

**Заключение.** Применение интегрального метода ЭИЛ с УЗО позволяет формировать на поверхности токопроводящих материалов покрытия различного назначения с отклонениями от равнотолщинности не более 3-5мкм. Определяющая роль в этом принадлежит составу легирующего анода и частоте УЗО.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чигринова, Н.М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика /Н.М.Чигринова //Монография. – Минск, «Бестпринт» 2018.– 262 с.
2. Чигринова, Н.М. Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании. /Н.М.Чигринова, В.Е.Чигринов, С.И. Ловыгин.– Минск.–Науч.-техн. журнал «Наука и техника», том 15.– № 5.(ВАК) – Минск.–2016.– С.380–390.
3. Чигринова, Н.М., Влияние режимов электроискровой обработки с ультразвуковым воздействием переменной интенсивности и частоты на свойства покрытий / Н.М.Чигринова, С.И.Ловыгин. – Минск.– Науч.-техн. журнал «Порошковая металлургия» (ВАК).– Минск.–2016.
4. Мицкевич М.К. Бушик А.И., Бакуто И.А., Шилов В.А. Изучение динамики процесса переноса материалов электродов в сильноточном импульсном разряде. Электронная обработка материалов, 1977, № 4.
- 5.Чигринова, Н.М. Микроплазменное легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н.М. Чигринова, А.А. Кулешов, В.В. Нелаев // Электронная обработка материалов.– НАН Молдовы.– Кишинев, 2010.– № 2.(262) – С.27–34.

УДК 691.9.048.4

#### НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

*доктор техн. наук Н. М. Чигринова, ст. преп. В.Е. Чигринов, С.Д. Шпадарук, магистрант, П. Е. Крушина, студентка гр. 10505122, ФММП БНТУ, г. Минск*

**Резюме.** Отработка принципов управления состоянием материала и изменением его служебных характеристик может осуществляться различными способами, выбор которых определяется химическим составом обрабатываемого материала, областью его применения, технологичностью метода и его экономическими параметрами. В данной статье речь идет о придании алюминиевым сплавам более высоких параметров.

**Ключевые слова:** покрытие, микродуговое оксидирование, анодно-катодный режим, катодно-анодная обработка.

**Введение.** Перспективным направлением обеспечения функциональности и конкурентоспособности с одновременным увеличением ресурса большинства изделий машиностроения и металлообработки, эксплуатируемых в условиях повышенных знакопеременных нагрузок и рабочих скоростей, термоциклирования, агрессивных сред, без существенного возрастания себестоимости является их поверхностное упрочнение с созданием функционально-адаптированных покрытий. Сегодня известно и успешно эксплуатируется множество различных технологий упрочнения – газопламенные, плазменные, ионно-плазменные методы, лазерная обработка, воздействие на поверхность сильноточковыми электронными пучками, механическое легирования и др. С помощью этих современных, обычно стационарных и дорогостоящих, энергоемких и требующих создания специальной инфраструктуры, высокопроизводительных процессов поверхностного упрочнения обеспечивается создание защитных и упрочняющих покрытий на поверхности металлических изделий, продлевающих срок их безремонтной службы. Выбор упрочняющих методов определяется условиями эксплуатации упрочняемого изделия, исходным состоянием его рабочих поверхностей, конструкторской документацией (КД). Так, решение указанных проблем для изделий из различных алюминиевых сплавов может быть достигнуто за счет применения технологии поверхностного упрочнения, получившей название микродугового оксидирования (МДО).

**Основная часть.** Данный вид обработки относится к электрохимическим процессам и отличается от традиционного анодного оксидирования наличием электрических разрядов на обрабатываемой поверхности, обуславливая ее нагрев и окисление, что оказывает существенное влияние на структуру и свойства получаемых оксидных покрытий [1]. Микродуговое оксидирование также, как и плазменно-электролитическое анодирование, протекает с участием электрических разрядов, однако, при этом имеется ряд существенных отличий: оба электрода погружены в электролит, а разрядные плазменные каналы проводимости образуются не между электродами, а в тонком приэлектродном слое между поверхностью обрабатываемого металла и так называемым электролитным катодом на локальных, хаотически перемещающихся микроучастках, в то время как остальная поверхность контактирует с водным раствором электролита; плазма при МДО не паровоздушная, а электролитная; разряд при МДО не является нормальным тлеющим, высокочастотным, искровым или дуговым, а имеет более сложный характер [2,3]; МДО чаще проводится на переменном токе и в щелочных электролитах при высоких напряжениях – до 1000 В [4]. Технология МДО является экологически безопасным процессом, так как позволяет проводить обработку в электролитах с низкой концентрацией неагрессивных компонентов.

Микродуговое оксидирование может осуществляться в анодном и анодно-катодном режимах. Процесс реализуется при помощи специального оборудования в гальванической ванне с электролитом. Постоянный электрический ток подается на электроды, одним из которых является оксидируемая деталь, а вторым – корпус ванны. В ряде случаев при больших габаритах детали или ее сложной конфигурации в ванну вводится дополнительный электрод, инертный по отношению к материалу оксидируемого объекта.

В любом исполнении – анодный или катодный варианты МДО на процесс оксидирования влияют такие факторы, как напряжение, плотность тока, температурный режим, продолжительность процесса, обуславливающие получение требуемой толщины оксидного слоя, его плотности и твердости.

Для осуществления процесса МДО, как правило, не требуется, тщательной предварительной подготовки металлической поверхности: травления, обезжиривания, осветления, промывок горячей и холодной водой; т. е. исключается ряд технологических операций, а, следовательно, существенно сокращается производственная площадь участка нанесения покрытия, увеличивается производительность процесса и экологическая чистота получения конечной продукции, что приводит к увеличению рентабельности производства [5]. Кроме того оксидная пленка обладает высокой термостойкостью и электроизоляционными свойствами, что позволяет использовать детали в условиях высоких температур и в электротехнике.

Процесс микродугового оксидирования может проводиться как в анодном режиме – АМДО (рисунок 1,а), так и анодно-катодном режимах – АКМДО (рисунок 1,б).

*Анодное микродуговое оксидирование (АМДО)*, осуществляемое в анодном полупериоде, сравнительно новый вид поверхностного модифицирования и упрочнения главным образом металлических материалов вентильного типа, является разновидностью традиционного анодирования, и соответственно, относится к электрохимическим процессам [2,5]. При АМДО обработка поверхности с формированием оксидного покрытия происходит в результате пробоя электрической дугой уже имеющегося на поверхности металла оксидного слоя, его локального расплавления и повышения степени окисленности металла в поверхностном слое, а также кристаллизации образовавшихся химических соединений.

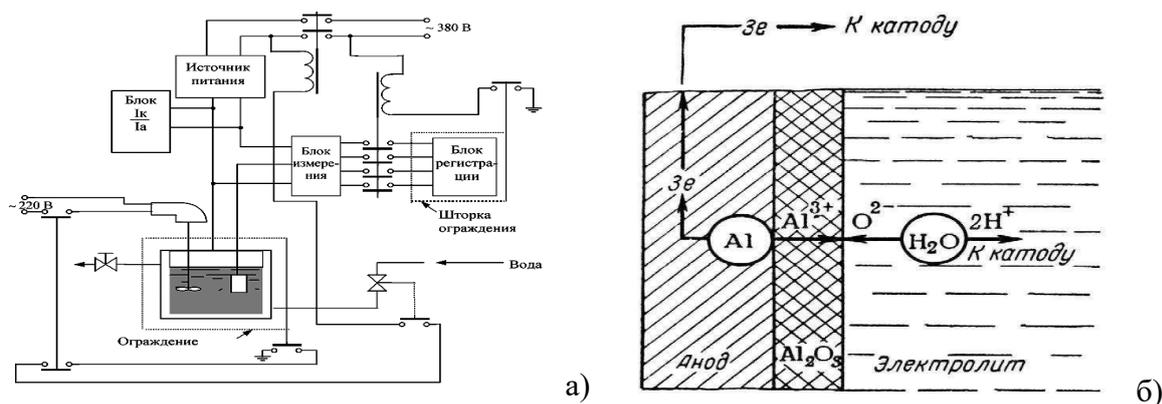


Рисунок 1 – Разновидности процесса микродугового оксидирования

К характерным особенностям АМДО-процесса можно отнести высокие температуры в разрядных каналах и, как следствие, образование высокотемпературных фаз в покрытии, например, твердого  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  – корунда – для алюминиевых сплавов и в электролитах, содержащих алюминаты; термическую деструкцию воды с образованием атомарного и ионизированного кислорода; локальное увеличение концентрации электролита и специфические плазмохимические реакции в зоне разряда: локальную последовательную переработку в разряде оксидов, сформированных обычным электрохимическим путем. Поэтому характеристики АМДО-процесса и АМДО-покрытий значительно отличаются от других методов анодирования.

При *анодно-катодном режиме (АКМДО)* рабочий электрод, подключенный к положительному источнику тока и выполняющий роль катода, погружается в электролит, а деталь, которую требуется покрыть оксидной пленкой, подключается к аноду.

Этот процесс может проводиться и в *катодно-анодном режиме*, где все происходит по обратной схеме – деталь выполняет роль катода, а в электролит погружают электрод, подключенный к отрицательному источнику тока, являясь при этом анодом. При этом катодной составляющей переменного тока отводится комплексная роль: а) специфической катодной мешалки, обеспечивающей барботаж и активацию заключенного в сквозных порах формируемого покрытия электролита, перемешивая его с охлаждаемым электролитом, находящимся в объеме рабочей ванны; б) образования газовой смеси ( $\text{O}_2 + \text{H}_2$ ), образующейся при гидролизе жидкости, перекрывающей сквозные поры, и микропробой которой приводят к образованию паргазовой фазы, последующие пробои которой вносят также значительный вклад в скорость роста покрытия [3].

На начальном этапе на поверхности металла образуется первичная оксидная пленка вследствие начала процесса окисления алюминия. При этом растет температура процесса, возрастает уровень напряжения, приводя к появлению микродуговых разрядов (рис. 2), провоцирующих свечение в зоне обработки. Под воздействием пропускаемого через электролит тока формируется оксидное покрытие. Этот процесс, как и

другие процессы МДО, происходит в два этапа – фаза искровых разрядов (рисунок 2,а) и фаза микродуговых разрядов (рисунок 2, б).

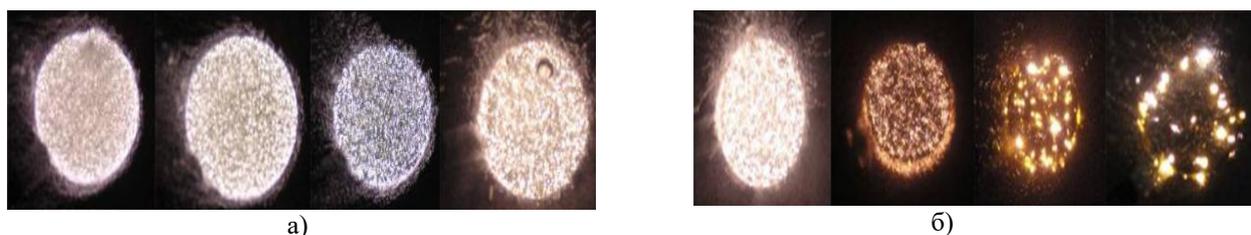


Рисунок 2 – Стадия искрения на обрабатываемой поверхности в процессе АКМДО

С увеличением времени и напряжения количество разрядов на оксидируемой поверхности возрастает. Множественные микродуговые разряды хаотично перемещаются на границе между оксидируемым металлом и электролитом, при этом нагревая металл. В результате процессе оксидирования металла интенсифицируется и на поверхности начинает формироваться твердое пористое оксидное покрытие (рисунок 3).



Рисунок 3 – Пористая структура АКМДО-покрытия

Следует подчеркнуть, что важно контролировать время АКМДО, поскольку может начаться обратный процесс, при котором сформировавшаяся оксидная пленка будет разрушаться.

Используя катодно-анодный режим, можно восстановить покрытие после износа, что является преимуществом данной версии процесса. При этом отсутствует необходимость тщательной предварительной подготовки поверхности перед обработкой [4]. Кроме того, в процессе микродугового оксидирования существует возможность получения покрытий различных цветов, что также позволяет улучшить декоративные свойства поверхности изделия.

Недостатками традиционных методов МДО являются большая продолжительность обработки (до 180 мин) для формирования оксидных слоев необходимой толщины с требуемыми свойствами и, соответственно, высокие энергетические затраты [4,5]. Также МДО-покрытия сложно формировать на внутренних поверхностях, особенно длинномерных изделий, поскольку это дорого и трудозатратно.

Несмотря на все недостатки, покрытия, полученные при помощи микродугового оксидирования, широко используются во многих отраслях промышленности, благодаря ряду преимуществ. Основными преимуществами МДО-покрытий являются их механическая и коррозионная стойкость. Это позволяет использовать обработанные детали на производствах, где требуется повышенная защита от износа оборудования, а также возможно применение в агрессивных средах.

Так, анодно-катодный режим может быть выбран в случае, когда требуется оксидировать алюминиевую деталь с целью получения покрытия с повышенной твердостью и устойчивостью к коррозионным воздействиям. Деталь подключают к отрицательному источнику питания, погружают в электролит, в который предварительно размещен катод, форма и размеры которого, а также их количество определяется размерами и конфигурацией оксидируемой детали и требуемой толщиной покрытия.

В качестве примера использования *катодно-анодного режима* КАМДО можно привести восстановление поверхности детали из стали, если на ней имеются некоторые дефекты в виде царапин или коррозии. Стальную деталь подключают к катоду, погружают в электролит, в который ранее был опущен анод, и пропускают через электролит ток, при помощи которого поверхность стальной детали восстанавливается, устраняя дефекты. Режимы выбирают в зависимости от материала, требуемой толщины оксидной пленки и других факторов.

**Заключение.** МДО-покрытия обладают разнообразными функциональными свойствами, обеспечивая изделия с такими покрытиями высокими коррозионностойкостью, износостойкостью, термостойкостью. Такие покрытия также являются электроизоляционными, могут исполнять функции декоративных слоев. Эта многофункциональность покрытий позволяет применять изделия с ними в различных отраслях промышленности. В кораблестроении МДО-покрытия используются для защиты от износа, коррозии и для декоративной отделки элементов катеров, яхт, водных мотоциклов, лодок и др. Покрытия могут применяться в автомобильной промышленности при декорировании и защите внешних металлических запчастей машин. В медицине покрытия могут наноситься на зубные импланты и протезы, увеличивая их срок службы. Также метод используется при обработке деталей аэрокосмической техники, где даже пористость покрытия может положительно влиять на использование деталей.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зинкович, Д. И. Микродуговое оксидирование / Д. И. Зинкович; науч. рук. С. Г. Койда // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы VII Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ, 21–22 апреля 2011 г. / Белорусский национальный технический университет; гл. ред. С. А. Иващенко [и др.] – Минск: БНТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 56-60.
2. Суминов, И. В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборуд.) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В. Б. Людин, Б. Л. Крит, А. М. Борисов – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
3. Бардин, И. В. Электрические режимы микродугового оксидирования алюминиевого и магнитного сплавов в щелочных электролитах / Диссертация ... кандидата химических наук : 05.17.03 // И.В. Бардин: Моск. ин-т стали и сплавов. – Москва, 2009.– 179 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-2/35.
4. Нисс, В. С. Получение оксидных покрытий на поверхности вентильных металлов с применением высокочастотного импульсного микродугового оксидирования / В. С. Нисс [и др.] // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : тезисы докладов 36-ой Международной научно-технической конференции в рамках международной специализированной выставки «Машиностроение/Металлообработка–2022», (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2022. – С. 112–113.
5. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое оксидирование: проблемы, решения, перспективы. / Н. М. Чигринова // Минск : Бестпринт, 2019. – 255 с.