

УДК 621.891

ПОВЫШЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МДО НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

И. И. ЗЛОТНИКОВ^{а+}, В. М. ШАПОВАЛОВ^б

Рассмотрена проблема повышения антифрикционных свойств оксидно-керамических покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования на поверхности алюминиевых сплавов. Данная задача была решена путём пропитки оксидно-керамических покрытий растворами полимеров (олигомеров), которые при дальнейшей термообработке и полимеризации придают оксидно-керамическим покрытиям антифрикционные свойства. Проведены лабораторные испытания триботехнических свойств полученных полимерно-керамических покрытий. Рассмотрены области возможного практического применения полученных полимерно-керамических покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминиевые сплавы, оксидно-керамические покрытия, антифрикционные свойства

Введение. Применение микродугового оксидирования (МДО) для создания износостойких покрытий на деталях из алюминия и его сплавах является эффективным методом повышения ресурса работы различных узлов трения, в которых применяются алюминиевые сплавы: поршней двигателей внутреннего сгорания, плунжеров и торцевых уплотнений насосов, запорной арматуры и др. Согласно современным представлениям [1—4] при МДО алюминия и его сплавов в щелочно-силикатных растворах на поверхности анода формируется оксидно-керамическое покрытие, прочно сцепленный с металлической основой и состоящее преимущественно из кристаллического оксида алюминия ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) во внутренних слоях покрытия и муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) во внешних. Такие покрытия обладают повышенной твёрдостью, износостойкостью, высокими противокоррозионными свойствами, что и делает такие покрытия перспективными для использования в узлах трения. Кроме того, МДО-покрытия сохраняют свои свойства при температурах от 77 до 1000 К, в вакууме и при воздействии различных агрессивных сред. Однако общим недостатком оксидно-керамических покрытий при их использовании в узлах трения является высокий коэффициент трения. Это связано с тем, что основные компоненты МДО-покрытий на алюминии и его сплавах — оксиды алюминия в различных модификациях являются абразивными материалами.

Из литературных источников известны попытки снижения коэффициента трения МДО-покрытий путём введения в керамическую матрицу в процессе её формирования различных антифрикционных частиц (графит, ультрадисперсный углерод, фуллерены и др.) [5], нанесением на поверхность готового оксидно-керамического слоя тонкого антифрикционного покрытия, например, медного [6] или полимерного [7], а также пропиткой керамического покрытия смазочными маслами [8]. Однако такие покрытия пока не нашли достаточно широкого промышленного применения. Это связано с тем, что микрочастицы антифрикционных веществ плохо внедряются в оксидно-керамическую матрицу в процессе её формирования, а иногда вообще разрушаются в

а Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Беларусь, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48.

б Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: z_ai@tut.by.

высокотемпературных микроплазменных разрядах, а антифрикционные покрытия, наносимые на оксидно-керамический слой, часто имеют плохую адгезию к керамической подложке, отслаиваются в процессе эксплуатации или быстро изнашиваются.

Цель работы — изучение возможности повышения антифрикционных свойств оксидно-керамических покрытий, полученных методом МДО на поверхности алюминиевых сплавов путём их пропитки растворами полимеров или олигомеров, которые при дальнейшей термообработке и полимеризации могут придавать МДО-покрытиям выраженные антифрикционные свойства, а также уплотнять и упрочнять их за счет заполнения пор и микротрещин.

Материалы и методы исследований. На основе литературных данных [1—4] и результатах ранее проведённых исследований [9], в качестве базового электролита использовали раствор, содержащий натриевое жидкое стекло (ЖС) в количестве 30 г/л и гидроксид калия (КОН) в количестве 3,5 г/л. В качестве модификатора, повышающего адгезию получаемых покрытий к полимерным субстратам, использовали бихромат натрия ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), который вводили в базовый электролит в количестве 0,1 г/л. Процесс МДО образцов из алюминиевых сплавов проводили в симметричном анодно-катодном режиме с использованием переменного тока частотой 50 Гц. Использование для проведения оксидирования синусоидального напряжения с частотой 50 Гц позволяет применять обычное промышленное напряжение, не прибегая к преобразователям частоты, что значительно упрощает процесс. Плотность тока в течение всего времени оксидирования поддерживали равной 5 А/дм², напряжение изменяли в пределах от 0 до 250 В. Одним электродом служили обрабатываемые образцы, вторым — сосуд, изготовленный из нержавеющей стали. Покрытия наносили на алюминиевую фольгу марки АД1 толщиной 50 мкм и шириной 10 мм. После формирования оксидно-керамических покрытий образцы промывали проточной водой и термообработывали при температуре 140—150 °С в атмосфере воздуха в течение 10-15 мин. Затем полученные образцы пропитывали путём окунания в следующих составах:

