

УДК 627.7.015

Микродуговое оксидирование высококремнистого алюминиевого сплава АК12Д

Киселева С. К.^{1,*}, Зайнуллина Л. И.¹,
Абрамова М. М.¹, Дударева Н. Ю.¹,
Александров И. В.¹

* nurieva_s@mail.ru

¹Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия

Приведены результаты исследования свойств упрочненных поверхностных слоев, формируемых методом микродугового оксидирования (МДО) на образцах из Al-Si сплава. Установлено, что свойства сформированных поверхностей (микротвердость, толщина, пористость) зависят от концентрации компонентов электролита и микроструктуры материала основы. Увеличение концентрации жидкого стекла Na_2SiO_3 и гидроксида калия КОН приводит к образованию МДО-слоя с большей толщиной, повышенной микротвердостью и пониженной пористостью. Деформационно-термическая обработка образцов сплава АК12Д перед МДО приводит к ухудшению качества сформированного слоя.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминиевые сплавы, микроструктура, микротвердость, пористость

Введение

На сегодняшний день существует несколько методов модификации поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов, таких, как анодирование, напыление, металлизация и микродуговое оксидирование. Наиболее перспективной и активно развивающейся технологией является микродуговое оксидирование (МДО). Суть метода заключается в формировании на поверхности детали высокопрочного износостойкого и теплостойкого покрытия, состоящего преимущественно из высокотемпературных оксидов (корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и других окислов алюминия). К основным преимуществам МДО можно отнести возможность получения защитных покрытий с высокими показателями механических свойств, минимизацию производственных площадей и сокращение времени технологического процесса, поскольку не требуется тщательной предварительной подготовки поверхности деталей и конструкций. Малая себестоимость является немаловажным достоинством этой технологии.

Известно, что качество формируемых поверхностных слоев определяется режимами МДО-процесса [1-5]. На сегодняшний день технология МДО широко применяется для упрочнения поверхностей деталей из алюминиевых сплавов систем Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Si и др. [6]. Для этих материалов достаточно полно изучено влияние различных режимов на свойства МДО-слоя. Что же касается возможности получения качественного покрытия на высококремнистых алюминиевых сплавах, то в научной литературе количество таких работ невелико [7,8], и выводы в них достаточно противоречивые.

Известно, что качество формируемого покрытия зависит от нескольких факторов процесса МДО: химического состава обрабатываемого материала, состава электролита, электрических режимов и продолжительности обработки, а в качестве параметров выхода обычно выступают толщина, микротвердость, структура и пористость МДО-слоя [1-4, 9-11]. Еще одним важным фактором, который редко принимается во внимание в процессе исследований, является исходная микроструктура образцов. Для Al-Si сплавов такая микроструктура определяется размерами зерен матричной фазы, размерами частиц кремния и характером их расположения в объеме основного материала. В исходных полуфабрикатах частицы кремния могут располагаться в объеме матричного раствора по-разному, например, в виде строчек или равномерно. В связи с тем, что МДО-слои формируются вглубь поверхности материала образца [12], исходная микроструктура материала не может не сказаться на качестве покрытия. Однако исследований в этом направлении проведено довольно мало. Из работы [8] известно, что исходные форма и размеры частиц кремния в структуре Al-Si-сплавов различного состава (6-22% Si) определяют ход процесса, а предварительная термообработка образцов оказывает влияние на прочность сцепления МДО-слоев с подложкой. Но в целом количество научных работ и приведенная в них информация являются недостаточными, на ликвидацию этого пробела и направлены данные исследования.

В связи с этим, была сформулирована цель работы: исследовать влияния микроструктуры высококремнистого алюминиевого сплава АК12Д и режимов МДО-процесса на характеристики формируемого поверхностного слоя (микротвердость, пористость и толщину оксидного слоя).

1. Материал и методика эксперимента

В качестве материала исследования был выбран эвтектический силумин АК12Д ОСТ 192014-90. Исходный полуфабрикат представлял собой горячепрессованный пруток.

Исследовали два состояния сплава АК12Д:

Состояние 1 – состояние поставки;

Состояние 2 – состояние после деформационно-термической обработки (ДТО), которая состояла из двух этапов. На первом этапе заготовки подвергались всесторонней полужакрытой ковке [13] с понижением температуры от 400 °С до 320 °С. Данный метод деформации был выбран для устранения неоднородного распределения частиц кремния, характерного для состояния поставки. Однако при проведении вышеописанной

деформационной обработки была сформирована ультрамелкозернистая (УМЗ) структура, которая могла также повлиять на качество формируемого МДО-слоя. Для устранения УМЗ состояния при одновременном сохранении однородного распределения частиц кремния, заготовки послековки подвергали закалке с температуры 515 °С и старению при $T=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение пяти часов.

