

УДК 621.793:621.891

СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ, НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Керимова А.В.

магистрант кафедры теории механизмов и машин УГАТУ

e-mail: AVkerimova@mail.ru

Аннотация

Рассмотрено влияние структуры, толщины и состояния поверхности микродуговых оксидных покрытий на износостойкость алюминиевых сплавов в условиях трения скольжения. Сопоставлены результаты исследований покрытий на сплавах 2A12, 2024, 6061-T6, 6082 и 7075, а также эффект финишной обработки и смазывания. Показано, что повышение твердости и толщины не всегда сопровождается пропорциональным снижением износа из-за пористости, микротрещин и слабого опирания керамического слоя на подложку. Предложена воспроизводимая методика сравнительных трибологических испытаний с регистрацией удельной интенсивности изнашивания, коэффициента трения и изменения топографии дорожки износа. Численные значения воспроизведены исключительно по опубликованным исследованиям; собственные испытания не заявляются. Обоснована необходимость учитывать режим контакта, материал контртела и объемный износ обеих сопряженных поверхностей.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, плазменно-электролитическое оксидирование, алюминиевый сплав, покрытие, трение скольжения, износостойкость, пористость, оксид алюминия, трибология.

COMPARATIVE WEAR RESISTANCE OF MICRO-ARC OXIDATION COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS IN FRICTION UNITS

Kerimova A.V.

Master's student at the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Ufa State Aviation Technical University

e-mail: AVkerimova@mail.ru

Abstract

The study examines the effects of microstructure, thickness and surface finishing on the sliding wear behavior of plasma-electrolytic oxidation coatings formed on aluminum alloys. Published findings for 2A12, 2024, 6061-T6, 6082 and 7075 alloys are reviewed, including the role of polishing and lubrication. High coating hardness and thickness alone are insufficient predictors of tribological durability because porosity, microcracks and substrate support affect the wear mechanism. A reproducible laboratory comparison protocol is proposed, covering specific wear rate, friction coefficient and wear-track characterization. Quantitative values are attributed to actual publications; no original measurements are claimed. The counterbody material, contact conditions and damage to both mating components are emphasized.

Keywords: micro-arc oxidation, plasma electrolytic oxidation, aluminum alloys, tribological coating, sliding wear, alumina, porosity, wear rate.

Введение

Алюминиевые сплавы востребованы в транспортном машиностроении, приводах и корпусных деталях благодаря высокой удельной прочности, технологичности и коррозионной стойкости. Вместе с тем при непосредственном контакте с твердым контртелом их поверхностные слои склонны к пластической деформации, адгезионному схватыванию и ускоренному изнашиванию. Особенно заметно это в шарнирных соединениях, направляющих,

втулках и других деталях, где снижение массы конструкции должно сочетаться с сохранением геометрии сопряжения.

Одним из способов модификации поверхности является микродуговое оксидирование (МДО), которое в англоязычной литературе обозначается также plasma electrolytic oxidation (PEO). При обработке сплавов в электролите на поверхности формируется сравнительно толстый оксидно-керамический слой; электрические микрозаряды изменяют механизм роста и фазовый состав оксида [1, 2]. Получаемая поверхность отличается от обычного анодного оксида повышенной толщиной и неоднородной многослойной структурой.

Однако понятие «износостойкое МДО-покрытие» нельзя трактовать вне конкретной пары трения. Одна и та же поверхность может хорошо сопротивляться абразивному разрушению при умеренной нагрузке и одновременно интенсивно повреждать стальное контртело. Кроме того, пористый наружный слой, полезный для удержания смазки, при сухом скольжении иногда становится источником абразивных частиц. Вследствие этого для инженерного выбора важны не только твердость и толщина, но и данные о взаимодействии покрытий с сопряженной деталью.

Цель исследования – сравнить износостойкость МДО-покрытий на алюминиевых сплавах по опубликованным экспериментальным работам и разработать методику последующей лабораторной проверки при стандартизованных условиях. В задачи входят анализ структуры и механизма изнашивания, описание количественных показателей, сопоставление вариантов финишной обработки и выбор подхода к статистической оценке. Статья является обзорно-методической; непроведенные испытания не представляются как экспериментальные результаты.

Методы и методики

МДО осуществляется при приложении к детали переменного, импульсного или комбинированного электрического напряжения в водном электролите. В ходе обработки на отдельных участках оксидной пленки возникают локальные разряды, сопровождающиеся плавлением, быстрым охлаждением и переносом компонентов электролита. На структуру покрытия влияют состав и температура раствора, плотность тока, соотношение полярностей импульсов, частота, длительность и геометрия обрабатываемой детали [1, 2].

Типичный оксидный слой алюминия неоднороден по толщине: наружная часть содержит кратеры, каналы разрядов и открытые поры, а внутренняя более плотная область связана с основным металлом. В публикации о покрытиях на сплаве 2A12 отмечено сочетание рыхлого внешнего слоя, преимущественно содержащего $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, и более плотного внутреннего слоя с существенным участием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [3]. Такое разделение объясняет, почему измерение одной интегральной толщины недостаточно для прогноза износа.

Оксид $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ отличается высокой твердостью и термической стабильностью, но отсутствие пористости само по себе не гарантирует долговечности покрытия. В реальном контакте нагрузка передается через выступающие микронеровности на более мягкую металлическую основу. Если слой слишком хрупок, а подложка под нагрузкой деформируется, возникают поперечные и продольные трещины. Отслоившиеся фрагменты способны работать как третье тело и увеличивать интенсивность абразивного изнашивания.

Толщина покрытия формируется как суммарный результат роста оксидной пленки и ее локального разрушения микродугами. Поэтому увеличение времени обработки нередко повышает толщину лишь до тех пор, пока образование дефектов не начинает компенсировать преимущества дополнительного слоя. Современное исследование покрытий на сплаве 7075 показывает немонотонную связь времени оксидирования с трибокоррозионной стойкостью [4]. Эта закономерность особенно важна для технологического проектирования: назначать максимальное время обработки без предварительной оптимизации нецелесообразно.

На результирующую структуру влияет сам сплав. Магний, кремний и медь изменяют оксидообразование и фазовый состав, поэтому выводы по сплаву 6082 нельзя без проверки переносить на 2024 или 7075. При сравнении разных сплавов требуется отделять эффект

покрытия от влияния прочности и твердости подложки, а также от возможного различия в химическом составе электролита.

Для корректного анализа износа необходима единая система метрик. В исследованиях покрытий часто приводится объемный износ V после прохождения пути скольжения L под нормальной нагрузкой F . Удельный объемный показатель изнашивания, применяемый в соответствии с распространенной практикой трибологических испытаний, рассчитывается следующим образом:

$$k = \frac{V}{F \cdot L}, \quad (1)$$

В формуле (1) k измеряется, например, в $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, если объем выражен в мм^3 , нагрузка – в ньютонах, путь – в метрах. Низкое значение k соответствует меньшей потере объема при заданных условиях. Массовую потерю можно пересчитать в объем при известной эффективной плотности, однако для пористых покрытий этот переход создает дополнительную неопределенность. Предпочтительным является измерение профиля дорожки износа с последующим интегрированием площади сечения.

Коэффициент трения определяется отношением тангенциальной силы к нормальной нагрузке. Его среднее значение нужно вычислять на заранее выбранном стабильном интервале скольжения; начальный этап приработки следует показывать отдельно. Сам по себе малый коэффициент трения не означает низкого износа: возможны случаи относительно высокого трения при малой потере материала вследствие устойчивого оксидного контакта.

$$\mu(t) = \frac{F_{\text{тр}}(t)}{F}, \quad (2)$$

Показатель относительной эффективности покрытия целесообразно вычислять по сравнению с непокрытым образцом той же марки сплава, испытанным с тем же контртелом и при той же нагрузке. Для пары образцов с сопоставимой геометрией он выражает отношение удельных износов:

$$R = \frac{k_{\text{осн}}}{k_{\text{покр}}}, \quad (3)$$

Если R больше единицы, покрытая поверхность в данных условиях изнашивается медленнее. Однако сравнивать R из отдельных публикаций без проверки режима контакта нельзя, поскольку изменение нагрузки, контртела, влажности или смазки способно менять не только величину, но и ведущий механизм разрушения. В инженерных статьях необходимо указывать одновременно нагрузку, скорость, путь трения, температуру, материал и твердость контртела, способ приготовления поверхности.

Для контактирующих деталей требуется оценивать также износ контртела. Керамическое покрытие с низкой собственной потерей материала может действовать абразивно на стальную пару, вследствие чего ресурс всего узла окажется неудовлетворительным. Поэтому сравнительное исследование должно рассматривать изнашивание двух поверхностей и появление частиц третьего тела как единую систему.

Результаты

В работе о микродуговом оксидировании сплава 2A12 исследованы фазовый состав, характер сцепления слоев и износ при разных схемах нагружения [3]. Для механически обработанного внутреннего слоя с преобладанием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ авторы сообщили удельный износ порядка $(3\text{-}5) \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при возвратно-поступательном скольжении по керамическому контртелу со скоростью 0,33 м/с и контактным давлением 2 МПа. В той же работе коэффициент трения для иной схемы испытаний, с кольцевым стальным контртелом, превышал 0,45. Эти числа нельзя связывать между собой как полученные в едином тесте: геометрия и материал контакта различались.

В исследовании МДО-покрытий на алюминиевом сплаве 2024 продемонстрировано существенное влияние последующей обработки наружного рыхлого слоя и смазывания [5]. Для отполированного покрытия толщиной около 100 мкм в условиях масляного трения авторами описано снижение коэффициента трения примерно до одной десятой, а скорости изнашивания – примерно до одной тысячной соответствующих значений при сухом

скольжении. Такое различие относится к конкретным условиям и выбранному маслу, а не является универсальным множителем для любых МДО-покрытий.

Для сплава Al-6082 исследована связь толщины МДО-покрытия с его механическими характеристиками и реакцией на скольжение, царапание и ударную нагрузку [6]. Авторы сообщали твердость отдельных Al-Si-O покрытий вплоть до 2400 HV и отмечали, что более толстые покрытия показывали высокие результаты при нескольких видах испытаний, тогда как образцы промежуточной толщины оказались менее удачными. Это важное наблюдение предостерегает от линейной экстраполяции «больше толщина – выше ресурс».

Сопоставление МДО и твердого анодирования выполнено для сплава 6061-T6 [7]. Подобные работы полезны прежде всего, как сравнительная проверка производственного решения на одной подложке: оба покрытия могут иметь высокую твердость, но особенности рельефа, дефектов и финишной обработки влияют на распределение контактного давления. В более позднем исследовании после шлифования МДО-покрытий показана лучшая износостойкость по сравнению с рассмотренным вариантом твердого анодирования, а также более высокие механические показатели обработанного покрытия [8].

Наконец, применительно к сплаву 7075 в статье 2026 года исследовалось трибокоррозионное поведение в зависимости от времени оксидирования. Для выбранных условий оптимум достигался при 25 мин: удельный износ составлял $3,9 \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м), твердость – около 880 HV (табл. 1); более продолжительная обработка до 30 мин сопровождалась накоплением дефектов и ухудшением свойств [4]. Поскольку тест проводился в коррозионно-активной среде, его результат нельзя напрямую сопоставлять с сухим скольжением из работ [3, 5].

Таблица 1 – Опубликованные показатели и условия исследования МДО-покрытий

Источник, сплав	Обработка или режим	Опубликованный результат
[3], 2A12	Полированный внутренний слой; керамическое контртело	$k = (3-5) \cdot 10^{-6}$ мм ³ /(Н·м)
[5], 2024	Полированное покрытие; масло / сухой контакт	При смазке: $\mu \sim 1/10$, износ $\sim 1/1000$ от сухого
[6], 6082	МДО, различная толщина	Твердость до 2400 HV; выраженный эффект толщины
[4], 7075	Трибокоррозия; время МДО 25 мин	$k = 3,9 \cdot 10^{-6}$ мм ³ /(Н·м); около 880 HV

Данные табл. 1 служат иллюстрацией различий между исследованиями, а не рейтингом покрытий. В первом и последнем случаях значения k близки по порядку величины, однако измерены при существенно отличающихся условиях, поэтому вывод о равенстве эксплуатационного ресурса некорректен. Обобщаемым результатом является зависимость свойств от внутренней плотности, состояния верхнего слоя и режима контакта.

После МДО наружная поверхность часто имеет развитый рельеф с кратерами и выступами. При первом контакте нагрузка распределяется по относительно небольшой действительной площади, из-за чего локальное давление может быть намного выше номинального. Приработка постепенно снимает вершины микронеровностей, но образующиеся твердые частицы способны царапать покрытие или контртело. Шлифование и полирование уменьшают шероховатость, удаляют наиболее рыхлый слой и могут улучшать стабильность трения.

При этом чрезмерное шлифование уменьшает эффективную толщину и рискует обнажить пористую переходную зону. Поэтому контролировать следует не только итоговую шероховатость R_a , но и остаточную толщину, распределение пор и наличие открытых дефектов. Обработка должна быть одинаковой по методу и измеримым параметрам для всех сравниваемых серий.

Для анализа механизма износа предлагается изучать дорожки трения оптической микроскопией и по возможности сканирующей электронной микроскопией с локальным элементным анализом. Продольные борозды свидетельствуют об абразивном механизме; участки отслаивания и сколы указывают на хрупкое разрушение; перенесенные слои материала контртела – на адгезионные взаимодействия. Отдельно следует определять наличие оксидных продуктов и уплотненного третьего тела.

