Исследование абразивной стойкости сопел из титанового сплава с керамикоподобными покрытиями, полученными микродуговым оксидированием

И. В. Суминов[a,*], Б. Л. Крит[a,b,], С. А. Кусманов[a,***], А. П. Митрофанов[a], В. А. Гапонов[a]**

[a]*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, 127994, Россия*
[b]*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, 125993, Россия*
[*]*e-mail: ist3@mail.ru ;* [**]*e-mail: bkrit@mail.ru;* [***]*e-mail: sakusmanov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.05.2026
После доработки 18.06.2026
Принята к публикации 26.06.2026

Исследованы некоторые свойства сопел из титанового сплава ВТ6 с керамикоподобными покрытиями, сформированными микродуговым оксидированием (МДО), в том числе с добавлением в электролит наночастиц графена и оксида графена. Приведены результаты измерений микротвердости, абразивной стойкости и трибологических характеристик покрытий, а также натурных испытаний сопел в составе инжекционно-струйного аппарата. Выявлены особенности изнашивания МДО-покрытий в зависимости от компонентного состава электролита и состояния формируемого поверхностного слоя. Установлено, что при определенных условиях износостойкость сопел из титанового сплава с МДО-покрытиями сопоставима с показателями, которые демонстрируют серийно выпускаемые керамические сопла.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, титановый сплав ВТ6, графен, оксид графена, керамикоподобные покрытия, сопла, абразивное изнашивание

УДК 621.9.011:669.15-194.56:539.25′32′536
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.3.09

ВВЕДЕНИЕ

В современной практике обработки материалов широко используются абразивно-струйные технологии, которые позволяют достигать высоких степеней качества поверхностей при экологической чистоте самого процесса. При этом ключевым недостатком, определяющим эффективность и работоспособность применяемого оборудования, является износ сопел под воздействием высокого давления и взаимодействия с дисперсными веществами высокой твердости, вследствие чего возникает необходимость не только регулярной, но и внеплановой замены и обслуживания. Это приводит к серьезным проблемам, таким как снижение качества обработки, потеря производственного времени, рост материальных отходов и др. [1].

С начала XXI в. в индустрии ведущих стран доминирует концепция SWAP-C [2], что предполагает в том числе повышенную заинтересованность в вовлечении легких металлов, в частности сплавов на основе Ti, для изготовления сопел устройств абразивно-струйной обработки. Поскольку плотность титана в 1,75 раза меньше, чем сплавов на основе железа, удельные характеристики промышленно выпускаемых титановых материалов не хуже, а зачастую лучше аналогичных для сталей [3]. Типичным представителем может служить сплав ВТ6, обладающий сравнительно высокими прочностными, антикоррозионными свойствами и низкой стоимостью. Из него изготавливают крупногабаритные поковки, штамповки, катаные и кованые плиты, а также полуфабрикаты мелкого сечения, корпуса летательных аппаратов, подводных лодок, шар-баллонов высокого давления, детали изделий точного приборостроения [4, 5].

Возможная недостаточность физико-механических свойств сплава ВТ6 для предметной области (твердость, жесткость, стойкость к абразивному изнашиванию) может быть элиминирована с помощью инженерии поверхности. Вследствие того, что сплавы Ti относятся к вентильным материалам, для упрочнения их поверхности наиболее целесообразно использование плазменно-электролитной обработки (ПЭО) в ее разновидности микродугового оксидирования (МДО) [6–8]. Благодаря способности формировать поверхностные слои с огромным разнообразием состава и структуры, МДО способно кардинально изменять характеристики поверхности исходных подложек. Это очень важно, поскольку известно, что именно свойства поверхности определяют в основном

интегральные свойства материалов [9]. В общем, МДО – один из наиболее перспективных видов ПЭО поверхности преимущественно металлических вентильных материалов (в частности, сплавов на основе титана), позволяющих получать многофункциональные керамикоподобные модифицированные слои (покрытия) с широким комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионно-защитные, термостойкие, электроизоляционные (диэлектрические) и декоративные. Кроме того, как технологический процесс микродуговое оксидирование привлекательно благодаря возможности улучшения поверхностных свойств изделий из титановых материалов сложных геометрических форм с использованием экологически чистых электролитов при низкой стоимости и без воздействия высоких температур на обрабатываемый объект [10].

Структурой и свойствами МДО-покрытий можно управлять, изменяя электрические параметры процесса и/или состав электролита путем введения различных растворимых и нерастворимых химических веществ [11–13]. В последнее время в означенном аспекте большое внимание уделяется формированию композитных МДО-покрытий в электролитах-суспензиях, образующихся при добавлении в базовые электролиты нерастворимых наноразмерных частиц (оксидов, различных аллотропических форм углерода, полимеров и т.п.). Электрофоретическое допирование покрытий этими дисперсными фазами приводит к корректировке микроструктуры и влияет на порообразование, что, в свою очередь, обеспечивает существенное повышение многих эксплуатационных свойств [14, 15]. В ряде исследований показано, что добавляемые наночастицы (Al_2O_3, графит, MoS_2, Ag) могут внедряться в МДО-покрытия на титановых сплавах в инертном [13, 16] или реакционно-активном (графит, ZrO_2, Cu, MnO_2 и NiO) [17–19] состояниях. В работах [18, 20] отмечается, что при добавлении в электролит частиц твердой смазки (графит и MoS_2) значительно снижается коэффициент трения МДО-покрытий, что способствует уменьшению объемного износа.