Обработке методом МДО подвергались образцы в виде параллелепипедов, вырезанных из заготовок состояния 1 и 2. Поверхность образцов имела исходную шероховатость $Ra\ 0,5\ \mu\text{м}$. Предварительной промывке и обезжириванию поверхность не подвергалась.

Образцы состояний 1 и 2 подвергались МДО обработке по режимам, представленным в табл. 1. Эти режимы отличаются концентрацией компонентов электролита – жидкого стекла Na_2SiO_3 и гидроксида калия КОН. Обычно [14] при анализе влияния состава электролита на свойства МДО-слоя концентрация одного из компонентов электролита остается неизменной, а концентрация второго компонента изменяется. В нашем случае изменяется содержание двух компонентов сразу, и жидкого стекла и гидроксида калия, при этом их концентрационное соотношение остается постоянным. Такой подход обусловлен тем, что в электролите эти компоненты взаимодействуют между собой. Поэтому, чтобы не повлиять на равновесие электролита, изменяли оба компонента одновременно, сохранив их количественное соотношение. Электрический режим процесса определялся емкостью конденсаторной батареи установки для обоих режимов, оставался неизменным. Для обоих режимов электрические параметры процесса были следующие: частота импульсов составляла 50 Гц, соотношение анодных и катодных токов $I_a/I_k = 1$, средняя плотность тока для обоих режимов составлял $j = 4,82 \dots 4,92\ \text{А/дм}^2$, среднее напряжение на аноде составляло $U_a = 340\ \text{В}$. Продолжительность обработки определялась интенсивностью процесса МДО, при этом формирование упрочненного слоя продолжалось до момента прекращения искрения на поверхности образцов и составляло 3 часа. Температура электролита не превышала 45 °С.

Таблица 1. Режимы МДО

№ режима	1	2
концентрация КОН, $C_{\text{кон}},\ \text{г/л}$	1,5	3,5
концентрация жидкого стекла $C_{\text{жс}},\ \text{г/л}$	1,5	3,5

Микроструктуру сплава АК12Д изучали с помощью оптического микроскопа «Olympus GX51». Параметры микроструктуры оценивали по стандартным методикам с вероятной статистической ошибкой не более 5% [15]. Химический состав частиц определяли энергодисперсионным методом на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «JEOL JSM 6490LV».

Для оценки толщины покрытий проводили съемку изображений системы «сплав АК12Д – МДО-слой» с помощью растрового электронного микроскопа «JEOL JSM 6490LV» при увеличении $\times 500$. Съемку вели в режиме обратных рассеянных электронов.

Образцы заливали в жидкую эпоксидную смолу и после отверждения проводили их установку в колонну микроскопа.

Просмотр и съемку пор в МДО-слоях также вели на растровом электронном микроскопе. Пористость $V_{\text{пор}}$ рассчитывали по формуле 1:

$$\sum V_{\text{пор}} = \frac{Z_{\text{пор}}}{Z}, \quad (1)$$

где $\sum V_{\text{пор}}$ – доля пор в МДО-слое; %; $Z_{\text{пор}}$ – число точек равномерной сетки, попавших на поры; Z – общее число точек сетки.

Твердость МДО-слоев по Виккерсу (HV) определяли на микротвердомере «Struers Duramin» при приложении нагрузки 1Н в течение 10 секунд.

2. Результаты исследования

На рис. 1а представлена микроструктура образцов из сплава АК12Д перед МДО в состоянии поставки (состояние 1). Как видно, кремниевая фаза распределена неоднородно. Наблюдаются области, обогащенные частицами кремния со средним размером $3,0 \pm 0,5$ мкм и объемной долей $22 \pm 4\%$. Средний размер зерен алюминиевой матрицы 14 ± 4 мкм. Кроме того, в структуре обнаружены выделения θ -фазы (CuAl_2) с объемной долей $3 \pm 1\%$ и средним размером, близким к размеру кремниевых частиц. Средняя микротвердость сплава в состоянии поставки равна $92 \pm 7\text{HV}$.

Микроструктура образцов после ДТО (состояние 2) значительно отличается от состояния поставки (рис. 1б). Наблюдается однородное распределение частиц кремния по всему объему матричного раствора. Средний размер зерен составил 15 ± 4 мкм. Размер частиц кремния и их объемная доля – $3,2 \pm 0,5$ мкм и $23 \pm 4\%$ соответственно. В микроструктуре присутствуют выделения θ -фазы, размер и объемная доля которых также не изменились по сравнению с состоянием 1. Средняя микротвердость сплава после ДТО стала выше и составила $145 \pm 9\text{HV}$.