- 1) 10%-ный спиртовой раствор фенолоформальдегидной смолы марки СФ-381;
- 2) 1%-ный раствор фторопласта марки Ф-32 в бутиловом эфире уксусной кислоты;

После пропитки образцы сушили при температуре 60—70 °С до полного удаления растворителя и термообработывали при температурах 170—180 °С для образцов пропитанных фенолоформальдегидной смолой и 280—290 °С для образцов пропитанных фторопластом Ф-32. Процесс пропитка-сушка-термообработка повторяли 2 раза.

Для определения триботехнических свойств получаемых покрытий была применена специально изготовленная лабораторная установка, схема узла трения которой приведена на рис. 1. Согласно данной методике алюминиевая фольга с исследуемым покрытием скользит с заданной нагрузкой и скоростью по вращающемуся ролику диаметром 30 мм изготовленному из сплава Д16 с керамическим покрытием, также нанесённым методом МДО. Покрытие на ролик наносили из базового электролита при тех же токовых режимах, что и на фольгу и полировали до шероховатости $R_a \leq 0,40$ мкм. Угол охвата ролика фольгой во всех опытах составлял 90°. Силу натяжения T_1 задавали с помощью набора грузов 4, прикрепленных к нижнему краю фольги. Силу натяжения T_2 измеряли с помощью динамометра 3. Скорость скольжения фольги по ролику во всех экспериментах составляла 0,1 м/с (частота вращения ролика — 1,1 об/с).

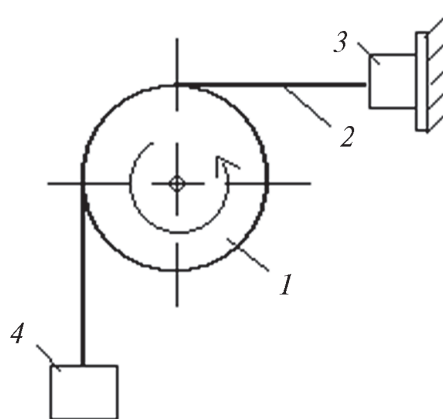


Рис. 1. Схема установки: 1 — вращающийся ролик с керамическим покрытием; 2 — алюминиевая фольга с исследуемым покрытием; 3 — динамометр; 4 — груз

Коэффициент трения f вычисляли по формуле Эйлера: $T_2 = T_1 e^{f\alpha}$, где α — угол обхвата, T_1 — сила натяжения в сбегавшей ветви, T_2 — сила натяжения в набегавшей ветви. В нашем случае $\alpha = \pi/2$, поэтому $f = \frac{2}{\pi} \ln \frac{T_2}{T_1}$. Температуру в зоне трения оценивали по температуре на внешней стороне фольги, которую измеряли бесконтактным способом с помощью пирометра “Орион 1100”.

Результаты исследований и их обсуждение. Перед проведением измерений покрытия, нанесённые на фольгу прирабатывали при нагрузке 1 Н до стабилизации величины коэффициента трения (15–20 мин). Были проведены измерения среднего коэффициента трения, и установившейся температуры в зоне трения при различных нагрузках. Результаты лабораторных испытаний исследуемых покрытий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства покрытий

Характеристика	Без пропитки	Образец 1 (смола СФ-381)	Образец 2 (фторопласт)
Коэффициент трения при нагрузке:	0,5 Н	0,56	0,26
	1,0 Н	0,65	0,25
Температура в зоне трения, °С, при нагрузке:	0,5 Н	65	45
	1,0 Н	75	46

Как следует из представленных в табл. 1 данных, после пропитки покрытий полимерами их коэффициент трения и температура в зоне трения значительно снижаются. Наиболее низкий коэффициент трения имеет покрытие, пропитанное фторопластом. Соответственно и температура в зоне трения у этого покрытия заметно ниже, чем у остальных образцов. Однако покрытие, пропитанное фенолоформальдегидной смолой, имеет более стабильный коэффициент трения (и температуру в зоне трения) — его коэффициент трения и температура в зоне трения почти не изменяются при увеличении нагрузки в два раза.

Далее были проведены исследования, по оценке ресурса работы полимерно-керамических покрытий. В табл. 2 приведены результаты измерения коэффициента трения в зависимости от пути трения при скорости скольжения 0,1 м/с и нагрузке 1 Н.

Таблица 2. Зависимость коэффициента трения покрытий от пути трения

Образец	Путь трения, м					
	100 (в конце приработки)	460	720	1080	1440	1800
Без пропитки	0,65	0,62–0,68				
Образец 1	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25	0,24
Образец 2	0,10	0,10	0,12	0,16	0,22	0,23

Проведённые эксперименты показали, что при увеличении пути трения коэффициент трения чистого оксидно-керамического покрытия остаётся в среднем на уровне начального, хотя и испытывает колебания в пределах около 10%. Тенденции к повышению или понижению коэффициента трения в процессе работы данного покрытия не замечено. Коэффициент трения покрытия, пропитанного фторопластом уже после 700 м пути трения, начинает значительно повышаться, что объясняется истиранием слоя полимера и обнажением керамической поверхности. К концу испытаний (путь трения 1800 м) покрытие, пропитанное фторопластом, практически полностью утрачивает свои первоначальные преимущества по сравнению с покрытием, пропитанным фенолоформальдегидной смолой. Коэффициент трения покрытия, пропитанного фенолоформальдегидной смолой, остаётся стабильным в течение всего испытания.

На рис. 2, *а* приведён характерный вид поверхности получаемых оксидно-керамических покрытий перед их пропиткой; хорошо просматривается мелкозернистая, высокопористая структура материала. На рис. 2, *б* показан вид того же керамического покрытия, пропитанного фенолоформальдегидной смолой, по описанной выше технологии, поры и микротрещины покрытия полностью заполнены смолой с образованием сплошной полимерной плёнки на поверхности. На рис. 2, *в* приведён вид керамического покрытия, пропитанного фенолоформальдегидной смолой после 5 часов работы (путь трения около 1800 м) узла трения, заметно сглаживание поверхности вдоль направления скольжения.

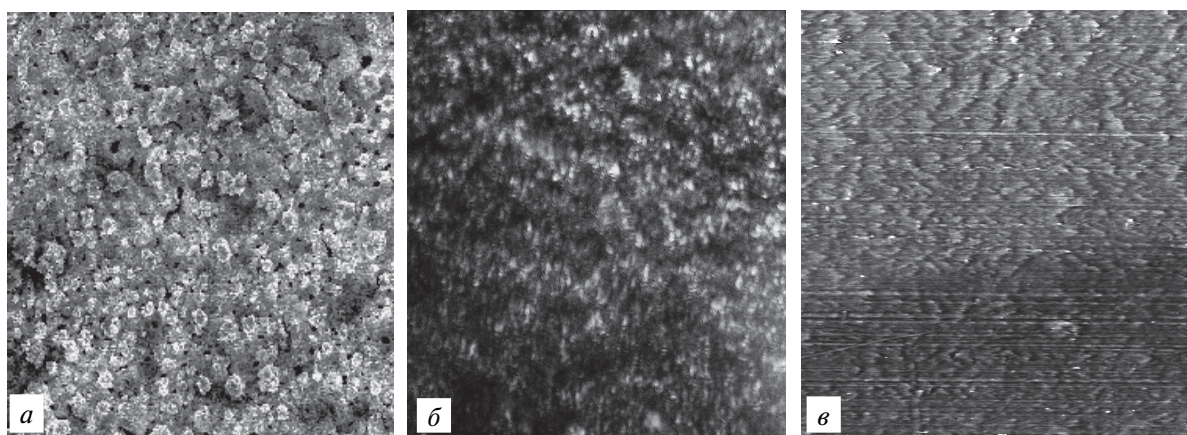


Рис. 2. Микрофотографии поверхности покрытия, $\times 300$: *а* — исходное керамическое покрытие, *б* — после пропитки фенолоформальдегидной смолой, *в* — после трения

Основываясь на полученных результатах, можно рекомендовать изученные покрытия для различных областей применения: покрытия с фторопластом — только для низконагруженных низкоскоростных узлов трения, применение смазки в которых недопустимо. Покрытия с фенолоформальдегидной смолой являются более универсальными, обеспечивающими длительный ресурс работы и особенно высокую эффективность будут иметь в узлах трения, работающих со смазкой.

