

4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Физические основы контактного взаимодействия, трения и изнашивания: монография. Тверь: ТвГТУ, 2024. 172 с.

5. Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. О параметрах силы трения и их температурных зависимостях // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 17. Тверь: ТвГТУ, 2023. С. 11–21.

6. Бриджмен П.У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва: Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. 2-е изд, испр. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 448 с.

7. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.

8. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Чаплыгин С.А. О методиках экспериментального определения удельной силы трения и ее параметров // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 5. С. 435–444.

9. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 200 с.

УДК 621.891

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.И. Болотов
Тверской государственный технический университет

СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ОКСИДИРОВАНИЕМ

© Болотов А.Н., Новиков В.В.,
Новикова О.О., Болотов М.И., 2024

Аннотация. Предложен способ снижения расхода абразивного инструмента при удалении внешнего вспомогательного слоя детали, полученной микродуговым оксидированием. Установлено, что твердость внешнего слоя ухудшается при предварительной выдержке детали в растворе плавиковой кислоты. Сделаны выводы, что оптимальное время выдержки детали составляет 15–25 мин; технология позволит уменьшить износ абразивного инструмента более чем в 2 раза при достижении заданной шероховатости на поверхности трения готовой детали.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, износостойкое керамическое покрытие, микротвердость, трение, износ.

REDUCED ABRASIVE TOOL WEAR WHEN PROCESSING OF CERAMIC MATERIALS OBTAINED BY OXIDATION

Abstract. A method for reducing the consumption of abrasive tools when removing the outer auxiliary layer of a part obtained by microarc oxidation is proposed. It has been established that the hardness of the outer layer decreases when the part is pre-aged in a hydrofluoric acid solution. It is concluded that the optimal holding time of the part is 15–25 min; the technology will reduce the wear of the abrasive tool by more than 2 times when a given roughness is reached on the friction surface of the finished part.

Keywords: microarc oxidation, wear-resistant ceramic coating, microhardness, friction, wear.

Создание твердых износ- и коррозионно-стойких пленок на поверхности металлов повышает рабочий ресурс узлов трения. В настоящее время разработаны методы инженерии поверхностей, позволяющие сформировать состав покрытия с необходимыми физико-механическими и триботехническими свойствами на конструкционном материале основы [1–3]. К таким методам относятся, например, лазерная наплавка, газотермическое напыление, электрохимическое осаждение, заключающиеся в том, что на рабочую поверхность наносится покрытие из другого материала [1, 2]. Иной подход к созданию двухслойной трибоповерхности заключается в ее реконструкции без нанесения дополнительных покрытий: трибомеханической обработке, ионной имплантации, анодировании и микродуговом оксидировании (МДО) [4–6].

Микродуговое оксидирование, или микроплазменное электролитическое оксидирование, – электрохимический процесс, который используется для формирования оксидной керамической пленки на поверхности вентильных металлов; он применяется для преобразования поверхности таких металлов, как алюминий, титан и цирконий, но ему могут быть подвергнуты и другие материалы [4, 7–9]. Процесс включает в себя погружение детали в электролитную ванну, где происходит анодное растворение металла и формируется оксидная пленка. В ходе МДО образуются микродуги, которые способствуют быстрому росту оксидной пленки и обеспечивают ее равномерное распределение по поверхности детали. Микроплазменное электролитическое оксидирование позволяет создавать уникальные и функциональные покрытия с высокой твердостью, износостойкостью и химической стойкостью. Узлы трения, подвергнутые МДО, благодаря своим уникальным физико-химическим и триботехническим свойствам, находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая авиакосмическую, машиностроительную, нефтегазодобывающую, медицинскую, точного приборостроения [6, 10].

Технология МДО имеет некоторые особенности, которые снижают ее рентабельность: высокую энергоемкость процесса, необходимость проводить дополнительную обработку рабочей поверхности для

приведения ее к требуемому сочетанию рабочих характеристик и, следовательно, большой расход абразивного материала.

Цель исследования: повысить рентабельность технологии МДО путем уменьшения износа абразивного инструмента при шлифовании композиционного керамического покрытия.