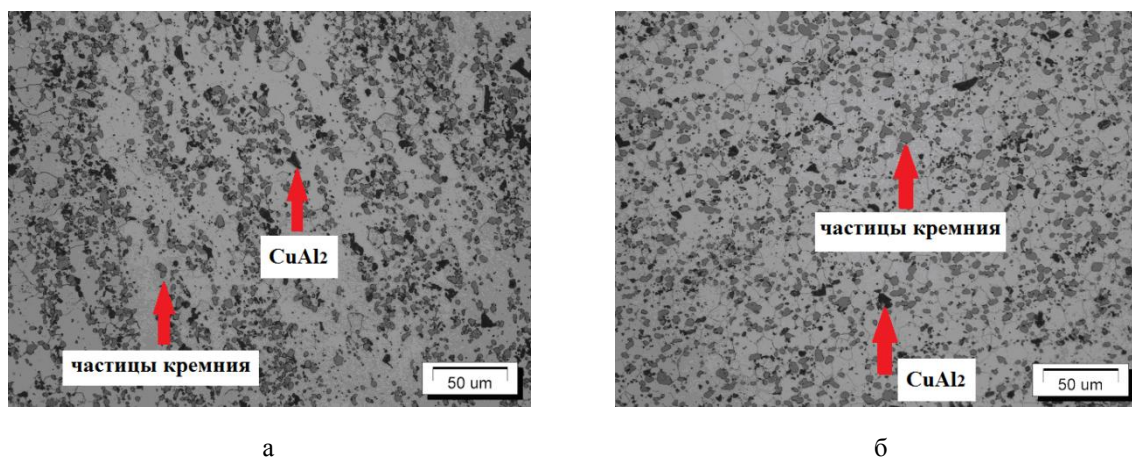


Рис. 1. Микроструктура сплава АК12Д, а – состояние 1, б – состояние 2; оптика; стрелками указаны частицы кремния и частицы θ -фазы (CuAl_2)

Следовательно, рассмотренные состояния отличаются распределением частиц кремния. Рассмотрим влияние МДО на основные характеристики слоя (толщину, микротвердость и пористость) в зависимости от микроструктуры сплава АК12Д и режимов процесса.

Анализ изображения позволяет утверждать, что толщина слоя зависит как от режима МДО-обработки, так и от микроструктуры (табл. 2).

Таблица 2. Средняя толщина ($t_{\text{покр}}$, мкм), пористость ($V_{\text{пор}}$, %) покрытий на сплаве АК12Д

Состояние	№ режима			
	1		2	
	$t_{\text{покр}}$ (мкм)	$V_{\text{пор}}$ (%)	$t_{\text{покр}}$ (мкм)	$V_{\text{пор}}$ (%)
1 - поставка	50±4	6±2	114±8	5±2
2 - ДТО	20±3	9±2	90±8	10±2

Толщина слоя, полученного в результате МДО, неоднородна по всей поверхности образцов (рис. 2).

Наиболее сильная неоднородность наблюдается для образцов, обработанных по режиму 1 (рис. 2а, рис. 2в). Кроме этого, увеличение концентрации компонентов в электролите (режим 2) приводит к значительному увеличению толщины слоя. Деформационно-термическая обработка образцов алюминиевого сплава перед МДО способствует снижению средней толщины покрытия (рис. 2).

Анализ изображения системы «сплав АК12Д – МДО-слой» показал, что покрытие состоит из множества пор. При исследовании МДО-слоя целесообразно выделять на анализируемом изображении подслои: 1 – металл образца; 2 – переходный подслой покрытия; 3 – основной подслои покрытия; 4 – эпоксидная смола (рис. 2). В состоянии 1 (поставка) наибольшая пористость наблюдается в переходном подслое, который прилегает к металлу (рис. 3а, 3б). При переходе к основному рабочему подслою (область 3 на рис. 2а, 2б), состоящему из оксида алюминия Al_2O_3 , пористость снижается (рис. 3а, 3б). В состоянии 2 - после ДТО переходная зона отсутствует и МДО-покрытие состоит из основного рабочего слоя (рис. 2в, 2г), для которого наблюдается равномерное распределение пор (рис. 3в, 3г).