Разработанная технология получения антифрикционных полимерно-керамических покрытий (с пропиткой фенолоформальдегидной смолой) была апробирована для изготовления опытных образцов роликов-нитеводителей, которые изготавливали из алюминиевого сплава Д16 с последующим нанесением покрытия, взамен керамических. Проведённые испытания показали высокий ресурс работы такой нитепроводящей фурнитуры при скольжении нитей из лавсанового и полиэфирного волокон. Присутствующий на нитях замасливатель переносится на контртело, что дополнительно снижает коэффициент трения и износ рабочей поверхности.

Заключение. Таким образом, проведённые исследования показали, что модифицирование оксидно-керамических покрытий, получаемых методом МДО на поверхности алюминиевых сплавов, растворами полимеров или олигомеров позволяет направленно управлять фрикционными свойствами получаемых покрытий. Это существенно расширяет области применения алюминиевых сплавов, в качестве конструкционных материалов для изготовления деталей узлов трения различного назначения. Изученные керамические покрытия могут быть рекомендованы в первую очередь для упрочнения рабочих поверхностей деталей нитепроводящей фурнитуры, которые в этом случае могут изготавливаться из алюминиевых сплавов, взамен дорогостоящих керамических.

Обозначения

R_a — шероховатость поверхности ролика; T — сила натяжения фольги; f — коэффициент трения; α — угол охвата ролика фольгой

Литература

1. Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин Б. В. и др. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). — М.: ЭКОМЕТ. — 2005
2. Парфенов Е. В., Невьянцева Р. Р., Горбатков С. А., Ерохин А. Л. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление. — М: Машиностроение. — 2014
3. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов в 2 т. / Под ред. И. В. Суминова. — М.: Техносфера. — 2011 (2)
4. Гнеденков С. В., Хрисанфова О. А., Завидная А. Г. Плазменное электролитическое оксидирование металлов и сплавов в тартратсодержащих растворах. — Владивосток: Дальнаука. — 2008
5. Витязь П. А., Комаров А. И., Комарова В. И., Кузнецова Т. А. Особенности формирования износостойких слоев на поверхности модифицированного фуллеренами МДО-покрытия при трении // Трение и износ. — 2011 (32), № 4, 313—325
6. Басинюк В. Л., Коломейченко А. В., Кукареко В. А., Мардосевич Е. И., Титов Н. В. Способ фрикционно-механического формирования антифрикционных покрытий на Al_2O_3 // Трение и износ. — 2005 (26), № 5, 530—538
7. Мальшев В. Н., Гантимиров Б. М., Вольхин А. М., Ким С. Л. Повышение антифрикционных свойств износостойких МДО-покрытий // Химическая физика и мезоскопия. — 2013 (15), № 2, 254—261
8. Способ восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов: пат. 2389593 РФ, МПК В 23Р 6/00, С 25D 11/18. Бюл. изобр. — 2010, № 14 / А. В. Коломейченко, Н. В. Титов, В. Н. Логачев, Р. В. Гладков
9. Способ получения светопоглощающего покрытия на поверхности алюминия или его сплавов: пат. 19849 РБ, МПК С 25D 11/06. Афіцыйны бюл. — 2016, № 1 / И. И. Злотников, С. В. Пискунов

Поступила в редакцию 19.02.19.

После доработки 10.07.19.

Принята к публикации 11.07.19.

Zlotnikov I. I. and Shapovalov V. M. **Improvement of Antifriction Properties of Ceramic Coatings Obtained by MDO Method on Aluminium Alloys.**

The problem of increasing antifriction properties of oxide-ceramic coatings obtained by micro-arc oxidation on the surface of aluminium alloys is considered. This problem was solved by impregnation of oxide-ceramic coatings with solutions of polymers (oligomers), which during further heat treatment and polymerization give oxide-ceramic coatings antifriction properties. Laboratory tests of tribotechnical properties of obtained polymer-ceramic coatings were carried out. Areas of possible practical application of the obtained polymer-ceramic coatings are considered.

Keywords: micro arc oxidation, aluminium alloys, oxide-ceramic coatings, antifriction properties.