

## ПРИМЕНЕНИЕ ОКСИДНО-КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С НАНЕСЕННЫМ МЕДНЫМ СЛОЕМ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Р.Л. Саханов<sup>1</sup>, В.А. Султанов<sup>2</sup>, М.М. Махмутов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань;*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань;*

### **Аннотация**

В данной работе разработана технология нанесения на поверхность оксидно-керамического покрытия, сформированного МДО, антифрикционного медного слоя. При ее реализации медный слой на поверхность покрытия наносится с использованием тонкой пластины, закреплённой на нажимном элементе устройства для натирания и теплоизолированной с обеих сторон. Износостойкость соединений, содержащих детали с оксидно-керамическими покрытиями и нанесенным медным слоем, увеличивается в среднем в 2,5...3,0 раза.

**Ключевые слова:** микродуговое оксидирование, оксидно-керамическое покрытие, медный слой, скорость скольжения, фрикционно-механическое натирание.

В настоящее время для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов все шире используются оксидно-керамические покрытия, формируемые микродуговым оксидированием (МДО). Эти покрытия имеют высокие твердость, износостойкость и прочность сцепления с основой [1]. Однако при граничной смазке или взаимодействии без смазочного материала, что бывает как при приработке, так и при эксплуатации деталей в составе подвижных соединений, оксидно-керамические покрытия обладают высокими фрикционными свойствами. Это приводит к тому, что деталь с покрытием вызывает повышенный износ ответной, зачастую дорогостоящей, детали соединения при их взаимодействии, за счёт чего происходит снижение износостойкости соединения в целом. Кроме этого, в зоне фрикционного контакта взаимодействующих поверхностей происходит значительное тепловыделение, в ряде случаев приводящее к разрушению покрытия из-за локализованного нагрева в зонах сквозных пор и изменения прочностных свойств его металлической основы.

Для устранения указанных недостатков нами разработана технология нанесения на поверхность оксидно-керамического покрытия, сформированного МДО, антифрикционного слоя, материалом которого служит технически чистая медь. Выбор меди обусловлен тем, что она способствует проявлению и наиболее полной реализации эффекта избирательного переноса (ИП). В этом случае ответная деталь подвижного соединения также покрывается тончайшими плёнками меди, сила трения уменьшается в несколько раз, а площадь фактического контакта взаимодействующих поверхностей значительно увеличивается, что приводит к практически безизносной работе соединения.

В основу разработанной технологии положен способ фрикционно-механического нанесения антифрикционных слоёв, разработанный группой российских ученых под руководством Д.Н. Гаркунова и И.В. Крагельского. В нём используется эффект ИП и отсутствует ударное взаимодействие инструмента с обрабатываемой деталью, что особенно важно для покрытий, сформированных МДО, из-за их высокой хрупкости. Способ нашёл практическое применение в финишной антифрикционной безабразивной обработке (ФАБО) деталей из сталей и чугунов, работающих в различных фрикционных соединениях, например, гильз цилиндров и шеек коленчатых валов автотракторных двигателей. При его реализации создание антифрикционного слоя происходит в результате механического, химического, электрического и трибологического взаимодействия трущихся поверхностей подвижных соединений, сопровождающегося тепловыми и физико-химическими процессами [2].

Однако оксидно-керамические покрытия, сформированные МДО, не выдерживают значительные контактные давления, имеющие место при ФАБО, и при их приложении разрушаются. При уменьшении контактного давления до уровня, исключающего разрушение покрытия, на его поверхности образуются лишь фрагментарные участки меди, однако сплошной медный слой хорошего качества в этом случае отсутствует.

Было выдвинуто предположение о том, что получение сплошного медного слоя на поверхности покрытия, сформированного МДО, при контактном давлении, не вызывающем разрушение покрытия, возможно за счёт локализованного нагрева зоны фрикционного взаимодействия покрытия и натирающего элемента из меди до температуры, при которой происходит рекристаллизация меди и перенесение её на поверхность покрытия. Локализованный нагрев зоны фрикционного взаимодействия возможен при использовании в качестве натирающего элемента тонкой пластины, закреплённой на нажимном элементе устройства для натирания и теплоизолированной с обеих сторон. В качестве теплоизолирующего материала могут быть использованы сами оксидные покрытия, имеющие коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,425$  Вт/мК и удельную теплоёмкость  $c_{п} = 800$  Дж/кг $^{\circ}$  К [3]. Схема фрикционно-механического нанесения медного слоя при взаимодействии натирающей пластины с оксидно-керамическим покрытием, сформированным МДО, при реализации этого подхода показана на рис. 1.

Анализ литературных данных [4, 5, 6, 7, 8] и собственные предварительные исследования позволили установить, что при нанесении медного слоя контактное давление  $p_k$  не должно превышать 10...15 МПа, так как при его дальнейшем увеличении может произойти разрушение покрытия. Скорость скольжения  $v_{СК}$  не должна превышать 0,5 м/с, так как при

дальнейшем её увеличении происходит снижение тепловыделения в зоне фрикционного контакта. С уменьшением толщины натирающей пластины  $\delta$  время её нагрева до температуры, при которой на поверхности покрытия начинает образовываться медный слой, также уменьшается. Минимальное значение толщины натирающей пластины (0,05...0,10 мм) определяется её прочностью на разрыв под действием сил трения и соотношением площадей пластины и обрабатываемой поверхности. С увеличением толщины натирающей пластины толщина медного слоя на поверхности покрытия уменьшается, а при ее увеличении свыше 0,3 мм сплошной медный слой вообще не образуется.

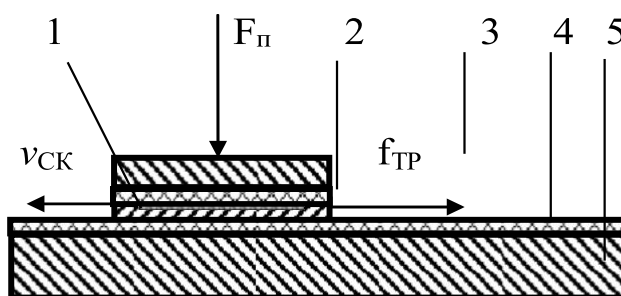


Рисунок 1. Схема взаимодействия натирающей пластины с оксидно-керамическим покрытием, сформированным МДО, при фрикционно-механическом нанесении медного слоя: 1 – натирающая пластина из меди; 2 – теплоизолирующее покрытие; 3 – нажимной элемент устройства для нанесения медного слоя; 4 – оксидно-керамическое покрытие; 5 – упрочненная деталь

Апробация фрикционно-механического нанесения медного слоя на поверхность покрытия, сформированного МДО, осуществлялась при  $p_k = 15$  МПа,  $v_{СК} = 0,5$  м/с с использованием натирающей пластины, имеющей  $\delta = 0,05$  мм. При этом контактирующие поверхности

смазывали техническим глицерином, а также наносили медный слой без применения смазоч-

ного материала. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Анализ полученных данных показал, что при отсутствии смазочного материала на поверхности покрытия образовывались лишь фрагментарные участки меди, однако в целом сплошной медный слой получен не был. Коэффициент трения по мере нагрева натирающей пластины сначала увеличивался (от 0,48 до 0,65), а затем снизился до 0,58 и стабилизировался на этом уровне (рисунок 2, б).

При смазывании контактирующих поверхностей техническим глицерином (рис. 2, а) коэффициент трения в начальный момент времени, в течение  $N_1 \approx 10$  циклов, несколько возрос (с 0,38 до 0,42), затем в течение последующих  $N_2 \approx 80$  циклов плавно снижался до 0,34. После этого, по мере нагрева натирающей пластины, значение коэффициента трения вновь возросло до 0,48 в течение  $N_3 \approx 150$  циклов. В последующие  $N_4 \approx 10$  циклов нанесение медного слоя на поверхность покрытия завершилось, температура в зоне контакта снизилась и тепловой режим взаимодействия трущихся поверхностей стабилизировался. В результате этого коэффициент трения снизился до 0,22 и через  $N_5 \approx 20 \dots 30$  циклов стабилизировался на уровне  $\sim 0,24$ . На поверхности покрытия образовался равномерный медный слой толщиной 4,0...4,5 мкм.

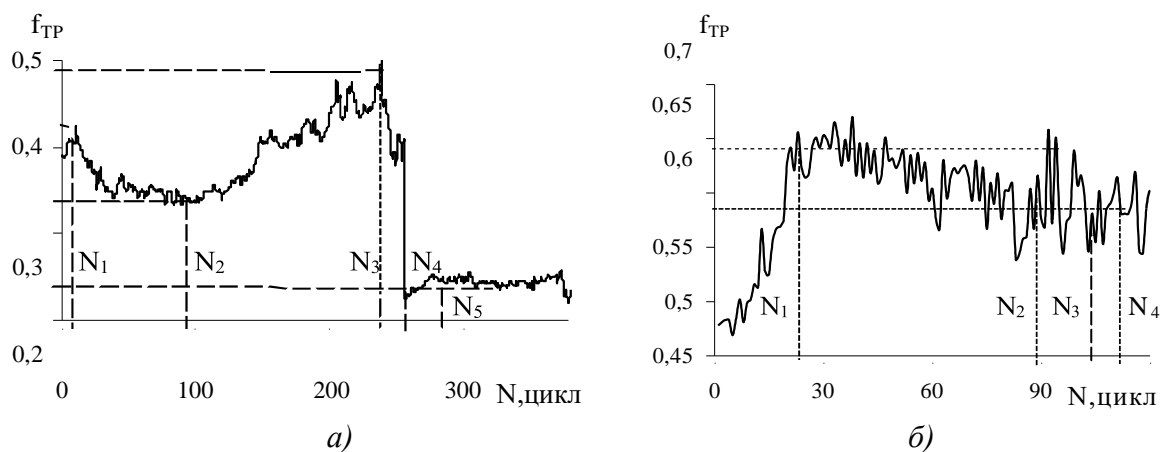


Рисунок 2. Осциллограммы изменения коэффициентов трения при фрикционно-механическом нанесении медного слоя на поверхность оксидно-керамического покрытия, сформированного МДО, со смазкой техническим глицерином (а) и без смазочного материала (б)

Полученные результаты подтвердили возможность нанесения медного слоя на поверхность оксидно-керамического покрытия, сформированного МДО, путем его фрикционно-механического натирания тонкой теплоизолированной пластиной. При этом износостойкость соединений, содержащих детали с оксидно-керамическими покрытиями и нанесенным медным слоем, увеличивается в среднем в 2,5...3,0 раза.

### Литература

1. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.]. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
2. Гаркунов, Д.Н. Триботехника, износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. – 616 с.
3. Зарипов, А.М. Разработка унифицированного захват-кантователя для рулонов стали / Р.Ф. Кашипов, Т.Р. Габдуллин // Техника и технология транспорта. – 2018. – № 2 (7). – С. 5.
4. Ерохин, Я.С. К вопросу повышения износостойкости деталей машин / Я.С. Ерохин, Т.Р. Габдуллин // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 1 (10). – С. 3.
5. Лапин, И.В., Новые модификации металлов в современном производстве / В.Г. Кузнецов, Г.А. Аминова // Известия КГАСУ. – 2017. – № 3 (41). – С. 188–195.

6. Лукашенко, В.И. Исследование сходимости определения ресурса элементов сооружения в условиях моделирования величин случайных параметров резерва прочности / Д.В. Дунаев, А.В. Бикмурзина // Известия КГАСУ. – 2019. – № 2 (48). – С. 141–149.

7. Мухаметшина, Р.М. Металлопокрытия на основе комплексных соединений меди(II) с нитрилотриметиленфосфоновой кислотой / Р.М. Мухаметшина, В.И. Морозов // Известия КГАСУ. – 2019. – № 4 (50). – С. 359–367.

8. Sakharov R.L., Nikolaeva R.V., Gatiyatullin M.H., Makhmutov M.M. Modeling of traction-coupling properties of wheel propulsor // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. –2017. – С. 012033.

9. Sakharov R and Makhmutov M M Innovative technology for monitoring pavements IOPSeries: Materials Science and Engineering 786 (1) 012023 (2020).

10. Farit Khaliullin, Aleksandr Matyashin, Minsur Zemdikhanov, Aleksey Martyushev and Nikolay Davydov Motorless pilot studies of crankshaft dampers of combustion engines // IOP Conf.Series: Earth and Environmental Science 699 (2021) 012041 doi:10.1088/1755-1315/699/1/012041.