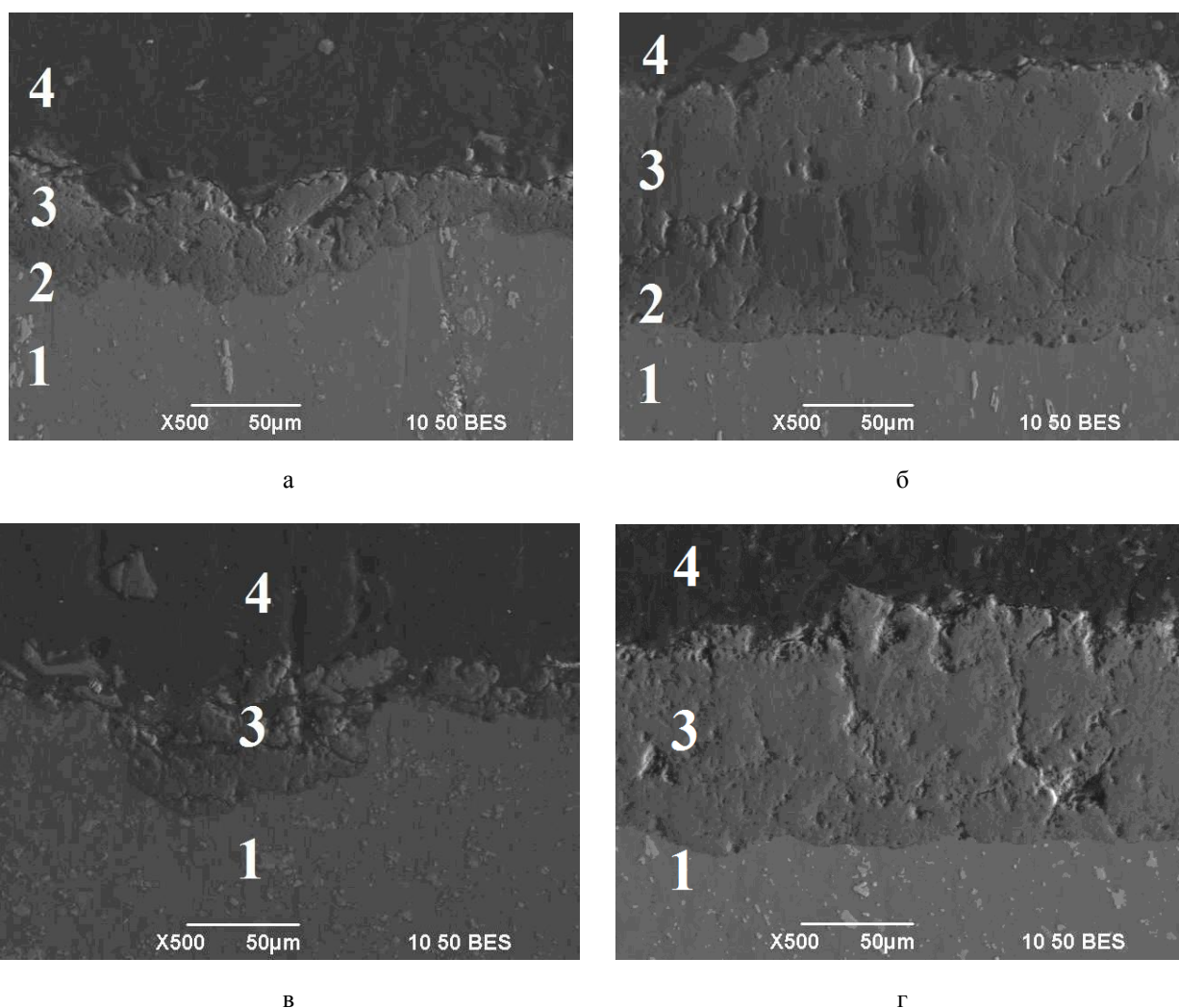


Рис. 2. Изображение системы «сплав АК12Д – МДО-слой»: *а, б* – состояние 1; *в, г* – состояние 2; *а, в* – режим 1; *б, г* – режим 2; 1 – металл; 2 – переходной подслоя; 3 – основной подслоя; 4 – эпоксидная смола

Среднее значение пористости по всей толщине МДО-слоя выше для образцов состояния 2 (табл. 2), при этом концентрация компонентов электролита практически не влияет на эту величину. Таким образом, микроструктура сплава вносит более существенный вклад в среднее значение пористости, чем режим МДО.

Оксид алюминия Al_2O_3 является основой рабочего подслоя, и, как известно, характеризуется высокой микротвердостью [3]. Результаты измерения микротвердости подтверждают образование оксида алюминия при МДО-обработке исследованных образцов (рис. 3). Во всех случаях микротвердость МДО-слоя значительно превышает микротвердость материала основы, как в состоянии поставки, так и после ДТО.

