

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 62.843.6

DOI:10.34759/vst-2020-1-217-223

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК12ММГН МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Сергеев С.В. *, Аль-Бдейри М.Ш.Х. **, Дубровина Н.А. ***

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
улица Победы, 85, Белгород, 308015, Россия*

** e-mail: sergeyev72@gmail.com*

*** e-mail: engmahmood86@gmail.com*

**** e-mail: natysia2601@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 31.10.2019

Показана возможность создания твердых защитных покрытий на алюминиевом сплаве АК12ММГН методом микродугового оксидирования (МДО), исследованы особенности строения модифицированных слоев, установлено влияние емкости конденсатора установки и продолжительности обработки на структуру и микротвердость получаемых покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминиевый сплав АК12ММГН, толщина покрытия, емкость конденсатора.

Введение

Значительное развитие и в России, и за рубежом получила технология микродугового оксидирования, как эффективный метод упрочнения поверхностей деталей [1]. МДО — современная перспективная технология электрохимического окисления металлов вентильной группы, включая алюминий, титан, цирконий, магний, ниобий, бериллий, тантал, а также их сплавов в целях образования на их поверхности равномерного кера-

мического покрытия толщиной до 200—300 мкм с высокими эксплуатационными и защитными свойствами. Экологически безопасный метод микродугового или микроплазменного оксидирования оптимален для обработки и упрочнения поверхностей изделий со сложным рельефом — сложнопрофильных деталей и узлов ограниченной массы в электротехнической, авиационной, нефте- и газоперерабатывающей промышленности,

приборо- и машиностроении, а также судостроении, медицине и коммунальном хозяйстве [2].

В настоящее время алюминий и его сплавы являются основным сырьем в авиационной и авиакосмической промышленности, они также применяются в других промышленных отраслях [3, 4].

Алюминиевый сплав АК12ММГН является высоколегированным, в его структуре содержится большое количество второй фазы, такой, как силумины, данный сплав имеет большое значение как конструкционный материал [5, 6]. Модификация с помощью МДО позволяет повысить ресурс и надежность деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), защитить их от высокотемпературной газовой эрозии и снизить температуру металла основы в 1,5 раза [7–12].

На основании вышеизложенного была сформулирована цель данного исследования: оценить возможность применения МДО к алюминиевому сплаву АК12ММГН, отработать режимы и изучить строение и свойства полученных покрытий.

Материалы и методики исследования

Для модификации с помощью МДО был выбран алюминиевый сплав АК12ММГН. Образцы для нанесения покрытия были вырезаны из поршня ДВС50 в форме прямоугольных параллелепипедов, имеющих площадь поверхности 0,17 мм².

Поперечные шлифы были подготовлены механической шлифовкой и полировкой на установке LaboPol-5 (Struers) [13] с использованием абразивной бумаги и суспензий.

Образцы были исследованы на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Quanta 200 в режиме обратного рассеивания электронов, ускоряющее напряжение на катоде составляло 3 кВ.

Пять образцов были подготовлены для исследования. Режимы обработки приведены в табл. 1. Оксидирование проводилось в щелочном электролите с добавлением жидкого стекла. Емкость конденсаторов *C* установки МДО составляла

Таблица 1

Режимы МДО-обработки исследуемых образцов

№ образца	<i>C</i> , мкФ	τ , мин	Электролит, г/л
1	78	60	КОН- 4; Жст- 9
2	78	120	КОН- 10; Жст- 4
3	100	60	КОН- 10; Жст- 4
4	78	60	КОН- 10; Жст- 30
5	78	90	КОН- 7; Жст- 20

78 мкФ, за исключением режима исследования образца №3, когда МДО проводилось при 100 мкФ, чтобы значительно сократить время обработки и увеличить толщину покрытия. Время обработки τ определялось уменьшением интенсивности процесса (появления дугового разряда на ребрах).

После обработки образцы промывали под проточной водой в течение 3 мин, чтобы предотвратить осаждение компонентов электролита во время сушки.

Толщина покрытия определялась на поперечных шлифах с использованием программы Digimizer.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана структура поверхности исходного образца из сплава АК12ММГН. В структуре, наряду с матричной фазой, можно выделить кремниевую фазу со средним размером 2,4 мкм, равномерно распределенную по объему сплава.

