

УДК 621.193.722

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

© 2013 Г.Г. Винокуров, Д.И. Лебедев, М.П. Лебедев

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Поступила в редакцию 05.03.2013

В работе изучены поверхности износостойких порошковых покрытий при трении скольжения со стальным контртелом. В качестве модифицирующих добавок износостойких порошковых покрытий использовались ультрадисперсные шпинели CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 . Выявлены особенности взаимосвязи характеристик микрогеометрии поверхностей пар трения.

Ключевые слова: *порошковое покрытие, модифицирование, износ, поверхность трения, радиус корреляции*

С развитием порошковой металлургии для восстановления изношенных деталей техники в ремонтном производстве широко применение получили технологии нанесения износостойких покрытий [1]. При этом в качестве материала для напыления используются промышленные самофлюсующиеся сплавы на никелевой или кобальтовой основе и их смеси с различными модификаторами, которые обеспечивают образование упрочняющих фаз и улучшают структуру покрытия. Поэтому актуальными являются исследования по выявлению механизмов и особенностей изнашивания износостойких модифицированных покрытий при трении скольжения с контртелами из конструкционных материалов.

Как известно, при трении скольжения на контактной поверхности материалов образуются многочисленные борозды вдоль пути трения [2-6]. Для исследования процессов фрикционного взаимодействия порошкового покрытия и металлического контртела важным является установление взаимосвязи характеристик поперечных профилей, которые отражают микрогеометрию контактных поверхностей трения.

Цель работы: установление взаимосвязи характеристик профилей контактных поверхностей при трении скольжения износостойких модифицированных порошковых покрытий со стальным контртелом.

Материалы и методика экспериментальных исследований. Объектом исследования являются износостойкие порошковые покрытия разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, модифицированные ультрадисперсными шпинелями CoAl_2O_4 и

CuAl_2O_4 (порошки производства АО «НЕОМАТ» Латвии, средний размер частиц порядка ~ 100 нм) [7]. Для исследования изнашивания модифицированных покрытий проведены испытания на износ на машине трения СМЦ-2 при режимах: нагрузка 75 кГ, частота вращения вала 5 об/сек, трение сухое. На основе анализа работ и методик испытаний на износ выбрана схема трения «диск-колодка»; по соответствующим размерам были изготовлены контртела в виде колодок из стали марки Ст6, которые характеризуются более низкими значениями твердости. Микротвердость покрытий и контртел была измерена на приборе ПМТ-3М при нагрузках на алмазный индентор 100 и 200 гр. Были установлены интервалы изменения микротвердости для покрытий с ультрадисперсными добавками: CuAl_2O_4 ~ 9400 -11200 МПа, CoAl_2O_4 ~ 9200 -12600 МПа; для контртела из Ст6 ~ 1900 -3000 МПа. Поверхности трения исследовались профилометром SJ-201P и на микроскопах «Stemi 2000C» и «Axio Observer» через каждые 9000 циклов трения; по выбранной схеме трения один цикл машины трения соответствует пути трения, равному $1,96 \times 10^{-2}$ м. Измерялся поперечный профиль покрытий и стального контртела; для покрытий – на четырех маркированных диаметрально противоположных участках с усреднением по всей поверхности трения.

Как отмечено выше, при трении скольжения на контактных поверхностях узла трения образуются многочисленные продольные борозды, которыми определяется поперечный профиль поверхности трения. Поэтому целесообразным является исследование поперечного профиля, который описывается общеизвестными вертикальными отклонениями R_a , R_q , R_z , R_y и горизонтальными характеристиками – средним шагом неровностей по вершинам S и средней линии S_m [2-4]. Поскольку данные горизонтальные характеристики определяются по ограниченному набору точек профилограммы, в предыдущей работе авторов для оценки

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

Лебедев Дмитрий Иосифович, аспирант. E-mail: Uranhai@ramler.ru

Лебедев Михаил Петрович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, директор. E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru

ширины борозд поверхности трения было предложено использовать радиус корреляции [8]. Как известно, автокорреляционная функция получается обработкой всех данных поперечного профиля, поэтому позволяет учитывать многочисленные случайные факторы при формировании продольных борозд поверхности трения. В данной работе основное внимание уделено исследованию взаимосвязи радиуса корреляции износостойкого покрытия и стального контртела. Обработка экспериментальных данных проведена в программной среде MathCad и в электронных таблицах Excel.