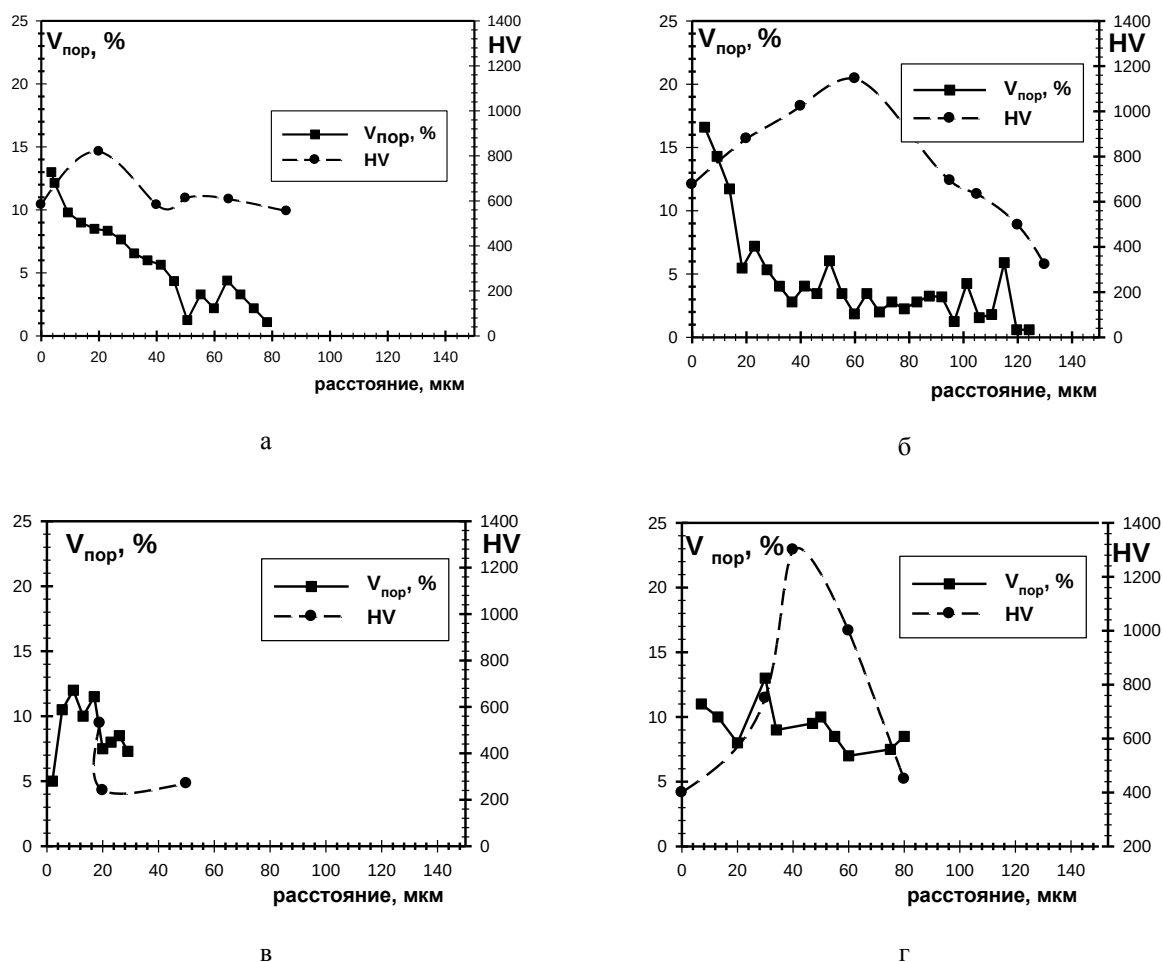


Рис. 3. Графики зависимостей микротвердости и пористости покрытий от расстояния от поверхности металла: а, б – состояние 1; в, г – состояние 2; а, в – режим 1; б, г – режим 2;

Распределение микротвердости неоднородно по толщине МДО-слоя (рис. 3). Общая тенденция такова, что при переходе к основному рабочему слою значения микротвердости повышаются. При дальнейшем увеличении расстояния от поверхности металла микротвердость снижается. Максимальное их значение наблюдается для образцов, обработанных по режиму 2 (рис. 3б, 3г) и составляет 1200-1300HV. У образцов, обработанных по режиму 1 (рис. 3а, 3в) максимальное значение микротвердости 800HV.

Общий характер распределения пористости и микротвердости по толщине покрытия для образцов состояния 1 соответствует зависимостям, представленным ранее в литературе [16]. Большое количество пор, также, наблюдается в переходном слое, который характеризуется относительно низким значением микротвердости. С увеличением расстояния от поверхности металла пористость снижается и при этом увеличивается микротвердость за счет формирования рабочего слоя, состоящего в основном из оксида алюминия Al_2O_3 . При дальнейшем увеличении расстояния от поверхности металла, ожидалось увеличение пористости за счет образования технологического слоя, состоящего из муллита, который характеризуется низким значением микротвердости и высокой пористостью [17]. Однако, в нашем случае роста

пористости с одновременным снижением микротвердости не произошло. По-видимому, это связано с тем, что большая часть слоя муллита была удалена при предварительной подготовке образцов.

Для состояния 2 распределение микротвердости и пористости не согласуются с известными данными, что может быть связано с отсутствием переходного слоя (рис. 2в, 2г). При этом основной слой имеет повышенную пористость (табл. 2). Наиболее пористый и наименее твердый МДО-слой (600HV), был сформирован на образце в состоянии 2 на режиме 1 (рис. 3в).

3. Обсуждение результатов

Известно, что при МДО-обработке высококремнистых алюминиевых сплавов часто возникают трудности с формированием качественного МДО-слоя. Это связывают с наличием кремния в составе литейных сплавов. Последний, препятствуя взаимодействию алюминия с кислородом, блокируя формирование оксидной пленки и выходя на рабочую поверхность в процессе ее обработки, создает очаги питтинга. В местах выхода кремния покрытие или не образуется, или его качество не является удовлетворительным [7].