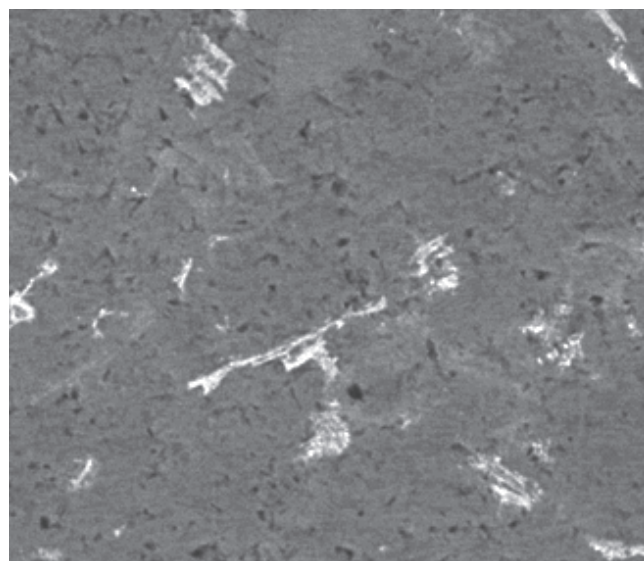


Рис. 1. Микроструктура материала-основы сплава АК12ММГН

На рис. 2 показано поперечное сечение после МДО при различных режимах. Содержание кремния в сплаве отрицательно влияет на покрытие, особенно в переходном слое [14, 15]. В образце №1 (рис. 2, а, б) видно, что там, где находятся фазы кремния, пористость больше, и, как следствие, адгезия меньше. В образце №3 (рис. 2, в), который исследовался при увеличенной емкости конденсатора, пористость меньше как в переходном, так и в основном слое. Для образцов №4 и №5 (рис. 2, г, д) характерна большая пористость в

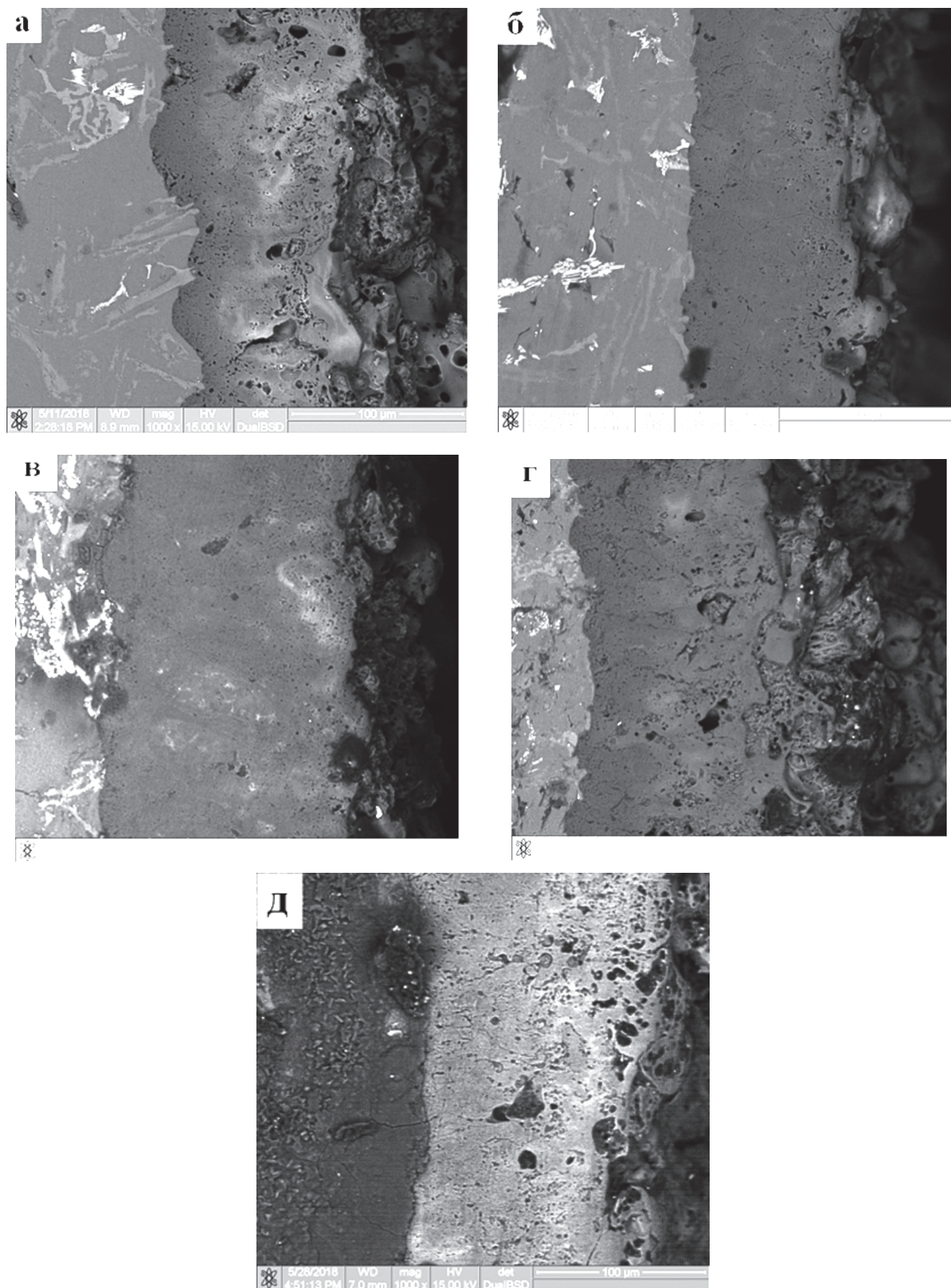


Рис. 2. МДО покрытия на сплаве АК12ММГН: а — образец №1; б — образец №2; в — образец №3; г — образец №4; д — образец №5 (поперечное сечение, режим обратно-рассеянных электронов)

основном рабочем слое, в переходном пористость меньше, и, как следствие, адгезия лучше по сравнению с образцами №1 и №2.

