

# КОРРЕЛЯЦИЯ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОНТРТЕЛА

© 2011 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 25.02.2011

Работа посвящена установлению взаимосвязи между шероховатостями контактных поверхностей износостойкого порошкового покрытия и металлического контртела при трении скольжения. В качестве модифицирующих добавок при получении износостойких газотермических покрытий использовались ультрадисперсные шпинели  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ . Показано, что модифицирующие добавки покрытия и материал контртела существенно влияют на корреляцию шероховатостей контактных поверхностей трения.

Ключевые слова: *порошковое покрытие, модифицирование, контртело, износ, шероховатость, корреляция*

Как известно, для упрочнения поверхности деталей машин и механизмов в настоящее время широко применяются высокоэнергетические способы нанесения износостойких покрытий (плазменное и газопламенное напыление, электродуговая металлизация проволоками и др.) [1]. 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 других соединений, которые обеспечивают образование упрочняющих фаз и улучшают структуру покрытия. Как показывают исследования, при трении скольжения износостойких порошковых покрытий профиль их контактной поверхности тесно связан со свойствами контртела [2-4]. Для исследования взаимосвязи процессов изнашивания порошкового покрытия и контртела актуальным является установление количественных соотношений для характеристик микрогеометрии контактных поверхностей.

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

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

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

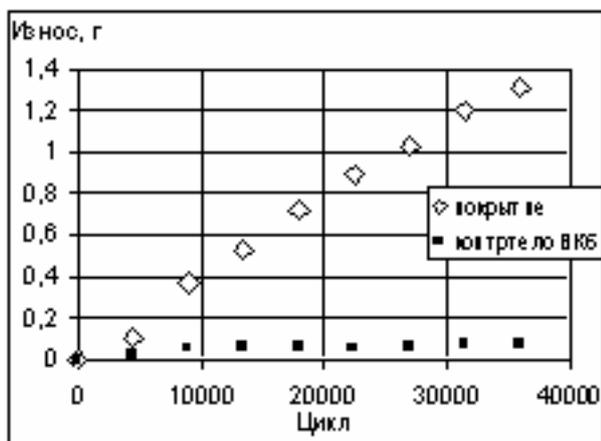
**Цель данной работы:** установление взаимосвязи шероховатостей контактных поверхностей износостойкого порошкового покрытия, модифицированного ультрадисперсными добавками шпинелей, и металлического контртела при трении скольжения.

**Материалы и методика экспериментальных исследований.** В данной работе в качестве модифицирующих добавок при получении износостойких газотермических покрытий использовались ультрадисперсные шпинели  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ , получаемые в процессе плазмохимического синтеза (порошки производства АО «НЕОМАТ» Латвии, средний размер частиц порядка 100 нм). Выбор этих добавок основан на том, что соединения шпинелей труднее активируются на контакте при трении и в случае их формирования в покрытии как упрочняющей фазы повышение износостойкости будет возможно как за счет модифицирования структуры, так и за счет введения упрочняющей фазы [5]. Матрицу порошкового материала для напыления составлял промышленный самофлюсующийся порошок ПР-Н70ХТ7С4Р4 системы Ni-Cr-B-Si [6].

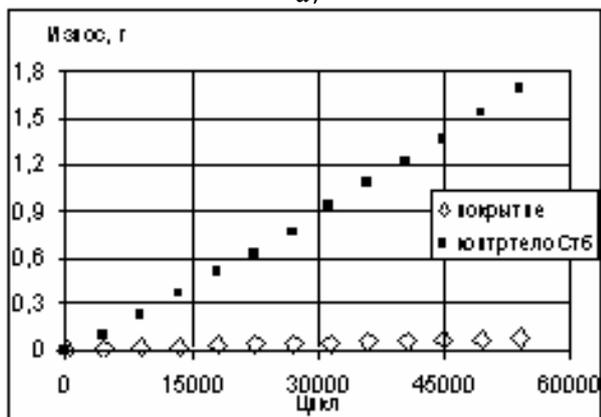
Для исследования изнашивания модифицированных покрытий проведены испытания на износ на машине трения СМЦ-2 при режимах: нагрузка 75 кГ, частота вращения вала 5 об/сек, трение сухое. На основе анализа работ и методик испытаний на износ выбрана схема трения «диск-колодка»; по соответствующим размерам были изготовлены контртела в виде колодок из твердосплавного материала ВК6 и из стали марки