Фазовый состав рекомендуется оценивать рентгеновской дифракцией с фиксацией границ чувствительности метода. Присутствие пиков α - и γ - Al_2O_3 информативно, но не дает прямой количественной оценки пористости или адгезии. Для этих характеристик нужны поперечные шлифы, измерение профиля и дополнительные механические тесты. Только совместный анализ структуры и дорожки износа позволяет связать численные трибологические показатели с вероятным механизмом разрушения.

Для воспроизводимого исследования целесообразно выбирать один основной сплав, например, 6061-Т6 или его технически обоснованный аналог, и организовать серии с одинаковыми исходными размерами и термическим состоянием. Контрольная группа должна состоять из непокрытых образцов, полученных из той же партии проката. Вторая группа включает покрытие после МДО без финишной обработки; третья – покрытие после стандартизованного полирования. При наличии оборудования выделяют дополнительные группы по времени обработки либо режиму электрических импульсов.

Параметры процесса необходимо протоколировать в полном объеме: электролит и его концентрации, температуру, электрическую плотность тока, форму импульсов, максимальное напряжение, продолжительность и фактическую толщину. Приведение только времени обработки не позволяет другой лаборатории воспроизвести результат, поскольку кинетика роста чувствительна к электрическому режиму и составу раствора.

После изготовления для каждого образца измеряют покрытие минимум в нескольких точках и шероховатость по повторным трассам. Желательно дополнительно определять микротвердость при нагрузке, не вызывающей доминирующего влияния подложки, и рассматривать результаты на сечении. Приоритетом является наличие идентифицируемой партии и индивидуальной карточки для каждого образца. Объединение всех измерений одной детали в качестве независимых повторов недопустимо.

Испытание трением скольжения можно проводить на установке pin-on-disc или ball-on-disc с регистрируемой нагрузкой и скоростью. Для первичной серии рекомендуется сохранять постоянными контртело (например, шарик Al_2O_3 фиксированного диаметра), нормальную нагрузку, радиус дорожки, суммарный путь и относительную влажность. Точный диапазон режимов следует выбирать по возможностям трибометра и проектным условиям узла; приведенные здесь варианты не являются заявлением о выполненном эксперименте.

В каждом варианте целесообразно предусмотреть не менее пяти независимо подготовленных деталей и, при возможности, повторить изготовление на другой партии. Испытания следует перемешать в случайном порядке, чтобы влияние прогрева установки или постепенного изменения контртела не совпало с принадлежностью к группе. Для изучения чувствительности результата можно организовать отдельный двухфакторный план по нагрузке и состоянию финишной поверхности.

После испытания объем дорожки оценивают методом профилометрии по нескольким сечениям с поправкой на исходную кривизну. Для круговой дорожки, если поперечная площадь износа приблизительно постоянна по окружности, используется приближение:

$$V = A \cdot 2\pi r, \quad (4)$$

где A – площадь поперечного сечения потери материала;

r – радиус дорожки.

Применимость формулы проверяют по нескольким азимутальным положениям, особенно при неоднородном скалывании. Отдельно необходимо документировать износ или изменение геометрии шарика-контртела, так как он влияет на контактные напряжения на протяжении опыта.

После каждой таблицы измерений требуется давать интерпретацию применительно к поставленной задаче. В предлагаемом протоколе особенно важно разграничить внутриобразцовую повторяемость измерения профиля и реальную изменчивость между покрытиями: эти величины описывают разные источники неопределенности и не должны подменять друг друга.

Таблица 2 – Минимальный состав протокола испытаний

Этап	Фиксируемые параметры	Зачем нужны
Изготовление	Сплав, партия, электролит, режим МДО	Воспроизводимость состава и технологии
Характеризация	Толщина, Ra, твердость, микроструктура	Объяснение причин различий
Трение	Нагрузка, скорость, контртело, путь, влажность	Сопоставимость контактных условий
Износ	V, k, $\mu(t)$, контртело, изображения дорожек	Оценка ресурса пары и механизма
Повторы	Номер детали, партия, порядок, дефекты	Статистическая независимость

Для каждой группы рассчитывают средний удельный износ, стандартное отклонение и доверительный интервал. Поскольку износ часто имеет асимметричное распределение и зависит от редких событий скалывания, дополнительно полезно показывать индивидуальные значения и медиану с межквартильным размахом. При явной положительной асимметрии уместен анализ логарифма k, если он имеет физический смысл для заданного набора результатов.

$$\bar{k} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i k_i; \quad s_k = \sqrt{\left[\frac{\sum_i (k_i - \bar{k})^2}{n-1}\right]}, \quad (5)$$

Разницу между группами следует оценивать с учетом независимости образцов. Если одна деталь испытана на нескольких дорожках, результаты представляют иерархические данные; корректным подходом может быть усреднение по детали либо смешанная модель со случайным эффектом образца. Для нескольких состояний покрытия допускается дисперсионный анализ при проверенных предположениях; при малом числе повторов рационально использовать доверительные интервалы и непараметрические или перестановочные методы.

