

Особенности строения модифицированного слоя, полученного микродуговым оксидированием на сплаве АК12Д

Гринь Р.Р.[†], Галлямова Р.Ф., Дударева Н.Ю., Сиренко А.А., Мусин Ф.Ф.

[†]s-r-r@ya.ru

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К.Маркса 12, 450000, Уфа

Показана возможность создания высокотвердых защитных покрытий на алюминиевом сплаве АК12Д методом микродугового оксидирования (МДО). Исследованы особенности строения модифицированных слоев на алюминиевом сплаве АК12Д. Установлено влияние емкости конденсатора установки, межэлектродного расстояния и продолжительности обработки на структуру и микротвердость получаемых покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, силумин, покрытие, пористость.

Characteristics of modified layer configuration formed by micro-arc oxidation on the alloy AK12D (Al-12Si-Mg-Cu-Ni)

R.R. Grin, R.F. Gallyamova, N.Yu. Dudareva, A.A. Sirenko, F.F. Musin

Ufa State Aviation Technical University, K. Marks 12, 450000, Ufa

The possibility of high hard protective coatings formation on aluminum alloy AK12D by micro-arc oxidation (MAO) was presented. Specific features of the structure of the modified layers on the aluminum alloy of Al-12Si-Mg-Cu-Ni were investigated. The influence of installation capacitor capacity, interelectrode distance and duration of treatment on the produced coatings structure and microhardness was discovered.

Keywords: microarc oxidation, silumin, coating, porosity.

1. Введение

Микродуговое оксидирование (МДО) является одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов. Оно позволило получить изделия с повышенными свойствами, а именно коррозионной стойкостью, твердостью, износостойкостью [1-4] и тем самым оказалось эффективным способом поверхностной обработки.

Метод МДО заключается в создании на поверхности детали модифицированного слоя, состоящего преимущественно из высокотемпературных оксидов, в случае алюминиевых сплавов это α -Al₂O₃ (корунд) и другие окислы алюминия. Этот слой формируется в результате электрохимических реакций под действием микродуговых разрядов. На настоящий момент широко исследованы особенности формирования и свойства МДО-слоев на дуралюминах и других матричных сплавах, имеющих достаточно однородную структуру на поверхности [2, 3]. Вместе с тем, в литературе отсутствуют данные о возможности получения качественных МДО слоев в высоколегированных алюминиевых сплавах, содержащих в структуре большое количество вторых фаз, например, таких как силумины. Это, прежде всего, связано с тем,

что существуют технологические сложности получения однородных покрытий на поверхности материала, где присутствуют две фазы, кардинально отличающиеся друг от друга электрофизическими свойствами [5].

Вместе с тем, силумины занимают большой сегмент среди конструкционных материалов. Особое значение имеет применение силуминов для изготовления деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Однако эти сплавы имеют ряд недостатков: повышенная склонность сплавов к хрупкому разрушению при длительном действии внутренних или внешних напряжений; снижение прочностных характеристик при совместном действии нагрузок и температуры; ухудшение механических свойств по мере увеличения сечения стенок деталей [6]. Таким образом, существует потребность в повышении эксплуатационных свойств материалов этого класса.

В связи с тем, что имеется положительный опыт применения технологии МДО к деформируемым алюминиевым сплавам, можно сделать предположение о наличии широких перспектив использования МДО и для силуминов, что в свою очередь откроет возможность увеличить ресурс и надежность деталей цилиндропоршневой группы ДВС.

Таблица 1

Режимы МДО-обработки исследуемых образцов

№ образца	C, мкФ	τ, час	S, мм
1	100	3	100
2	200	3	100
3	150	3	50
4	200	4,5	100

В связи с вышеизложенными положениями, была сформулирована цель настоящего исследования: оценить возможность применения МДО к жаропрочному алюминиевому сплаву АК12Д посредством изучения строения и свойств полученных покрытий.

2. Материалы и методики исследования

В качестве материала для МДО был выбран алюминиевый сплав АК12Д. После выплавки сплав был подвергнут прессованию по серийной технологии, применяемой на Каменск-Уральском металлургическом заводе. Образцы для нанесения покрытия в виде диска были вырезаны из прессованного прутка диаметром 70 мм.

На рис.1 представлена структура поверхности образцов из АК12Д перед МДО. В структуре наряду с матричной фазой, можно выделить кремневую фазу со средним размером 2,6 мкм и объемной долей 27 %, которая однородно распределена по объему сплава. Кроме этого в структуре можно обнаружить и грубые выделения фазы CuAl_2 (около 3,5%) имеющих размер близкий к размеру кремневых частиц.

Для проведения исследований было подготовлено четыре образца. Режимы обработки указаны в таб.1. Оксидирование проводилось в щелочном электролите с добавлением жидкого стекла. Емкость конденсаторов установки МДО, C, составляла – 100, 150, 200 мкФ, продолжительность обработки, τ, определялась снижением интенсивности процесса, и составляла – 3 часа, кроме режима для образца № 4, когда МДО проводилось 4,5 часа, расстояние между обрабатываемой поверхностью и электродом, S, изменялось от 50 мм для образца № 3 до 100 мм для остальных образцов.

Исследовались как внешняя поверхность покрытий, так и поперечные шлифы. Поперечный срез образцов изучался при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6490LV в режиме вторичных и обратно-рассеянных электронов, ускоряющее напряжение на катоде составляло 3 кВ.

Толщина покрытий определялась двумя способами: неразрушающим методом при помощи вихревого

толщиномера ТТ-210 и на поперечных шлифах.

Измерения микротвердости производились на микротвердомере Struers Duramin-2. Нагрузка составляла 1 Н, время приложения – 10 с.

3. Результаты и их обсуждение

Цвет покрытия на исследуемых образцах варьируется от светло-серого к бурому, что говорит о различном фазовом составе наружных слоев.

В общем случае в структуре можно выделить несколько слоев, характерных для МДО-покрытий на алюминиевых сплавах (рис.2) [5, 7]. Это прилегающий к подложке переходный слой, средний рабочий слой, и наружный рыхлый технологический. Такая же последовательность слоев была обнаружена на исследуемых образцах (рис.3). Однако, в отличие от МДО-покрытий на дуралюминах, в переходном слое не наблюдается адгезионная область, которая обычно прилегает к подложке [3, 5]. Общая толщина покрытия и соотношение толщин его внутренних слоев отличаются в зависимости от режима МДО (таб.2). Наиболее толстое покрытие было сформировано на образце №4, что связано с увеличением времени обработки от 3 до 4,5 часов. Покрытие образца 1 отличается наименьшей толщиной, это можно объяснить тем, что снижение емкости конденсатора установки при прочих равных условиях приводит к уменьшению энергии микродуговых разрядов и, следовательно, уменьшению объема продуктов реакции, образующихся за единицу времени. При этом на образце 3 сформировалось более толстое покрытие, чем на образце 2, хотя емкость

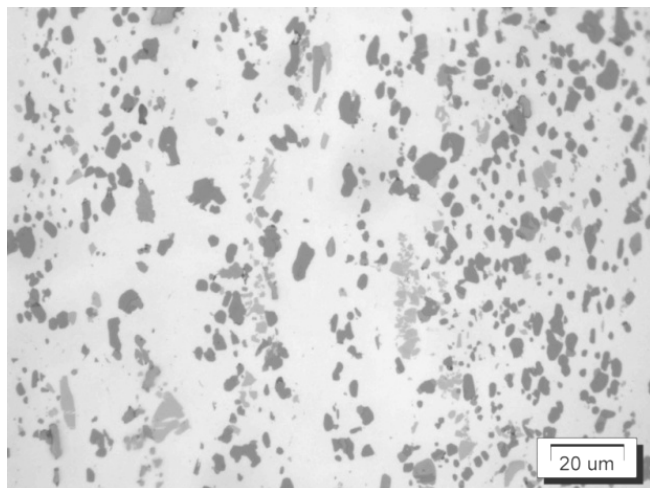


Рис. 1. Микроструктура материала-основы сплава АК12Д (полированная поверхность).

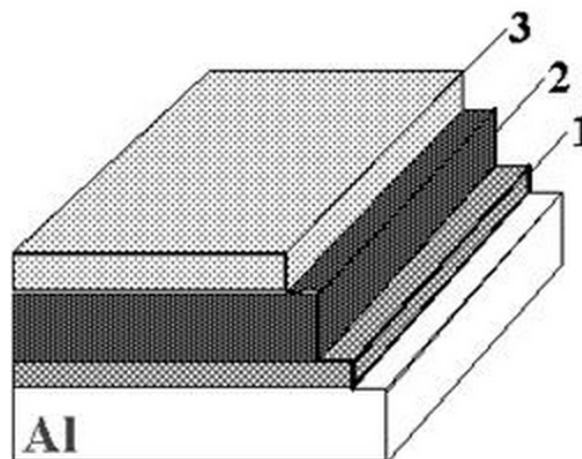


Рис. 2. Типичное строение МДО-покрытий [6]: 1 – переходный слой; 2 – рабочий слой; 3 – технологический слой.

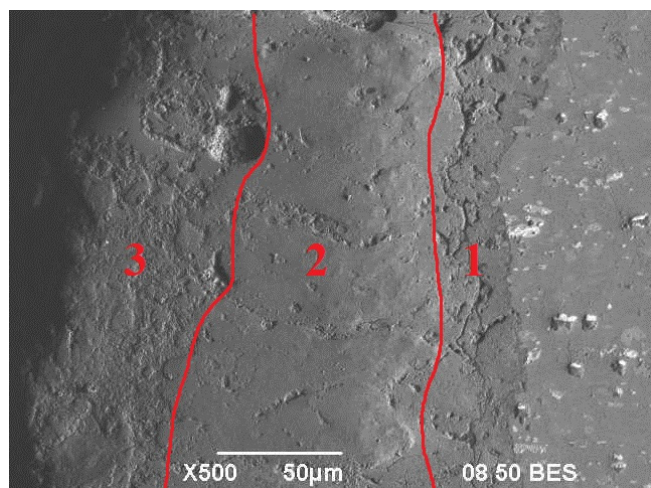


Рис. 3. Слоистое строение покрытия на примере образца № 4: 1 – переходный слой; 2 – рабочий слой; 3 – технологический слой.

конденсатора была ниже, в этом случае решающим фактором явилось расстояние между обрабатываемой поверхностью и электродом.

На поперечных шлифах (рис.3,4) было обнаружено, что покрытия характеризуются наличием пор и пустот. Их присутствие может быть объяснено захватом пузырьков газов, которые являются продуктами распада электролита по реакциям (1), (2).



Установлено, что сквозная пористость характерна только для технологического слоя. Замкнутые поры встречаются по всей толщине покрытия, но распределение пор разное: в рабочем слое чаще наблюдаются одиночные пустоты размером до 1,5 мкм, для переходного слоя характерно равномерное распределение более крупных пор и наиболее рыхлый технологический слой содержит высокую плотность пор различных размеров. В переходном слое дополнительными местами локализации пор являются кремниевые частицы (рис.4). Этот эффект можно объяснить увеличением плотности тока в областях, прилегающих к кремниевой частице, что происходит из-за отличия электросопротивления алюминиевой основы и кристаллов кремния. Средняя пористость по слоям для каждого образца приведена в таб.3. Сравнивая пористость покрытий на образцах № 1 и 2, можно отметить, что увеличение емкости конденсаторов

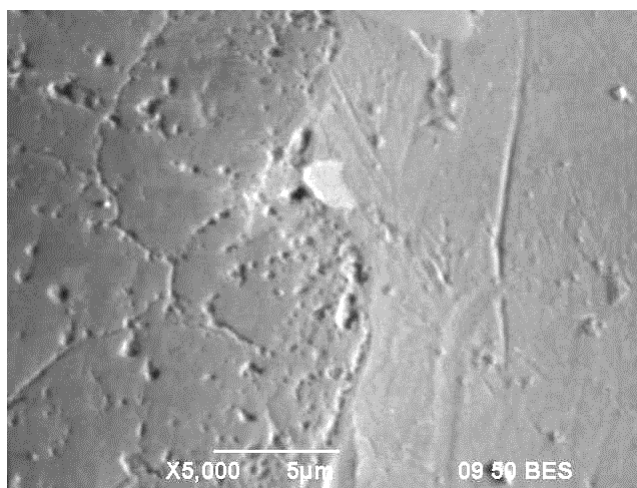


Рис. 4. Поры, локализованные около кремниевой частицы.

Таблица 3

Пористость покрытий на сплаве АК12Д

№ образца	Пористость слоев, %		
	Технологический	Рабочий	Переходный
1	11,7	13,0	12,5
2	4,3	4,8	6,9
3	13,0	10,2	11,5
4	13,3	8,1	8,3

установки МДО способствует её снижению. Это можно объяснить тем, что существует критическое значение плотности тока, ниже которой образуются пористые, а выше - беспористые МДО-слои [8].

Так как основные составляющие МДО-покрытия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 , химически инертны и сквозная пористость не характерна для внутренних слоев, можно говорить о предпосылках хорошей коррозионной стойкости покрытий, потому что замкнутые поры не приводят к снижению их защитных свойств. Кроме того, повышенная пористость обеспечивает снижение теплопроводности покрытия, что может быть полезным в условиях термических ударов.

Микротвердость МДО-слоя является показателем присутствия в покрытии высокотвердых фаз типа $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [5, 7], поэтому сопоставление значений микротвердости может служить косвенным методом сравнительной оценки содержания этой фазы. Исследование микротвердости модифицированных слоев выявило неоднородность её значений по толщине покрытий (рис.5). По мере удаления от поверхности сплава-основы АК12Д наблюдается снижение микротвердости, это обусловлено как изменением фазового состава покрытий [5], так и тем, что с ростом толщины покрытий происходит увеличение их пористости и образование структурных микронесплошностей, которые распределены по толщине оксидного слоя неравномерно (рис.3).

Во всех образцах микротвердость покрытий превысила эту же характеристику для алюминиевого сплава АК12Д более чем в 10 раз (средняя микротвердость ма-

Таблица 2

Толщина слоев покрытий, сформированных МДО

№ режима	Толщина слоев, мкм			Общая толщина, мкм
	Технологический	Рабочий	Переходный	
1	11±4	11±3	12±3	33±10
2	30±1	12±5	7±1	54±7
3	33±7	24±7	36±7	86±10
4	46±9	43±12	74±6	167±9

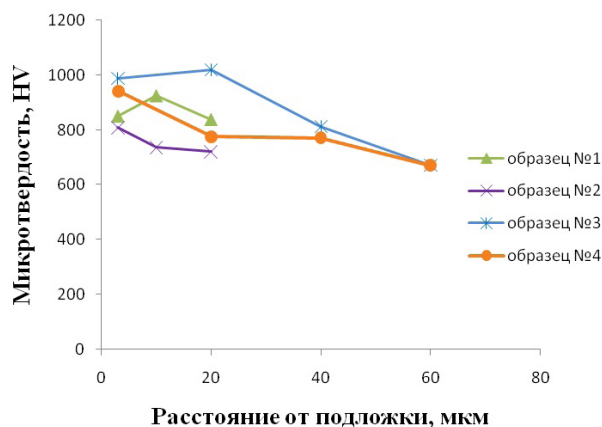


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине покрытий.

териала основы 68 HV). Наибольшие значения микротвердости рабочего слоя характерны для образца №3 - 1010 HV, это образец, обработанный при минимальном межэлектродном расстоянии. МДО-слои на образцах №2, 4, полученные на установке с емкостью конденсатора 200 мкФ, характеризуются значительно меньшим уровнем микротвердости, что говорит о том, что, доля высокотвердых фаз в этих покрытиях сравнительно невелика.

4. Заключение

Исследование покрытий, полученных методом МДО на сплаве АК12Д, позволило установить, что сформировавшиеся покрытия имеют слоистое строение, характерное для МДО-покрытий на алюминиевых сплавах. Их общая толщина варьируется от 33 мкм до 167 мкм. Увеличение емкости конденсатора установки, как и уменьшение расстояния между образцом и электродом повышают интенсивность процесса МДО. Это приводит к увеличению количества продуктов электрохимической реакции и, следовательно, к формированию более толстых покрытий.

Изучение поперечного сечения позволило обнаружить, что сквозная пористость характерна только для наружного технологического слоя. Во внутренних слоях МДО-покрытий наблюдаются только замкнутые поры и пустоты различных размеров. Увеличение емкости конденсаторов на установке МДО способствует снижению пористости.

Измерение твердости позволило выявить неоднородность механических свойств МДО-покрытий по толщине в зависимости от фазового состава и наличия дефектов. Наибольшее влияние на микротвердость МДО слоя оказало взаимное расположение обрабатываемой

поверхности и электрода.

Максимальное значение микротвердости (1010 HV) было достигнуто на образце, обработанном при наименьшем межэлектродном расстоянии, что в 15 раз превысило твердость материала подложки (68 HV).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения на силуминах высококачественных МДО-слоев с высоким комплексом механических свойств.

Результаты работы были получены в ходе выполнения совместного проекта ФГБОУ ВПО УГАТУ и ОАО «УМПО» «Разработка и промышленное освоение координируемых технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из Al-сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью», реализуемого в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 года.

Литература

1. T. Wei, F. Yan, J. Tian. Journal of Alloys and Compounds. **389**, 169 (2005).
2. L. Wen, Y. Wang, Y. Jin, B. Liu, Y. Zhou, D. Sun. Surface & Coatings Technology. **228**, 92 (2013).
3. R.R. Grin, F.F. Kutusova, N.Yu. Dudareva, I.V. Aleksandrov, F.F. Musin. Vestnik USATU **8** (61), 143 (2013). (in Russian) [Р. Р. Гринь, Ф.Ф. Кутусова, Н.Ю. Дударева, И.В. Александров, Ф.Ф. Мусин. Вестник УГАТУ. **8** (61), 143 (2013).]
4. H. Fadaee, M. Javidi. Journal of Alloys and Compounds. **604**, 36 (2014).
5. Plasma electrolytic surface modification of metals and alloys. Vol.2 M.:Technosphere. (2011). (in Russian) [Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Том 2. М.: Техносфера. (2011)]
6. V. K. Afanasyev, etc. The piston silumins. Kemerovo: Polygraph. (2005). (in Russian) [В.К. Афанасьев и др. Поршневые силумины. Кемерово: Полиграф. (2005)]
7. V.V. Tihonenko, A.M. Shkilkko. Diagnostics the outer layer of the coating produced microarc oxidation on aluminum alloys. 119-125 (2010). (in Russian) [В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько. Диагностика наружного слоя покрытия, полученного микродуговым окислением на сплавах алюминия. 119-125 (2010).]
8. A.Yu. Stepanova, I.V. Zaporotckova, A.N. Belov. Vestnik VolSU series. **10** (5), 114 (2011). (in Russian) [А.Ю. Степанова, И.В. Запороцкова, А.Н. Белов. Вестник ВолГУ. **10** (5), 114 (2011).]