Ст6, которые значительно отличаются по твердости. Поверхность трения исследовалась профилометром SJ-201P и на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000C» через каждые 4500 циклов трения, по выбранной схеме трения один цикл машины трения соответствует пути трения, равному  $1,96 \times 10^{-2}$  м. Измерения шероховатости проводились на четырех маркированных диаметрально противоположных участках покрытия образца, затем данные усреднялись по всей поверхности трения. Обработка экспериментальных результатов проведена в программной среде MathCad и в электронных таблицах Excel.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 приведены сравнительные данные массового износа пары трения «покрытие – контртело» для покрытия с ультрадисперсными добавками  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  в зависимости от количества циклов машины трения.



а)



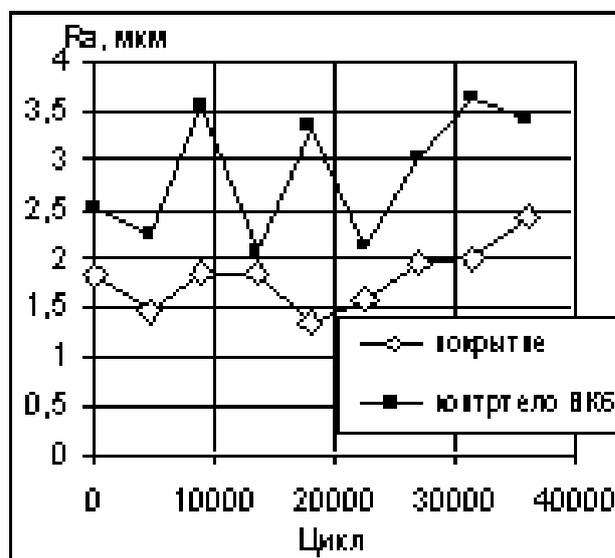
б)

**Рис. 1.** Массовый износ пары трения; покрытие с ультрадисперсными добавками  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ ; контртело: а) ВК6; б) Ст6

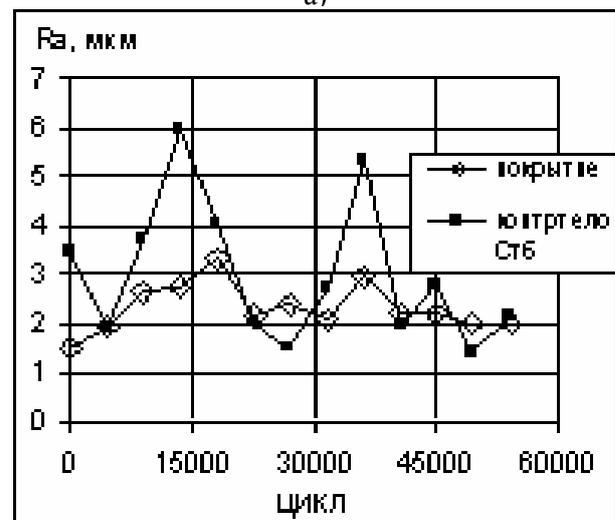
Как видно из графиков, в кривых массового износа обеих пар трения наблюдаются незначительные участки приработки, в которых интенсивность износа отличается нестабильностью, имеет различные значения в зависимости от условий трения и начальной шероховатости. Далее, начиная с  $\approx 5000$ -10000 циклов,

начинается режим установившегося износа, интенсивность изнашивания стабилизируется, наблюдается равномерное повышение массового износа пар трения до конца испытаний (рис. 1). В целом наблюдается существенная разница массовых износов покрытия и контртела, обусловленная различной твердостью материалов контртел.

На рис. 2 приведены зависимости средних шероховатостей  $R_a$  контактных поверхностей при трении покрытия с ультрадисперсными добавками  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  в зависимости от количества циклов машины трения. В отличие от графиков массового износа на рис. 1 с монотонными зависимостями, шероховатость контактных поверхностей изменяется сложным колеблющимся образом. Примерно к  $\approx 5000$  циклов заканчивается участок влияния начального состояния контактных поверхностей трения из-за ее приработки (рис. 1).



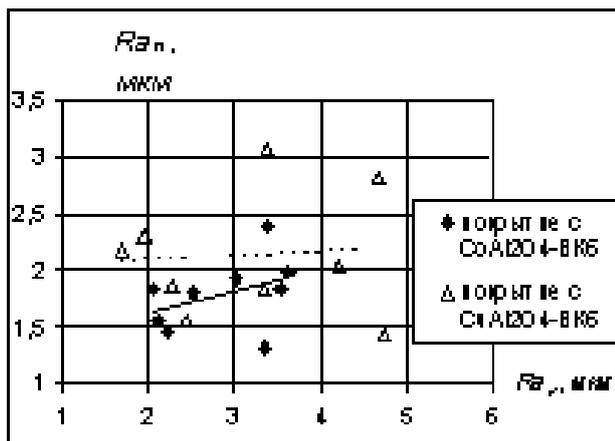
а)



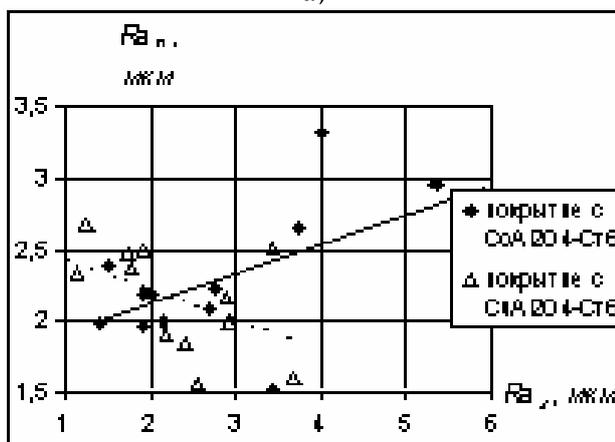
б)

**Рис. 2.** Шероховатость контактных поверхностей; покрытие с ультрадисперсными добавками  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ; контртело: а) ВК6; б) Ст6

Далее начинается превалирование влияния механизма изнашивания материалов, что приводит к существенной разнице в поведении шероховатости поверхностей трения покрытия и контртела. Тогда как шероховатость поверхности трения покрытия имеют меньшие колебания, шероховатость контртел характеризуется большим разбросом, обусловленным периодическими колебаниями. Это обусловлено тем, что твердосплавный материал из-за большей хрупкости способен к выкрашиванию при трении скольжения, а стальной материал из-за низкой износостойкости способен к интенсивному изнашиванию; эти процессы приводят к регулярному появлению нового рельефа контртела с последующим сглаживанием, следовательно, к большей нестабильности шероховатости поверхности. Износостойкие покрытия характеризуются более высокими упругими свойствами, при фрикционном контакте более способны к сохранению рельефа поверхности трения (рис. 2).



а)



б)

**Рис. 3.** Взаимосвязь шероховатости контактных поверхностей трения; покрытия с ультрадисперсными добавками  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ ; контртело: а) ВК6; б) Ст6

Для отражения взаимосвязи шероховатости контактных поверхностей пары трения «покрытие - контртело» целесообразным является построение соответствующих данных по пути трения в координатах шероховатостей: покрытия  $R_{an}$  и контртела  $R_{ak}$  (рис. 3). На рис. 3 сплошной и пунктирной линиями проведены прямые линейной регрессии для шероховатости покрытий с ультрадисперсными добавками  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ , соответственно. Как видно из графиков, величина и знак корреляции шероховатостей контактных поверхностей зависит от материала контртела и покрытия.

Установленные коэффициенты корреляции шероховатости контактных поверхностей трения приведены в таблице 1. В качестве характеристик контактных поверхностей трения можно выбрать также величины среднеквадратического отклонения  $R_q$  и размаха отклонений  $R_z$  профиля поверхностей, которые изменяются по аналогичной закономерности. Как видно из табл. 1 и рис. 3, влияние модифицирующих добавок покрытия на коэффициент корреляции является существенным, для контртела из ВК6 трение покрытий со шпинелью  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  приводит к снижению и практическому отсутствию корреляции характеристик контактных поверхностей. При трении покрытий с модификаторами  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  с контртелом из Ст6 наблюдается также снижение со сменой знака коэффициента корреляции характеристик контактных поверхностей трения.

**Таблица 1.** Коэффициент корреляции характеристик контактных поверхностей трения

Модификатор покрытия	Материал контртела	$R_a$	$R_q$	$R_z$
$\text{CoAl}_2\text{O}_4$	ВК6	0,39	0,45	0,63
$\text{CuAl}_2\text{O}_4$	ВК6	0,08	0,02	0,00
$\text{CoAl}_2\text{O}_4$	Ст6	0,62	0,66	0,71
$\text{CuAl}_2\text{O}_4$	Ст6	-0,52	-0,50	-0,45

Как видно из табл. 1 и рис. 3, материал контртела влияет на коэффициент корреляции неоднозначным образом; если для покрытия с модификаторами  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  трение с контртелом из Ст6 повышает коэффициент корреляции, то для покрытия с модификаторами  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  использование контртела из Ст6 приводит к снижению коэффициента корреляции.

**Выводы:**

1. При трении скольжения покрытий с ультрадисперсными добавками шпинелей  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  с контртелами из ВК6 и Ст6 не наблюдается существенного участка приработки, практически сразу начинается установившийся износ. Соотношение массового износа пары трения в основном определяется твердостью материала контртела.

2. В качестве характеристики взаимосвязи поверхностей модифицированного покрытия и металлического контртела предложено использовать коэффициенты корреляции величин шероховатости  $R_a$ , а также среднеквадратического отклонения  $R_q$  и размаха отклонений  $R_z$  профиля по пути трения. Величина и знак корреляции характеристик контактных поверхностей зависит от материала контртела и покрытия.

3. Влияние модифицирующих добавок покрытия на коэффициент корреляции является существенным, трение покрытий со шпинелью  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  приводит к снижению корреляции характеристик контактных поверхностей. Материал контртела влияет на коэффициент корреляции неоднозначным образом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
3. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. Т.1. 400 с.
4. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.
5. Винокуров, Г.Г. Износостойкость и характеристики поверхности трения газотермических покрытий с ультрадисперсными добавками / Г.Г. Винокуров, М.П. Лебедев, М.И. Васильева и др. // Трение и износ. 2009. Том 30. №6. С. 596-600.
6. Патент РФ 2040570. Порошковый материал для газотермического напыления / Н.П. Болотина, С.Е. Милохин, В.П. Ларионов и др. // Рег. 25.07.1995 г.

Работа посвящена установлению взаимосвязи между шероховатостями контактных поверхностей износостойкого порошкового покрытия и металлического контртела при трении скольжения. В качестве модифицирующих добавок при получении износостойких газотермических покрытий использовались ультрадисперсные шпинели  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ . Показано, что модифицирующие добавки покрытия и материал контртела существенно влияют на корреляцию шероховатостей контактных поверхностей трения.

Ключевые слова: *порошковое покрытие, модифицирование, контртело, износ, шероховатость, корреляция*

## ROUGHNESSES CORRELATION OF FRICTION CONTACT SURFACES OF THE MODIFIED GAS-THERMAL COVERING AND METAL COUNTERBODY

© 2011 G.G. Vinokurov, D.I. Lebedev, M.P. Lebedev

Institute of Physicotechnical Problems of the North named after V.P. Larionov SB RAS,  
Yakutsk

Work is devoted to interrelation establishment between roughnesses of contact surfaces of a wearproof powder covering and a metal counterbody at a sliding friction. As modifying additives at reception wearproof gas-thermal coverings were used ultradisperse spinels  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ . It is shown that modifying additives of covering and counterbody material essentially influence correlation of roughnesses of contact surfaces of a friction.

Key words: *powder covering, modifying, counterbody, deterioration, roughness, correlation*

---

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, Doctor of Technical Sciences, Director.  
E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru