

УДК 621-034.14.669.14

З.А. Годжаев, профессор, д-р техн. наук,

С.Д. Зайцев, канд. техн. наук,

О.В. Сомов, ст. науч. сотр., канд. техн. наук

ОАО «Федеральный исследовательский испытательный центр машиностроения»

ул. НАТИ, д.13, с. Новый Быт, Чеховский р-н, Московская область, Россия, 142322

E-mail: ficm@mail.ru

И.В. Сулинов, профессор, д-р техн. наук

Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (РГТУ «МАТИ»),

ул. Оршанская, д. 3, г. Москва, 121552.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ (МДО) ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе рассматривается технология микродугового оксидирования (МДО) по созданию износостойких наноструктурированных композитов на основе вентильных металлов для уплотнений центробежных насосов системы охлаждения двигателей. Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного контракта №14.518.11.7025 по мероприятию 1.8 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Ключевые слова: анализ, технология, наноструктурированные композиты, вентильные металлы, плазмохимические реакции, микродуговое оксидирование, уплотнение, физико-химические и механические свойства, программа-методика.

Анализ научно-технических материалов исследований и патентный поиск показал, что разработка новых экологически чистых технологий и создания многофункциональных поверхностных слоёв и покрытий для защиты и упрочнения поверхностных слоёв поверхности деталей, их стойкости к агрессивным средам и образующему износу в парах трения, в т.ч. торцевых уплотнений центробежных насосов является актуальной проблемой современной науки и техники.

Повышение долговечности изделий традиционно основано на разработке новых материалов или создании различными методами поверхностных защитных оксидных слоёв.

В последнее время для этих целей все шире применяется плазменное воздействие в электролитах нового вида электрохимической обработки поверхности металлических материалов методом микродугового оксидирования (МДО). Указанный метод позволяет получить многофункциональные порошкоподобные наноструктурированные слои на вентильных металлах (алюминий, титан, магний, тантал, ниобий, цирконий и др.) их сплавах и покрытиях из этих сплавов с регулируемым в широком диапазоне составом, структурой и свойствами и использовать их в качестве износ- и коррозионностойких МДО покрытий [1].

Основными преимуществами метода МДО является его экологичность, отсутствие необходимости применять тщательную предварительную подготовку поверхности и высокотехнологичное холодильное оборудование для получения покрытий толщиной более 100 мкм.

В научно-технических обзорах, посвященных технологиям «плазменного электролиза», среди которых значительное место отводится МДО, приводятся всякие обоснования для включения его в нанотехнологические процессы [2].

Особенностью этих технологий является образование специфических структур в поверхностном слое (метастабильные и высокотемпературные фазы, неравновесные твердые растворы, сложные соединения стеклофазы и т.п.). Эти вещества появляются в результате плазмохимических реакций при бомбардировке поверхности обрабатываемого материала потоками высокоэнергетических частиц из плазмы разряда. Из-за очень высокой скорости охлаждения ~ 108 К/с в синтезируемом слое при комнатной температуре образуются высокотемпературные фазы (α - Al_2O_3), пересыщенные твердые растворы, аморфные и метастабильные фазы Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , Nb_2O_5 и другие), определяющие характеристики оксидного слоя и его свойства. Наиболее эффективным методом модифицирования путем формирования наноструктурированных покрытий и пленок является импульсное электроснабжение [2] на подложке, помещенной в раствор, содержащий ионы осаждаемого элемента, за счет разности потенциалов формируют металлические или алмазоподобные плёнки. Микродуговое оксидирование, обладающее всеми перечисленными чертами импульсного электроосаждения, существенно расширяет возможности методов этой группы, позволяя формировать керамические слои.

В существующих конструкциях отечественных торцевых уплотнений центробежных насосов одна из вращающихся деталей выполняется из относительно мягкого материала, а ответная деталь пары трения – из твердого материала. При этом в качестве мягкого материала применяется графитсодержащие композиции (типа НАМИ – ГСТАФ-40, графито-свинцовая композиция), материал твердой детали – легированная нержавеющая сталь (ШХ-15, 30Х13 и др.) или серый чугун. Сочетание в паре трения деталей различной плотности не обеспечивает сохранение уплотняющей способности контактной поверхности вращающихся деталей пары трения в процессе эксплуатации.

Пары трения в конструкции торцевых уплотнений центробежных насосов зарубежного производства работают по принципу «твердая по твердой». Для дизельных двигателей ярославского моторного завода (ЯМЗ) в настоящее время используются узлы торцевых уплотнений импортного производства (Германия, Италия) в которых детали пары трения выполнены из технической керамики (SiC – SiC). Детали из технической керамики обладают высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью. Такая пара трения обеспечивает достаточный ресурс водяного насоса, однако, при повышенных оборотах двигателя ($< 4000 \text{ мин}^{-1}$) возможно растрескивание керамических деталей, что приводит к потере целостности изделия и потере работоспособности торцевого уплотнения.

Разрабатываемая технология по созданию износостойких наноструктурированных композитов на основе вентильных металлов для уплотнений центробежных насосов системы охлаждения двигателей ОАО «ММЗ» и ОАО «ЧТЗ-Уралтрак» позволит обеспечить замещение импорта аналогичных деталей и значительно повысит конкурентоспособность отечественных двигателей.

Технологический процесс МДО

Технологический процесс МДО содержит три вида операций.

1. Подготовительные операции.

- Приготовление в рабочей ванне электролита заданного компонентного состава и концентрации на дистиллированной или деминерализованной воде (соответствующей требованиям Госфармакопеи РФ ФС 42-2619-89).
- Корректировка электролита по результатам химического анализа добавлением недостающих компонентов, в том числе и воды, до исходного уровня.
- Монтаж токоподводов на детали. Токоподвод из алюминиевой проволоки диаметром 4 мм монтируется резьбовым способом, обеспечивающим жесткий, надежный как механический, так и электрический контакт. Если необходимо, на детали с помощью специальной оснастки устанавливают дополнительные электроды, уплотнения и изолирующие накладки из фторопласта, капролона, кремнийорганического герметика и др.
- Обезжиривание загрязненных деталей в растворе $40 \text{ г/л Na}_3\text{PO}_4 + 40 \text{ г/л Na}_2\text{CO}_3$ в воде.
- Промывка деталей в холодной проточной воде.
- Установка деталей с токоподводами в электролитической ванне на подвеске таким образом, чтобы они были полностью погружены в электролит, равномерно распределены по объему ванны, не касаясь друг друга, стенок и дна ванны, а также дополнительных электродов. Кроме того, необходимо исключить возможность образования воздушных и/или газовых пузырей, как при установке, так и в процессе МДО.

2. Основные операции.

- Закрывать ограждение ванны, включить водяное охлаждение, вытяжную вентиляцию, устройство перемешивания электролита – мешалку;
- Подключить технологический источник тока (ТИТ) к нагрузке, задать необходимые параметры процесса и поддерживать их в течение всего времени обработки;
- По окончании процесса отключить ТИТ, вентиляцию, охлаждение, устройство перемешивания электролита, открыть ограждение ванны (не ранее, чем через две минуты после отключения конденсаторного ТИТ) и извлечь детали из ванны.

3. Дополнительные и контрольные операции.

- Промывка деталей в холодной проточной воде в течение $0,5 \div 1,5 \text{ ч}$, в зависимости от времени обработки.
- Обдув деталей сжатым воздухом (приблизительно $0,05 \text{ МПа.}$) до внешнего высыхания.
- Сушка деталей при $50 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $30 \div 40 \text{ мин.}$
- Демонтаж токоподводов, а также дополнительных электродов, уплотнений.
- Контроль качества поверхности и необходимых параметров покрытия (толщина, пористость, прочность сцепления покрытия с материалом основы).
- Упаковка готовых деталей.

Упрощенная схема последовательности технологических операций при микродуговом оксидировании приведена на рисунке 1.

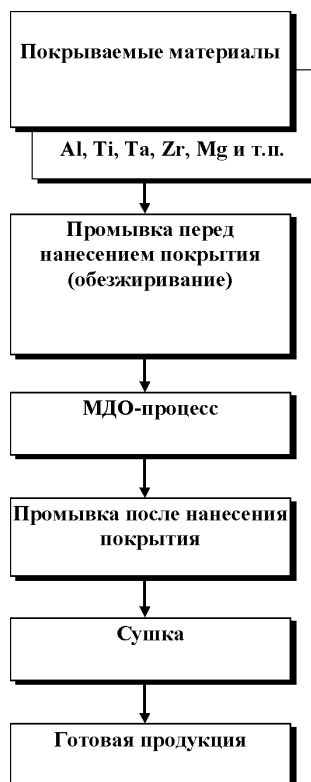


Рисунок 1 – Последовательность технологических операций при МДО

Разработанная технология предусматривает замену дорогих легированных сталей в узлах уплотнений на более дешевые материалы (AL) вторичного использования. За счет варьирования параметрами процесса МДО обеспечивается возможность формировать и модернизировать структурные объекты, имеющие принципиально новые качества.

Используется аттестованное оборудование современного мирового уровня: по плазменно-электролитической химико-термической обработке: установка ионно-плазменной химико-термической обработки; для обработки материалов при плазменных воздействиях в электроплитах ПОЭП-1 и ПОЭП-2, установка микродугового оксидирования – МДО-20, для точной имплантации – МКМ-50, для исследования состава поверхностных слоев используется спектрометрические комплексы ядерного и резерфордского обратного рассеяния на ускорителях НИИСФ МГУ-циклотроне и электростатическом ускорителе с энергиями от сотен до 8 МВ/нуклон. Для структурно-кордиологического анализа – рентгеновский дифрактометр «Дрон-3М», спектрометр РЭ-1306, зондовый микроскоп Ректоскоп, оптический микроскоп Axiostar plus, растровый микроскоп LEO-1430vp.

Для исследования физико-механических свойств – металлографический микроскоп – твердомер ф. «Leitz».

Механические свойства МДО-покрытий оценивали по результатам испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и усталость.

Испытания на *растяжение* проводили на плоских образцах с размерами рабочей части, мм: сечение – 2×4, длина – 17 при скорости перемещения активного захвата 0,071 мм/мин. На протяжении всего периода нагружения под микроскопом наблюдали за состоянием поверхности образца.

При достижении в образце напряжений ниже $\sigma_{0,2}$ трещины на поверхности не зарождались, что связано с наличием в МДО-покрытиях значительных остаточных напряжений сжатия. В упругой области нагружения происходит разгрузка покрытия вследствие его деформации совместно с металлической основой.

По достижении напряжений, примерно равных условному пределу текучести материала основы, в покрытии образовывались микротрещины, зародившиеся, как правило, на его поверхности с ребер граней образца и распространяющиеся навстречу друг другу до их встречи в плоскостях, перпендикулярных линии действия растягивающей нагрузки.

При уровне напряжений выше $\sigma_{0,2}$ развивалась одна магистральная трещина в покрытии. Дальнейшее нагружение образца приводило к образованию «шейки» и уменьшению реального сечения металлической основы, возникновению в покрытии продольных трещин и отслаиванию покрытия. Для сравнения испытывали также образцы без покрытия. В таблице 1 приведены результаты испытаний образцов из алюминиевого сплава Д16Т без и с МДО-покрытием толщиной 140 мкм, полученным в силикатно-щелочном электролите в мягком анодно-катодном режиме.

Из таблицы видно, что покрытие несколько снижает показатели механических свойств. Это обусловлено тем, что МДО-покрытие уменьшает площадь живого металлического сечения образца, поскольку формируется в процессе оксидирования, главным образом, за счет металла основы. При толщине 140 мкм эта площадь уменьшается на 21 % (если покрытие полностью формируется за счет металла основы) и на 14 % (если – на две трети, а на одну треть – за счет электролита) – это уменьшение даже превышает уровень снижения свойств.

Таблица 1 – Результаты испытаний на растяжение образцов из алюминиевого сплава Д16Т

Характеристика	Образцы		Отношение
	с МДО	Без МДО	
Временное сопротивление σ_b , МПа	392	445	0,88
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	320	336	0,95
Относительное удлинение δ , %	12,6	14,3	0,88
Относительное сужение ψ , %	23*	25,7	0,89

* рассчитано для металлической основы без учета покрытия

Испытания на сжатие проводили на таких же образцах, что и на растяжение, а также на цилиндрических образцах диаметром 10 и длиной 30 мм.

В результате испытаний плоские образцы с покрытием теряли устойчивость при достижении нагрузки 1700 Н ($\sigma = 243$ МПа), в то время как образцы без покрытия теряли ее уже при 820 Н ($\sigma = 117$ МПа), при этом, вплоть до потери устойчивости, трещины на поверхности покрытия не появлялись. Таким образом, образцы с МДО-покрытием показали примерно в 2 раза большую устойчивость, чем без него.

