэйшая школа, 2020.

Поступила 15.06.2020

УДК 621.793

Леванцевич М.А.¹, Сокоров И.О.², Ванюк Э.А.³

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ГАЗОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДАМИ НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ ЧЕРНИ

1. ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

2. УО «Республиканский институт профессионального образования»

3. Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье приведены результаты исследований коэффициента трения композиционных газотермических покрытий, модифицированных добавками фуллереновой черни до 10 % от объема порошкового материала. Технология формирования покрытий: газопламенное напыление с последующим оплавлением и финишная механическая обработка образцов для испытаний.

Введение. Проблема кардинального повышения ресурса узлов трения машин и механизмов предопределяет необходимость изыскания все более эффективных путей ее решения. Перспективным в этом направлении является применение упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование поверхностей трения с заданным комплексом эксплуатационных свойств различными технологическими методами, в том числе и путем нанесения антифрикционных покрытий [1].

В последние годы, в связи с бурным развитием нанотехнологий, наибольший интерес стали представлять композиционные покрытия, содержащие в матричном мате-

риале ультрадисперсные (размером не более 10...100 нанометров) частицы из оксидов, боридов, карбидов, фуллеренов, ультрадисперсных алмазов и др. Известно, что введение в состав, например, электрохимических покрытий порошка ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза (УДА) способствует диспергированию кристаллов осаждаемого металла и насыщению покрытия сверхтвердыми частицами. В результате износостойкость, микротвердость, адгезия покрытий и их коррозионная стойкость существенно повышаются [2, 3]. При использовании, например, в качестве присадки к индустриальным маслам фуллерена C₆₀ улучшается трибополимеризация минерального масла следствием, которой, является образование на трущихся поверхностях антифрикционного покрытия обладающего низкими значениями коэффициента трения скольжения и высокой износостойкостью [4]. При этом, улучшение эксплуатационных свойств покрытий в значительной степени может зависеть как от качества используемых порошков, вида осаждаемого материала покрытия, так и от размера и концентрации частиц порошка в покрытии.

Многообразие факторов, влияющих на качество формируемых покрытий, создает определенные трудности при выборе необходимого вида покрытия для конкретных условий эксплуатации деталей трибосопряжений. Имеющейся к настоящему времени информации об эксплуатационных свойствах и технологических возможностях композиционных покрытий с наноразмерными наполнителями недостаточно для принятия решения о целесообразности их практического применения.

Кроме того, значительная часть публикаций по вопросам формирования композиционных покрытий с наполнителями наноразмерного уровня посвящена преимущественно методам гальванического осаждения, в то время, как в современном машиностроении известно большое количество средств и методов формирования покрытий. К их числу относятся методы газотермического и ионно-плазменного напыления, лазерного легирования, микродугового оксидирования, ионной имплантации, золь-гель методы и др. Однако эффективность их применения с точки зрения создания композиционных покрытий недостаточно изучена, что и предопределяет необходимость проведения дополнительных исследований.

Целью исследований, выполненных в настоящей работе, являлось изучение влияния модификация порошковых материалов наноразмерными добавками фуллереновой черни размером около 30 нм на триботехнические свойства покрытий, сформированных методом газопламенного напыления.

Материалы. Для проведения исследований были выбраны покрытия системы Ni-Cr-B-Si, широко используемые в машиностроительном производстве для решения задач, связанных не только с улучшением эксплуатационных свойств трущихся деталей подвижных сопряжений, но и восстановлением изношенных деталей. В исследованиях было задействовано 6 композиций порошковых материалов, которые модифицировались добавками фуллереновой сажи в количестве не более 10 % объема порошка (таблица 1).

Таблица 1 – состав порошковых смесей, модифицированных добавками фуллереновой сажи

Марка порошка	Химический состав
ПГ-СР4	основа Ni; 13–17 % Cr; 0,6–1 % C; 3–5 % Si; 2,5–4 % B; 4 % Fe
ПР-БрОНСР	основа Cu; 8 % Sn; 5 % Ni; 1 % Si; 1 % B
ПН-НД-42	основа Ni-Cu; 42,5 % Cu; 0,2 % C; 0,9 % Si; 1 % B; до 3 % Fe
ПР-Х4ГСР	основа Fe; 3,8 % Cr; 1,2 % C; 2,5 % Si; 2,2 % B; 0,5 % Cu
ПГ-19М-01	основа Cu; 4 % Fe; 8,5–10,5 % Al
ПТ-ЮНХ16СР3	основа Ni; 0,7 % C; 16 % Cr; 3,2 % Si; 2,6 % B; 1,2 % Al

Указанные порошковые композиции использовались для последующего формирования композиционных покрытий на плоских поверхностях экспериментальных образцов дисков, диаметром 70 мм и толщиной 5 мм, изготовленных из стали 45 ГОСТ 1050-88. Формирование покрытий осуществлялось с использованием оборудования для газопламенного напыления покрытий мод. ТРУ-2.1.Р, разработанного на базе отраслевой научно-исследовательской лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ, при следующих режимах: давление воздуха 0,2 МПа, давление воздуха кислорода 0,3 МПа, давление мафа 0,18 МПа, температура горения дуги 2800 °С. Оплавление сформированного слоя покрытия осуществлялось до «запотевания» поверхности (температура 1123–1273 К).

После напыления образцы шлифовали и полировали до шероховатости Ra 0,63 (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальные образцы дисков с покрытиями для проведения испытаний на трение и износ

Методика исследований. Диски с покрытием и без покрытия подвергали сравнительным испытаниям на трение и изнашивание на машине трения одностороннего вращения реализующей трение сферического индентора, выполненного из стали 40Х (HRC 43...45), по плоской поверхности диска (рис. 2).



Рис. 2. Фото машины трения одностороннего вращения

Испытания проводили в режиме «сухого трения» (без смазочного материала) с использованием в качестве контртела сферического индентора радиусом 1 мм при ско-

рости относительного скольжения индентора по диску 3 м/с и удельной нагрузка в зоне контакта 7,8 МПа. В ходе испытаний регистрировали силу трения, возникающую в процессе трения индентора с плоской поверхностью диска, по значениям, которой, вычислялись величины коэффициента трения скольжения ($f_{тр}$), а также износ индентора и диска, определяемый методом взвешивания, т.е. по разности масс образцов до и после испытаний. Продолжительность испытаний составляла $t = 60$ мин, что соответствовало пути трения $S = 18000$ м.

В качестве примера на рисунке 3 представлены образец осциллограммы с записью отклонений силы трения от начала до конца цикла испытаний.



Рис. 3. Осциллограмма отклонений силы трения $F_{тр}$ при трении сферического индентора по диску с покрытием ПТ-ЮНХ16СР3 (основа Ni; 0,7 % C; 16 % Cr; 3,2 % Si; 2,6 % B; 1,2 % Al)

Результаты исследований. При проведении исследований на этапе подготовки порошковых композиций было установлено, что при добавке фуллереновой черни не все исходные порошковые смеси одинаково взаимодействуют с ней, что может приводить к ухудшению качества покрытий, формируемых при последующем напылении. В частности, покрытие на основе порошка ПР-БрОНСР, после смешивания с добавкой фуллереновой черни и последующем напылении (рис. 4), оказалось не пригодным к испытаниям.

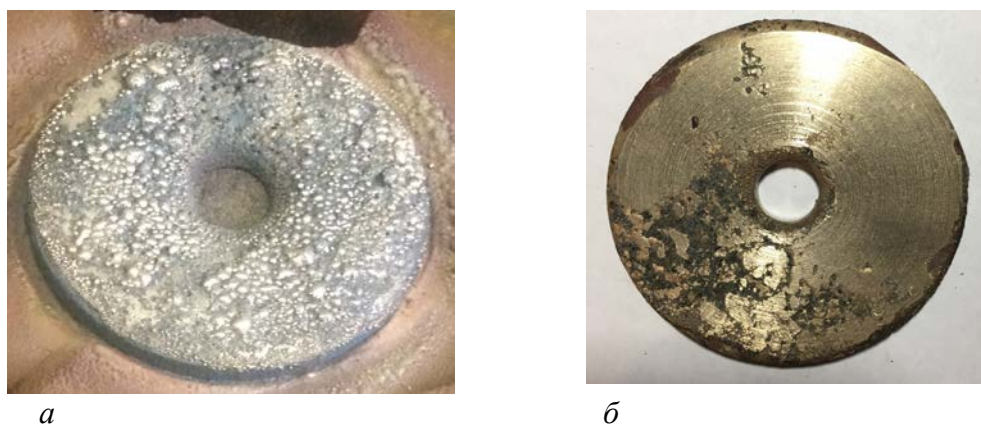


Рис. 4. Фото дисков с покрытием на основе порошка ПР-БрОНСР с добавкой 10 масс % фуллереновой черни:

а – образец после газопламенного напыления с оплавлением, *б* – образец после шлифования

В ходе триботехнических испытаний образцов без покрытия, а также образцов с не модифицированными и модифицированными фуллереновой чернью покрытиями были получены следующие значения величин коэффициента трения скольжения (таблица 1):

Результаты исследований на коэффициент трения показали, что из представленных данных (таблица 1), модификация фуллереновой чернью порошковых смесей, используемых для последующего газопламенного напыления, способствует снижению коэффициенту трения скольжения для следующих видов сформированных покрытий: ПР-Х4ГСП – в 1,8 раза, ПГ-19М-01 – в 2,6 раза и ПТ-ЮНХ16СП3 – в 1,6 раза. Вместе с тем, подобная модификация может привести как к увеличению значений величины коэффициента трения скольжения, в частности, для покрытий на основе порошков ПГ-СП4 в 1,2 раза, так и не оказывать существенного влияния, например, для покрытий ПН-НД-42.