На качество МДО-слоя влияет ряд факторов, среди которых наиболее важными считаются состав и концентрация компонентов электролита, а также микроструктура материала основы. В наших экспериментах режимы МДО отличались концентрацией жидкого стекла и гидрооксида калия. Изменялось количество двух компонентов сразу, при этом их соотношение сохранялось неизменным. Микроструктура образцов из алюминиевого сплава АК12Д различалась распределением кремниевых частиц.

Увеличение концентрации жидкого стекла и гидрооксида калия в электролите привело к получению покрытия с большей толщиной (114 ± 8 мкм для образца в состоянии поставки и 90 ± 8 мкм – после ДТО) и высокой микротвердостью (табл. 2 и рис. 3). Высокая микротвердость наблюдается у МДО-слоев большей толщины. По-видимому, это связано с тем, что МДО-слои обладают низкой теплопроводностью [18], что при значительной толщине покрытия увеличивает температуру на поверхности и способствует формированию высокотемпературных и высокотвердых фаз оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [6].

В результате исследования обнаружено сильное влияние исходной микроструктуры сплава на толщину МДО-слоя (рис. 2). Объяснить этот эффект можно основываясь на физических основах процесса МДО.

Сущность процесса МДО заключается в том, что под действием дуговых и искровых разрядов, возникающих на поверхности заготовки, происходит расплавление материала матрицы и его взаимодействие с атомами электролита, в результате чего происходит формирование покрытия [19]. Как известно, электрические разряды гасятся на частицах кремния [20]. В результате чего снижается интенсивность процесса обработки, что ведет к снижению микротвердости и толщины формируемого МДО-слоя. Поэтому, чем больше в материале образца участков, свободных от частиц кремния, тем более качественным будет МДО-слой. Анализ микроструктуры показал, состояние 1 характеризуется строчечным

выделением частиц кремния. Между этими строчками находятся протяженные участки исходной матричной фазы, свободные от частиц кремния. Благодаря такой структуре на образцах состояния 1 был получен более качественный МДО-слой, характеризующийся большей толщиной и меньшей пористостью.

В целом анализ полученных результатов показал, что методом МДО можно получить качественное покрытие (с высокими микротвердостью - до 1200-1300HV и толщиной - до 114 ± 8 мкм) на высококремнистом алюминиевом сплаве АК12Д, содержащем до 13% кремния.

Выводы

1. Микроструктура алюминиевого сплава АК12Д и концентрация компонентов электролита – жидкого стекла Na_2SiO_3 и гидроксида калия КОН влияют на качество покрытия, сформированного в результате МДО-обработки.
2. Увеличение концентрации компонентов электролита приводит к формированию МДО-слоя с большей толщиной, повышенной микротвердостью и пониженной пористостью.
3. Деформационно-термическая обработка образцов сплава АК12Д по схеме «ковка+закалка+старение» перед МДО приводит к ухудшению качества сформированного слоя.

«Результаты работы были получены в ходе выполнения совместного проекта ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО УГАТУ «Разработка и промышленное освоение координируемых технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из Al-сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью», реализуемого по Договору №40/10-30976/НЧ-НЧ-01-13-ХГ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0010 м/у ОАО «УМПО» и Министерством образования и науки РФ) в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 года».

Список литературы

1. Жаринов П.М. Эффективные микроразряды и новые способы нанесения покрытий на изделия из алюминиевых сплавов: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2009. 24 с.
2. Габралла Мохаммед Эльхаг Мохаммед. Влияние электрического режима на свойства микродуговых покрытий, формируемых на сплаве Д16: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 24 с.
3. Тихоненко В.В., Шкилько А.М. Метод микродугового оксидирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 2, вып. 13 (56). С. 13-18.
4. Дударева Н.Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности // Вестник УГАТУ. 2013. Т.17, вып. 3. С. 217-222.

