

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ С ТУГОПЛАВКИМИ ДОБАВКАМИ

© 2012 Г.Г. Винокуров<sup>1</sup>, Н.Ф. Стручков<sup>1</sup>, О.Н. Попов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

<sup>2</sup> НИИ математики, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Поступила в редакцию 28.02.2012

Проведено исследование поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с оксидом алюминия. Изучены автокорреляционные функции профиля, поперечного пути трения; определен радиус корреляции, отражающий среднюю ширину борозд на поверхности трения. Для теоретического описания корреляции профиля использована статистическая модель изнашивания порошковых покрытий при трении скольжения.

Ключевые слова: *порошковое покрытие, изнашивание, профиль, корреляция, статистическое моделирование*

Электродуговая металлизация порошковых проволок является одним из перспективных методов нанесения износостойких покрытий на детали машин и механизмов [1]. Данная технология является также высокоэффективной по технико-экономическим показателям как способ восстановления изношенных деталей техники в ремонтном производстве. В качестве материала для нанесения износостойких покрытий в основном используются самофлюсующиеся сплавы на никелевой или кобальтовой основе и их смеси с модификаторами из тугоплавких металлов, карбидов, нитридов, оксидов и др., которые обеспечивают образование упрочняющих фаз и улучшают структуру покрытия. Структура и физико-механические свойства покрытий из порошковых проволок существенно влияют на эксплуатационные характеристики обработанной поверхности деталей машин и механизмов [2]. При этом следует выявить, как особенности структуры покрытия из порошковой проволоки будут проявляться в процессе изнашивания его поверхности при трении скольжения. Одной из актуальных задач данного направления является установление корреляционных характеристик профиля поверхности трения, описывающих взаимосвязь частиц порошкового покрытия на поверхности трения и, безусловно, связанных с ее триботехническими свойствами.

**Цель настоящей работы:** выявление автокорреляционной функции профиля поверхности покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими

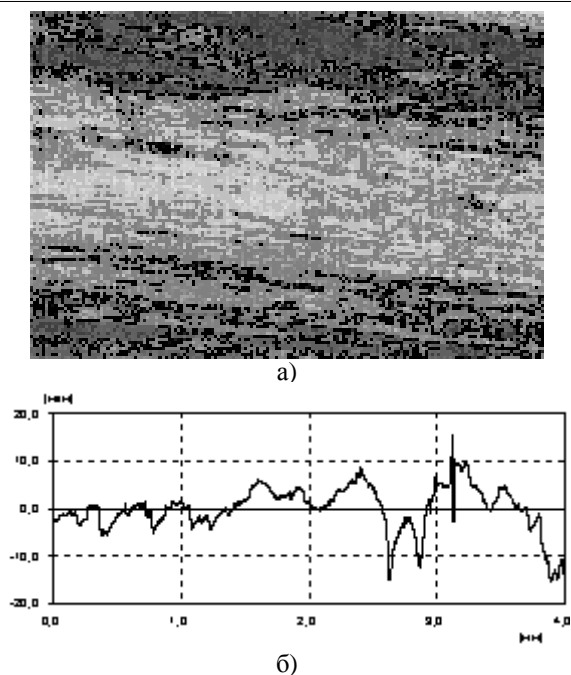
добавками  $Al_2O_3$  при трении скольжения и разработка ее описания статистическим моделированием.

**Материалы и методика экспериментальных исследований.** В работе исследована поверхность трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками  $Al_2O_3$  разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС, г. Якутск) [3]. Покрытия были нанесены на боковую поверхность дисков для испытаний на износ (диаметр 50 мм, высота 10 мм) с помощью промышленной установки электродуговой металлизации ЭДУ-500С при следующих технологических режимах: ток  $I=280$  А, напряжение  $U=38$  В, дистанция напыления  $L=130$  мм. Металлографические исследования поверхности покрытия проводились на микроскопах «Neophot-32» и «Axio Observer» (увеличение от  $100\times$  до  $1000\times$ ) (рис. 1,а). Испытания покрытия на износ проведены на машине трения СМЦ-2, износ определялся весовым методом при сухом трении скольжения по схеме «диск-колодка»; режимы испытаний: нагрузка 75 кГ, частота вращения вала 5 об/сек, контртело – колодка из закаленной стали ШХ15. Измерения проводились через 4500 циклов машины трения; по выбранной схеме трения один цикл соответствует пути трения, равному  $1,96 \times 10^{-2}$  м. Микрогеометрия поверхности трения покрытия исследовалась с помощью профилометра SurfTest SJ-201P фирмы «Mitutoyo»; для измерения профиля на каждом образце были промаркированы четыре диаметрально противоположных участка покрытия. Измерялся поперечный к пути трения профиль поверхности покрытия на каждом из четырех участков с базой 4 мм по 8000 точкам (рис. 1,б). Автокорреляционные функции профиля получены обработкой профилограмм в электронных таблицах Excel с усреднением данных по всей поверхности трения покрытия.

