

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РАБОТЕ С ТИПОВЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

Пономарев И.С.<sup>1</sup>, Кривоносова Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, [cs8864@mail.ru](mailto:cs8864@mail.ru), [katerinakkkk@mail.ru](mailto:katerinakkkk@mail.ru).

В данной статье исследованы особенности проведения процесса микродугового оксидирования при использовании конденсаторного и тиристорного источников питания. Проводится анализ динамики образования оксидного покрытия на алюминиевом сплаве Д16 при работе с конденсаторным источником питания. С помощью высокоскоростной видеосъемки установлено, что при работе с конденсаторным источником питания время горения микродуговых разрядов на поверхности образцов значительно меньше полного времени процесса оксидирования. Плавное начало горения и угасания разрядов на поверхности образцов связано с синусоидальной формой электрического тока источника питания. Изменение плотности электрического тока влияет на интенсивность образования оксидного покрытия на поверхности образцов. Повышение плотности тока при микродуговом оксидировании значительно увеличивает толщину оксидного покрытия, однако при этом количество дефектов в нем также растет.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминий, алюминиевый сплав Д16, конденсаторный источник питания, оксидное покрытие, плотность тока.

## FEATURES OF ALUMINUM ALLOYS MICROARC OXIDATION IN WORKING WITH MODELS INDUSTRIAL POWER SUPPLY

Ponomarev I.S.<sup>1</sup>, Krivonosova E.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, [cs8864@mail.ru](mailto:cs8864@mail.ru), [katerinakkkk@mail.ru](mailto:katerinakkkk@mail.ru)

In this article characteristics of the micro-arc oxidation process with standard capacitor and thyristor power sources are present. The formation of oxide coating on aluminum alloy samples D16 in working with capacitor power source is analyzed. The advantages and disadvantages of this process are listed. The using of high-speed video revealed that with a capacitor power supply burning time microarc discharges on the sample surface is much smaller than the total time of oxidation process. Smooth start and fading of discharges on the surface of the samples is due to the sinusoidal electric current source.

The change of electric current density affects the rate on the formation of oxide coating on the sample surface. Increasing current density microarc oxidation increases the thickness of the oxide coating, but the number of defects therein is also increasing.

Keywords: Microarc oxidation, aluminum, aluminum alloy D16, the capacitor source, the oxide coating, current density.

Актуальная задача уменьшения массы машин и механизмов без потери их производительности и механических свойств является причиной поиска и использования новых материалов и композитов. Широко применяемые в авиа- и машиностроении, химической и нефтегазовой промышленности алюминий и алюминиевые сплавы обладают достаточной прочностью и высокой коррозионной стойкостью при малом удельном весе. Однако ряд недостатков алюминиевых сплавов, таких как низкая температура плавления и износостойкость, высокая теплопроводность ограничивают использование данного материала [1].

Одним из наиболее эффективных, экономичных и экологически безопасных способов модифицирования поверхности алюминиевых сплавов, является микродуговое

оксидирование. В основе процесса лежит высокотемпературная электрохимическая реакция в виде микродуговых разрядов на поверхности деталей, помещенных в электролит. Результатом реакции является образование покрытия большой толщины (до 400 мкм), обладающего высокой твердостью, прочностью, низкой химической активностью, тепло- и электропроводностью [2, 3]. Механические параметры покрытия регулируются составом электролита и электрическим режимом обработки. Электролит содержит щелочные растворы натрия, калия и других легирующих элементов. Напряжение активации процесса, как правило, составляет 450-500 В [4].

Основой состава МДО-покрытия являются высокотемпературные  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы оксида алюминия (корунд), а также различные химические соединения элементов состава электролита:  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  (силлиманит),  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  (ортоклаз) [5, 6].

Покрытие состоит из трех слоев (рис. 1).

