

УДК 621.791.75

**И.С. Пономарев, Е.А. Кривоносова**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
НА ПОКРЫТИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16  
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ  
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

Исследуется влияние плотности электрического тока на свойства покрытия при поверхностной обработке алюминиевого сплава Д16 с помощью микродугового оксидирования. Показаны особенности образования оксидированной поверхности алюминиевого сплава при обработке на трех различных режимах оксидирования при одинаковой продолжительности процесса.

**Ключевые слова:** поверхностная обработка, микродуговое оксидирование, переменный ток, регулируемый конденсаторный источник питания, алюминиевый сплав Д16, толщина покрытия, плотность тока.

**I.S. Ponomarev, E.A. Krivonosova**

Perm National Research Polytechnic University

**EFFECT OF ELECTRICAL CURRENT ON THE ALUMINUM  
ALLOY D16 WITH A SURFACE MICRO-ARC  
OXIDATION COATING**

This article analyzed effect of different values of the electric current to properties of the coating at the surface treatment of aluminum alloy D16 using micro-arc oxidation. The features of the formation of oxidized surface of the aluminum alloy during the processing in the three different modes for the same duration of the oxidation process are shown.

**Keywords:** surface treatment, micro-arc oxidation, alternate current, adjustable capacitor power supply, aluminum alloy D16, coating thickness, the current density.

В настоящее время в различных отраслях машиностроения находит применение алюминий и алюминиевые сплавы. Обладая рядом полезных механических и химических свойств, таких как малый удельный вес, высокая пластичность, прочность и тугоплавкость, коррозионная стойкость, данный материал позволяет увеличить производи-

тельность различных машин и устройств, уменьшая вес конструкций и деталей [1].

Одним из главных преимуществ алюминиевых сплавов является образование твердой оксидной пленки на поверхности материала, препятствующей взаимодействию материала с окружающей средой. Однако при работе деталей на износ оксидная пленка деталей удаляется, за счет чего резко увеличивается химическая активность материала и уменьшается износостойкость, что ограничивает использование алюминиевых сплавов в машиностроении [2].

Существует множество способов улучшения поверхностных свойств алюминиевых сплавов, преимущественно химического и электрохимического типа. Применение анодирования алюминиевых сплавов позволяет нанести на поверхность деталей оксиды других металлов, обладающие более высокими механическими свойствами, однако данный процесс негативно влияет на экологические условия и требует специальных мер при проведении процесса [3].

Наиболее эффективным и экологичным методом поверхностной обработки алюминиевых сплавов является микродуговое оксидирование (МДО). Данный метод представляет собой электрохимический процесс образования керамикоподобного покрытия, в основном корунда  $Al_2O_3$ , значительных толщин на поверхности алюминиевых сплавов. Данное покрытие обладает высокой износостойкостью, твердостью, низкой теплопроводностью и высокой химической устойчивостью в агрессивных средах. Толщина покрытия при микродуговом оксидировании может достигать 600 мкм [4].

Технически процесс микродугового оксидирования представляет собой электрохимический высокотемпературный процесс, протекающий на поверхности материала, помещенного в среду электролита. Электролит, как правило, содержит щелочные или солевые растворы натрия, калия и других легирующих элементов. При возникновении разности потенциала в системе деталь – электролит около 400–600 В происходит активация процесса [5].

При протекании тока возникающие на поверхности микродуговые разряды расплавляют основной металл, за счет чего происходит смешивание металла с элементами электролита, образуется оксид алюминия  $Al_2O_3$  и различные сложные химические соединения –  $Al_2SiO_5$  (силлиманит),  $K(AlSi_3O_8)$  (ортоклаз),  $Na(AlSiO_4)$  (ниффелин).

Толщина оксидного слоя зависит от нескольких факторов: химический состав электролита, плотность электрического тока, напряжение, время проведения процесса. В среднем для проведения полного цикла процесса микродугового оксидирования плотность тока  $j = 10 \dots 30 \text{ А/дм}^2$ , напряжение 450–1000 В, а время оксидирования  $t = 30 \dots 240 \text{ мин}$  [6]. Выбор определенных параметров, как правило, зависит от размеров деталей, химического состава алюминия или его сплава, состава электролита.

В данной работе проводилось исследование влияния плотности тока на толщину полученных покрытий с целью сокращения времени проведения процесса МДО и увеличения производительности. В качестве исследуемого материала использовалось три группы образцов из алюминиевого сплава Д16. Образцы представляли собой плоские пластины размером 87×27 мм, толщиной 1 мм. Время проведения процесса составляло 15 мин для каждой группы образцов. Образцы погружались в электролит не полностью ввиду конструктивных особенностей крепления деталей ванны для микродугового оксидирования. В качестве источника питания для микродугового процесса использовался конденсаторный источник питания со ступенчатой регулировкой электрического тока. Значения плотности тока, напряжения, температуры электролита и размеры образцов указаны в таблице.

Параметры МДО

Номер образца	Площадь оксидированной поверхности, $\text{дм}^2$	Плотность тока, $\text{А/дм}^2$	Напряжение, В	Температура электролита, $^{\circ}\text{C}$	Время проведения процесса, мин
1	0,299	3,34	306	33	15
2	0,369	8,11	360	34	15
3	0,364	12,63	390	34	15

Полученные изображения поверхности образцов (рисунок, а–в) позволяют оценить степень оксидирования поверхности образца за определенное время с различными значениями плотности тока. Оксидированная поверхность образца № 1 имеет равномерное тонкое покрытие, свидетельствующее о начальной стадии микродугового оксидирования (см. рисунок, а). Области белого цвета – места начала глу-

бокого оксидирования. В основном они расположены вблизи границ образца, что говорит о более высокой плотности тока в этой области.

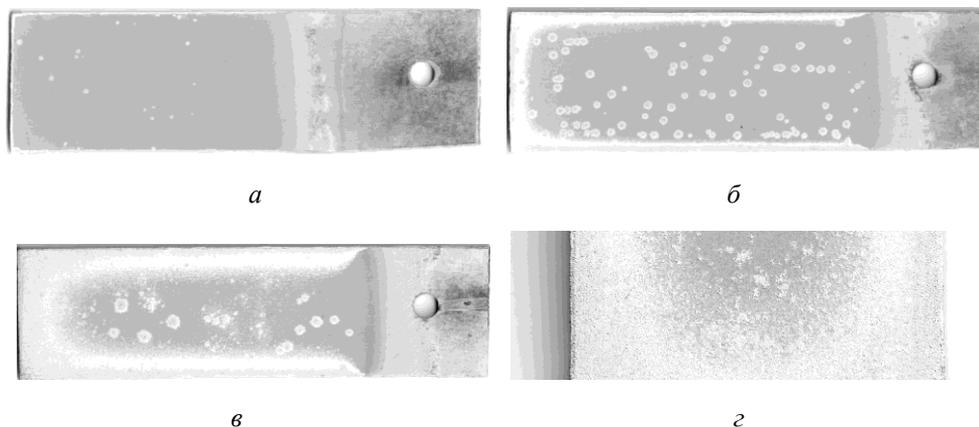


Рис. Поверхность образцов после МДО: *а* – образец № 1; *б* – образец № 2; *в* – образец № 3; *г* – образец № 3

Размеры области оксидированной поверхности образца № 2 значительно больше, чем образца № 1 (см. рисунок, *б*). Плотность тока при оксидировании данного образца была повышена более чем в два раза, напряжение выше на 60 В. Оксидное покрытие при этом имеет равномерную структуру, прожоги отсутствуют.

Размеры оксидированной области образца № 3 максимальны (см. рисунок, *в*). Плотность тока на поверхности образца во время процесса микродугового оксидирования была в 4 раза выше, чем у первого, и составляла  $12,63 \text{ А/дм}^2$ , а напряжение было повышено на 90 В. Область оксидированной поверхности на данном образце значительно больше, чем на первом и втором, что говорит о более высокой производительности процесса за одинаковый для всех образцов промежуток времени.

Однако оксидированный образец № 3 имеет ряд недостатков. За счет более высоких значений плотности тока и напряжения на поверхности образца во время микродугового оксидирования неоднократно возникали дуговые разряды, за счет чего образовались прожоги поверхностной пленки. Кроме того, из-за высокой интенсивности процесса поверхность образованной оксидной пленки имеет неравномерную структуру (рисунок, *г*).

Сделаем следующие выводы:

1. С помощью ступенчатой регулировки мощности источника питания для микродугового оксидирования удалось получить образцы с разными степенями оксидирования поверхности. Был проведен процесс микродугового оксидирования для трех групп образцов с различными электрическими параметрами для определения влияния плотности тока и напряжения на процесс и возможности повышения производительности процесса.

2. Установлено, что повышение плотности тока и напряжения влияют на скорость проведения процесса. Так, повышение плотности тока в 2 раза и напряжения на 60 В увеличило площадь оксидированной поверхности образца № 2 (в сравнении с образцом № 1). Однако режим микродугового оксидирования образца № 2 в некотором роде является стандартным (оптимальным) для данного процесса.

3. Дальнейшее повышение плотности тока и напряжения также увеличивает скорость проведения процесса, однако при этом присутствуют негативные эффекты, такие как прожоги за счет увеличения плотности тока вблизи поверхности и длины микродуг, увеличение пористости оксидного слоя, неравномерное покрытие.

### **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., Горчаков А.И., Щербаков Ю.В. Структура и свойства покрытий при микродуговом оксидировании // Сварочное производство. – 2013. – № 10. – С. 27–31.

3. Особенности формирования покрытий при микродуговом оксидировании / Е.А. Кривоносова, С.С. Подшивалкин, А.И. Горчаков, Ю.В. Щербаков // Сварка и контроль – 2013: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 125-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом, Пермь, 15–17 мая 2013 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 170–181.

4. Krivonosova E., Gorchakov A. Micro-arc oxidation as efficient technology of increasing of wear resistance of aluminum alloy // *Elektrotechnica&Electronica E+E*. – 2013. – № 5, 6. – P. 57–59.

5. 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.

6. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов [и др.]. – М.: Экомет, 2005. – 368 с.

Получено 25.04.2014

**Пономарев Илья Сергеевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: cs8864@mail.com

**Кривоносова Екатерина Александровна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru

**Ponomarev Ilya Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: cs8864@mail.ru

**Krivosova Ekaterina Alexandrovna** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru