

УДК 620.178.162:621.891

А.Я. ГРИГОРЬЕВ, д-р техн. наук

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, г. Гомель, Республика Беларусь

А.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

А.А. ГЛАЗУНОВА

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

М.Ю. ЦЕЛУЕВ, канд. техн. наук

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, г. Гомель, Республика Беларусь

АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДОКЕРАМИКИ ДЛЯ ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Приведены результаты исследований триботехнических свойств антифрикционных композиционных покрытий на основе оксидокерамики для прецизионных пар трения скольжения. Показана возможность создания при использовании многослойных покрытий в подшипниках скольжения качественно нового комплекса свойств, ориентированных на использование в прецизионных скоростных электрошпинделях.

Ключевые слова: антифрикционные многослойные композиционные покрытия, оксидокерамика, смазка, прецизионная точность, электрошпиндель

Введение. Пары трения скольжения широко применяются в промышленности, в особенности там, где требуется сочетание высокой жесткости и плавности работы для обеспечения прецизионной точности и наноразмерной шероховатости обрабатываемых поверхностей [1–20]. Как правило, в этих парах трения используются сплавы типа бронзы и спеченные материалы типа бронзо- или железграфит. Однако к особенностям их применения можно отнести ограниченные величины характеристики pV (p — контактное давление, V — скорость скольжения), что во многом обусловлено нагревом контактирующих поверхностей при взаимодействии, а также шаржирование относительно мягких рабочих поверхностей из приведенных выше материалов более твердыми частицами, попадающими в смазку из окружающей среды, и продуктами износа с последующим достаточно интенсивным изнашиванием ответной полированной поверхности, выполняемой зачастую из стали типа сталь ШХ15 и имеющей твердость 61–65 HRC и существенному снижению ресурса (с соответствующей потерей точности).

Ограниченные величины характеристик pV , в свою очередь, накладывают определенные ограничения на скорости скольжения и, как правило, на скорости резания, что не позволяет в полной мере использовать возможности, например, высокоскоростной лезвийной обработки инструментом с режущими пластинами из кубического нитрида бора. Износ контактирующих поверхностей ограничивает возможности использования пар трения скольжения в таких прецизионных системах, как прецизионные скоростные электрошпиндели, работающие с принудительным охлаждением до нормальной температуры.

Цель исследования — оценка возможностей создания многослойного композиционного материала для пары трения скольжения, свойства которого позволяли бы комплексно обеспечить возможность повышения скорости скольжения и износостойкости.

Методический подход к формированию композиционного материала. В основу методического подхода были положены следующие требования к многослойному композиционному материалу:

- основа композиционного материала должна иметь не уступающие бронзе коэффициенты теплопроводности при нормальной температуре и исключить схватываемость поверхностей при высоких скоростях скольжения;
- покрытие должно иметь твердость, исключающую возможность ее шаржирования твердыми частицами.

С учетом ранее проведенных исследований при создании многослойного композиционного материала в качестве базового материала приняты (рисунок 1):

- композиционный материал основы дюраль Д16 (см. рисунок 1, позиция 1), коэффициент теплопроводности которого при нормальной температуре близок к лучшим в части этого параметра маркам бронзы;
- формируемый анодно-катодной микродуговой обработкой на поверхности основы слой Al_2O_3 (см. рисунок 1, позиция 2) с твердостью 12–16 ГПа, имеющий толщину, обеспечивающую с одной стороны практически не снижающийся уровень отвода тепла из зоны контакта, с другой — исключающий внедрение твердых частиц в поверхность материала основы;

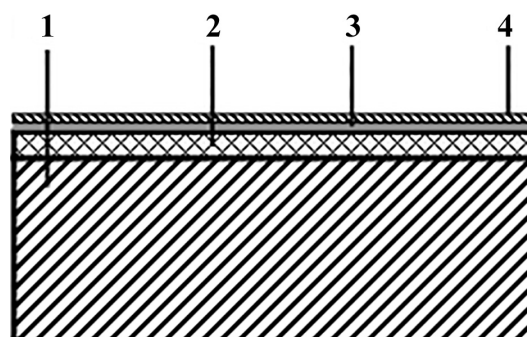


Рисунок 1 — Схема покрытия: 1 — материал основы; 2 — слой Al_2O_3 ; 3 — промежуточный слой; 4 — антифрикционный слой

- промежуточный слой (см. рисунок 1, позиция 3) толщиной $0,5 \pm 1$ мкм, обеспечивающий повышенную адгезию Al_2O_3 с последующим рабочим антифрикционным слоем;

- поверхностный рабочий антифрикционный слой из бронзового сплава, толщина которого позволяет с одной стороны сохранить развитую топографию поверхности для последующего удержания смазки, с другой — обеспечить требуемый ресурс и исключить возможность прямого взаимодействия контртела с оксидокерамикой.

В качестве объекта исследований принят образец в виде плоского диска, изготовленный из алюминиевого сплава Д16 толщиной 5 мм, обработка которого включала следующее:

- на образце анодно-катодной микродуговой обработкой формировался слой оксидокерамики (Al_2O_3);

- на слое оксидокерамики гибким инструментом (нанесение промежуточного и рабочего слоя гибким инструментом осуществлялось в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси М.А. Леванцевичем) наносился промежуточный слой из сплава на основе меди толщиной от 0,5 мкм до 1 мкм;

- осуществлялась лазерная обработка промежуточного слоя (лазерная обработка промежуточного слоя осуществлялась в БНТУ О.Г. Девойно) с режимами, обеспечивающими его оплавление без критического нагрева прилегающей к Al_2O_3 основы;

- осуществлялось плакирование поверхности образца гибким инструментом с образованием антифрикционного слоя (см. рисунок 1, позиция 4) из сплава на основе меди.

Проведение исследований. На рисунке 2 показан образец в виде плоского диска, изготовленный из алюминиевого сплава Д16 толщиной 5 мм.

В соответствии с приведенным выше методическим подходом на образце анодно-катодной микродуговой обработкой был сформирован слой оксидокерамики (Al_2O_3), затем на него гибким инструментом было нанесено промежуточное покрытие из сплава меди толщиной от 0,5 мкм до 1 мкм, после чего оно было оплавлено лазерной обработкой и плакировано гибким инструментом антифрикционным сплавом на основе меди.

До проведения исследования триботехнических свойств без смазки и с пластичным смазочным материалом КПСМ-2М (смазочный материал разработан и произведен в ИММС НАН Беларуси лабораторией 4.3 «Трибофизика смазочных материалов», заведующий лабораторией С.Ф. Ермаков) поверхность образца разбивалась на области, как показано на рисунке 2, где области 1–5 это поверхность образца без смазочного материала, а области 6 и 7 — с пластичным смазочным материалом.

Исследования триботехнических свойств осуществлялись на универсальном микротрибометре MTU-2K7 по схеме шарик–плоскость. После прохода 2000 циклов нагружения произведен осмотр дорожек качения с оценкой величины износа.

К основным особенностям MTU-2K7 можно отнести возможности проведения автоматизированных испытаний тонких покрытий при малых нагрузках, точного определения площади пятна контакта и реализации микроперемещений, а так же наличие обратной связи преобразователя перемещения и датчика положения образца. Приведенное выше позволяет уменьшить

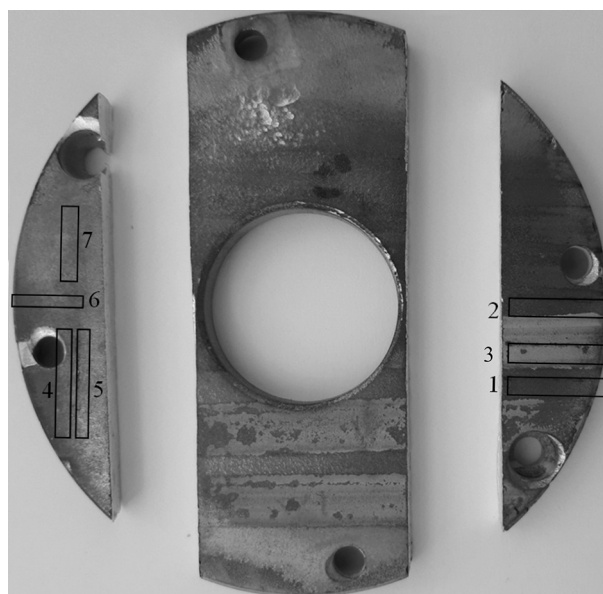


Рисунок 2 — Общий вид образца и расположение областей поверхности

влияние шумов и вибраций на коэффициент трения. Режимы испытаний приведены в таблице. При испытаниях нагрузка на индентор варьировалась в диапазоне $0,05 \pm 0,5$ Н, линейная скорость скольжения составляла 10 мм/с, ход индентора — 8 мм. Индентор был выполнен из стали ШХ15 с поверхностной твердостью 61 ± 65 HRC.