На цилиндрических образцах в упругой области при напряжениях ниже $\sigma_{0,2}$ трещины не появлялись. При напряжениях, превышающих $\sigma_{0,2}$, у основания образцов на поверхности покрытия образовывалась сетка микротрещин, которые с увеличением нагрузки распространялись, как правило, по образующей вдоль оси образцов. Из некоторых микротрещин возникали магистральные трещины, которые раскалывали покрытие до основы. В некоторых случаях отмечалось ветвление магистральных трещин. При дальнейшем повышении нагрузки начинались сколы покрытия у основания образца, а также образовывались кольцевые трещины в плоскости, перпендикулярной оси образца, и покрытие начинало отслаиваться вследствие значительной деформации металла основы.

Испытания на **статический изгиб** и усталость проводили на плоских образцах с размерами рабочей части, мм: сечение – 5×5, длина – 86 при консольном закреплении на установке.

Образцы изгибали сосредоточенной нагрузкой, приложенной к их концу, и с помощью микроскопа фиксировали деформацию и динамику разрушения в зонах растяжения и сжатия.

Исследования показали, что при напряжениях выше $\sigma_{0,2}$ начиналось зарождение магистральной трещины в зоне сжатия, где происходило разрушение покрытия до металла основы (сечение трещины имело V-образную форму), в то же время, на растянутой стороне зарождались микротрещины, которые не распространялись на всю высоту образца. Вначале, в плоскостях, параллельных линии действия изгибающей силы, магистральные трещины распространялись со стороны сжатия только до нейтральной линии образца. При дальнейшем нагружении на сжатой стороне образца возникали трещины вдоль продольной оси, а на растянутой стороне из микротрещин возникала трещина, которая сообщалась с образовавшимися ранее.

На рисунке 2 представлены зависимости прогиба образцов с МДО-покрытием толщиной 140 мкм и без покрытия от приложенной нагрузки. Видно, что образцы с покрытием при изгибе обладают более высокой жесткостью по сравнению с образцами без покрытия. Аналогичные результаты получаются при сжатии образцов. Повышение жесткости связано с наличием в оксидном покрытии остаточных напряжений сжатия, а также с тем, что МДО-покрытие обладает более высоким модулем упругости, чем алюминиевый сплав.

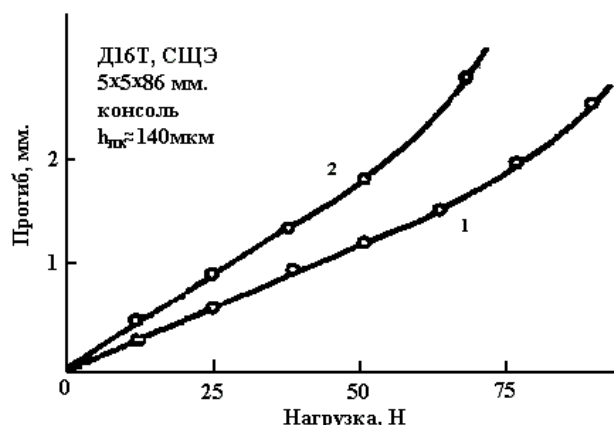


Рисунок 2 – Влияние нагрузки на прогиб образцов
1 – образец с МДО-покрытием; 2 – образец без покрытия

Исследование *усталостной прочности* проводили на установке при поперечном изгибе в одной плоскости консольных образцов при частоте нагружения 27,4 Гц с симметричным циклом нагружения 116 МПа. В результате испытаний было выявлено, что образцы с покрытием (уведомление о получении и регистрации заявки № 2010107963 от 05.03.2010 и № 2010113434 от 07.04.2010) разрушались при количестве циклов нагружения в 2,3 раза меньшем по сравнению с образцами без покрытия.

Снижение числа циклов до разрушения при принятом в испытаниях высоком уровне нагружения, по-видимому, связано со значительным перепадом механических характеристик (твердости, пластичности, модуля упругости и т. д.) металлической основы и оксидного покрытия. При испытаниях трещины сначала зарождались в покрытии, а затем происходило лавинообразное разрушение образцов.

Прочность сцепления МДО-покрытий с основой, как показали испытания с микроиндентором, может достигать 350–380 МПа (для покрытий толщиной 200–250 мкм), что соизмеримо с пределом прочности дуралюминов. Это объясняется, прежде всего, тем, что модифицированный слой образуется в основном из обрабатываемого материала с продвижением границы раздела вглубь и имеет химическую связь с ним.

Микротвердость МДО-покрытий измеряли на поперечных шлифах образцов с помощью металлографического комплекса «Leitz» или на микротвердомере ПМТ-3М с использованием алмазной пирамидки Виккерса при нагрузках на индентор $50 \div 200 \text{ Г}$.