Положительный эффект использования графитовых материалов при формировании покрытий на титане отмечен в [21, 22], а в работе [23] описан положительный опыт добавления графеновых наночастиц в электролит при ПЭО сплава Д16Т. Синтезированные покрытия имеют более плотную и компактную морфологию поверхности с более высокой твердостью и гораздо толще по сравнению с МДО-покрытиями, получаемыми в электролитах без графена. Благоприятное влияние графеновых наночастиц на фазовый состав МДО-покрытий отмечено в работе [24], где установлено, что подобные добавки в электролит увеличивают объемную долю α-Al_2O_3 с 37 до 75% и существенно улучшают трибологические свойства. Подтверждают позитивный эффект воздействия графеновых наночастиц на основные характеристики МДО-покрытий и данные работ [25, 26]: авторами зафиксировано увеличение толщины покрытия до 2 раз с повышением содержания корунда и, как следствие, достижение двукратного снижения коэффициента трения и интенсивности изнашивания. В исследовании [22] методом ПЭО в силикатно-гипофосфитном электролите с добавкой оксида графена на титановом сплаве ВТ6 синтезированы покрытия толщиной от 40 до 50 мкм. Найдено, что добавление оксида графена 0.5 мг/л в базовый силикатный гипофосфитный электролит приводит к снижению скорости изнашивания более чем в 1.5 раза, что объясняется авторами образованием смазочного трибослоя с оксидом графена в паре трения.

Учитывая вышесказанное, представляет несомненный интерес детальное исследование влияния графена и оксида графена на эксплуатационные свойства сопел для абразивно-струйной обработки, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания.

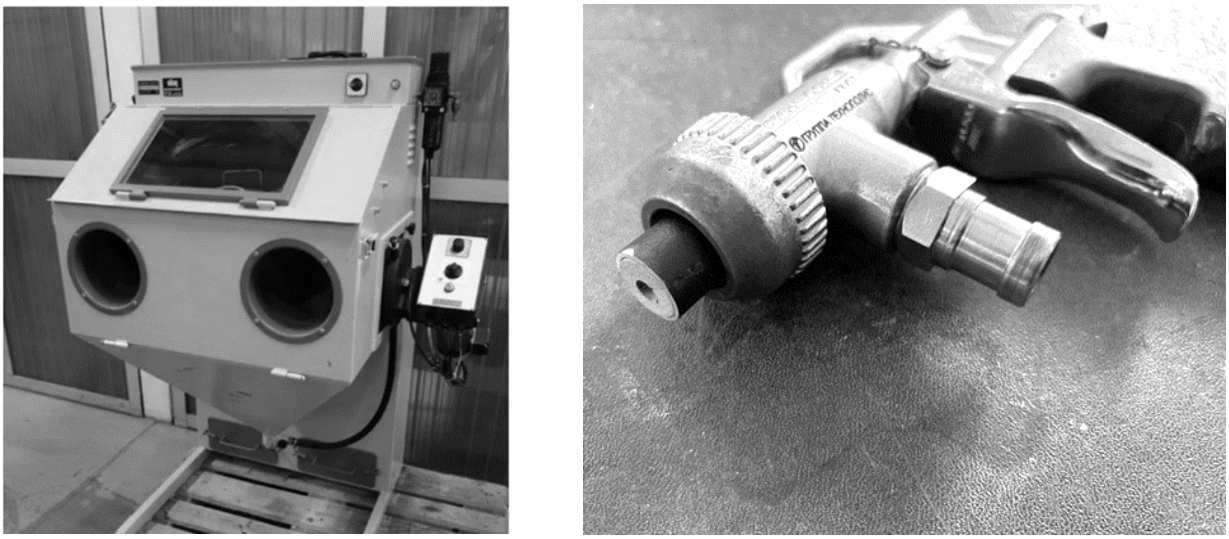
МЕТОДИКА

Плазменно-электролитную обработку проводили на специальной установке, разработанной и изготовленной в МГТУ «СТАНКИН», структурно-компоновочная схема которой представлена на рис. 1.



Рис. 1. Установка ПЭО МГТУ «СТАНКИН».

Технологический источник переменного тока установки позволяет формировать выходные импульсы напряжения с регулируемыми конфигурацией и параметрами.



(а) (б)

Рис. 2. Камера инжекционно-струйного аппарата SANDMASTER 75S (а) и пистолет SBCG (б).