Полученные результаты и их обсуждение. При отсутствии смазки взаимодействие индентора с промежуточным и плакированным слоем (участки поверхности с 1-го по 4-й на рисунке 2, таблица) носило ярко выраженный фрикционный характер. Трение покоя отсутствовало. Коэффициент трения в течение 600 циклов возрастал от 0,175 до 803 (рисунок 3 а, кривая 1), что связано с приработкой и частичным разрушением промежуточного слоя, после чего величина коэффициента трения стабилизировалась на уровне $\sim 0,710$.

При завершении приработки до конца испытаний диаметр пятна износа составлял 0,46 мм. С учетом этого расчетная величина контактного давления в паре трения скольжения в этот период составляла $\sim 3,0$ МПа.

В других случаях, как показано на рисунке 3 б, возникло трение покоя, после чего коэффициент трения несколько снижался, а затем начинал вновь возрастать до величин, близких к 1. Это свидетельствует о разрушении промежуточного слоя как не оплавленного (участок 2), так и оплавленного лазерной обработкой (участок 3). Несколько большее число циклов фрикционного взаимодействия выдержал до разрушения плакированный рабочий антифрикционный слой участок 4. Вместе с тем и этот участок при взаимодействии без смазки разрушился.

При наличии смазки развитая топография поверхностного слоя позволила сохранить смазочный слой и обеспечить приемлемый достаточно стабильный коэффициент трения (рисунок 4). Учитывая свойство консистентности смазки, это косвенно характеризует стабильность тепловой нагруженности. При этом вследствие специфических служебных свойств смазочного материала его величина при более высоких давлениях (см. рисунок 4 б) оказалась несколько ниже по сравне-

Таблица — Режимы испытаний образца на трение

| № области поверхности образца | Нагрузка на индентор, Н | Скорость скольжения, мм/с | Односторонний ход индентора, мм | Примечание |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 0,5 | 10 | 8 | участок поверхности с промежуточным антифрикционным слоем |
| 2 | 0,1 | 10 | 8 | участок поверхности с промежуточным антифрикционным слоем |
| 3 | 0,1 | 10 | 8 | участок поверхности с промежуточным антифрикционным слоем после лазерной обработки |
| 4 | 0,1 | 10 | 8 | участок поверхности с плакированным рабочим слоем без смазки |
| 5 | 0,05 | 10 | 8 | участок поверхности с плакированным рабочим слоем без смазки |
| 6 | 0,1 | 10 | 8 | участок поверхности с плакированным рабочим слоем, покрытым смазочным материалом КПСМ-2М |
| 7 | 0,5 | 10 | 8 | участок поверхности с плакированным рабочим слоем, покрытый смазочным материалом КПСМ-2М |

