

Заключение. Проверка целесообразности применения технологии микродугового или пламенного оксидирования в электролитах, модифицированных присадками нано-дисперсных частиц диоксида циркония, полученных разными способами, а также их концентрация, демонстрирует влияние комбинации факторов на конечные свойства формируемых защитных барьеров. В покрытиях, полученных в электролите с добавлением нанопорошка диоксида циркония, синтезированного в плазме СВЧ, с большим содержанием наночастиц, обеспечивается более высокая микротвердость и меньшая сквозная пористость, что гарантирует и более высокую надежность таких барьеров в эксплуатационных условиях, что в свою очередь, расширяет возможности применения изучаемой технологии для создания защиты изделия от вредных воздействий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковальчук, В. Б. Повышение качества антиэрозионных покрытий методом плазмохимического оксидирования на алюминиевых фольгах / В. Б. Ковальчук, С. С. Ивасев // Решетневские чтения – 2011 – С. 332–333.
2. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика / Н. М. Чигринова // Монография. – Минск, «Бестпринт». – 2018. – 262 с.
3. Чигринова, Н. М., Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании. / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин. // В н-т журнале «Наука и техника». – Т. 15. – № 5. – 2016 г. – Минск. – С. 380–390.
4. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое оксидирование: проблемы, решения, перспективы. / Н. М. Чигринова // Монография. – Минск, «Бестпринт». – 2019. – 299 с.
5. Ракоч, А. Г. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом / А. Г. Ракоч, В. В. Хохлов, В. А. Баутин и др. // Защита металлов. 2006. Т. 42. № 2. С. 173-184.
6. Кириллов, В. И. Ансамбль микроплазменных разрядов. Напряженность электрического поля, числа частиц и другие характеристики плазмы / В. И. Кириллов // Электрохимия. 1996. Т. 32. № 3. С. 435-439.
7. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 99–107.
8. Аль-Бдейри, М. Ш. Х. Обзор методов гальвано-плазменной модификации для производства анодированных покрытий на сплавах алюминия: микроструктура, свойства и применение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 51–59.

УДК 67. 02

АНАЛИЗ ПРИЕМОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КЕРАМОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

*доктор техн. наук, профессор Н. М. Чигринова, магистрант С. Д. Шпадарук, студентка П. Е. Крушная,
ФММП БНТУ, г. Минск*

Резюме: Технология микродугового оксидирования, усовершенствованная указанными в статье приемами ее модификации, предназначена для совершенствования структуры и рабочих свойств функционально-адаптированных керамоподобных покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамоподобные покрытия, электролит, энергетические параметры, дополнительные катоды, нанодобавки.

Введение. В динамично развивающемся мире современных технологий, обеспечивающих изделия нетрадиционными и улучшенными рабочими свойствами, достойное место принадлежит методам их поверхностной модификации. Одним из вариантов такого решения является формирование в критических зонах изделий функционально адаптированных к эксплуатационным условиям покрытий. Среди успешно эксплуатируемых методов следует отметить технологии модифицирования металлических материалов в условиях регулируемого электрического разряда через различные передающие среды [1]. К ним относятся микро-дуговые процессы, применение которых обеспечивает создание в критических зонах изделия многофункциональных керамоподобных покрытий, сочетающих повышенные износ-, коррозионно- и теплостойкость, электроизоляционные свойства, и также влияющих на декоративные характеристики поверхности [1]. Среди них особое место принадлежит технологии микродугового оксидирования.

Основная часть. Физическая сущность данной технологии состоит в использовании энергии электрических разрядов, мигрирующих по обрабатываемой поверхности погруженного в электролит объекта, в результате чего формируются керамоподобные покрытия с регулируемыми в широком диапазоне элементным и фазовым составом, структурой и свойствами.