Обсуждение результатов. Сравнительным анализом интенсивности изнашивания было установлено, что стадия приработки для исследуемых материалов составляет порядка 5000-10000 циклов. Для стали Ст6 характерно интенсивное изнашивание до $\sim 10^4$ циклов, что связано с составом и структурой материала; на этой стадии происходит интенсивное деформационное упрочнение и наклеп поверхности. Интенсивность изнашивания для покрытия стабилизируется и, начиная с $\sim 18 \times 10^3 - 24 \times 10^3$ циклов для обоих материалов характерна постоянная интенсивность износа, при этом следует заметить, что износостойкость покрытия существенно выше, чем у стали. В отличие от графиков массового износа с монотонными зависимостями, шероховатость контактных поверхностей изменяется сложным колеблющимся образом. Примерно к $\sim 5000-10000$ циклов заканчивается участок влияния начального состояния контактных поверхностей трения из-за ее приработки.

Износ при трении скольжения проявляется практически всегда в сочетании различных механизмов разрушения поверхностей трения. Каждому механизму соответствует то или иное явление; например, пластическая деформация, адгезия и перенос металла, схватывание, износ со снятием стружки, поверхностные реакции и т.д. [2-4]. В работе проведено металлографическое исследование поверхности износа в интервале от 0 до 54000 циклов для выяснения характерных особенностей разрушения поверхности на той или иной стадии изучаемых материалов, характера поведения их в условиях сухого трения скольжения (рис. 1). В исходном состоянии поверхности характеризуются шлифовочными следами различной высоты, края их деформированы, есть заусенцы и области оксидных пленок (рис. 1а). К началу установившегося износа шлифовочные гребни претерпевают плоское сжатие, формируются площадки контакта в виде борозд, края борозд откалываются и износ на данной стадии происходит по механизму: пластическая деформация $\rightarrow$ деформационное упрочнение $\rightarrow$ отрыв. Оторвавшиеся частицы могут попасть в зону контакта, вдавиться и действовать как режущий инструмент (рис. 1б). Как видно из рис. 1б, после 9×10^3 циклов для износостойкого покрытия площадь контакта заметно увеличилось, несущие дорожки расширились и стабилизировались за счет деформирования, поскольку происходит

отрыв и унос краев гребней. В местах соединения гребней наблюдаются небольшие пустоты (рис. 1б).

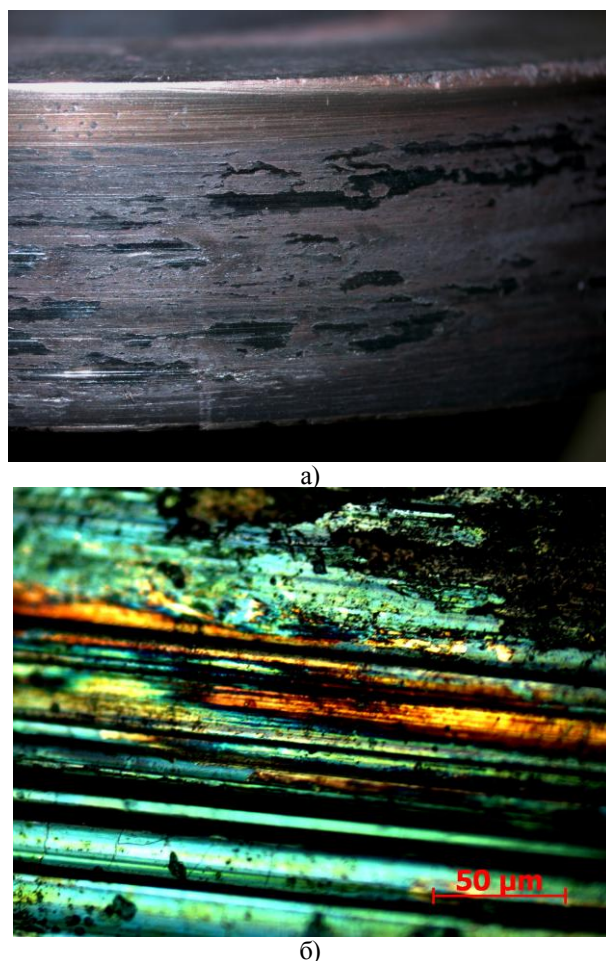


Рис. 1. Поверхность трения износостойкого покрытия: а) исходное состояние, увеличение $20\times$; б) путь трения 9000 циклов; модификатор CoAl_2O_4 , контртело – термообработанная Ст6, нагрузка 75 кГ, сухое трение