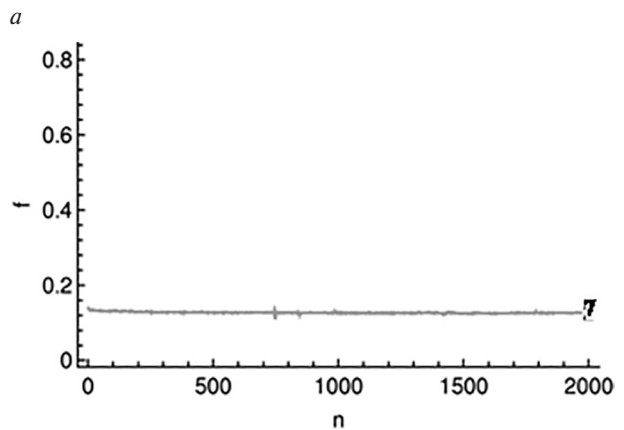
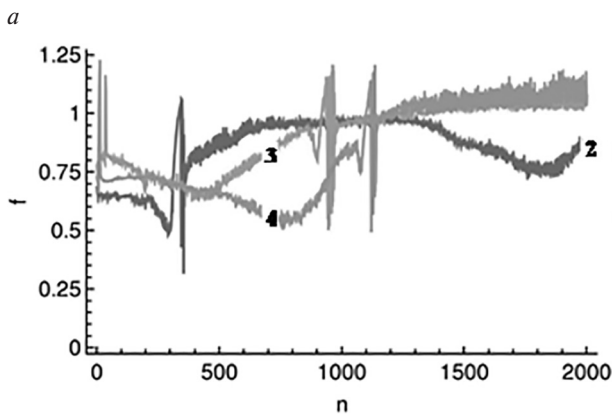
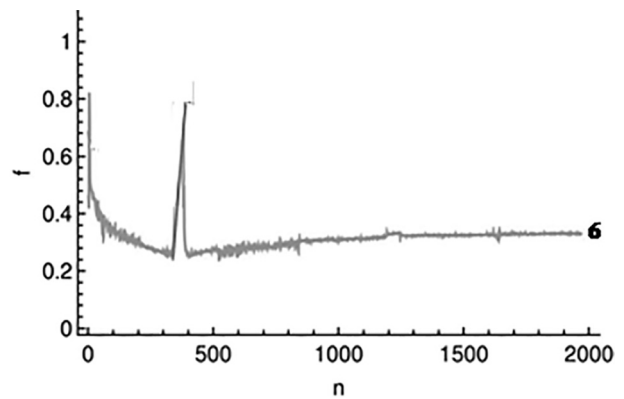
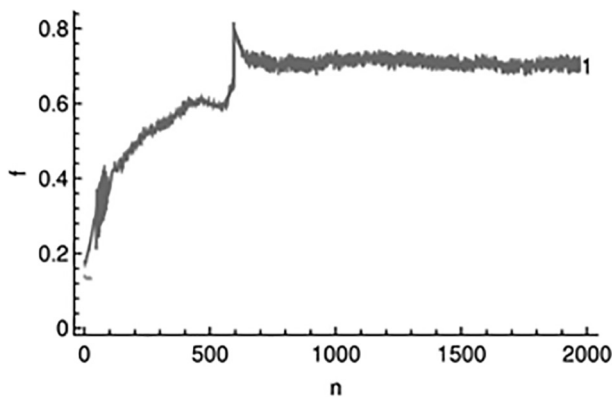


Рисунок 3 — Зависимость коэффициента трения от количества циклов испытания при отсутствии смазки: 1 — область 1 поверхности образца (а); 2 — область 2 поверхности образца (б); 3 — область 3 поверхности образца; 4 — область 4 поверхности образца

Рисунок 4 — Зависимость коэффициента трения от количества циклов испытания при смазке контактирующих поверхностей: 1 — область 6 поверхности образца (а); 7 — область 7 поверхности образца (б)

нию с коэффициентом трения при меньшем давлении (см. рисунок 4 а) вероятно из-за некоторого увеличения температуры в зоне контакта и снижения вязкости смазочного материала.

Основные выводы и результаты. Результаты исследований подтвердили возможность создания многослойного композиционного материала, основа которого вы-

полнена из сплава алюминия с не уступающим бронзе коэффициентом теплопроводности при нормальной температуре, который при принудительном охлаждении и оптимальных режимах смазывания исключает схватываемость поверхностей трения при высоких скоростях скольжения, обеспечивает требуемую твердость и жесткость с исключением шаржирования поверхности

трения твердыми частицами. Одним из перспективных направлений использования такого композиционного материала могут быть опоры скольжения скоростных прецизионных электрошпинделей, имеющих высокую жесткость и плавность функционирования.