На рисунке 3 представлены данные, полученные при изучении влияния концентрации компонентов электролита на микротвердость получаемых МДО-покрытий.

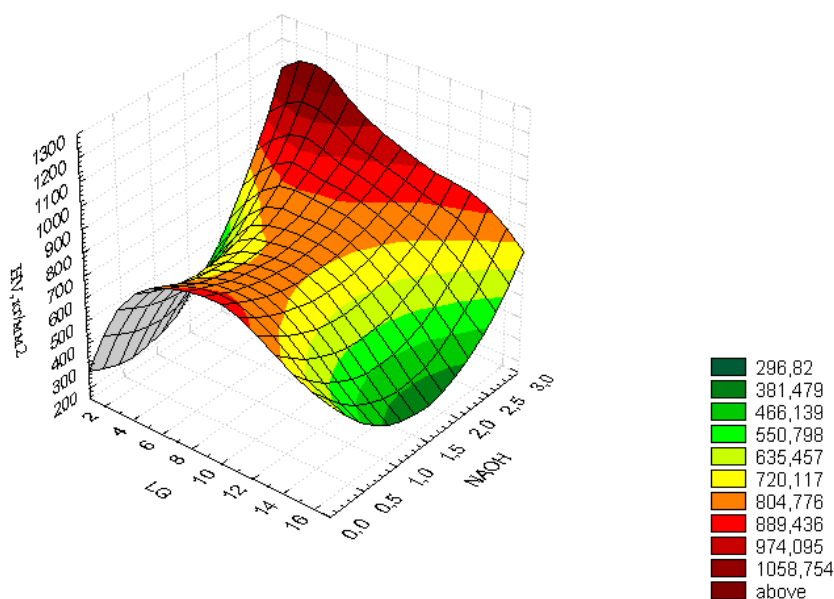


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости МДО-покрытия от концентрации жидкого стекла и NaOH в электролите, сплав АМг5, $\tau = 3 \text{ ч}$, $i_a = 5,5 \text{ А/дм}^2$, $I_K/I_A = 1$

Максимум микротвердости МДО-покрытий, формируемых на сплаве АМг5 в силикатно-щелочном электролите находится в области с минимальным содержанием жидкого стекла и наибольшей в исследуемом диапазоне концентрацией щелочи.

В некоторых условиях могут быть получены покрытия, обладающие микротвердостью вплоть до 2500 кг/мм^2 . Такие покрытия получаются, например, при особенных режимах МДО-обработки или при добавлении в электролит специальных компонентов (рисунок 4).

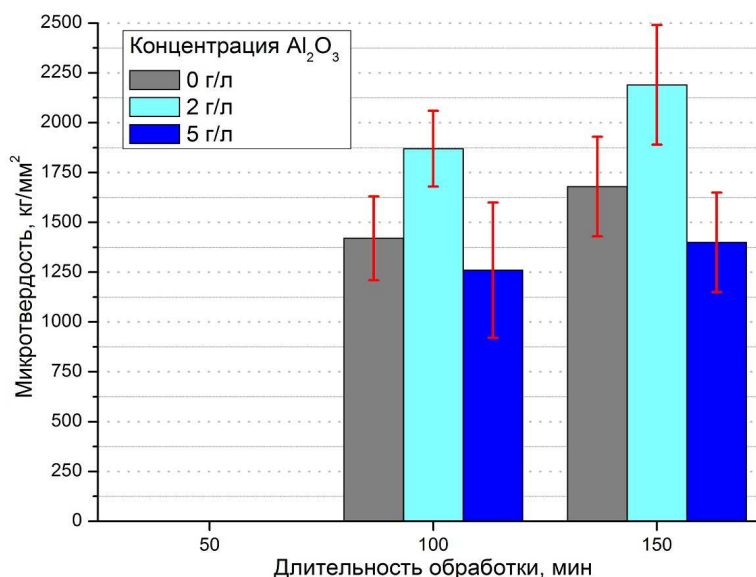


Рисунок 4 – Влияние концентрации оксида алюминия на микротвердость получаемых МДО-покрытий

Добавка в электролит Al_2O_3 оказывает практически одно и то же влияние на микротвердость МДО-покрытий, полученных при длительности обработки 100 и 150 мин.

Максимальная во всех рассмотренных случаях микротвердость составляет около 2500 кг/мм^2 при относительно невысокой длительности обработки – 150 мин.

Пористость МДО-покрытий в различных слоях определяли на послойно сошлифованных образцах методами стереометрической металлографии по результатам планиметрического обмера микрофотограмм, полученных на растровом электронном микроскопе JSM-50A фирмы «Jeol».

Фазовый состав МДО-покрытий (уведомление о получении и регистрации заявки № 2010110320 от 19.03.2010) анализировали послойно методом рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-3. Образцы для исследования закрепляли в массивных шайбах из кварцевого стекла с помощью сплава Вуда.

Дифрактограммы получали на $\text{Cu-K}\alpha$ излучении с использованием никелевого фильтра в виде фольги оптимальной толщины при напряжении на трубке БСВ-23 Cu 44 кВ и силе тока 40 мА. Предел измерений составлял 10^3 имп/с, постоянная времени – $S = 2,5$ с, скорость наблюдаемого спектров ЯОР в пределах статистической погрешности измерений. Толщину слоев модельной структуры определяли в единицах ат./см^2 . При переводе толщины из этих единиц h_n в метрическую шкалу h атомную плотность оксида алюминия n_0 ($\sim 10^{23} \text{ ат./с м}^3$) полагали равной плотности беспористого корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$):

$$h = h_n / n_0. \quad (1)$$

Пористость МДО-покрытий приводит к уменьшению средней плотности оксида алюминия и, следовательно, к увеличению геометрической толщины покрытия, результаты измерения которой токохревным толщиномером также приведены на рисунке 2.9 б.

Трибологические испытания

Одно из основных достоинств оксидированных поверхностей (особенно в случае МДО алюминия и его сплавов) – их высокая износостойкость при фрикционном, т. е. основанном на трибологическом эффекте, взаимодействии с твердыми телами, гидро- и газоабразивными потоками. Это обусловлено высокой твердостью МДО-покрытий в сочетании с их особым фазовым составом (корунд и др. оксиды, алюмосиликаты) и структурой, обеспечивающей пониженную хрупкость, хорошей прирабатываемостью и низким коэффициентом трения после приработки, отсутствию склонности к схватыванию, благодаря

своей керамической природе. Схема факторов, влияющих на фрикционное взаимодействие твердых тел, приведена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Схема факторов, влияющих на фрикционное взаимодействие твердых тел

Изучение триботехнических характеристик МДО-покрытий в различных условиях показало, что независимо от схемы трения они обладают высокой износостойкостью, низкими значениями коэффициента трения и способны работать в определенном диапазоне нагрузок, скоростей и сред в паре со многими материалами. Особенно важно, что такие оксидные слои обладают высоким сопротивлением абразивному изнашиванию, сравнимым с композитами на основе карбида вольфрама WC, бронированной сталью и корундом (уведомление о получении и регистрации заявки № 2010114349 от 13.04.2010).

По объемному показателю величина износа МДО-покрытий на алюминиевых сплавах в зависимости от условий испытания в 5÷7 раз меньше, чем стали 45, после закалки и среднего отпуска. Особенно большое преимущество оксидных слоев проявляется в условиях, когда основным механизмом изнашивания является микрорезание.

При трибологических испытаниях МДО-покрытий можно выделить три этапа с различной скоростью изнашивания, коррелирующие с неравномерностью распределения твердости и изменением пористости по толщине покрытия (рисунок 3):

- 1-й этап с высокой скоростью изнашивания, вызванной низкой твердостью и высокой пористостью технологического слоя покрытия;
- 2-й этап с минимальной скоростью изнашивания рабочего слоя покрытия, связанной с самой высокой твердостью и низкой пористостью этого слоя;
- 3-й этап с резким повышением скорости изнашивания на границе покрытие-подложка из-за понижения твердости в переходном слое и выхода на необработанную алюминиевую подложку.

Трибологические испытания поверхностей, обработанных методом МДО, аналогичны тестированию износостойких материалов (чугунов, закаленных сталей, твердых сплавов и др.). Типовые методики могут быть успешно воспроизведены при помощи стандартного оборудования (машины трения), а также на специальных испытательных установках.

На машине трения УМТ-1 исследовалась износостойкость при сухом трении по схеме «кольцо-кольцо» МДО-покрытий, сформированных в силикатно-щелочном электролите при мягком анодно-катодном режиме. Частота вращения составляла 15 Гц, нагрузка на образец – 200 Н. В результате испытаний было установлено, что при сухом трении по этой схеме линейный износ для оксидированных образцов из сплава Д16 не превышает 1 мкм/мин.