5. Кучмин И.Б., Нечаев Г.Г. Плотность тока как определяющий параметр процесса микродугового оксидирования // Вестник СГТУ. 2013. Т. 1, № 1 (69). С. 62-66.
6. Суминов И.В. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование. М.: Экомет, 2005. 368 с.
7. Чигринова Н.М. Особенности формирования функциональных покрытий в проблемных зонах металлоконструкций торгового и рекламного оборудования // Вестник Государственного инженерного университета Армении (ГИУА). Сер. Механика, Машиноведение, Машиностроение. 2012. Вып.15, № 1. С. 46-53.
8. Криштал М.М., Ивашин П.В., Полунин А.В., Павлов Д.А. Повышение износостойкости деталей алюминиево-кремниевых сплавов методом МДО для работы в экстремальных условиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4-3. С. 765-768.
9. Wenbin Xue, Xiuling Shia, Ming Huaa, Yongliang Lib. Preparation of anti-corrosion films by microarc oxidation on an Al-Si alloy // Applied Surface Science. 2007. Vol. 253, no. 14. P. 6118-6124. DOI: [10.1016/j.apsusc.2007.01.018](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.018)
10. Wenbin Xue, Chao Wangb, Hua Tiana, Yongchun Laia. Corrosion behaviors and galvanic studies of microarc oxidation films on Al-Zn-Mg-Cu alloy // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201, iss. 21. P. 8695-8701. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.10.029](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.029)
11. Lei Wen, Yaming Wang, Ying Jin, Bing Liu, Yu Zhou, Dongbai Sun. Microarc oxidation of 2024 Al alloy using spraying polar and its influence on microstructure and corrosion behavior // Surface & Coatings Technology. 2013. Vol. 228. P. 92-99. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2013.04.013](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.04.013)
12. Федоров В.А., Великосельская Н.Д. Влияние режимов микродуговой обработки на размеры пар трения из алюминиевых сплавов // Химическое и нефтяное машиностроение. 1991. № 5. С. 24-26.
13. Шундалов В.А., Иванов В.Ю., Латыш В.В., Михайлов И.Н., Павлинич С.П., Шарафутдинов А.В. Способ получения ультрамелкозернистых заготовок из металлов и сплавов: пат. № 2393936 РФ. 2010.
14. Токарев А.В. Электрофизические характеристики покрытий на алюминии, полученных методом микродугового оксидирования // Вестник КРСУ. 2012. Т.12, вып. 10. С. 106-110.
15. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 271 с.
16. Эпельфельд А.В. Применение технологии микродугового оксидирования для формирования защитных покрытий // Технология обработки материалов потоками высоких энергий (ТОМПВЭ): сайт. Режим доступа: http://tompve.ru/science/techn_mash.htm (дата обращения 18.02.2015).
17. Алехин В.П., Федоров В.А., Булычев С.И., Тюрпенко О.А. Особенности микроструктуры упрочненных поверхностных слоев, получаемых микродуговым оксидированием // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 5. С. 121-126.

18. Криштал М.М. О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на силумине АК9ПЧ // Вектор науки ТГУ. 2012. № 4 (22). С. 169-172.
19. Лелевкин В.М., Токарев А.В., Черткова А.А. Композиционное покрытие на алюминии // Вестник КРСУ. 2012. Том 12, № 5. С. 166-169.
20. Криштал М.М., Рюмкин М.О. Влияние исходной структуры Al-Si-сплавов на свойства получаемых методом микродугового оксидирования оксидных слоев и торможение частицами кремния роста оксидного слоя // Материаловедение. 2008. № 12. С. 50-61.

Microarc Oxidation of the High-Silicon Aluminum AK12D Alloy

S.K. Kiseleva^{1,*}, L.I. Zainullina¹,
M.M. Abramova¹, N.Yu. Dudareva¹,
I.V. Alexandrov¹

*nurieva_s@mail.ru

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Keywords: microarc oxidation, aluminum alloys, microhardness, microstructure porosity

The aim of work is to study how the high-silicon aluminum AK12D alloy microstructure and MAO-process modes influence on characteristics (microhardness, porosity and thickness of the oxide layer) of formed surface layer.

Experimental methods of study:

1) MAO processing of AK12D alloy disc-shaped samples. MAO modes features are concentration of electrolyte components – soluble water glass Na_2SiO_3 and potassium hydroxide (KOH). The content of two components both the soluble water glass and the potassium hydroxide was changed at once, with their concentration ratio remaining constant;

2) metallographic analysis of AK12D alloy structure using an optical microscope «Olympus GX51»;

3) image analysis of the system "alloy AK12D – MAO - layer" using a scanning electron microscope «JEOL JSM 6490LV»;

4) hardness evaluation of the MAO-layers using a micro-hardness tester «Struers Duramin».

The porosity, microhardness and thickness of MAO-layer formed on samples with different initial structures are analyzed in detail. Attention is paid to the influence of MAO process modes on the quality layer.

It has been proved that the MAO processing allows reaching quality coverage with high microhardness values of 1200-1300HV and thickness up to 114 μm on high-silicon aluminum alloy.

It has been found that the initial microstructure of alloy greatly affects the thickness of the MAO - layer. The paper explains the observed effect using the physical principles of MAO process and the nature of silicon particles distribution in the billet volume.

It has been shown that increasing concentration of sodium silicate and potassium hydroxide in the electrolyte results in thicker coating and high microhardness. It has been revealed that high microhardness is observed in the thicker MAO-layers.

Conclusions:

1) The microstructure of aluminum AK12D alloy and concentration of electrolyte components - liquid glass Na_2SiO_3 and potassium hydroxide affect the quality of coating resulted from MAO-processing.

2) Increasing concentration of the electrolyte leads to the thicker MAO-layer of higher microhardness and lower porosity.

3) Deformation-heat treatment of AK12D alloy samples using a scheme "forging + quenching + aging" before the MAO leads to deteriorated quality of formed layer.