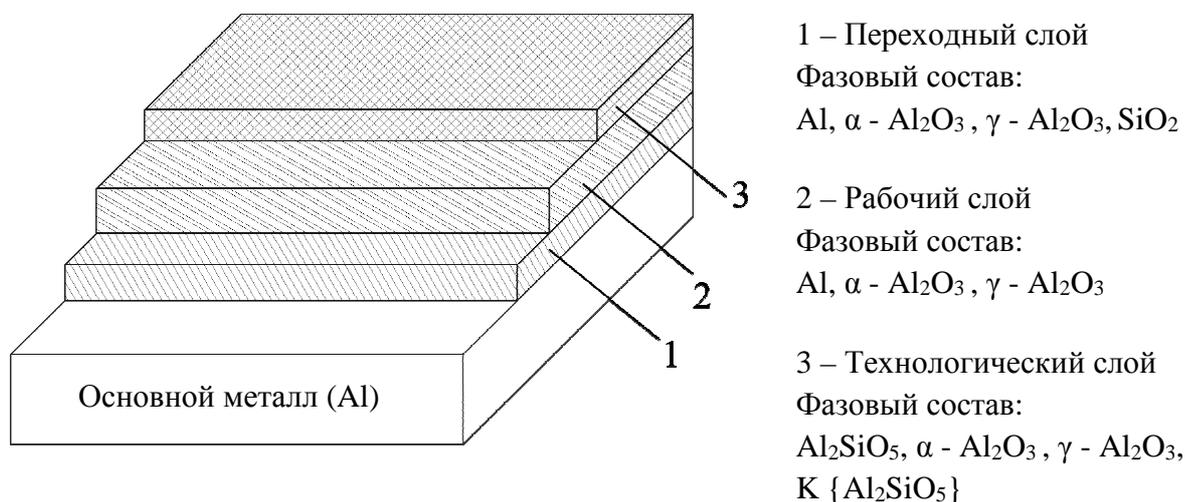


Рис. 1. Схема структуры покрытия при микродуговом оксидировании алюминия.

Основным слоем МДО-покрытия является рабочий слой (2). Технологический слой, как правило, имеет высокую пористость, низкие механические свойства, и поэтому удаляется при обработке или в процессе эксплуатации детали.

Для проведения процесса микродугового оксидирования применяются источники питания конденсаторного или тиристорного типа с рабочим напряжением 400-800 В, которые имеют простую конструкцию, высокую мощность и надежность [7].

Частота работы данных источников питания часто равна частоте промышленной сети, и составляет 50 Гц (в некоторых источниках частота электрического тока процесса равна 300 Гц).

Целью данной работы является исследование особенностей процесса микродугового оксидирования при работе с разными источниками питания, для получения покрытия с повышенными свойствами при снижении энергозатрат процесса.

### Методика и проведение исследования

В данной работе рассмотрен процесс микродугового оксидирования детали из алюминиевого сплава Д16 при работе с конденсаторным источником питания. Рабочее напряжение источника питания 450-600 В, регулировка тока ступенчатая (0-20 А), частота 50 Гц.

Условная схема источника питания, регулируемого с помощью изменения емкости конденсаторной батареи, представлена на рис. 2.

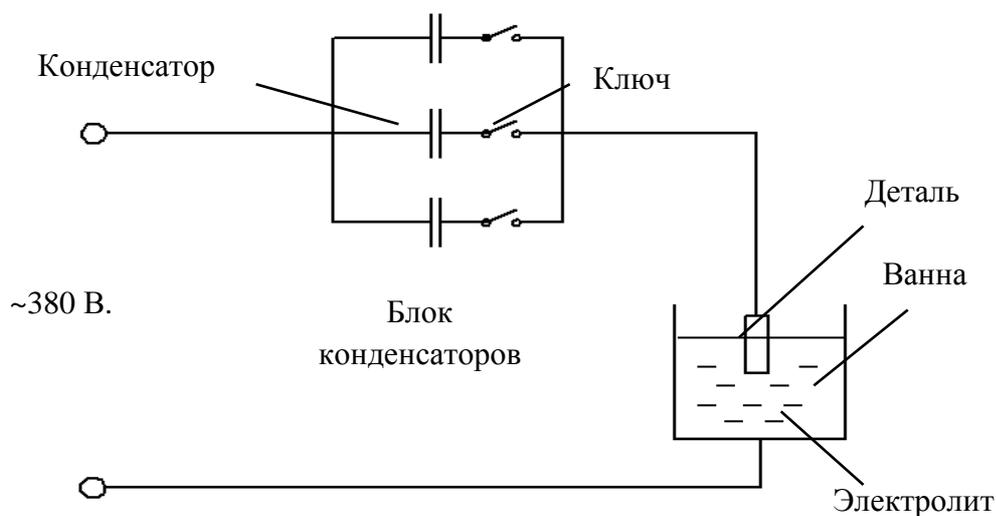


Рис. 2. Условная схема конденсаторного источника питания МДО.

При работе такого источника питания, значение электрического тока в системе деталь-ванна напрямую зависит от емкости конденсаторных батарей, и является равным току заряда конденсаторов за один период переменного тока [8].

Так как источники питания работают от промышленной сети (синусоидальный сигнал), процесс заряда конденсаторов начинается еще до достижения напряжения цепи, необходимого для образования микродуговых разрядов. Таким образом, часть электроэнергии затрачивается до начала процесса образования покрытия.

Для детального исследования процесса была применена высокоскоростная видеосъемка процесса МДО с помощью фото-видеокамеры Fujifilm SL1000, скорость съемки составляла 480 кадров в секунду.