Список литературы

1. Композиционное покрытие на деталях из алюминиевых сплавов и способ его изготовления: пат. 10319 Респ. Беларусь / В.Л. Басинюк, В.А. Кукарко, А.В. Коломейченко, Е.И. Мардосевич, А.В. Титов; дата публ.: 28.02.2007.
2. Калиниченко, А.С. Композиционные материалы для пар трения скольжения мехатронных систем / А.С. Калиниченко, Е.И. Мардосевич, А.А. Глазунова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2016. — Вып. 5. — С. 386–389.
3. Петров, Н.И. Пути повышения надежности и ресурса подшипниковых опор роторов современных газотурбинных двигателей и редукторов / Н.И. Петров, Ю.Л. Лаврентьев // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та. — 2015. — Т. 14, № 3, ч. 1. — С. 228–236.
4. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников: материал, технология изготовления и механическая обработка, расчеты и испытания / Т.Д. Каримбаев [и др.] // Композиты и наноструктуры. — 2010. — № 2. — С. 12–27.
5. Доценко, В.Н. Вопросы исследования керамических и гибридных подшипников качения и их применение в авиационных двигателях / В.Н. Доценко, С.В. Никитин // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 8(55). — С. 138–144.
6. Загашвили, Ю.В. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами / Ю.В. Загашвили, В.И. Кулик, А.С. Орыщенко // Инновации. — 2007. — № 12(110). — С. 94–98.
7. Барманов, И.С. Исследование осевых динамических характеристик подшипника № 126126 с керамическими шариками / И.С. Барманов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. — 2014. — № 2. — С. 194–195.
8. Оптимизация технологии термодиффузионной обработки керамических порошков для плазменного напыления внешних колец подшипников электроустановок / О.Г. Девойно [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2015. — № 1(51). — С. 48–55.
9. Исаева, Е.А. Создание компенсаторов термических напряжений для перспективного авиационного ГТД методами порошковой металлургии / Е.А. Исаева, С.А. Перевоин, Д.А. Исаев // Изв. МГТУ МАМИ. — 2013. — Т. 2, № 2(16). — С. 331–336.
10. Панов, А.Д. Трибологические особенности конструкционных керамических материалов в подшипниках скольжения / А.Д. Панов, И.М. Панова // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» — 2015. — Т. 7, № 1. — С. 1–9. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru78TVN115>.
11. Сердобинцев, Ю.П. Обзор и анализ применения керамических материалов в различных отраслях промышленности / Ю.П. Сердобинцев, М.Ю. Харьков, Наззал Анан Се // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — №1. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12085>.
12. Воловик, А.П. Высокоскоростные подшипники качения генератора для газотурбинных установок / А.П. Воловик, М.Е. Коварский, В.А. Зайцев // Вопросы электромеханики. — 2014. — Т. 139. — С. 1–6.
13. Рекламные материалы ННЦ ХФТИ. — Режим доступа: <http://carbon.com.ua/produkciya/vtulki/>.
14. Чарнко, Д.В. Профильные соединения валов и втулок в машиностроении / Д.В. Чарнко, А.И. Тимченко // Вестн. машиностроения. — 1981. — № 1. — С. 33–35.
15. Данилов, В.А. Анализ схем ротационного точения некруглых цилиндрических поверхностей / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. — 2006. — № 10. — С. 146–157.
16. Данилов, В.А. Конструкторско-технологическое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в трансмиссиях машин / В.А. Данилов, А.И. Костюченко, С.В. Спиридонов // Машиностроение: сб. науч. тр.; под ред. И.П. Филонова. — Минск: Технопринт, 2001. — Вып. 17. — С. 209–214.
17. Данилов, В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. — 2003. — № 1. — С. 61–71.
18. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. — Минск: Выш. шк., 1995. — 264 с.
19. Данилов, В.А. Оборудование и инструмент для обработки некруглых валов / В.А. Данилов, А.И. Костюченко, А.Н. Селицкий // Материалы, технология и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф.: в 3-х т. / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. — Новополоцк: ПГУ, 2007. — Т. II. — С. 63–66.
20. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем формообразования поверхностей с синусоидальным профилем / В.А. Данилов, А.И. Костюченко, А.Н. Селицкий // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. — 2008. — № 2. — С. 30–37.

Grigoriev A.Ya., Kalinichenko A.C., Hlazunova H.A., Cheluev M.U.

Antifriction composite coatings based on oxide ceramics for friction pairs

The results of studies of tribotechnical properties of antifriction composite coatings based on oxide ceramics for precision sliding friction pairs are presented. The possibility of creating a new set of properties, when multilayer coatings are used in sliding bearings, for use in precision high-speed electrospindles, is shown.

Поступил в редакцию 31.08.2017.