Обоснование метода. При оксидировании детали из вентильного металла на ее рабочей поверхности образуется покрытие, состоящее из трех слоев: переходного, рабочего и внешнего. Первый слой, примыкающий к поверхности основного металла, имеет небольшую толщину (0,01–0,1 мкм) и отвечает за адгезию между металлом основы и формирующимся покрытием. Основной, в зависимости от требуемых параметров работоспособности, может иметь толщину до 100 мкм, представляет собой керамический материал, состоящий из оксида вентильного металла. Для алюминиевых сплавов это сложная структура из α -, β - и γ -модификаций оксидов алюминия с микротвердостью до 20–24 ГПа. Данный модифицированный слой сочетает в себе все необходимые физико-механические и триботехнические характеристики. Но на поверхности рабочего слоя формируется, согласно технологическому процессу, вспомогательный технологический слой толщиной до 200 мкм. Этот уровень поверхности имеет рыхлую структуру, высокую пористость, более низкую твердость, чем основной, но все же достаточно высокую прочность, чтобы создавать трудности при его удалении. Для его сошлифовывания необходимо применять высокотвердые абразивные материалы.

Пренебречь удалением технологического слоя во многих случаях нельзя, так как твердость и шероховатость полученной поверхности являются основными параметрами, определяющими ресурс работы трибосопряжения. Внешний вид технологического слоя на детали из алюминиевого сплава АМ5 после МДО представлен на рис. 1, где видно высокую шероховатость поверхности детали, не подверженной дополнительному шлифованию.



Рис. 1. Внешний вид технологического слоя на детали из сплава АМ5 после МДО

Шлифование полученного керамического слоя – достаточно дорогостоящий процесс, главным образом когда требуется достичь

высокого уровня гладкости поверхности, что предполагает большие затраты рабочего времени, электроэнергии, амортизации используемого оборудования и абразивного инструмента, особенно если необходимо обработать большую площадь поверхности. Однако при правильном выборе последующей технологии обработки керамического слоя, полученного методом МДО, можно снизить эти затраты.

Одним из распространенных электролитов при МДО является слабощелочной с добавкой жидкого стекла. В этом случае поверхностный слой формируется из различных силикатов. Для предварительного частичного разрушения такого слоя и уменьшения его прочности предлагается деталь с МДО-покрытием выдерживать в плавиковой (фтористоводородной) кислоте перед шлифованием [11]. Разложение силикатов этой кислотой происходит следующим образом:



Оборудование и методика исследования. Для изучения были выбраны образцы из алюминиевого сплава АМ5 с нанесенным керамическим покрытием в слабощелочном электролите с добавлением жидкого стекла [4]. Площадь покрываемого слоя составляла 10 см². Для обработки изделий применялся 50%-й раствор плавиковой кислоты при температуре 45 °С. Время контакта поверхности с химическим реактивом составляло до 30 мин. После этого образцы подвергались промывке водой и последующему воздействию абразивным материалом. В качестве него был выбран электрокорунд белый 25А микротвердостью 16 ГПа.

Контейнер для плавиковой кислоты выполнен из коррозионно-устойчивого материала, оборудован системой обогрева и вентиляцией. Микротвердость полученных образцов определялась на микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76. Фрикционные испытания проводились на машине трения МТ-2 [5], моделирующей работу шлифовального инструмента по схеме *палец – кольцо*. Линейная скорость скольжения 1 м/с.

Образцы сошлифовывались до шероховатости керамического слоя 0,8–1,6 Ra. Микротвердость основного рабочего слоя при этом составляла 11–13 ГПа.

Износ электрокорунда Q рассчитывался как отношение изменения массы абразивного материала к обработанной площади поверхности образца.

Результаты исследования. Анализ результатов эксперимента представлен на рис. 2. При обработке кислотой поверхности детали менее 5 мин наблюдался значительный износ абразивного материала, микротвердость снижалась несущественно. Можно предположить, что реагент проникает недостаточно глубоко и разрушает силикаты только самого верхнего слоя, так как пористость керамического слоя уменьшается

по мере приближения к материалу основе (алюминию). Вместе с тем при увеличении времени обработки t (более 30 мин) он проникает через поры к подложке и уже воздействует на нее, в результате нарушается адгезия МДО-покрытия и основного материала. Это приводит к значительному снижению микротвердости слоя H_{μ} и катастрофическому разрушению керамического слоя при трении, тем самым провоцируется частичный скол. Оптимальное время обработки, позволяющее уменьшить износ электрокорунда, составляет 15–25 мин. При этом масса изношенного абразивного материала снижается на 50–55 %.