Процесс ПЭО проводили в анодно-катодном режиме при соотношении анодного и катодного токов 1:1, средней плотности 25 А/дм^2 с последующим снижением до 10 А/дм^2 и продолжительности обработки 45 мин. Формирование покрытий осуществляли в базовом слабощелочном электролите КОН 2 г/л с 16 г/л алюмината натрия $NaAlO_2$ (образцы обозначены далее как МДО), а также с добавлением в базовый электролит порошка графена 0,5 г/л (производитель ООО «РУСГРАФЕН», толщина в среднем 5 нм, ширина от 0,5 до 10 мкм; последующее обозначение образцов МДО+Г) и суспензии оксида графена 0,5 г/л (производитель ООО «ГРАФЕНОКС», толщина в среднем 2 нм, ширина от 0,5 до 10 мкм; последующее обозначение образцов МДО+ОГ). После обработки образцы промывали в два этапа: сначала в проточной воде, затем в ультразвуковой ванне, наполненной изопропиловым спиртом, после чего осуществляли сушку при температуре 50 °С. Толщина покрытия на сплаве ВТ6, измеренная токовихревым толщиномером, составляла около 60–70 мкм. После удаления верхнего технологического слоя шлифованием с помощью наждачной бумаги зернистостью от 400 до 2500 толщина рабочего слоя ПЭО-покрытий уменьшалась до 30 мкм.

В целях обеспечения возможности максимально корректного измерения микротвердости и триботехнических показателей при проведении экспериментов использовали образцы из титанового сплава ВТ6 цилиндрической формы Ø20 х 6 мм с площадью поверхности 0,1 дм^2.

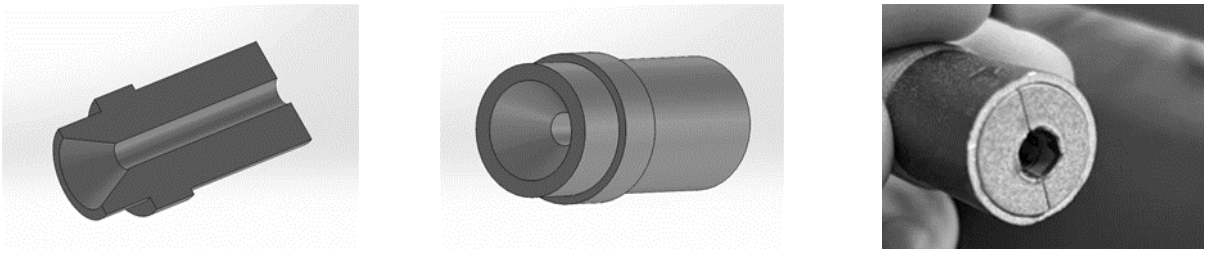
Определение микротвердости проводили на приборе QNESS Q10A, для оценок морфологии поверхности применяли сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) KYKY EM8000F. Исследование динамики изменения величины коэффициента трения выполняли на трибометре DUCOM POD-4.0 производства Ducom Instruments по стандарту ASTM G99. Испытания осуществляли на пути трения 500 м при усилии 5 Н и скорости вращения 5 см/с, контртелом служил шарик из Al_2O_3.

Тесты на абразивное изнашивание проводили с использованием установки Calowear (CAW). Была задействована следующая методика: на образец воздействует вращающийся шар диаметром Ø25,4 мм с постоянной нагрузкой 0,2 Н, а в зону контакта регулярно поступает водная алмазная суспензия. В результате воздействия на поверхности образца в покрытии образуется лунка, по объему которой рассчитывали величину объемных потерь и скорость износа.

Натурные испытания абразивно-струйной стойкости проводили на инжекционно-струйном аппарате Sandmaster 75S, укомплектованном пистолетом SBCG, с варьируемым давлением в диапазоне 0,5–8 бар (рис. 2). При проведении исследований использовали кварцевый песок с основной фракцией абразивного материала от 75 до 150 микрометров (согласно гранулометрическому анализу).

В качестве испытательных образцов для исследования абразивно-струйной стойкости были изготовлены прямоточные сопла специальной конструкции (рис. 3) с диаметрами канала 3, 4, 5 мм, что соответствует геометрии штатных сопел инжекционного устройства.

Подобная конструкция макетных образцов позволила исследовать толщину покрытия внутри сопла и изменение профиля канала до и после испытаний. Ее суть заключается в том, что сопло изготавливается из двух одинаковых частей, которые для проведения испытаний запрессовываются в обжимную втулку и после эксперимента опять разделяются на две части,



(а) (б)

Рис. 3. 3D-изображение сопла для проведения исследований (а) и фото сопла в обжимной втулке (б).