*Винокуров Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: g.g.vinokurov@iptn.ysn.ru*

*Стручков Николай Федорович, кандидат технических наук, научный сотрудник. E-mail: struchkov\_n@rambler.ru*

*Попов Олег Николаевич, старший преподаватель. E-mail: poppon1@mail.ru*



**Рис. 1.** Поверхность трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками: а) металлографическое изображение; б) профиль участка; путь трения 54000 циклов (3 часа испытаний на износ)

**Статистическая модель для описания профиля поверхности трения порошковых покрытий.** При трении скольжения порошковых покрытий формирование профиля поверхности трения происходит под влиянием многочисленных факторов изнашивания на отдельную граничную частицу. Точное определение количественных характеристик изнашивания, действующих на частицу (механические напряжения, локальную температуру при отрыве частицы, газогидродинамические параметры смазки и др.), а также локальных физико-механических свойств порошкового материала представляется даже теоретически невозможным из-за большого количества частиц. Поэтому для описания поверхности трения покрытий наиболее целесообразным является использование вероятностно-геометрических моделей макроструктуры порошковой среды, которые в настоящее время широко используются [4-8].

В работе для описания изнашивания порошковых покрытий выбрана элементарная модель макроструктуры порошковой среды на основе матричной вероятностно-геометрической системы частиц, предложенной авторами работы [4]. Так как сопротивление разрушению порошковой среды определяется, в основном, когезией частиц, то для учета макроструктуры покрытия при трении скольжения необходимо связать ее характеристики с вероятностью удаления отдельной частицы на поверхности трения. Основными количественными характеристиками макроструктуры порошковых покрытий, влияющими

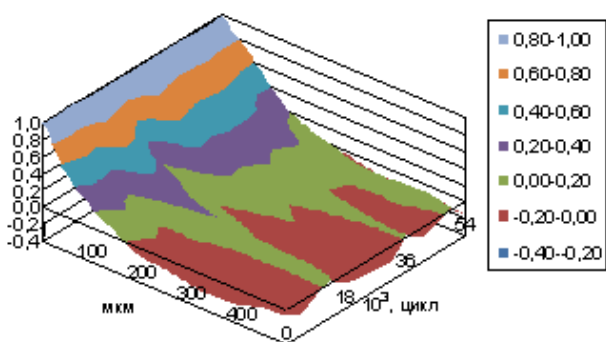
на их физико-механические свойства, являются координационные числа частиц и пористость (в случае изнашивания поверхности трения вместо пористости следует рассматривать локальный линейный износ). Поэтому для разработки описания профиля поверхности порошкового покрытия выбранная модель развита введением индивидуальных статистических весов граничных частиц, которые позволяют задавать вероятности их удаления. В общем случае вероятность удаления частицы зависит от пути трения вследствие усталостного механизма разрушения поверхности порошковых покрытий при трении скольжения. При использовании вероятностно-геометрической системы зависимость вероятности удаления от пути трения обусловлена самим процессом формирования профиля поверхности трения, когда вероятность удаления частицы определяется ее локальным окружением и изменяется по пути трения.

В данной работе для описания корреляции профиля в качестве статистического веса рассмотрена сумма  $n_{np}^{(j)} + n_{no}^{(j)} + n_o^{(j)}$  ( $j=1, \dots, m$ ) продольного, поперечного и диагонального координационных чисел частицы [4,8]. Ввиду того, что у частиц поверхности  $n_{np}^{(j)}=1$ , то статистический вес граничных частиц имеет вид:

$$v_j = (1 + n_{no}^{(j)} + n_o^{(j)})^\beta, \quad (1)$$

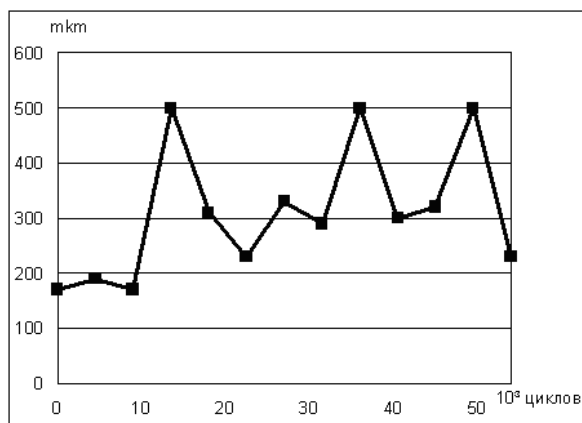
где  $\beta$  – параметр статистической модели, которого можно определить известным методом моментов или максимального правдоподобия с дальнейшей проверкой статистической гипотезы [9]. В данной работе для описания корреляционных характеристик профиля параметр  $\beta$  определялся аппроксимацией экспериментальной автокорреляционной функции при фиксированном пути трения, полученной обработкой профилограммы.

**Обсуждение результатов.** Анализ профилограммы поверхности трения покрытий показывает, что ее значение при  $x = x_0$  существенно не отличается от значений координат профиля в достаточно малой окрестности точки  $x_0$  (рис. 1,б). Поэтому следует ожидать существование корреляции между координатами профиля соседних точек поверхности покрытия. Данное предположение подтверждается усреднённой экспериментальной автокорреляционной функцией (рис. 2), она показывает тесноту взаимосвязи сечений профиля, поперечного пути трения. Как видно из графиков, автокорреляционная функция профиля качественно не изменяется по пути трения, монотонно убывает с увеличением расстояния, практически падает до нуля при расстояниях выше 200 - 300 мкм; наблюдаются незначительные колебания функции вблизи нуля по расстоянию и по пути трения.



**Рис. 2.** Средняя автокорреляционная функция профиля поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками

Как видно из рис. 1, поверхность трения покрытия имеет характерные борозды по пути трения, которые отражаются на поперечной профилограмме впадинами. Среднюю ширину борозд можно оценить анализом усредненной автокорреляционной функции; в качестве характеристики поверхности трения целесообразно рассмотреть радиус корреляции – координату вдоль профиля, при которой автокорреляционная функция обращается в нуль (рис. 3). Очевидно, по физическому смыслу радиус корреляции отражает среднюю полуширину борозд на поверхности трения (рис. 1).

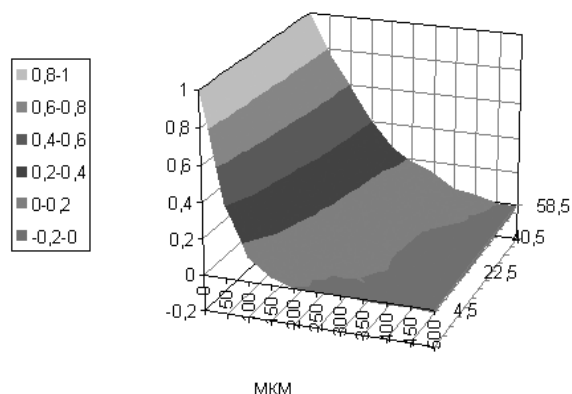


**Рис. 3.** Радиус корреляции профиля поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками

Как видно из рис. 3, радиус корреляции по пути трения имеет колеблющийся характер изменения: наблюдаются значительные участки с относительно стабильным значением радиуса на уровне  $\approx 200-300$  мкм, также регулярно происходит его резкое кратковременное повышение до  $\approx 500$  мкм.

Для теоретического описания рассчитана автокорреляционная функция по модели со статистическим весом частиц (1) с усреднением по 100 реализациям. Полные координатные числа дают более подробную информацию об окружающей частице, что приводит к согласию расчетных данных с экспериментом (рис. 4). Как видно из

графика, результаты расчетов качественно удовлетворительно описывают экспериментальные данные автокорреляционной функции, полученной статистической обработкой профилограмм (рис. 2). Следует отметить, что в расчетных данных более четко наблюдается тенденция к уширению борозд на поверхности трения покрытия (рис. 4).



**Рис. 4.** Расчетная автокорреляционная функция профиля поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками;  $\beta=1,6$ , количество реализаций 100

#### Выводы.

1. Изучена поверхность покрытия с тугоплавкими добавками оксида алюминия при трении скольжения на основе исследования корреляционных характеристик поперечного профиля. Автокорреляционная функция профиля исследованного покрытия качественно не изменяется по пути трения, монотонно убывает с увеличением расстояния, практически падает до нуля при расстояниях выше 200-300 мкм; наблюдаются незначительные колебания функции вблизи нуля по расстоянию и по пути трения.

2. В качестве характеристики поверхности трения покрытия предложено рассматривать радиус корреляции, который отражает среднюю полуширину борозд на поверхности трения. Радиус корреляции по пути трения имеет колеблющийся характер изменения: наблюдаются значительные участки с относительно стабильным значением радиуса на уровне  $\approx 200-300$  мкм, также регулярно происходит его резкое кратковременное повышение до  $\approx 500$  мкм.

3. Для теоретического описания корреляции профиля использована статистическая модель изнашивания порошковых покрытий при трении скольжения, результаты расчетов удовлетворительно описывают экспериментальные данные автокорреляционной функции профиля поверхности трения.

*Авторы выражают благодарность ведущему инженеру Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН Гаврильевой А.А. за помощь в обработке экспериментальных данных.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.
3. Патент РФ 2048273. Порошковая проволока для получения покрытий / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П. и др. Опубликовано 20.11.1995.
4. Каминский, В.М. Двумерная стохастическая модель уплотнения порошковых материалов / В.М. Каминский, А.Н. Николенко, И.Я. Сидоренко // Порошковая металлургия. 1982. №2. С. 29-31.
5. Николенко, А.Н. Анализ случайной упаковки идентичных частиц. Общая теория / А.Н. Николенко, М.С. Ковальченко // Порошковая металлургия. 1985. № 11. С. 38-41.
6. Кадушиников, Р.М. Геометрическое моделирование структуры полидисперсных материалов / Р.М. Кадушиников, А.Р. Бекетов // Порошковая металлургия. 1989. № 10. С.69-74.
7. Гнедовец, А.Г. Модель формирования макроструктуры покрытий при плазменном напылении / А.Г. Гнедовец, В.И. Калита // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 1. С. 30-39.
8. Винокуров, Г.Г. Статистические подходы для описания формирования и изнашивания макроструктуры порошковых покрытий и материалов, полученных высокоэнергетическими методами / Г.Г. Винокуров, О.Н. Попов. – М.: Academia, 2009. 184 с.
9. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1965. 512 с.

## CORRELATION CHARACTERISTICS OF THE FRICTION SURFACE AT COVERING FROM THE POWDERED WIRE WITH REFRACTORY ADDITIVES

© 2012 G.G. Vinokurov<sup>1</sup>, N.F. Struchkov<sup>1</sup>, O.N. Popov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov  
SB RAS, Yakutsk

<sup>2</sup> Scientific Research Institute of Mathematics, Northeast Federal University  
named after M.K. Ammosov, Yakutsk

Research of a friction surface at covering from powdered wire with aluminium oxide is conducted. Profile autocorrelation functions, transverse way of friction are studied; the radius of correlation reflecting the average width of furrows on a friction surface is defined. For the theoretical description of profile correlation the statistical model of chafing the powdered coverings at a sliding friction is used.

Key words: powdered covering, chafing, profile, correlation, statistical modeling

---

Genadiy Vinokurov, Candidate of Technical Sciences, Leading  
Research Fellow. E-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru  
Nikolay Struchkov, Candidate of Technical Sciences, Research  
Fellow. E-mail: struchkov\_n@rambler.ru  
Oleg Popov, Senior Teacher. E-mail: ponpon1@mail.ru