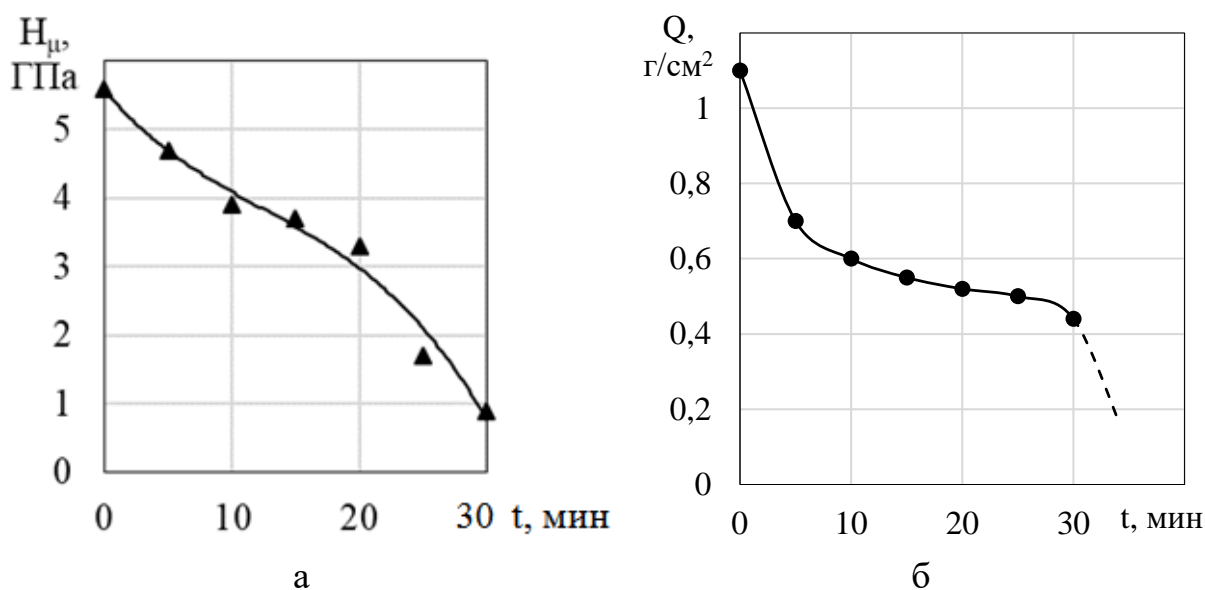


Рис. 2. Влияние времени обработки в плавиковой кислоте:
а – на микротвердость внешнего слоя; б – износ электрокорунда

Заключение

Проведенное исследование показало эффективность предложенного метода, позволяющего получить керамический слой с требуемой шероховатостью при сниженном износе абразивного инструмента. Оптимальное время выдержки детали перед шлифованием в 50%-м растворе плавиковой кислоты при температуре 45 °С составляет 15–25 мин. При применении предприятием этой технологии можно уменьшить износ абразивного инструмента более чем в 2 раза, повысить производительность труда, оптимально использовать ресурсы, минимизировать затраты на производство. При этом снижение объема отходов уменьшит воздействие предприятия на окружающую среду и, следовательно, улучшит экологическую ситуацию. Меньшие затраты на производство дадут компании возможность продавать свою продукцию по более низким ценам, что будет способствовать возрастанию его конкурентоспособности.

Библиографический список

1. Витязь П.А., Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А. Применение наноструктурных материалов и активированных методов инженерии поверхности для создания современных объектов техники // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 3–4 (20–21). С. 46–66.
2. Fotovvati B., Namdari N., Dehghanhadikolaei A. On Coating Techniques for Surface Protection: A Review // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019. № 3.
3. In-situ nanoscopic observations of dealloying-driven local corrosion from surface initiation to in-depth propagation / A. Kosari [et al.] // *Corrosion Science*. 2020. № 177. URL: https://www.researchgate.net/publication/343858997_In-situ_nanoscopic_observations_of_dealloying-driven_local_corrosion_from_surface_initiation_to_in-depth_propagation (дата обращения: 01.02.2024).
4. Плазменно-электролитическое модифицированное поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И.В. Суминов [и др.]. М.: Техносфера, 2011. Т. 2. 512 с.
5. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минерало-керамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
6. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
7. Федоров В.А., Белозеров В.В., Великосельская Н.Д. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов // *Физика и химия обработки материалов*. 1991. № 1. С. 87–93.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.
9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 4. С. 30–37.
10. Microarc Oxidation in Slurry Electrolytes: A Review / A.M. Borisov [et al.] // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. № 52. С. 50–78.
11. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Минск: Современная школа, 2005. 603 с.