Таблица 1. Данные измерений микротвердости

Образец	ВТ6	МДО	МДО+Г	МДО+ОГ
Микротвердость, HV	384±8	498±12	518±13	431±8

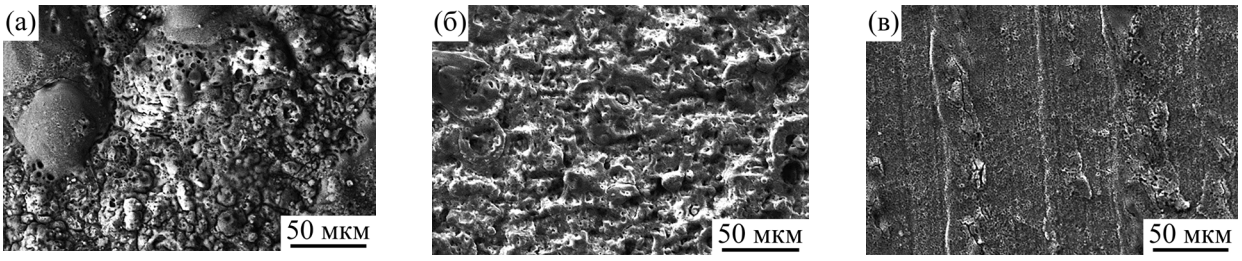


Рис. 4. Вид поверхности образцов сплава ВТ6 после ПЭО в различных электролитах: МДО (а); МДО+Г (б); МДО + ОГ (в).

обеспечивая визуальный и инструментальный доступ к каналу сопла. Для сравнения были выбраны штатные сопла из ВК96, которыми комплектуются пистолеты SBCG инжекционно-струйных аппаратов Sandmaster 75S.

Для характеризации абразивно-струйной стойкости проводили визуальный и гравиметрический анализ. Визуальный анализ до начала испытаний и после их завершения осуществляли путем осмотра каналов и фиксации картины износа. Изменение массы образцов сопел контролировали при помощи аналитических весов марки AND GR-300 с точностью измерения 0,0001 г, для чего осуществляли взвешивание до начала испытания и далее с интервалом в 15 мин до их завершения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения микротвердости модифицированной поверхности цилиндрических образцов осуществляли после шлифования (для удаления технологического слоя), полученные результаты представлены в табл. 1.

Анализ полученных значений показывает, что микротвердость образцов с МДО (покрытие в базовом электролите) и образцов с МДО+графен (МДО+Г) практически находится на одном уровне, в то время как у образцов МДО+оксид графена (МДО+ОГ) она несколько ниже. Это не противоречит известным данным, например, результатам, полученным при формировании МДО-покрытий на алюминиевом сплаве Д16 с использованием подобных добавок и описанным в работе [25].

Необходимо отметить, что структура сформированных покрытий значительно трансформируется при добавлении в электролит графеновой и оксид-графеновой добавок (рис. 4).

При использовании базового электролита в полученном МДО-покрытии преобладает неоднородная морфология поверхности с крупными агломератами и неравномерной пористостью (рис. 4а). Применение графена обеспечивает образование покрытия с более равномерным распределением пор по площади, рельеф поверхности сглаженный, менее шероховатый (рис. 4б). Совершенно контрастный результат в этом ряду получен при добавлении в электролит оксида графена: здесь морфология поверхности структурно однородна и обладает наименьшей шероховатостью (рис. 4в).

Испытания на трение (рис. 5) показали, что МДО-покрытия демонстрируют сравнительно высокую фрикционность (f ~ 0,55–0,6). С добавлением в электролит частиц графена и оксида графена образуются слои с существенно меньшим (0,1–0,2) коэффициентом трения. Это может быть связано, помимо прочего, с большей структурной гомогенностью поверхности и более мелкими порами в микроструктуре по сравнению с МДО-покрытием, поскольку морфология и шероховатость поверхности являются ключевыми факторами, определяющими трибологическое поведение материалов при контактном взаимодействии [27].

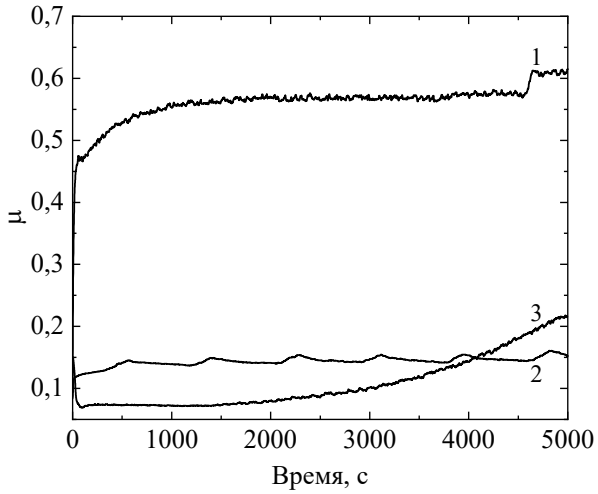


Рис. 5. Значения коэффициентов трения образцов сплава ВТ6, подвергнутых ПЭО в различных электролитах (контртело – Al_2O_3): *1* – МДО; *2* – МДО+Г; *3* – МДО + ОГ.

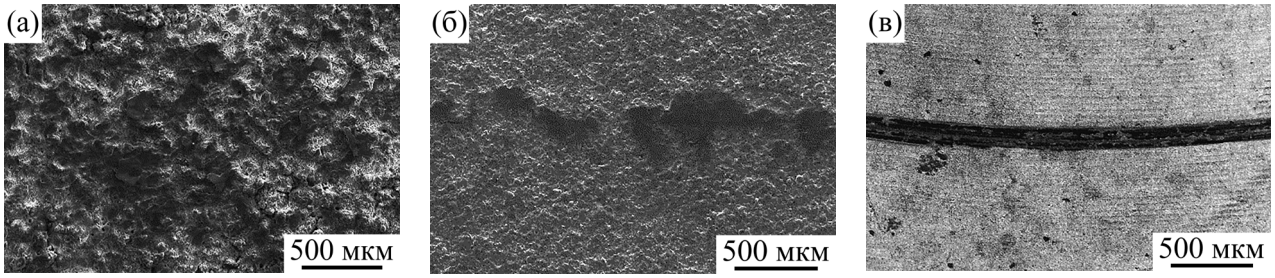


Рис. 6. Вид поверхности образцов сплава ВТ6, подвергнутых ПЭО в различных электролитах, после испытаний на трение: МДО (а); МДО+Г (б); МДО+ОГ(в).

Таблица 2. Результаты испытаний на абразивное изнашивание

Образец	Время, мин	Объем лунки, мм^3	Скорость изнашивания, 10^{-3} мм^3/мин
МДО (исходный)	30	0,019	0,63
	60	0,076	1,26
МДО (шлифованный)	30	0,039	1,3
	60	0,063	1,05
МДО+Г (исходный)	30	0,022	0,73
	60	0,033	0,55
МДО+Г (шлифованный)	30	0,008	0,26
	60	0,02	0,23
МДО+ОГ (исходный)	30	0,015	0,50
	60	0,018	0,30
МДО+ОГ (шлифованный)	30	0,007	0,23
	60	0,013	0,22
Керамика ВК96	30	0,007	0,233
	60	0,015	0,25

Визуальный анализ поверхности образцов после испытаний на трение (рис. 6) показывает, что при МДО отсутствует выраженная дорожка трения (рис. 6а). Это может быть обусловлено грубой морфологией, невысокой когезией и большим коэффициентом трения, в результате чего имеет место выкрашивание крупных фрагментов покрытия. После испытаний образцов с покрытием МДО+Г дорожка трения более отчетлива, хотя местами прерывиста вследствие наличия неровностей (рис. 6б). Покрытие МДО+ОГ показывает на первом этапе испытаний самый низкий коэффициент трения, увеличивающийся на завершающей стадии эксперимента (рис. 6в). Дорожка трения имеет достаточно четкие границы, тем не менее на ней присутствуют следы процессов изнашивания, что и является вероятной причиной возникновения тренда на увеличение коэффициента трения.

Тестирование устойчивости к абразивному воздействию образцов с различными типами ПЭО-покрытий осуществляли в течение двух временных диапазонов, равных 30 и 60 мин. Данный подход был выбран в целях повышения объективности расчета скорости абразивного

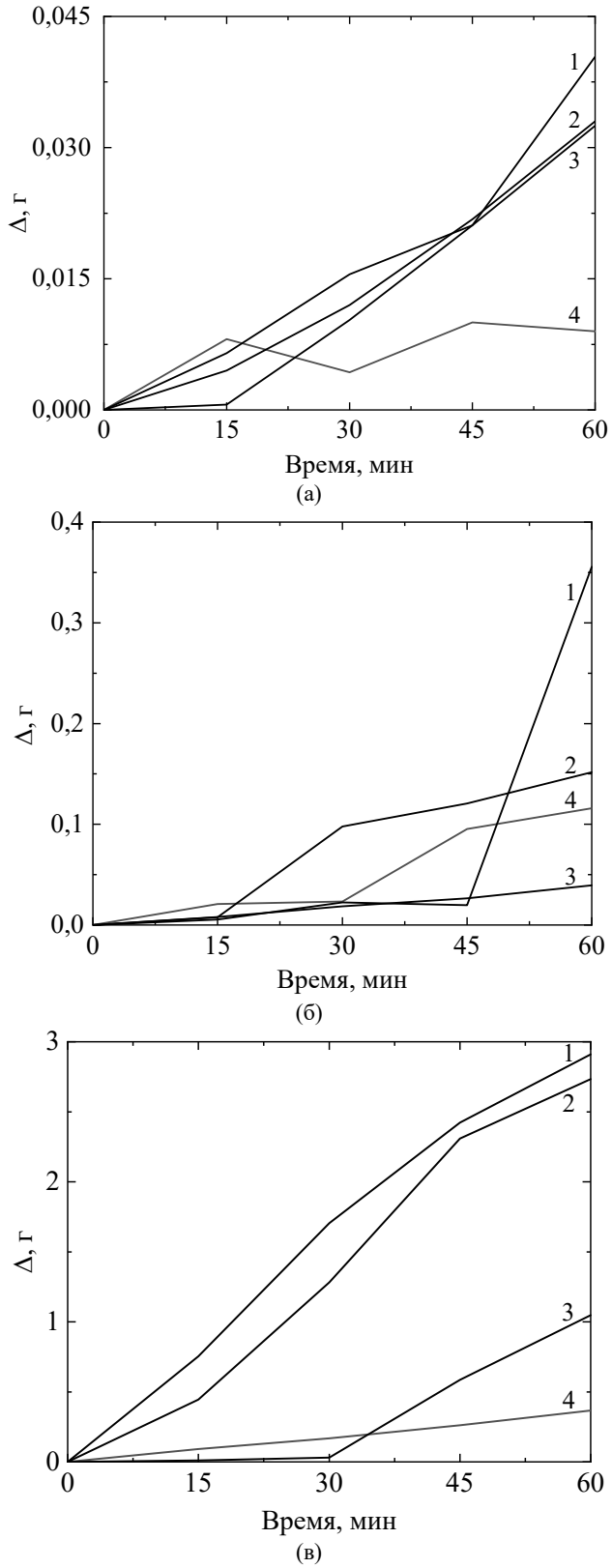


Рис. 7. Результаты весового анализа абразивно-струйного изнашивания сопел с диаметром канала: 3 мм (а); 4 мм (б); 5 мм (в); *1* – керамика; *2* – МДО; *3* – МДО+Г; *4* – МДО+ОГ.

изнашивания. Для оценки влияния структуры покрытия эксперименты проводили раздельно для образцов с имеющимся технологическим слоем покрытия и с рабочим слоем (после предварительного шлифования). Полученные результаты представлены в табл. 2.

Как следует из приведенных данных, у МДО-покрытий без графеновых добавок в электролит наблюдается самая высокая скорость износа как технологического, так и рабочего слоя, вне зависимости от продолжительности испытаний. При этом наиболее высокая износостойкость технологического слоя наблюдается у покрытия

МДО+ОГ, которому лишь немного уступает абразивная износостойкость покрытия МДО+Г. Более объективную характеристику функционала сформированных покрытий дает оценка стойкости рабочего слоя. Результаты показывают, что скорость износа покрытий с графеновой и оксид-графеновой добавками находится примерно на одинаковом уровне и приблизительно в 4 раза меньше по сравнению с МДО-покрытием, полученным в базовом электролите. Также необходимо отметить важное обстоятельство: абразивная износостойкость МДО-покрытий с графеновой и оксид-графеновой добавками практически идентична значениям, полученным при испытании образцов из керамики ВК96 (табл. 2).

Для исследования стойкости сформированных покрытий в условиях, максимально близких к реальным эксплуатационным, были выполнены натурные испытания абразивно-струйной стойкости макетных образцов сопел. Нагрузку на сопла, которыми комплектуются пистолеты инжекционно-струйных аппаратов, можно охарактеризовать как ударно-абразивное изнашивание. Для сравнения аналогичным испытаниям подвергли штатные сопла из ВК96. В процессе испытаний варьировали диаметры выходных отверстий сопел с целью изменений такого технологического фактора, как расход абразивного материала в единицу времени. Через каждые 15 мин проводили фиксацию износа, что позволяло давать оценку динамики износа в цикле испытания. Установлено, что увеличение диаметра сопла напрямую оказывает влияние на его износостойкость: практически для всех типов МДО-покрытий, а также для керамических сопел наблюдали снижение стойкости к ударно-абразивному воздействию (рис. 7).

При небольшом диаметре канала сопла (3 мм) расход воздушно-абразивной смеси незначителен, стойкость исследуемых МДО-покрытий в течение всего времени испытаний сохраняется на высоком уровне. Характер износа сопел с МДО-покрытий близок к параболическому; вероятно, реализуется усталостный механизм изнашивания, тогда как у керамического сопла износ преимущественно линейный. По истечении 30 мин испытания сопло с базовым МДО-покрытием показывает более высокую износостойкость, чем керамическое, тем не менее ближе к завершению тестирования данное преимущество теряется (рис. 7а).

Достаточно любопытный результат с научно-практической точки зрения получен в процессе испытания сопел с диаметром канала 4 мм. Как видно из рис. 7б, объемный износ сопла с МДО-покрытием в базовом электролите на протяжении всего цикла эксперимента идентичен значениям для керамического сопла, а работоспособность сопел соответственно сохраняется до окончания испытания. Сопло с покрытием МДО+Г показывает достаточно близкие результаты, несколько уступая в износостойкости рассмотренной паре (МДО и ВК96). Покрытие МДО+ОГ по своей абразивной стойкости вначале не уступает показателям сопла из ВК96, однако показывает катастрофический износ на последних минутах испытаний (рис. 7б). Увеличение диаметра канала сопла приводит к значительному повышению расхода воздушно-абразивной смеси, что усиливает ударно-абразивное изнашивание, и в этих условиях покрытие МДО+ОГ не может оказывать сопротивление износу в ходе всего цикла испытаний (рис. 7б).

При увеличении диаметра канала сопла до 5 мм уровень расхода воздушно-абразивной смеси становится критичным для сопел с покрытиями МДО+Г и МДО+ОГ (с инкорпорированными графеновой и оксид-графеновой добавками к электролиту), поэтому их использование в таких условиях эксплуатации следует признать нецелесообразным (рис. 7в). При этом МДО-покрытие, полученное в базовом электролите, по характеру и темпам изнашивания близко к результатам, показанным при испытании сопел с диаметром 3 мм. Однако наблюдается аналогичная закономерность: превосходство над соплом из ВК96 на начальном этапе (примерно до 30 мин испытаний) и резкая интенсификация процесса износа во второй половине эксперимента. Для керамического сопла по-прежнему отмечается линейный характер изнашивания.

ВЫВОДЫ

При проведении МДО сплава ВТ6 в слабощелочном алюминатном электролите установлено, что добавление графена и оксида графена повышает структурную однородность поверхности и снижает ее шероховатость.

Присутствие в МДО-покрытии графена и оксида графена способствует уменьшению коэффициента трения до ~ 0,1 и снижению скорости абразивного изнашивания, приближаясь к показателям для керамики ВК96.

По результатам натурных испытаний сопел на абразивно-струйную стойкость при ударно-абразивном воздействии установлено, что наилучшие показатели демонстрируют МДО-покрытия, полученные в базовом электролите без добавления графена и оксида графена и превосходящие (особенно на начальных стадиях)

стойкость керамики ВК96. Более того, при описанном механизме изнашивания добавление графена и оксида графена в состав электролитов не оказывает положи-тельного влияния на функциональные свойства сопловых каналов.

В целом можно утверждать, что процесс МДО обладает значительным потенциалом для обеспечения повышенной стойкости сопел, изготовленных из титановых сплавов, а само направление является перспективным для дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-00811).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковязин, С.С., Сороковиков, Н.А., Скрипка, А.В., Влияние технологических параметров на качество поверхности реза при гидроабразивной обработке, *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2019, № 1, с. 335.

2. Korobov, N., Shipitko, O., Konovalenko, I., Grigoryev, A., et al., SWaP-C Based Comparison of Onboard Computers for Unmanned Vehicles, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol. 154, p. 573. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_47

3. Золоторевский, В.С. *Механические свойства металлов*, М.: Металлургия, 1983. 352 с.

4. Lysenko, M.P., and Tlekhusezh, M.A., Titanium and its application in various industries, *Scientific review*, 2019, vol. 4, p. 64. https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=2145

5. Krotov, D.M., Structures of two-component titanium powder α- and β-phases in mimtechnology, *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, vol. 71, p.74. doi: 10.15593/2224-9982/2022.70.08

6. Aliofkhazraei, M., Macdonald, D.D., Matykina, E., et al., Review of plasma electrolytic oxidation of titanium substrates: Mechanism, properties, applications and limitations, *Applied Surface Science Advances*, 2021, vol. 5, art. ID 100121. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100121

7. Эпельфельд, А.В., Белкин, П.Н., Борисов, и др., *Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3-х т. Т. I: Микродуговое оксидирование*, М.- СПб.: Реноме, 2017. 648 с.

8. Крит, Б.Л., Плазменно-электролитное модифицирование как метод создания и улучшения характеристик адаптивных материалов, *Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности: коллективная монография*. Под ред. д.т.н., проф. С.Н. Григорьева, М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2021, с. 86.

9. Крит, Б.Л., Ионно-лучевая модификация материалов, *Очерки по физико-химии и материаловедению*, М.: Интермет инжиниринг, 1998. с. 278.

10. Tchufistov, O.E., Malyshev, V.N., Zolkin, A.N., and Tchufistov, E.A., Enhancement of Oxide Coatings Quality Formed by Electrolytic Oxidation Methods on Inner Surfaces of Lengthy Products, *Surf. Engin. Appl. Electrochem*., 2023, vol. 59, p. 728. https://doi.org/10.3103/S1068375523060169

11. Jiang, B.L., and Wang, Y.M., Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys, *Surf. Eng. Light Alloy. Alum. Magnes. Titan. Alloy*, 2010, p. 110. https://doi.org/10.1533/9781845699451.2.110

12. Li, N., Wang, H., Liu, Q., et al., Review of Preparation and Key Functional Properties of Micro-Arc Oxidation Coatings on Various Metal Substrates, *Coatings*, 2025, vol. 15, p.1201. https://doi.org/10.3390/coatings15101201

13. Necula, B.S., Apachitei, I., Tichelaar, F.D., Fratila-Apachitei, L.E., et al., An electron microscopical study on the growth of TiO2–Ag antibacterial coatings on Ti_6Al_7Nb biomedical alloy, *Acta Biomater*., 2011, vol. 7, p. 2751.

14. Shokouhfar, M., Dehghanian, C., Montazeri, M., and Baradaran, A., Preparation of ceramic coating on Ti substrate by plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance: Part II, *Applied Surface* Science, 2012, 258(7), p. 2416. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.064

15. Ming, X., Wu, Y., Zhang, Z., and Li, Y., Micro-Arc Oxidation in Titanium and Its Alloys: Development and Potential of Implants, *Coatings*, 2023, vol. 13, p. 2064. https://doi.org/10.3390/coatings13122064

16. Aliofkhazraei, M., Gharabagh, R.S., Teimouri, M., Ahmadzadeh, M., Darband, G.B., Hasannejad, H., Ceria embedded nanocomposite coating fabricated by plasma electrolytic oxidation on titanium, *J. Alloys Compd*., 2016, vol. 685, p. 376.

17. Yao, X., Zhang, X., Wu, H., Tian, L., et al., Microstructure and antibacterial properties of Cu-doped TiO_2 coating on titanium by micro-arc oxidation, *Appl. Surf. Sci.*, 2014, vol. 292, p. 944.

18. Mu, M., Zhou, X., Xiao, Q., Liang, J., et al., Preparation and tribological properties of self-lubricating TiO_2/graphite composite coating on Ti_6Al_4V alloy. *Appl. Surf. Sci.*, 2012, vol. 258, p. 8570. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.05.051

19. Vasilyeva, M.S., Rudnev, V.S., Korotenko, I.A., and Nedozorov, P.M., Producing and studying oxide

coatings containing manganese and nickel compounds on titanium from electrolyte suspensions. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2012, vol. 48, p.106 https://doi.org/10.1134/S2070205111050224.

20. Mu, M., Liang, J., Zhou, X., and Xiao, Q., One-step preparation of TiO_2/MoS_2 composite coating on Ti_6Al_4V alloy by plasma electrolytic oxidation and its tribological properties. *Surf. Coat. Technol.*, 2013, vol. 214, p.124.
https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.079
21. Rudnev, V.S., Vaganov-Vil'kins, A.A., Nedozorov, P.M., et al., Formation of oxide layers modified with polytetrafluoroethylene or graphite on aluminum and titanium alloys by plasma electrolytic oxidation, *Russ J Appl Chem*, 2012, vol. 85, p. 1147.
https://doi.org/10.1134/S1070427212080010
22. Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., et al. Investigation of Tribological Characteristics of PEO Coatings Formed on Ti_6Al_4V Titanium Alloy in Electrolytes with Graphene Oxide Additives, *Materials*, 2023, vol 16, no. 11, p. 3928.
https://doi.org/10.3390/ma16113928
23. Wanying, L., Ying, L., Yuanhua, L., et al., Effects of graphene on structure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on D16T Al alloy, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 475, p. 645.
24. Комаров, А.И., Износостойкие композиционные МДО-покрытия, модифицированные углеродными и керамическими наночастицами, *Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т*. Т. 2. Витебск: УО «ВГТУ», 2017, с. 418.
25. Комаров, А.И., Золотая, П.С., Горбачук, Н.И., О роли графеноподобного углерода в формировании покрытий методом микродугового оксидирования. *Механика машин, механизмов и материалов*, 2020, № 1(50), с. 72.
26. Chen, X., Tang, S., Zhang, D., Yan, J., et al., Influence of graphene on corrosion properties of micro arc oxidation coatings on 7075 aluminum alloy, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024, vol. 21, no. 5, p. 3516.
https://doi.org/10.1111/ijac.14767
27. Кузин, В.В., Федоров, С.Ю., Григорьев, С.Н., Трибологический аспект в технологическом обеспечении качества керамических деталей, *Новые огнеупоры*, 2019, № 5, с. 122.
https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-5-122-126

Summary

The paper investigates certain properties of nozzles made of VT6 titanium alloy with ceramic-like coatings formed by micro-arc oxidation (MAO), including those with the addition of graphene and graphene oxide nano-particles to the electrolyte. Data on measurements of microhardness, tribological characteristics, and abrasive resistance of the coatings, as well as on full-scale tests of the nozzles as part of an injection-jet apparatus are presented. The features of MAO coatings wear were identified depending on the component composition of the electrolyte and the condition of the formed surface layer. It has been established that under certain conditions, the wear resistance of titanium alloy nozzles with MAO coatings is comparable to the performance demonstrated by industrial produced ceramic nozzles.

Keywords: microarc oxidation, titanium alloy VT6, graphene, graphene oxide, ceramic-like coatings, nozzles, abrasive wear