На рис. 2 приведена усредненная автокорреляционная функция поверхности трения покрытия с ультрадисперсными добавками шпинели CuAl_2O_4 при трении с контртелом из Ст6. Как установлено в предыдущей работе авторов, если при анализе микрогеометрии пренебречь асимметрией борозд на поверхности трения (рис. 1), удвоенное расстояние d_0 , при котором достигается первый нуль автокорреляционной функции, характеризует среднюю ширину борозды поверхности трения порошкового покрытия (рис. 2). С расстоянием d_0 тесно связан т.н. радиус корреляции – расстояние, при котором корреляция падает в $e \approx 2,718$ раз. Дело в том, что для основных видов случайных процессов автокорреляционная функция описывается зависимостью вида $\exp(-d/r_0)$, где r_0 – радиус корреляции. Расстояние d_0 , при котором достигается первый нуль автокорреляционной функции, является верхней оценкой радиуса корреляции r_0 , также данное расстояние d_0 сравнительно проще определяется математической обработкой профилограмм.

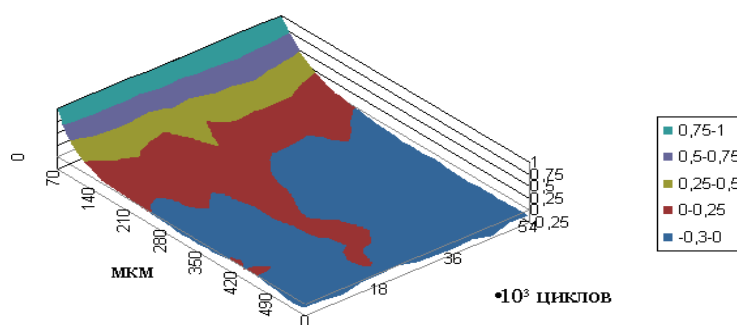


Рис. 2. Усредненная автокорреляционная функция профиля поверхности трения покрытия с ультрадисперсными добавками; модификатор CuAl_2O_4 , контртело Ст6, нагрузка 75 кГ, сухое трение

Как видно из графика, наблюдается существование устойчивой корреляции с коэффициентом корреляции $>0,8-0,7$ между координатами профиля соседних точек покрытия, автокорреляционная функция показывает тесноту взаимосвязи сечений профиля на расстоянии до ≈ 20 мкм. Как видно из графиков, автокорреляционные функции участков покрытия в области устойчивой корреляции несущественно отличаются, характеризуются монотонным убыванием, радиус корреляции стабилен. На расстояниях $\sim 150-250$ мкм корреляция снижается до несущественного уровня, наблюдается статистический разброс данных в участке отрицательных значений и единичный выброс радиуса корреляции по пути трения (рис. 2). Такое единичное увеличение наблюдалось в начальной стадии установившегося износа ($\sim 15000-25000$ циклов для контртела из Ст6) для обоих видов покрытий с ультрадисперсными добавками шпинели. Следует отметить, что при трении модифицированных покрытий с твердосплавным контртелом такого скачкообразного изменения радиуса корреляции не наблюдается. Поэтому, видимо, такая закономерность изменения радиуса корреляции связана с пластическими деформациями на контактных поверхностях при трении пары «покрытие – стальное контртело»; природа резкого увеличения радиуса корреляции профиля модифицированных покрытий является предметом будущих исследований.

Таким, образом, для отражения взаимосвязи ширины борозд контактных поверхностей пары трения «покрытие – контртело» целесообразным является построение соответствующих данных в установившемся режиме трения в координатах радиусов корреляции: покрытия d_{0n} и контртела d_{0k} (рис. 3). На рис. 3 сплошной и пунктирной линиями проведены прямые линейной регрессии для шероховатости покрытий с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 , соответственно. Как видно из графиков, величина и знак корреляции радиусов корреляции контактных поверхностей зависит от материала покрытия. Если для покрытия с модификаторами CoAl_2O_4 при трении с контртелом из Ст6 наблюдается устойчивая отрицательная корреляция радиусов корреляции, то для покрытия с модификаторами CuAl_2O_4 трение с контртелом из Ст6 приводит к практической независимости данных характеристик. Отметим, что для пары трения «покрытие с CoAl_2O_4 – стальное контртело Ст6» между вертикальными отклонениями R_a , R_q наблюдалась существенная положительная корреляция. Следует предположить, что если вертикальные характеристики R_a , R_q , отражающие глубину борозд контактных поверхностей, изменяются в одинаковую сторону (увеличение или уменьшение), то размеры ширины борозд меняются обратным образом, имеют отрицательную корреляционную зависимость.

