

## Исследование трения скольжения модифицированных износостойких порошковых покрытий с металлическими контртелами

Д.И. Лебедев\*, Г.Г. Винокуров

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

\*[uranhai@rambler.ru](mailto:uranhai@rambler.ru)

**Аннотация.** В настоящее время для упрочнения и восстановления деталей техники в ремонтном производстве широко применяются высокоэнергетические технологии нанесения износостойких порошковых покрытий. Физико-механические свойства и структура покрытий существенно влияют на их эксплуатационные характеристики при трении с металлической поверхностью металлического контртела – детали машин и механизмов. Поэтому для оценки износостойкости пары трения необходимо установить влияние структуры и свойств порошковых покрытий на фрикционное взаимодействие с материалом контртела. Следует выявить, как особенности свойств и структуры покрытия будут проявляться в процессах изнашивания обеих контактных поверхностей трения. В работе методом металлографического анализа и профилометрии изучены контактные поверхности при трении скольжения износостойких покрытий с модифицирующими добавками корунда  $Al_2O_3$ , ультрадисперсных шпинелей  $CoAl_2O_4$  и  $SiAl_2O_4$  с контртелами из различных материалов – твердого сплава ВК6, сталей марок ШХ15 и Ст6. Установлены основные механизмы повреждения контактных поверхностей трения. Показано, что изнашивание и формирование профилей контактных поверхностей зависит от соотношения износостойкости покрытия и контртела. Для описания трения порошкового покрытия с металлическим контртелом при установившемся изнашивании разработана статистическая модель на основе биномиального распределения удаленных частиц износа обеих контактных поверхностей.

**Ключевые слова:** покрытие, контртело, трение скольжения, износ, профиль, статистическое моделирование, биномиальное распределение.

### Введение

С развитием тенденции ресурсосбережения в промышленности для упрочнения и восстановления поверхности деталей машин и механизмов широко применяются высокоэнергетические технологии нанесения износостойких покрытий (плазменное, газопламенное и детонационное напыление, электродуговая металлизация проволоками и др.) [1–3]. В последующем износостойкие порошковые покрытия подвергаются трению скольжения с металлическим контртелом – контактной деталью узла трения машин и механизмов.

Как известно, износостойким порошковым покрытиям свойственна высокая степень неоднородности структуры – наличие избыточных фаз, слоистое строение и пористость. Физико-механические свойства упрочняющих фаз и неоднородная структура порошковых покрытий определяют эксплуатационные характеристики обработанной

детали техники. При этом для оценки износостойкости пары трения необходимо установить влияние структуры и свойств порошковых покрытий на процессы трения скольжения с материалом контртела.

В настоящее время существуют многочисленные исследования покрытий и материалов с покрытиями, в которых рассматриваются свойства собственно покрытий (пористость, адгезия, износостойкость и др.). Исследований фрикционного взаимодействия материалов с покрытиями значительно меньше, чем работы по изучению свойств только покрытий. Однако, вопрос влияния покрытий на износостойкость обработанной детали в целом значительно сложнее и не может быть полностью решен исследованием структуры и свойств только покрытий.

Таким образом, исследование фрикционного взаимодействия износостойких модифицированных покрытий с металлическими контртелами

является актуальной научно-практической проблемой. Решение ее позволит научно обосновать технологию получения покрытий с заданным уровнем физико-механических свойств, обеспечит разработку способов подбора металлического контртела для повышения износостойкости узла трения в целом.

Целью данной работы является установление закономерностей изнашивания и формирования профилей модифицированного порошкового покрытия и металлического контртела при трении скольжения для разработки статистической модели их фрикционного взаимодействия.

### **Материалы и методика экспериментальных исследований**

Объектами аналитического исследования в работе являются износостойкие покрытия, полученные при различных режимах электродуговой металлизации порошковой проволоки с тугоплавкими добавками корунда, также в работе исследовались износостойкие покрытия с ультрадисперсными модифицирующими добавками. Данные виды износостойких порошковых покрытий являются разработками Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) [4–6]. В качестве модифицирующих добавок износостойких порошковых покрытий использовались добавки корунда  $Al_2O_3$  и ультрадисперсные шпинели  $CoAl_2O_4$  и  $CuAl_2O_4$ , получаемые в процессе плазмохимического синтеза (порошки шпинели производства АО «NEOMAT», Латвия, средний размер частиц порядка  $\sim 100$  нм).

Выбор ультрадисперсных добавок  $CoAl_2O_4$  и  $CuAl_2O_4$  основан на том положении, что соединения шпинелей практически не 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. Матрицу порошкового материала для напыления составляет промышленный самофлюсующийся порошок ПР-Н70ХТ7С4Р4 системы Ni–Cr–B–Si [5, 6].