Испытания на изнашивание по шлифовальному кругу марки 14А40НГТ проводили по торцевой поверхности цилиндрических образцов диаметром 10 мм на установке, обеспечивающей трение по свежей абразивной поверхности за счет вращения образца вокруг своей оси, вокруг оси патрона, в котором крепится оправка с образцом, и вращения контртела – абразивного круга. Скорость скольжения образца составляла 0,28 м/с, удельная нагрузка на рабочую поверхность образцов 0,2÷1,5 МПа. Перед испытанием образцы подвергали приработке в тех же условиях, в которых проводили испытания. Исследования показали, что при изнашивании по закреплённому абразиву износ растет с повышением удельной нагрузки. Исходя из абсолютных значений потери массы при изнашивании, можно заключить, что оксидированный слой на сплаве Д16 обладает износостойкостью, значительно превышающей таковую для быстрорежущей стали Р18, твердостью 785-800 HV (рисунок 6).

Для оценки влияния оксидирования на контактную выносливость исследования проводили на воздухе, в 3%-ном водном растворе NaCl и при обильной смазке вазелиновым маслом на образцах из

сплава Д16Т диаметром 10 и длиной рабочей части 50 мм на модернизированной установке МКВ-К. На каждом образце испытания проводили по четырем дорожкам качения с использованием дисков из стали ШХ 15 (62-63 HRC) диаметром 150 и толщиной 10 мм при уровнях контактных напряжений 200 МПа. Количество циклов нагружения определяли по формуле:

$$N = 2Dn\tau/d, \quad (2)$$

где D – диаметр нагружающего диска, мм; d – диаметр образца, мм; n – скорость вращения нагружающего диска, об/мин; τ – время до появления первых очагов разрушения, мин. Число 2 указывает, что за один оборот образца осуществляется два цикла нагружения. Начало выкрашивания или отслаивания покрытия фиксировали вибродатчиком. Результаты испытаний показали, что долговечность испытанных образцов составляет $673 \cdot 10^3$, $437 \cdot 10^3$ и $126 \cdot 10^4$ циклов на воздухе, в водном 3 %-ном растворе NaCl и масле соответственно.

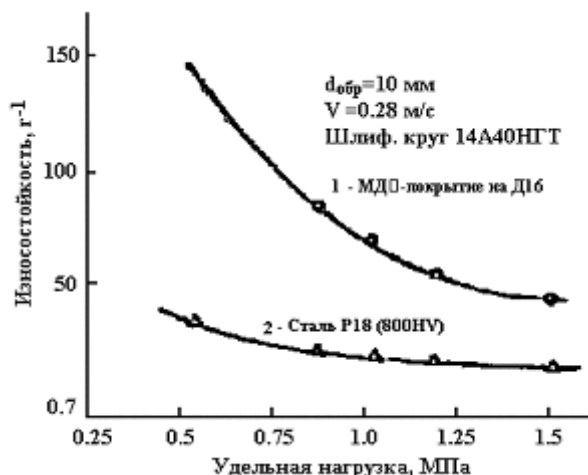


Рисунок 6 – Зависимость износостойкости от удельной нагрузки

В отличие от контактной выносливости при трении скольжения, наличие воды в рабочей зоне повышает сопротивление изнашиванию оксидированных алюминиевых сплавов по сравнению с износостойкостью при испытании на воздухе. Так, износ оксидного слоя на сплаве Д16Т при удельной нагрузке 0,8 МПа за 8 часов испытаний составил 62 мкм, тогда как в воде он снизился в 2,6 раза. Такое влияние, вероятно, связано с уменьшением коэффициента трения и температуры в зоне контакта.

Добавки NaCl в рабочую среду, как ни парадоксально, снижают величину коррозионно-механического износа, причем с повышением концентрации хлорида натрия износостойкость растет. Добавка 0,25 мас. % перекиси водорода H_2O_2 в силикатно-щелочной электролит оксидирования дополнительно снижает линейный износ МДО-покрытия на 30÷50 % в зависимости от концентрации NaCl.

МДО-покрытия также эффективно противостоят гидроабразивному изнашиванию в активных коррозионных средах, например, растворе NaCl и среде NACE.

Таблица 2 – Результаты трибологических испытаний МДО-покрытий

Покрытие на сплаве	Толщина покрытия, мкм $h_{раб}/h_{общ}$	Коэффициент трения скольжения по контртелу			
		Покрытие на сплаве АК4-1	Сплав Амг6	Сталь инструментальная	Фторопласт
АМг6	91/160	0,13	0,19	0,13	0,1
	98/185	0,13	0,19	0,13	0,11
АК4-1	81/160	0,12	0,14	0,12	0,07
	98/200	0,11	0,18	0,11	0,07
АК6Т1	84/170	0,11	0,2	0,13	0,08
	110/220	0,12	0,18	0,13	0,09

Таким образом, пары трения покрытие-покрытие, покрытие-сталь инструментальная и покрытие-фторопласт можно отнести к антифрикционным, поскольку их коэффициент трения скольжения не превышает 0,15, причем пара покрытие-фторопласт показывает минимальный коэффициент трения для всех сплавов и толщин покрытия.

МДО-покрытия на титановых сплавах кроме антифрикционных обладают еще и антизадириными свойствами.

Таким образом, исследования МДО-покрытий в плане износостойкости и антифрикционных свойств показали их высокие служебные характеристики. По сравнению с другими покрытиями, прежде всего металлическими, МДО-покрытия выгодно отличаются:

- высокая прочность сцепления с основой;
- повышение износостойкости в процессе изнашивания, благодаря росту микротвердости и снижению пористости и коэффициента трения;
- коррозионная индифферентность по отношению к большинству агрессивных сред (для металлических покрытий характерно увеличение износа в коррозионной среде);
- наличие остаточной пористости, которая обеспечивает возможность удержания смазки, снижающей коэффициент трения.

Для оценки показателей долговечности и надежности уплотняющих узлов водяных насосов ДВС, работающих в условиях рядовой эксплуатации, разрабатывается методика ускоренных испытаний. В основы ускорения положено:

- повышение рабочей охлаждающей жидкости до 100 °С;
- использование максимальной частоты вращения;
- пусковые циклы насоса при максимальной отрицательной температуре и максимально положительной температурах;
- чередование циклической нагрузки с постоянной.

На основании основ разрабатываемой методики планируется изготовление модульного блока к стенду УСУ «Климат» для испытаний элементов уплотнений водяных насосов для оценки их долговечности.

Заключение

Разработанная технология по созданию наноструктурированных композитов на основе вентильных металлов для уплотнения центробежных насосов системы охлаждения ДВС позволяет обеспечить замещение импорта аналогичных деталей и значительно повысить конкурентоспособность отечественных двигателей.

Библиографический список использованной литературы

1. Микродуговое оксидирование (Теория, Технология, Оборудование) / И.В. Сулинов [и др.]. — М.: ЭКОМЕТ, 2005. — 368 с.
2. Plasma electrolysis for Surface engineering / A.L Verokin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.I. Dowg // Elsevier Science, Surface and Coatings Technology. — 1999. — Vol. 122. — P. 73–93.
3. Natter H. Nanocrystalline nickel and nickel – copper alloys / H. Natter, M. Schmelzer, R. Hempelmann // J. Mater. Res. — 1998. — Vol. 13. — № 5. — P. 1186–1197.

Поступила в редакцию 18.06.2011 г.

Годжаєв З.А., Зайцев С.Д., Сомов О.В., Сулінов І.В Розробка та дослідження зносостійкості наноструктурованих композитів, отриманих методом мікродугового оксидування (МДО) для зміцнення виробів машинобудування

У роботі розглядається технологія мікродугового оксидування (МДО) зі створення зносостійких наноструктурованих композитів на основі вентильних металів для ущільнень відцентрових насосів системи охолодження двигунів. Стаття підготовлена за фінансової підтримки Міністерства освіти та науки Росії в межах Державного контракту № 14.518.11.7025 за заходом 1,8 ФЦП «Дослідження і розроблення за пріоритетними напрямками розвитку науково-технологічного комплексу Росії на 2007-2013 рр.».

Ключові слова: аналіз, технологія, наноструктуровані композити, вентильні метали, плазмохімічні реакції, мікродугове оксидування, ущільнення, фізико-хімічні та механічні властивості, програма-методика.

Godjaye Z.A., Zaitsev S., Somov O., Sulinov I. Research and development of wear-resistant nanostructured composites produced by micro-arc oxidation (MAO) to harden engineering products

In this paper, considered is the technology of micro-arc oxidation (MAO) to wear nanostructure-based composites for sealing valve metal centrifugal pumps of cooling engines. This article was prepared with the financial support of the Russian Ministry of Education as part of the State of the contract № 14.518.11.7025 on Activity 1.8 FTP "Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2007-2013".

Keywords: analysis, technology, nanostructured composites of valve metals, plasma chemical reactions microarc oxidation, compaction, physical-chemical and mechanical properties, the program-technique.