Таблица 2 - Значения величин коэффициента трения скольжения при трении сферического индентора по диску без покрытия и дискам с не модифицированными и модифицированными фуллереновой чернью покрытиями.

Вид покрытия	Не модифицированные	Модифицированные добавкой 10 масс. % фуллереновой черни
ПГ-СП4	0,203	0,241
ПР-БрОНСП	–	–
ПН-НД-42	0,205	0,201
ПР-Х4ГСП	0,18	0,098
ПГ-19М-01	0,218	0,084
ПТ-ЮНХ16СП3	0,19	0,118
Сталь 45 (HRC 43...45) без покрытия	0,21	

Заключение. Анализ результатов выполненных исследований позволяет заключить, что модификация порошковых композиций для газопламенного напыления нанокремнеземными добавками фуллереновой черни способствует снижению коэффициенту трения скольжения сформированных из них следующих видов покрытий: ПР-Х4ГСП – в 1,8 раза, ПГ-19М-01 – в 2,6 раза и ПТ-ЮНХ16СП3 – в 1,6 раза. Вместе с тем, подобная модификация может привести как к увеличению значений величины коэффициента трения скольжения, в частности, для покрытий на основе порошков ПГ-СП4 в 1,2 раза, так и не оказывать существенного влияния, например, для покрытий ПН-НД-42.

Таим образом технология модификации фуллереновыми нанокремнеземными компонентами порошковых смесей для газопламенного напыления может способствовать существенному улучшению эксплуатационных свойств, сформированных из них покрытий, что позволит достигнуть увеличения ресурса быстроизнашивающихся деталей, а, следовательно, затраты на изготовление запасных частей и ремонтно-восстановительные работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А. В. Повышение эффективности упрочняющих технологий // Справочник. Инженерный журнал, №3, 2004, с. 15–20.

2. Тимошков, Ю. В., Губаревич Т. М., Ореховская Т. И., Молчан И. С., Курмашев В. И. Свойства композиционных никелевых покрытий с различными типами ультрадисперсных алмазных частиц // Гальванотехника и обработка поверхности, 1999, т.7, № 2, с. 20–25.

3. Ващенко, С. В., Соловьева З. А. Электроосаждение износостойких хромовых покрытий из электролитов с ультрадисперсными алмазными порошками // Гальванотехника и обработка поверхности, 1(1992), № 5 – 6, 45 – 48.

4. Гинзбург, Б. М., Байдакова, М. В., Киреевко, О.Ф., Точильников, Д. Г., Шепелевский, А. А. // Влияние фуллерена C60, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжения металлов / Журнал технической физики, 2000, том 70, вып. 12, С. 87–97

Поступила 19.10.2020

УДК 621.794

Синькевич Ю.В.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Приведено описание методов исследования точности обработки при электроимпульсном полировании железо-никель-хромовых сплавов путем изучения распределения электрического поля в электролите, определения рассеивающей способности электролита, волнистости и отклонения от круглости поверхности образцов. Производительность обработки оценивалась по величине удельного съема металла с поверхности и съема металла на сторону.

Введение. Для электрохимических методов обработки обеспечение точности является одной из сложнейших задач [1]. Съем металла на различных участках поверхности заготовки сложной конфигурации напрямую связан с пространственно-временной эпюрой локальных скоростей анодного растворения металла. В общем случае равномерность съема металла, определяющая точность обработки, характеризуется равномерностью распределения электрического тока на различных участках обрабатываемой поверхности. При электрохимической обработке на распределение электрического тока оказывает влияние ряд трудно учитываемых факторов, в частности, расположение электродов относительно друг друга и относительно стенок электролитической ячейки, конфигурация и размер электродов и ячейки, величина поляризации электродов, электропроводность электролита, гидродинамические явления в электролите и другие факторы [2].

Для оценки равномерности распределения электрического тока на поверхности электродов существует несколько методов, которые можно объединить в три группы:

1. Графический метод [3], основанный на исследовании поляризации электродов. Основной недостаток метода заключается в сложности снятия воспроизводимых кривых поляризации.

2. Метод построения электрического поля [3], сущность которого заключается в том, что в результате измерений потенциалов в различных точках электролитической ячейки строится электрическое поле в виде графика распределения эквипотенциальных и силовых линий.

3. Метод, основанный на исследовании распределения тока непосредственно на поверхности электродов [2].