Порошковая проволока разработки ИФТПС СО РАН, содержащая тугоплавкий корунд  $Al_2O_3$ , состоит из стальной оболочки с шихтой из смеси порошков феррохрома и оксида алюминия следующего состава: углерод 0,47–0,51 масс. %; хром 2–4 масс. %; оксид алюминия 10–15 масс. %; железо – остальное [4]. Диаметр порошковой

проволоки равен 2,0 мм; исходный коэффициент заполнения составляет  $\sim 0,35$ –0,4. Износостойкие покрытия с тугоплавкими добавками корунда  $Al_2O_3$  нанесены на установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 (ООО «Вежа-1», г. Комсомольск-на-Амуре) при следующих технологических режимах электродуговой металлизации: ток дуги  $I = 280$ –300 А, дистанция напыления  $L = 130$  мм, напряжения дуги составляли  $U = 30, 35$  и 40 В.

Металлографический анализ структуры износостойких порошковых покрытий проведен на микроскопах «Neophot-32» и «Axio Observer D1m». Микроструктурные исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе TM3030 («Hitachi», Япония).

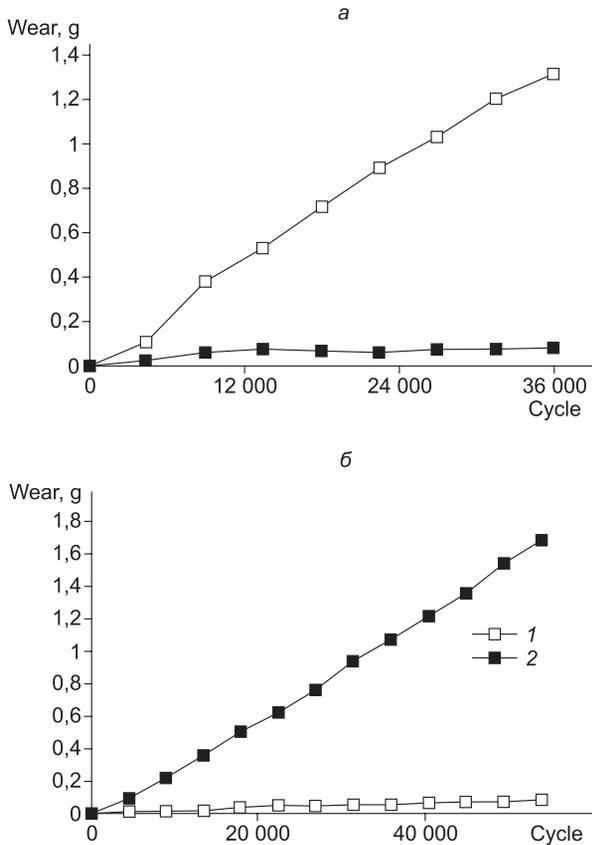
Для исследования изнашивания модифицированных покрытий были проведены испытания на износ на машине трения СМЦ-2 при следующих режимах: нагрузка 372,4 Н и 735 Н, частота вращения вала 5 об./с, трение сухое. На основе анализа работ и методик испытаний на износ выбрана схема трения «диск–колодка». По соответствующим размерам были изготовлены контртела из твердосплавного материала ВК6 и сталей марок ШХ15 и Ст6, которые значительно различаются по твердости (микротвердости покрытия  $\sim 7000$ –11000 МПа, сплава ВК6–9000 МПа и стальных контртел  $\sim 2300$  МПа соответственно).

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 образца с покрытием, затем данные усреднялись по всей поверхности трения.

Обработка экспериментальных результатов проведена в программной среде MathCad и в электронных таблицах Excel.

### **Экспериментальные исследования фрикционного взаимодействия порошковых покрытий с металлическими контртелами**

Процесс изнашивания материалов при трении скольжения определяется так называемой фактической площадью контакта, которая существенно зависит от текущих состояний профилей контактных поверхностей трения. Неоднородная случай-



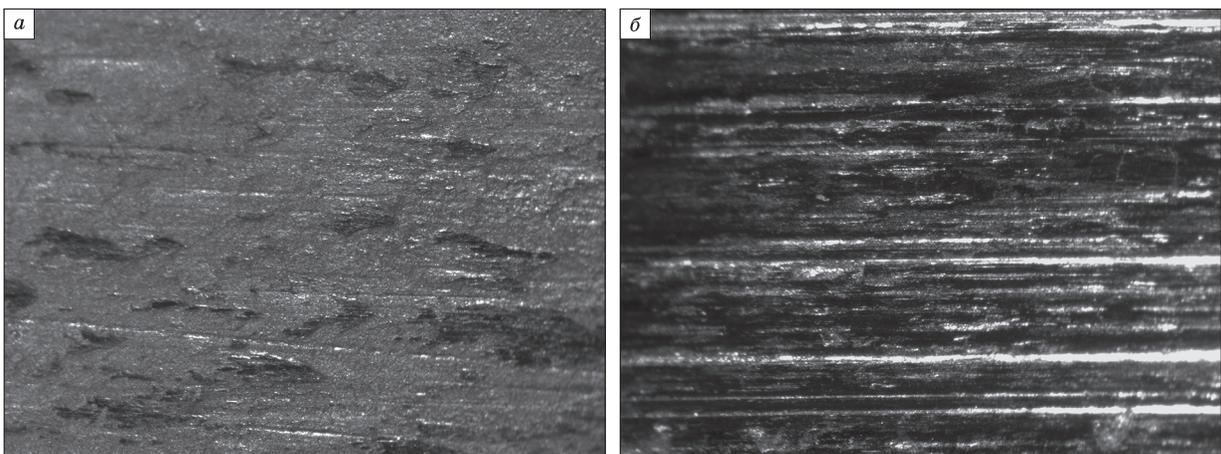
**Рис.1.** Массовый износ пары трения.  
*a:* 1 – покрытие с  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ , 2 – контртело ВК6; *б:* 1 – покрытие с  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ , 2 – контртело Ст6.  
**Fig. 1.** Mass wear of the friction pair.  
*a:* 1 – coating with  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ , 2 – counterbody ВК6; *б:* 1 – coating with  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ , 2 – counterbody Ст6.

ная структура порошкового покрытия, которая формируется при неравновесных условиях напыления, несомненно, влияет на формирование профилей контактных поверхностей трения.

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.

Для данного покрытия контртела были изготовлены из твердосплавного материала ВК6 (рис. 1, *a*) и из стали марки Ст6 (рис. 1, *б*). В кривых массового износа обеих поверхностей трения наблюдаются незначительные участки приработки, для которых интенсивность износа отличается нестабильностью. Далее, начиная с  $\approx 5000$ – $10\,000$  циклов, практически начинается режим установившегося износа, наблюдается равномерное повышение массового износа пары трения до конца испытаний (см. рис. 1). В целом наблюдается значительная разница массовых износов покрытия и контртела, обусловленная различной твердостью материалов покрытия и контртел из ВК6 и Ст6.

Металлографическим анализом контактных поверхностей трения установлено, что присутствуют основные механизмы повреждения контактных областей: упругое и пластическое отеснение, микрорезание, выкрашивание, отслоение, вырывы, которые являются характерными при трении скольжения материалов [7–10]. В основ-



**Рис. 2.** Поверхности трения износостойкого покрытия с модифицирующими добавками  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  (*a*) и контртела из Ст6 (*б*); увеличение  $20\times$ .

**Fig. 2.** Friction surfaces of a wear-resistant coating with modifying additives  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  (*a*) and a counterbody made of steel Ст6 (*б*); magnification  $20\times$ .

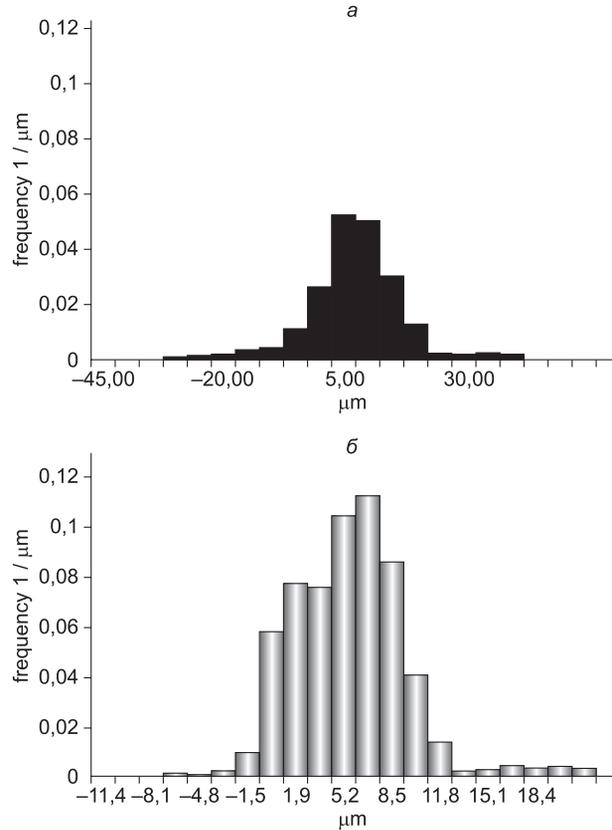
ном наблюдается известный механизм повреждения микрорезанием: частицы износа покрытия внедряются в стальной материал контртела и в последующем перемещаются по поверхности трения с образованием борозд, канавок и рисок различной ширины (рис. 2). Вследствие образования окалины поверхность трения стального контртела «разрыхляется», что также отражается на микрогеометрии поверхности (см. рис. 2, б).