В качестве обрабатываемой детали использовался диск из алюминиевого сплава Д16 диаметром 150 мм, толщиной 10 мм. Значение напряжения в системе деталь-ванна составляло 450-500 В., плотности тока  $j = 12 \text{ А/дм}^2$ .

На рис. 3 показаны стадии процесса оксидирования, соответствующие определенным значениям времени в одном периоде переменного тока в системе деталь-ванна. В таблице 1 указаны значения времени, соответствующие кадрам на рис. 3.

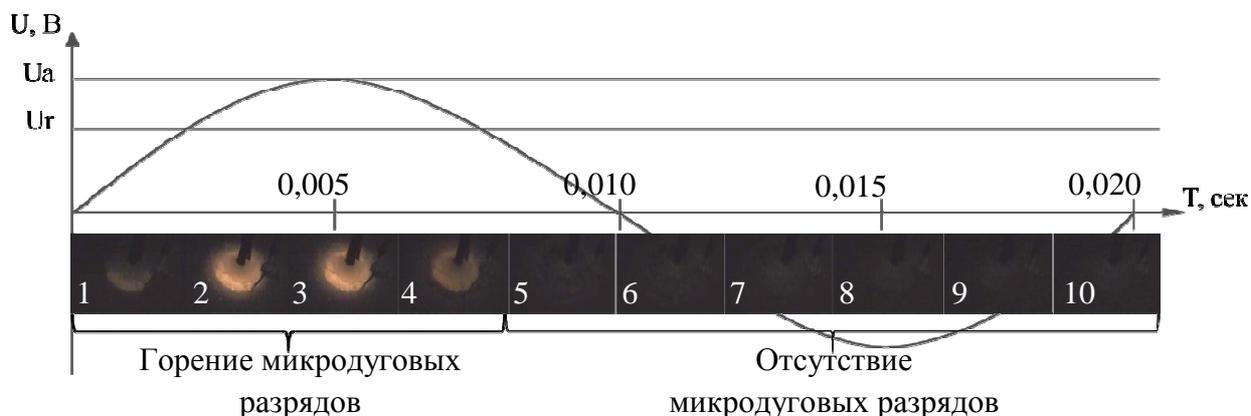


Рис. 3. Стадии формирования микродуговых разрядов за один период переменного тока, где  $U_a$  – амплитудное значение напряжения,  $U_r$  – действующее значение напряжения.

Таблица 1

Значения времени для стадий формирования разряда при МДО

Номер кадра, №	Время процесса, сек	Номер кадра, №	Время процесса, сек
1	0,0021	6	0,0126
2	0,0042	7	0,0147
3	0,0063	8	0,0168
4	0,0084	9	0,0189
5	0,0105	10	0,0210

На полученных снимках видно, что характер горения микродуговых разрядов на поверхности детали неравномерен и изменяется в соответствии с изменением напряжения в цепи. Максимально яркое свечение поверхностных разрядов на 2-м и 3-м кадрах. Таким образом, эффективное время существования микродуговых разрядов на поверхности детали достаточно мало и составляет 20-30% от полного времени процесса микродугового оксидирования. В моменты начала горения и угасания микродуговых разрядов на поверхности детали (кадры 1 и 4), их температура значительно ниже необходимой для образования покрытия с удовлетворительными свойствами.

В момент прохождения в цепи электрического тока обратной полярности, горение микродуговых разрядов на поверхности отсутствует. Это связано с вентильным эффектом системы «основной металл-покрытие» и значительным падением напряжения в цепи. Несмотря на то, что горение микродуговых разрядов в этом промежутке времени отсутствует, на поверхности обрабатываемой детали происходят химические реакции перехода элементов электролита в оксидное покрытие.

Исследовано влияние плотности тока на толщину получаемого покрытия, результаты приведены в табл.2. В эксперименте использовались три группы образцов в виде металлических пластин из алюминиевого сплава Д16, размерами 87x27 мм, толщиной 1мм.

Состав электролита: KOH – 4 г/л, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – 3 г/л, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – 100 г/л.

Температура электролита поддерживалась с помощью системы охлаждения и составляла 34°C.

Таблица 2

Электрические параметры режимов оксидирования.

Номер образца	Площадь оксидированной поверхности, дм <sup>2</sup>	Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>	Напряжение, В	Время проведения процесса, мин
1	0,299	3,34	306	15
2	0,369	8,11	360	15
3	0,364	12,63	390	15

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис 4 приведены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытий, полученных при МДО на разных режимах.

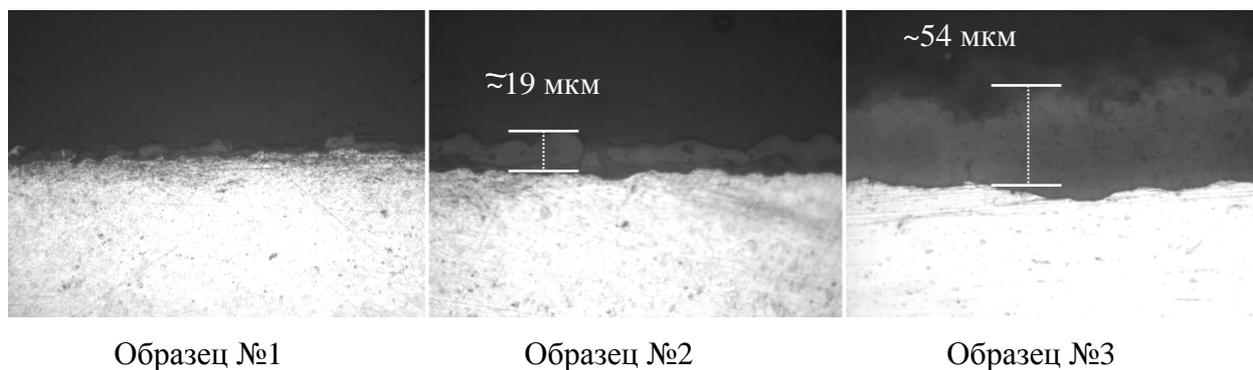


Рис. 4. Микроструктура поверхности оксидированных образцов, х200.

Прослеживается зависимость толщины получаемого покрытия от значения плотности тока. Толщина покрытия образца №1, оксидированного на низкой мощности электрического тока, минимальна, менее 5 мкм. Покрытие образца №2, оксидированное на плотности тока 8,11 А/дм<sup>2</sup>, имеет большую толщину (около 20 мкм) и низкую пористость рабочего слоя (15-20%). Образец №3, оксидированный на максимальном режиме, имеет значительную толщину оксидного слоя (около 55 мкм), по сравнению с первыми двумя образцами. Однако, стоит отметить достаточно высокую пористость покрытия образца №3, а также большое количество пор и дефектов в виде прожогов покрытия.

### Выводы

1) Исследованы процессы, происходящие на поверхности алюминиевого сплава Д16 при микродуговом оксидировании с использованием конденсаторного источника питания.

2) Эффективное время горения микродуговых разрядов на поверхности изделия, приводящее к образованию оксидированного слоя, существенно меньше полного времени оксидирования, и составляет около 20-30%. Это связано с синусоидальной формой сигнала и потерями энергии на электролитические реакции и нагрев электролита в моменты, когда напряжение в системе «деталь-ванна» ниже напряжения активации процесса.

3) Повышение значения плотности тока на поверхности оксидируемой детали увеличивает интенсивность образования покрытия, однако приводит к недопустимому росту количества дефектов в нем (пористости, прожогов покрытия мощными дугowymi разрядами, металлических включений основы). Покрытие более высокого качества было получено на плотности тока до 8 А/дм<sup>2</sup>.

4) Для уменьшения потерь энергии и увеличения эффективного времени горения микродуговых разрядов в процессе МДО целесообразно изменение синусоидальной формы тока на прямоугольную (миандр).

### Список литературы

1. Горчаков А.И., Кривоносова Е.А. К вопросу образования пор в покрытиях при микродуговом оксидировании. / Тяжелое машиностроение, 2008 №7, с. 26-29.
2. Кривоносова Е.А./ Применение теории фракталов в металловедении сварки и покрытий// Сварка и диагностика № 1 , 2008 г. с.2-5
3. Кривоносова Е.А., Горчаков А.И., Щербаков Ю.В./Легирование через электролит при микродуговом оксидировании алюминия// Сварка и диагностика , 2013 , № 4,. С.13-15
4. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Влияние режимов оксидирования на микротвердость оксидированных покрытий//Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.-2013.-Т. 15, №3. – С. 56-61.
5. Пономарев И. С., Кривоносова Е. А., Горчаков А. И. Механические характеристики оксидированной поверхности при различных режимах оксидирования. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.-2013.-Т. 15.№6-2.–С. 469-472.
6. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Особенности влияния электрических режимов на процесс микродугового оксидирования. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. -2013.-Т. 15, №4. – С. 99-103.
7. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Особенности процесса микродугового оксидирования алюминиевого сплава Д16. //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.-2014.-Т. 16, №1. – С. 55-62.

8. Ye.A. Krivonosova, A.I. Gorchakov & Yu.V. Scherbakov / Structure and properties of coatings in microarc oxidation / Welding International 2014, Vol. 28, No. 10 (2014), p.816-819 ISSN: 0950-7116.

**Рецензенты:**

Синани И.Л., д.т.н., проф. каф. СПиТКМ МТФ ПНИПУ, г. Пермь.

Беленький В.Я., д.т.н., проф., декан МТФ ПНИПУ, г. Пермь.