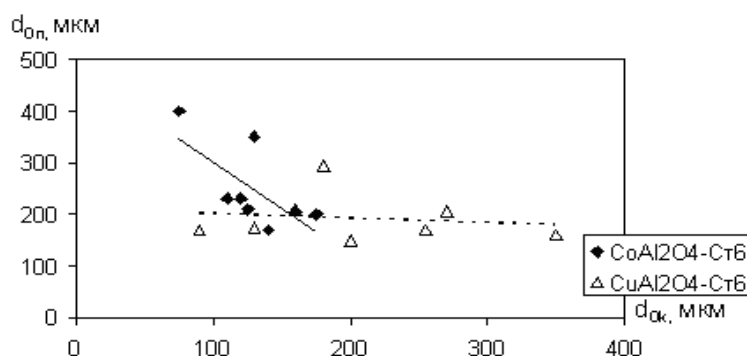


Рис. 3. Взаимосвязь радиусов корреляции контактных поверхностей трения; покрытия с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 ; контртело Ст6, нагрузка 75 кГ, сухое трение

Выводы:

1. Металлографическими и профилометрическими исследованиями изучены поверхности трения износостойких покрытий с модифицирующими добавками ультрадисперсных шпинелей CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 при трении скольжения со сталью Ст6. Устойчивая корреляция координат соседних точек поперечного профиля покрытий с коэффициентом корреляции $>0,8-0,7$ отражает наличие характерных продольных борозд на поверхности трения по всему пути трения.

2. В качестве характеристики взаимосвязи ширины продольных борозд поверхностей модифицированного покрытия и стального контртела предложено использовать коэффициент корреляции радиусов корреляции по пути трения. Величина и знак корреляции зависит от материала покрытия: если для покрытия с модификаторами CoAl_2O_4 при трении с контртелом из Ст6 наблюдается устойчивая отрицательная корреляция радиусов корреляции, то для покрытия с модификаторами CuAl_2O_4 трение с контртелом из Ст6 приводит к практической независимости данных характеристик.

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.

Работа проведена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант № 12-08-98500).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989, Т.1. 400 с.
3. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбаров. – М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. Мур, Д. Основы и применения триботоники. – М.: Мир, 1978. 488 с.
5. Чижик, С.А. Исследование субмикрорельефа поверхностей трения методом сканирующей туннельной микроскопии / С.А. Чижик, А.М. Трояновский, А.И. Свириденко // Трение и износ. 1991. Т. 12, №4. С. 596-603.
6. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / С.А. Чижик, А.М. Трояновский, А.И. Свириденко. – Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.
7. Патент РФ 2040570. Порошковый материал для газотермического напыления / Н.П. Болотина, С.Е. Милохин, В.П. Ларионов и др. // рег. 25.07.1995.
8. Винокуров, Г.Г. Исследование корреляционных характеристик профиля при трении скольжения порошкового покрытия с ультрадисперсными добавками / Г.Г. Винокуров, Д.И. Лебедев, М.П. Лебедев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14, №1(2). С. 597-600.

RESEARCH THE FRICTION SURFACE OF POWDER COVERING WITH ULTRADISPERSE MODIFYING ADDITIVES

© 2013 G.G. Vinokurov, D.I. Lebedev, M.P. Lebedev

Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov SB RAS,
Yakutsk

In work surfaces of wearproof powder coverings at sliding friction with a steel counterbody are studied. As modifying additives of wearproof powder coverings ultradisperse CoAl_2O_4 and CuAl_2O_4 spinels were used. Features of interrelation of characteristics of surfaces microgeometry of friction couples are revealed.

Key words: powder covering, modifying, wear, friction surface, correlation radius

Gennadiy Vinokurov, Candidate of Technical Sciences,
Leading Research Fellow. E-mail:

g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru

Dmitriy Lebedev, Post-graduate Student. E-mail:

Uranhai@ramler.ru

Mikhail Lebedev, Corresponding Member of RAS,
Doctor of Technical Sciences, Director.

E-mail: *m.p.lebedev@prez.ysn.ru*