В дополнение к р-значению следует указывать величину эффекта в физических единицах и ее интервал неопределенности. Для инженерного узла существенна минимальная воспроизводимая эффективность покрытия, а не только наличие статистической разницы между образцами. Если коэффициент трения стабилен, но контртело повреждается быстрее, покрытие не может считаться безусловно более подходящим для данного сопряжения.

Необходимо учитывать конкурирующие виды отказа. Высокая стойкость к абразивному износу не исключает разрушения при ударных нагрузках, контактной усталости или наличии электролита. Результаты исследования по трибокоррозии сплава 7075 [4] нельзя использовать как прямой прогноз поведения в сухом подшипнике скольжения; наоборот, сухие испытания не заменяют оценку покрытия в морской или химически активной среде.

Обсуждение

В узлах с устойчивой смазочной пленкой МДО-покрытие следует рассматривать как твердый несущий слой, способный снижать изнашивание поверхности, а удержание смазки в микрорельефе может быть дополнительным преимуществом. При сухом контакте особое значение приобретают шероховатость и материал контртела: отполированная поверхность часто уменьшает вероятность образования крупных абразивных частиц, хотя эффект зависит от остаточной толщины слоя и схемы нагружения [3, 5].

Для направляющих и шарнирных элементов полезно сопоставлять варианты МДО не только с непокрытым металлом, но и с альтернативными процессами – твердым

анодированием или применением сменной втулки. Сравнительные исследования [7, 8] показывают необходимость проводить испытания в одинаковой паре трения. Максимальная твердость покрытия не должна автоматически становиться главным критерием выбора без оценки массы, стоимости, точности геометрии и допустимого износа сопряженной детали.

Инженерное назначение оптимального режима МДО предполагает компромисс между плотностью, толщиной, прочностью связи с подложкой и затратами на финишную обработку. Переработка покрытия при длительной обработке способна увеличивать плотность дефектов, поэтому поиск технологического окна предпочтительнее ориентации на максимальную толщину [4]. Принципиально важно проверять стабильность результата между партиями, а не выбирать режим по единичному образцу.

Заключение

Рассмотрение реальных исследований МДО-покрытий на сплавах 2A12, 2024, 6061-T6, 6082 и 7075 показывает, что износостойкость определяется сочетанием фазового состава, плотности внутреннего оксидного слоя, поверхностной пористости и фактического режима нагружения. Высокая твердость α -Al₂O₃ способствует сопротивлению абразивному изнашиванию, однако сквозные дефекты, крупные поры и слабая поддержка покрытий подложкой могут снижать ресурс.

Опубликованные количественные результаты подтверждают существенное влияние полирования и смазывания, а также немонотонную связь свойств с толщиной и временем оксидирования. Их прямое численное ранжирование без сведения к единой схеме контакта недопустимо. Предложен лабораторный протокол со стандартизацией материала, режима МДО, геометрии, контртела, нагрузки и измерения износа обеих поверхностей.

Литература

1. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S. J. Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 122, № 2–3. PP. 73-93.
2. Micro-Arcs Oxidation Layer Formation on Aluminium and Coatings Tribological Properties—A Review // Coatings. 2023. Vol. 13, № 2. Art. 373.
3. Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 154, № 1. PP. 1-7.
4. Wu H., Guo X., Ge T. [et al.]. Oxidation-time-dependent tribocorrosion behavior and mechanism of micro-arc oxidation coatings on 7075 aluminum alloy // Wear. 2026. Vol. 601. Art. 206824.
5. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2005. Vol. 389, № 1-2. PP. 169-176.
6. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 116-119. PP. 1055-1060.
7. Rama Krishna L., Sudha Purnima A., Sundararajan G. A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings // Wear. 2006. Vol. 261, № 10. – PP. 1095-1101.
8. Rodriguez L., Vieu A., Balsarin M. [et al.]. Physico-chemical characterisation and tribological behaviour of ground micro-arc oxidation coating on aluminium alloy – Comparison with hard anodised oxidation // Wear. 2023. Vol. 516-517. Art. 204591.
9. Li W., Cheng M. [et al.]. Effects of nanoceramic particle size and content on the wear resistance of micro-arc oxidation coatings for 2A12 aluminum alloy // Heliyon. 2024. Vol. 10, № 19. Art. e38719.