References

1. Zharinov P.M. *Effektivnye mikrorazryady i novye sposoby naneseniya pokrytii na izdeliya iz alyuminiyevykh splavov. Avtoreferat kand. diss.* [Effective microdischarges and new methods for coating products made of aluminum alloys. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2009. 24 p. (in Russian, unpublished).
2. Gabralla Mokhammed El'khag Mokhammed. *Vliyanie elektricheskogo rezhima na svoistva mikrodogovykh pokrytii, formiruemykh na splave D16. Avtoreferat kand. diss.* [Influence of electrical conditions on the properties of microarc coatings formed on the alloy D16. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2007. 24 p. (in Russian, unpublished).
3. Tikhonenko V.V., Shkil'ko A.M. Method of microarc oxidation. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2012, vol. 2, no. 13 (56), pp. 13-18. (in Ukrainian).
4. Dudareva N.Yu. Influence of modes microarc oxidation on properties of the formed surface. *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 3, pp. 217-222. (in Russian).
5. Kuchmin I.B., Nechaev G.G. The current density as the determining parameter for the micro-arc oxidation process. *Vestnik SSTU*, 2013, vol. 1, no. 1 (69), pp. 62-66. (in Russian).
6. Suminov I.V. *Mikrodogovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* [Microarc oxidation: theory, technology, equipment]. Moscow, Ekomet Publ., 2005. 368 p. (in Russian).
7. Chigrinova N.M., Chigrinov V.E. Formation features of functional coatings in problem domains of metal structures for trade and advertising equipment. *Proceedings of State Engineering University of Armenia. Ser. Mechanics, Machine Science, Machine-Building*, 2012, iss. 15, no. 1, pp. 46-53. (in Russian).
8. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V., Pavlov D.A. Durability of parts from aluminum-silicon alloys improvement using micro arc oxidation for functioning in extremal friction conditions. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 765-768. (in Russian).

9. Wenbin Xue, Xiuling Shia, Ming Huaa, Yongliang Lib. Preparation of anti-corrosion films by microarc oxidation on an Al-Si alloy. *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253, no. 14, pp. 6118-6124. DOI: [10.1016/j.apsusc.2007.01.018](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.018)
10. Wenbin Xue, Chao Wangb, Hua Tiana, Yongchun Laia. Corrosion behaviors and galvanic studies of microarc oxidation films on Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 21, pp. 8695-8701. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.10.029](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.029)
11. Lei Wen, Yaming Wang, Ying Jin, Bing Liu, Yu Zhou, Dongbai Sun. Microarc oxidation of 2024 Al alloy using spraying polar and its influence on microstructure and corrosion behavior. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 228, pp. 92-99. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2013.04.013](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.04.013)
12. Fedorov V.A., Velikosel'skaya N.D. Effect of the regimes of microarc treatment on the dimensions of friction pairs made of aluminum alloys. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 1991, no. 5, pp. 24-26. (English version of journal: *Chemical and Petroleum Engineering*, 1991, vol. 27, iss. 5, pp. 280-283. DOI: [10.1007/BF01148552](https://doi.org/10.1007/BF01148552)).
13. Shundalov V.A., Ivanov V.Yu., Latysh V.V., Mikhailov I.N., Pavlinich S.P., Sharafutdinov A.V. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh zagotovok iz metallov i splavov* [Method of obtaining ultrafine-grained billets made of metals and alloys]. Patent RF, no. 2393936, 2010. (in Russian).
14. Tokarev A.V. Electrophysical characteristics of aluminum cover obtained by microarc oxidation method. *Vestnik KRSU*, 2012, vol. 12, no. 10, pp. 106-110. (in Russian).
15. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 271 p. (in Russian).
16. Epel'fel'd A.V. *Use of micro-arc oxidation technology for forming protective coatings*. High Energy Flows Material Processing: website. Available at: http://tompve.ru/science/techn_mash.htm , accessed 18.02.2015. (in Russian).
17. Alekhin V.P., Fedorov V.A., Bulychev S.I., Tyurpenko O.A. Features of the microstructure of the hardened surface layers obtained by microarc oxidation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1991, no. 5, pp. 121-126. (in Russian).
18. Krishtal M.M. Thermal conductivity of oxide coatings obtained by micro-arc oxidation, on silumin AK9. *Vektor nauki TGU*, 2012, no. 4 (22), pp. 169-172. (in Russian).
19. Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Chertkova A.A. Carbon-oxide composite coating on aluminum. *Vestnik KRSU*, 2012, vol. 12, no. 5, pp. 166-169. (in Russian).
20. Krishtal M.M., Ryumkin M.O. Influence of the starting structure of Al-Si alloys on the properties of oxide layers obtained by the microarc oxidation, and retardation of the oxide growth by the silicon particles. *Materialovedenie*, 2008, no. 12, pp. 50-61. (in Russian).