Далее, в работе на основе профилометрических измерений выявлены закономерности формирования микрогеометрии поверхности износостойких модифицированных порошковых покрытий при трении скольжения с металлическими контртелами. На рис. 3 приведены экспериментальные характеристики микрогеометрии поверхности трения износостойких модифицированных покрытий с тугоплавкими добавками корунда  $Al_2O_3$  и с ультрадисперсными добавками шпинели  $CuAl_2O_4$ . Как установлено профилометрическими исследованиями и видно из графиков, распределение координат равновесного (при больших значениях пути трения) профиля поверхности трения покрытий в основном является одномодальным и характеризуется высокой симметрией (см. рис. 3).

### Статистическая модель фрикционного взаимодействия порошкового покрытия с металлическим контртелом

Как показывают исследования, профили контактных поверхностей трения имеют сложную форму и распределяются случайным образом. Процесс усталостного разрушения при трении скольжения также зависит от многочисленных случайных факторов, влияющих на образование частиц износа. Поэтому наравне с детерминистическим подходом на основе теории усталости, многие исследования для описания процесса изнашивания использовали различные статистические подходы [11–14].

В данной работе при построении статистической модели использована схема трения скольжения, принятая в усталостной теории износа [7–10]: рассматривается трение двух тел с номинально плоскими поверхностями. Одно из тел имеет порошковую истираемую поверхность трения; а износ и формирование профиля металлического контртела зависит от текущей микрогеометрии покрытия. Для построения математической модели приняты следующие вероятностные допущения:



**Рис. 3.** Гистограммы координат равновесного профиля поверхности трения износостойких покрытий.

*a* – 9000 циклов; покрытие с тугоплавкими добавками  $Al_2O_3$ , *б* – 36000 циклов, покрытие с ультрадисперсными добавками, содержание  $CuAl_2O_4$  0,2 %; нагрузка 735 Н, частота вращения вала 5 об/с.

**Fig. 3.** Histograms of coordinates of the equilibrium profile of the friction surface wear-resistant coatings.

*a* – 9000 cycles; coating with refractory additives  $Al_2O_3$ , *b* – 36000 cycles, coating with ultradispersed additives,  $CuAl_2O_4$  content 0.2 %; load 735 N, shaft speed 5 r/sec.

- Удаления частиц износа порошкового покрытия при трении скольжения являются независимыми событиями с постоянной вероятностью (испытания Бернулли с биномиальным распределением).

- Удаление частицы износа металлического контртела при трении скольжения является дополнительным событием к удалению частицы износа порошкового покрытия.

Для большей наглядности биномиальное распределение количества удаленных частиц покрытия и металлического контртела построим в общих координатах. Пусть где  $p_{\Pi}$ ,  $p_K$  вероятности удаления частицы износа из покрытия и контртела соответственно. Учитывая формулы для дополнительных событий  $p_{\Pi} + p_K = 1$ , общего

количества испытаний Бернулли  $l = k_{\Pi} + k_{\text{К}}$ , введем общие обозначения  $k = k_{\Pi} = k_{\text{К}}$ ,  $p = p_{\Pi} = p_{\text{К}}$ . Тогда можно получить функцию для биномиального распределения удаленных частиц в общем виде [15, 16]:

$$F(k, l) = \frac{(l)!}{k!(l-k)!} p^k (1-p)^{l-k}. \quad (1)$$

Данное выражение описывает удаление частиц износа покрытия и металлического контртела в зависимости от общего количества испытаний Бернулли (пути трения), для этого надо подставить  $p = p_{\Pi}$  или  $p = p_{\text{К}}$  – вероятности удаления частицы износа из покрытия или контртела соответственно.

Как известно, существует аналитическое выражение для числовой характеристики случайной величины  $k$ , распределенной по биномиальному закону (1) – математического ожидания  $\langle k(l) \rangle$ , которое зависит от общего количества испытаний Бернулли – пути трения [15,16]:

$$\langle k(l) \rangle = lp, \quad (2)$$

где также надо подставить  $p = p_{\Pi}$  или  $p = p_{\text{К}}$  – вероятности удаления частицы износа из покрытия или контртела соответственно.

Физический смысл данной числовой характеристики случайной величины можно определить использованием матричной двумерной вероятностно-геометрической модели макроструктуры порошкового покрытия. Авторами ранее было показано, что математическое ожидание  $\langle k(l) \rangle$  (2) соответствует линейному износу материала [17].

На рис. 4, а приведены математические ожидания (2) биномиального распределения удаленных частиц (линейного износа) покрытия и контртела в зависимости от пути трения. Как и следовало ожидать, на стадии установившегося изнашивания линейный износ описывается прямыми линиями. Наклон прямых линейного износа определяется значениями вероятностей  $p_{\Pi}$  и  $p_{\text{К}}$ . В данном случае имеем  $p_{\Pi} = 0,3$ ,  $p_{\text{К}} = 0,7$ , поэтому линейный износ менее износостойкого стального контртела проходит выше, чем у покрытия. Таким образом, графики массового износа на рис. 4, а соответствуют установленным уровням износостойкости покрытия и стального контртела: уровень износостойкости покрытия выше износостойкости стали Ст6 (см. рис. 1, б, рис. 4, а).

На рис. 4, б приведены полученные функции удаленных частиц (1) в зависимости от пути тре-

ния при вероятностях удаления частиц из покрытия и контртела также  $p_{\Pi} = 0,3$ ,  $p_{\text{К}} = 0,7$ . В начальной стадии изнашивания у функции  $F(k, l)$ , которая при  $l = 0$  равна 1, при возрастании пути трения увеличивается интервал ненулевых значений, одновременно происходит снижение ее максимума (см. рис. 4, б).

Смещение максимума вправо по оси  $k$  отражает систематическое возрастание случайной величины  $k$  – удаленных частиц износа материала. Как видно из графиков, при данном соотношении вероятностей удаления частиц смещение максимума функции контртела происходит более значительными темпами – износ стального контртела выше, чем у покрытия (см. рис. 1, б, рис. 4, а).

Как видно из графиков рис. 4, б, при одинаковых значениях пути трения распределения удаленных частиц из покрытия и металлического контртела по форме одинаковы, отличаются только смещением, т. е. математическим ожиданием. Соответствующие распределения удаленных частиц покрытия и контртела попарно идентичны (кривые 1 и 6, 2 и 7, 3 и 8, 4 и 9, 5 и 10, см. рис. 4, б). Это означает равенство среднеквадратических отклонений двух распределений покрытия и контртела при одинаковых значениях пути трения.

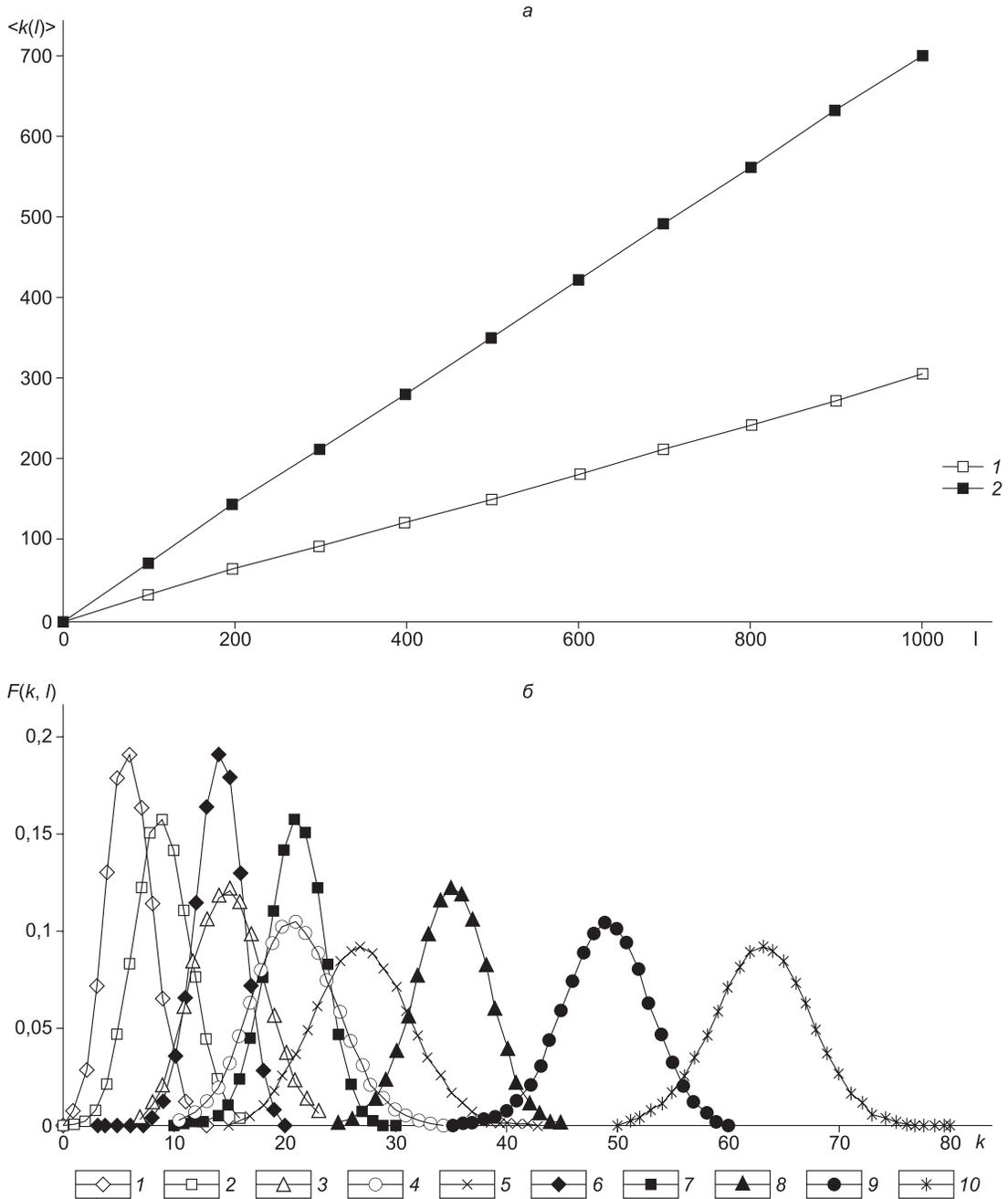
Также при больших значениях пути трения  $l \approx 90$  наблюдается формирование нормального распределения удаленных частиц износа покрытия и контртела в полном согласии с локальной теоремой Муавра–Лапласа (см. кривые 5 и 10 на рис. 4, б).

Следует отметить, что классические представления трибологии [7–14] основываются на общеизвестном положении, что координаты профиля равновесной поверхности трения описываются нормальным распределением, симметричным относительно математического ожидания (см. рис. 3). Поэтому разработанный статистический подход для описания установившегося изнашивания порошкового покрытия и металлического контртела на основе локальной теоремы Муавра–Лапласа дает статистическое обоснование данной гипотезы.

### Заключение

1. Металлографическим анализом и методом профилометрии изучены контактные поверхности при трении скольжения износостойких покрытий с модифицирующими добавками корун-

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ



**Рис. 4.** Массовый износ (а) и биномиальные распределения (б) удаленных частиц износа покрытия и контртела в зависимости от пути трения.

а: 1 – покрытие, 2 – контртелo. б: покрытие 1 –  $l = 10$ , 2 –  $l = 30$ , 3 –  $l = 50$ , 4 –  $l = 70$ , 5 –  $l = 90$ ; контртелo: 6 –  $l = 10$ , 7 –  $l = 30$ , 8 –  $l = 50$ , 9 –  $l = 70$ , 10 –  $l = 90$ ;  $p_{\Pi} = 0,3$ ,  $p_{\text{к}} = 0,7$ .

**Fig. 4.** Mass wear (а) and binomial distributions (б) of removed wear particles of the coating and counterbody, depending on the friction path;

а: 1 – coating, 2 – counterbody. б: coverage: 1 –  $l = 10$ , 2 –  $l = 30$ , 3 –  $l = 50$ , 4 –  $l = 70$ , 5 –  $l = 90$ ; counterbody: 6 –  $l = 10$ , 7 –  $l = 30$ , 8 –  $l = 50$ , 9 –  $l = 70$ , 10 –  $l = 90$ ;  $p_c = 0.3$ ,  $p_k = 0.7$ .

да  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и ультрадисперсных шпинелей  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  с контртелами из твердого сплава ВК6, сталей ШХ15 и Ст6. Установлены следую-

щие механизмы повреждения контактных зон поверхностей трения: упругое и пластическое отеснение, микрорезание, выкрашивание, от-

слоение, вырывы, которые являются характерными при трении скольжения материалов.

2. Показано, что изнашивание и формирование профилей контактных поверхностей зависят от соотношения износостойкости покрытия и контртела. Профилометрическими измерениями установлено, что распределение координат профиля равновесной поверхности покрытий с модифицирующими добавками корунда  $Al_2O_3$  и ультрадисперсных шпинелей  $CoAl_2O_4$  и  $CuAl_2O_4$  является одномодальным и характеризуется высокой симметрией.

3. Для статистического описания фрикционного взаимодействия порошкового покрытия с металлическим контртелом при установившемся изнашивании разработана теоретико-вероятностная модель на основе биномиального распределения удаленных частиц износа. События удаления частиц покрытия и контртела предполагаются дополнительными, общее количество испытаний Бернулли соответствует пути трения.

Разработанный теоретико-вероятностный подход на основе теоремы Муавра–Лапласа дает статистическое обоснование гипотезы нормальности распределения профилей равновесных поверхностей трения покрытия и контртела. На стадии установившегося изнашивания линейный износ описывается прямыми линиями, наклон которых определяется уровнями износостойкости покрытия и контртела.

### Литература

1. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
2. Бороненков В.Н., Коробов Ю.С. Основы дуговой металллизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург.: Изд-во Уральского университета, 2012. 268 с.
3. Архитов В.Е. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. М.: Красанд, 2017. 239 с.
4. Патент 93019989/02 Российская Федерация, Порошковая проволока для получения покрытий; заявл. 14.04.1993; опубл. 20.11.1995, Бюл. № 32. 3 с.
5. Патент 2040570 Российская Федерация, МПК С22С19/05, С23С4/06. Порошковый материал для га-

зотермического напыления / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Виноградов А.В., Стафецкий Л.П., Циелен У.А., Смилга А.А., Лобзов С.Н. // заявитель и патентообладатель Ин-т физико-техн. проблем Севера СО РАН; заявл. 06.07.92; опубл. 25.07.95.

6. Патент 2042728 Российская Федерация, МПК С22С19/05, С23С4/06. Порошковый материал для газотермического напыления. / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Виноградов А.В., Стафецкий Л.П., Циелен У.А., Смилга А.А., Лобзов С.Н. // заявитель и патентообладатель Ин-т физико-техн. проблем Севера СО РАН; заявл. 06.05.93; опубл. 27.08.95.

7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

8. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1989. Т. 1. 400 с.

9. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2013. 352 с.

10. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.

11. Кордонский Х.Б., Харач Г.М., Артамоновский В.П., Непомнящий Е.Ф. Вероятностный анализ процесса изнашивания. М.: Наука, 1968. 56с.

12. Лининьш О.А., Рудзит Я.А. Расчет интенсивности изнашивания пар трения скольжения с применением случайных полей к описанию шероховатости // Трение и износ. 1991. Т. 12, № 4. С. 581–587.

13. Холодиков О.В., Калмыкова Т.Ф. Вероятностный подход к построению количественных критериев оценки состояний фрикционного контакта // Трение и износ. 1990. Т. 11, № 5. С. 921–925.

14. Горицкий Ю.А., Главатских С.Б., Бражникова Ю.С. Марковская модель взаимодействия шероховатых поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 2. С. 11–20.

15. Венцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.

16. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1965. 512 с.

17. Vinokurov G., Popov O. Statistical approaches to describe the macrostructure formation and wear of powder coatings and materials obtained by high-energy methods. Moscow: Academia Publishers, 2013. 160 p.

Поступила в редакцию 11.03.2021

Принята к публикации 12.05.2021

### Об авторах

ЛЕБЕДЕВ Дмитрий Иосифович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-4176-4711>, [uranhai@rambler.ru](mailto:uranhai@rambler.ru);

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия,  
<https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, [g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru](mailto:g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru).

*Информация для цитирования*

Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г. Исследование трения скольжения модифицированных износостойких порошковых покрытий с металлическими контртелами // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 2. С. 170–178. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-12>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-2-12

## Study of the sliding friction of modified wear resistant powder coatings with metal counterbodies

D.I. Lebedev\*, G.G. Vinokurov

*V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia*  
 \*[uranhai@rambler.ru](mailto:uranhai@rambler.ru)

**Abstract.** *Currently, high-energy technologies for applying wear-resistant powder coatings are widely used to strengthen and restore parts of equipment in repair production. Physical-mechanical properties and the structure of coatings significantly affect their performance in friction with the metal surfaces of metal counterbodies – parts of machines and mechanisms. Therefore, to assess the wear resistance of a friction pair, it is necessary to establish the effect of the structure and properties of powder coatings on the frictional interaction with the material of the counterbody. It is necessary to identify how the features of the properties and structure of the coating will manifest themselves in the processes of wear of both contact surfaces of friction. In this work, the method of metallographic analysis and profilometry was used to study the contact surfaces during sliding friction of wear-resistant coatings with modifying additives of corundum  $Al_2O_3$ , ultrafine spinels  $CoAl_2O_4$  and  $CuAl_2O_4$  with counterbodies made of various materials – hard VK6 alloy, ShKh15 and St6 steel. The main mechanisms of damage to the contact surfaces of friction have been established. It is shown that wear and the formation of the profiles of the contact surfaces depends on the ratio of the wear resistance of the coating and the counterbody. To describe the friction of a powder coating with a metal counterbody during steady-state wear, a statistical model has been developed on the basis of the binomial distribution of the removed wear particles of both contact surfaces.*

**Key words:** coating, counterbody, sliding friction, wear, profile, statistical modeling, binomial distribution.

### References

1. Kudinov V.V., Pekshev P.YU., Belashchenko V.Ye., Solonenko O.P., Safiullin V.A. Nanoseniye pokrytiy plazmoy. M.: Nauka, 1990. 408 p.
2. Boronenkov V.N., Korobov Yu.S. Osnovy dugovoy metallizatsii. Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti. Yekaterinburg.: Izdatel'stvo Ural'skogo uni-versiteta, 2012. 268 p.
3. Arkhipov V.Ye. Gazodinamicheskoye napyleniye. Struktura i svoystva po-krytiy. M.: Krasand, 2017. 239 p.
4. Patent 93019989/02 Rossiyskaya Federatsiya, Poroshkovaya provoloka dlya polucheniya pokrytiy; zayavl. 14.04.1993; opubl.20.11.1995, Byul. № 32. 3 p.
5. Patent 2040570 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C22C19/05, C23C4/06. Poroshkovyy material dlya gazotermicheskogo napyleniya / Bolotina N.P., Milokhin S.Ye., Larionov V.P., Vinogradov A.V., Stafetskiy L.P., Tsiyelen U.A., Smilga A.A., Lobzov S.N. // zayavitel' i patentoobladatel' In-t fiziko-tekhn. problem Severa SO RAN; zayavl. 06.07.92; opubl. 25.07.95.
6. Patent 2042728 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C22C19/05, C23C4/06. Poroshkovyy material dlya ga-

zotermicheskogo napyleniya / Bolotina N.P., Milokhin S.Ye., Larionov V.P., Vinogradov A.V., Stafetskiy L.P., Tsiyelen U.A., Smilga A.A., Lobzov S.N. // *zayavitel' i patentoobladatel' In-t fiziko-tekhn. problem Severa SO RAN*; zayavl. 06.05.93; opubl. 27.08.95.

7. *Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na treniye i iznos. M.: Mashinostroyeniye, 1977. 526 p.*

8. *Spravochnik po tribotekhnike / pod red. M. Kheb-dy, A.V. Chichinadze. M.: Mashinostroyeniye, 1989. Vol. 1. 400 p.*

9. *Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniy. M.: Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", 2013. 352 p.*

10. *Kombalov V.S. Vliyaniye sherokhovatosti tverdykh tel na treniye i iznos. M.: Nauka, 1974. 112 p.*

11. *Kordonskiy Kh.B., Kharach G.M., Artamonovskiy V.P., Nepomnyashchiy Ye.F. Veroyatnostnyy analiz protsessa iznashivaniya. M.: Nauka, 1968. 56 p.*

12. *Linin'sh O.A., Rudzit Ya.A. Raschet intensivnosti iznashivaniya par treniya skol'zheniya s primeneni- yem sluchaynykh poley k opisaniyu sherokhovato- sti // Treniye i iznos. 1991. Vol. 12, No. 4. P. 581–587.*

13. *Kholodilov O.V., Kalmykova T.F. Veroyatnostnyy podkhod k postroyeniyu kolichestvennykh kriteriyev ot- senki sostoyaniy friktsionnogo kontakta // Treniye i iznos. 1990. Vol. 11, No. 5. P. 921–925.*

14. *Goritskiy Yu.A., Glavatskikh S.B., Brazhniko- va Yu.S. Markovskaya model' vzaimodeystviya sherok- hovatykh poverkhnostey // Treniye i smazka v mashin- nakh i mekhanizmakh. 2014. No. 2. P. 11–20.*

15. *Ventsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey. M.: Nauka, 1964. 576 p.*

16. *Smirnov N.V., Dunin-Barkovskiy I.V. Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnich- eskikh prilozheniy. M.: Nauka, 1965. 512 p.*

17. *Vinokurov G., Popov O. Statistical pproaches to describe the macrostructure formation and wear of pow- der coatings and materials obtained by high-energy me- thods. Moscow: Academia Publishers, 2013. 160 p.*

#### *About the authors*

LEBEDEV Dmitriy Iosifovich, Cand. Sci. (Engineering), researcher, V.P. Larionov Institute of Physical- Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-4176-4711>, [uranhai@rambler.ru](mailto:uranhai@rambler.ru);

VINOKUROV Gennady Georgievich, Cand. Sci. (Engineering), leading researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, [g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru](mailto:g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru).

#### *Citation*

*Фамилия И.О.* Study of the sliding friction of modified wear resistant powder coatings with metal counter- bodies // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, Vol. 26, No. 2. P. 170–178. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-12>