Основные отличия данной технологии от других, близких по принципу действия методов, состоят в том, что микродуговые покрытия могут создаваться на поверхностях изделий различного профиля. При этом их состав и

свойства могут изменяться за счет варьирования режимов обработки и состава электролита. При этом оксидируемая поверхность не требует предварительной подготовки, и наращивание покрытия происходит с высокой скоростью в диапазоне 1-1,5 мкм/мин. Экологичность данного метода обеспечивается отсутствием в рецептуре электролита вредных и опасных реагентов.

К недостаткам подобных технологий, включая МДО, относится высокое энергопотребление. Задачи снижения энергоемкости процесса решаются посредством использования различных приемов, таких, как применение нового типа энергоэффективных источников питания или экономия энергии на чередование режимов обработки детали, дополнительно внедренные в конструкцию установки противоэлектроды (экраны с диэлектрическими свойствами) или эксплуатация электролизных ванн с набегающим электролитом на обрабатываемую деталь.

Современные исследования метода направлены на снижение или исключение негативных особенностей процесса МДО и изучение процессов придания микродуговым покрытиям новых улучшенных свойств.

Так, в ряде работ отмечается, что при использовании процессов предварительной обработки, таких как лазерное текстурирование [2], дробеструйная обработка [3], экструзия с равным углом канала и лазерная переплавка [4], можно изменить морфологию поверхности и размер зерна подложки. В этих случаях появляется возможность формирования практически равнотолщинных покрытий с минимальной пористостью, повышенной износостойкостью в сочетании с высоким качеством поверхности.

Микродуговое оксидирование также целесообразно комбинировать с гидротермальной обработкой, электрофоретическим осаждением, оксидом графена [2-7], что также обеспечивает получение покрытий с улучшенными характеристиками.

Желаемый результат может быть достигнут при использовании предварительной диэлектрической пленки из органических полимеров, например, клеев БФ-2, БФ-6, которая обеспечивает запуск процесса со стадии микродугового оксидирования [8]. Регулировка толщины и качества полимерной пленки необходимы, чтобы избежать ее отслаивания и повысить однородность покрытия.

Эффективно формирование начального слоя электрофоретическим инкорпорированием мелкодисперсных огнеупорных порошков в процессе микродугового оксидирования (МДО) в электролитах-суспензиях. В электролит могут быть добавлены мелкодисперсные порошки, такие как Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , для формирования высокоплотных и износостойких покрытий [7, 8].

Инновационным решением создания покрытий с оптимальным типом структуры и свойств является присадки в раствор наночастиц разнозаряженных ингредиентов [1], что обуславливает возможность снижения электропроводности электролита, приводя к появлению более мощных микроразрядов, и позволяет получить покрытия большей толщины за технологически более короткое время.

На рисунке 1 приведена диаграмма связей входящих параметров процесса МДО и конечных характеристик формируемого покрытия.

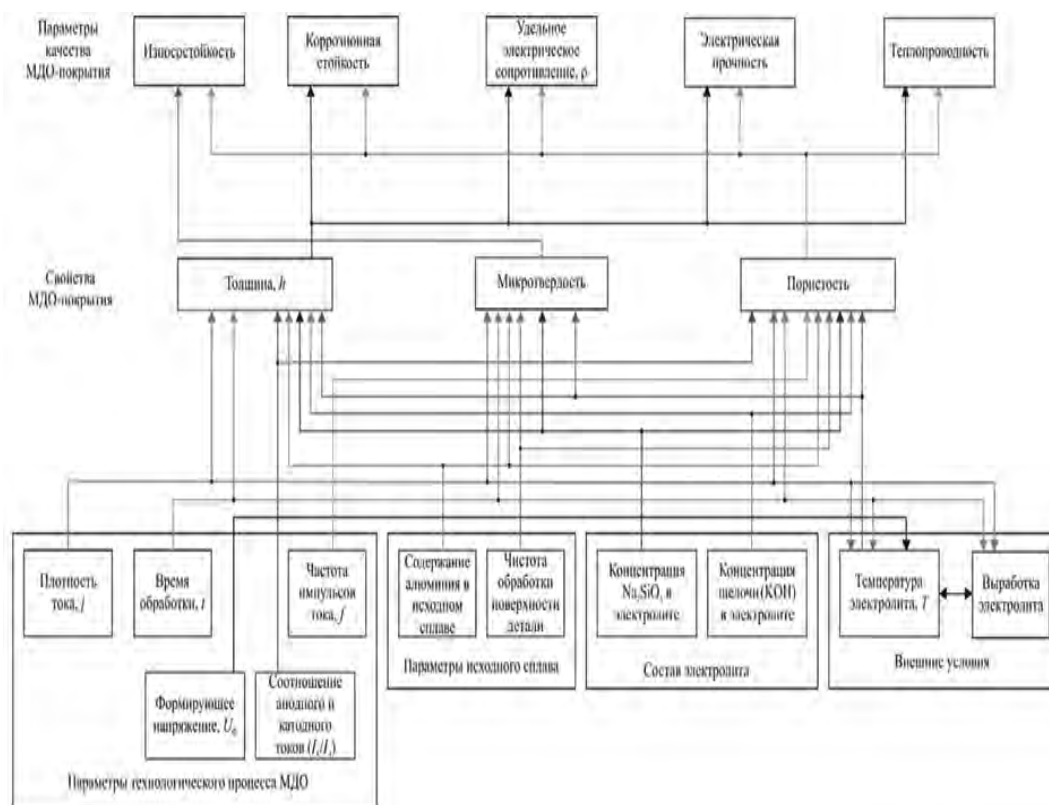


Рисунок 1 – Диаграмма связей параметров МДО на конечные характеристики микродуговых покрытий

Анализ данной диаграммы позволил установить, что к основным параметрам формируемых покрытий, оказывающим определяющее влияние на их работоспособность, включая электрическую прочность и коррозионную стойкость слоя, относятся микротвердость, толщина и пористость [1]. Эти выводы подтверждаются диаграммами Исикавы [9,10], из которых видно, что наличие в составе покрытий определенной концентрации кристаллических модификаций оксида алюминия в основном и повышает его микротвердость.

Однако все перечисленные приемы усовершенствования метода МДО в большинстве своем трудоемки, энергозатратны, требуют использования дорогостоящей инфраструктуры.

Тем не менее, очевидно, что основными параметрами, подлежащими регулированию в ходе процесса МДО, являются плотность тока, формовочное напряжение и время обработки состав электролита. Серьезное влияние на состав, цветовую гамму и свойства покрытий оказывает также рецептура электролита, в котором осуществляется процесс МДО.

Серьезное влияние на состав, цветовую гамму и свойства покрытий оказывает рецептура электролита, в котором осуществляется процесс МДО.

В большинстве исследований рассматривается процесс МДО в стандартном электролите на основе силикатов натрия и калия с добавлением некоторых других ингредиентов [1]. Установлено, что при содержании едкого кали в растворе менее 3 г/л из-за низкой проводимости раствора производительность обработки снижается, и формируются покрытия меньшей толщины темно-серого цвета. С увеличением концентрации данного ингредиента более 5 г/л из-за относительно высокой растворяющей способности раствор оказывает более заметное разъедающее действие на сплавы изделий и формируемые покрытия, вследствие чего у их наружных слоев повышается пористость и матовость вместе со способностью пропитываться жидкостями, оставляющими пятна и разводы [11]. Это весьма нежелательные с эксплуатационной позиции особенности покрытий, способные привести к разрушению защитного слоя в сложноподвижных условиях, не обеспечивая таким образом решение существующих при работе таких изделий проблем.

Раствор со сниженной концентрацией силиката натрия (менее 10 г/л) не обеспечивает равномерную окраску формируемого покрытия. На поверхности таких покрытий заметны разноокрашенные участки размерами не более 0,5 мм. А при содержании силиката натрия более 20 г/л получают структурно неоднородные слои с локальными бликовыми участками, появление которых обусловлено повышенным содержанием в составе стекловидной составляющей.

Введение в раствор оксида ванадия (V) с концентрацией менее 3 г/л приводит к получению неравнотолщинных слоев темно серого цвета с невысокими значениями коэффициента поглощения. Возрастание концентрации данного ингредиента более 5 г/л обуславливает повышение стоимости электролита, но без улучшения декоративных свойств и увеличения значений коэффициента поглощения покрытий. В электролит могут быть добавлены мелкодисперсные порошки, такие как Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , для формирования покрытия. Эти порошки служат основным активизирующим фактором для роста покрытия в процессе МДО [1, 2, 5].

Очевидно, что контроль параметров электролита, таких как концентрация компонентов, необходим для обеспечения нужной цветовой гаммы и служебных характеристик покрытия.

Весьма перспективным направлением в улучшении характеристик формируемых МДО покрытий с прогнозируемым комплексом рабочих свойств является введение в процесс оксидирования дополнительных перемещаемых катодов, размещение которых относительно оксидируемой детали может быть различным (рисунок 2). Это решение весьма перспективно, т. к. гарантирует не только более высокую производительность процесса МДО, но его меньшую энергоемкость [12].

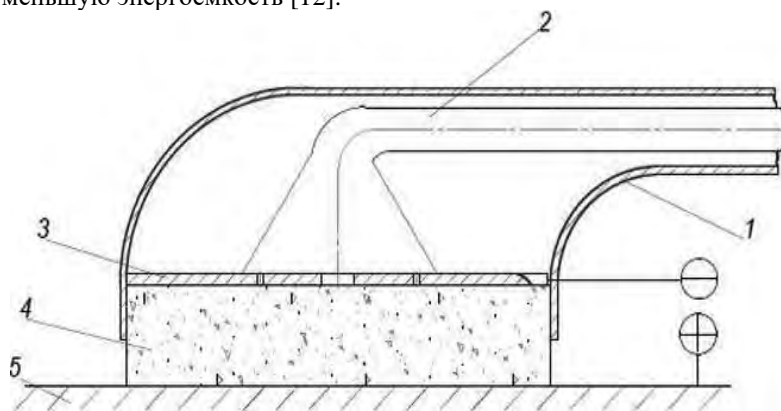


Рисунок 2 – Схема МДО с подвижным электродом:
1 – корпус, 2 – трубка подачи электролита, 3 – электрод-катод,
4 – волокнистый экран, 5 – деталь-анод [12]

Рисунок 3 иллюстрирует процесс МДО в ванне с подвижным катодом на фоне формируемой при этом структуры покрытия.

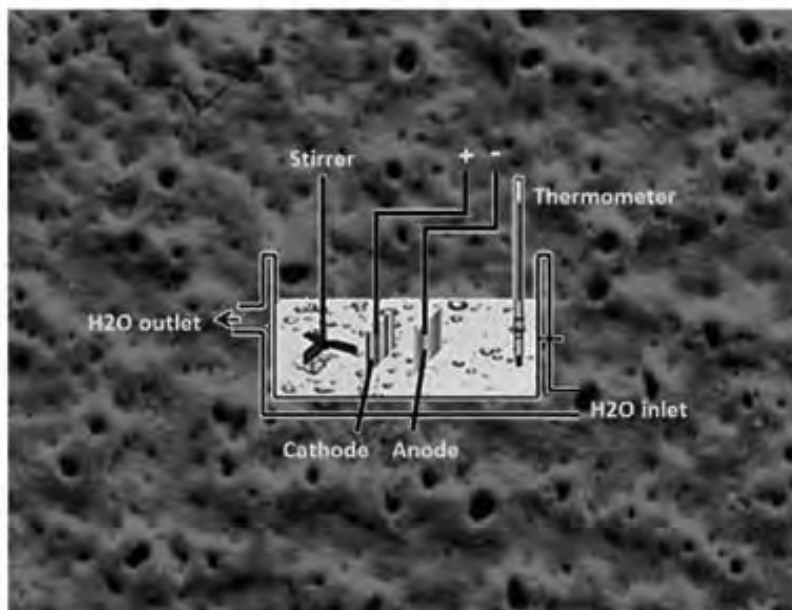


Рисунок 3 – Процесс МДО в ванне с подвижным катодом [12]

Еще одно интересное направление в процессах формирования микродуговых покрытий связано с пропуском переменного электрического напряжения к обрабатываемой детали и гальванической ванне с поочередной сменой их полярности. Функции катода и анода поочередно выполняются деталью и ванной. При этом между ними поочередно протекает анодный и катодный ток различной интенсивности [12]. Применение импульсного анодно-катодного режима подачи тока позволяет улучшить распределение энергии и уменьшить перегрев участков покрытия. В результате получают микродуговое покрытие повышенной твердости и износостойкости со сниженным коэффициентом трения.

Заключение. Керамоподобные покрытия, полученные указанными методами, заметно изменяют в лучшую сторону характеристики изделий. Разработка новых версий технологий формирования защитных керамоподобных покрытий для изделий, эксплуатируемых в сложноподвижных условиях, является задачей актуальной и имеющей серьезную практическую ценность. И создание новых версий методов создания керамоподобных покрытий позволит решить множество сложных производственных проблем и создавать продукты, обладающие повышенной конкурентоспособностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое оксидирование: проблемы, решения, перспективы / Н. М. Чигринова // Монография. Изд. «Бестпринт» – Минск – 2019. – 299 с.
2. Печерская, Е. А. Влияние технологических параметров на свойства покрытий, синтезируемых методом микродугового оксидирования / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, Т. О. Зинченко, В. В. Смогунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 89–99. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-11.
3. Б. Л. Крит, В. Б. Людин, Н. В. Морозова, А. В. Эпельфельд Микродуговое оксидирование углеграфитовых материалов (обзор) // ЭОМ. 2018. №1. URL. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrodugovoe-oksidirovanie-uglegrafitovykh-materialov-obzor> (дата обращения: 31. 03. 2025).
4. Impedance monitoring of corrosion degradation of plasma electrolytic oxidation coatings (PEO) on magnesium alloy / L. Gawel, L. Nieuzyla, G. Nawrat, et al. // J. of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 722. – P. 406–413.
5. Vatan, H. N. Structural, tribological and electrochemical behavior of SiC nanocomposite oxide coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ31 magnesium alloy / H. N. Vatan, R. Ebrahimi-kahrizsangi, M. Kasiri-asgarani // J. of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 683. – P. 241–255.
6. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 363–369.
7. Патент RU 2389830 С2. Никифоров А. А. Способ микродугового оксидирования.
8. Ферябков, А. В. Композиционные покрытия микродугового оксидирования // Вестник ОрелГАУ. 2010. №1. URL. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-pokrytiya-mikrodugovogo-oksidirovaniya> (дата обращения: 27. 03. 2025).

9. Muhammad Qadir, Yuncang Li, Khurram Munir & Cuie Wen (2017): Calcium Phosphate-Based Composite Coating by Micro-Arc Oxidation (MAO) for Biomedical Application: A Review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, DOI:10.1080/10408436.2017.1358148
10. Li G. et al. Review of micro-arc oxidation of titanium alloys: Mechanism, properties and applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Т. 948. – С. 169773.
11. Патент RU 2835458 С1. Малышев В. Н., Чуфистов О. Е., Чуйков В. Е., Золкин А. Н. Способ получения черных покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов.
12. Штокал А. О., Поровая Т. А. Определение влияния режимов микродугового оксидирования перемещаемым электродом на глубину получаемого оксидного слоя // *Международный студенческий научный вестник*. 2014. № 4. ; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=11944> (дата обращения: 27. 03. 2025).