Цвет покрытия на исследуемых образцах варьируется от светло-серого до бурого, что указывает на различный фазовый состав внешних наружных слоев.

В структуре можно выделить несколько слоев, характерных для МДО-покрытий на алюминиевых сплавах (рис. 3). Они состоят из следующих слоев: тонкого переходного слоя, рабочего слоя с максимальной твердостью и минимальной пористостью, состоящего в основном из корунда, и наружного рыхлого технологического слоя, обогащенного алюмосиликатами [16].

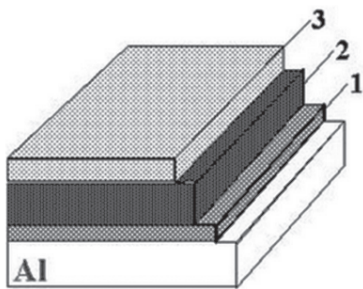


Рис. 3. Типичное строение МДО-покрытий: 1 — переходный слой; 2 — рабочий слой; 3 — технологический слой

Такая же последовательность слоев была обнаружена на исследованных образцах (рис. 4), с переходным слоем от 3 до 5 мкм, рабочим слоем от 70 до 120 мкм и технологическим слоем около 30 мкм.

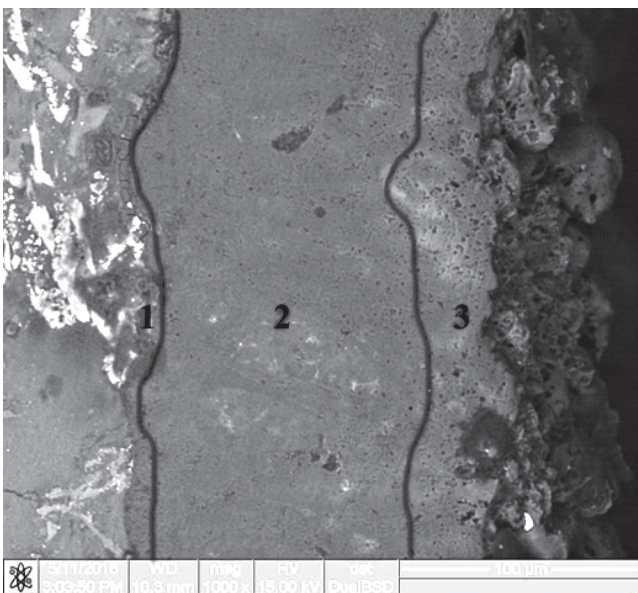


Рис. 4. Слоистое строение покрытия на примере образца №3

Таким образом, повышенное содержание элементов, входящих в покрытие из электролита, может наблюдаться в переходном и наружном технологическом слое (рис. 5).

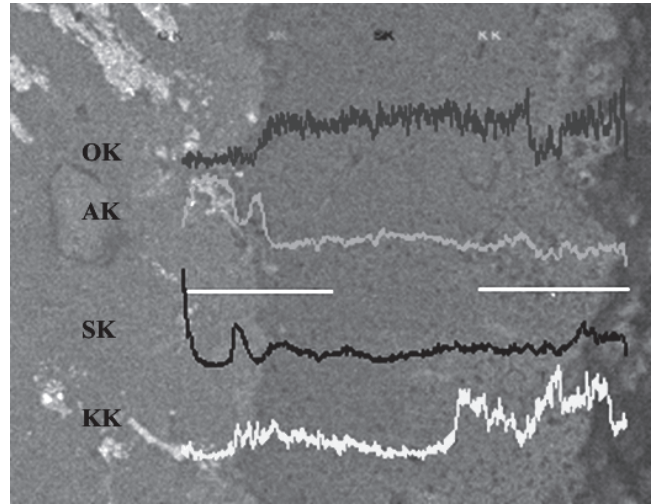


Рис. 5. Распределение элементов по толщине МДО-покрытия

Общая толщина покрытия и толщина его рабочего слоя могут различаться в зависимости от режима МДО (табл. 2).

На образце №4 было сформировано самое толстое покрытие, что связано с увеличением концентрации электролита. Несмотря на это, если сравнивать его с образцом №5, у него получается более пористый технологический слой. Образцы №1 и №2 имеют самое тонкое покрытие, это связано с меньшей концентрацией жидкого стекла. Образец №3, так же как и образцы №4 и №5, имеет толстое покрытие, в данном случае это обусловлено тем, что увеличение емкости конденсатора установки МДО привело к увеличению энергии микродуговых разрядов. Как следствие, увеличивается объем продуктов реакции, которые образуются за единицу времени.

Таблица 2

Толщина покрытия, сформированная методом МДО

№ образца	Толщина рабочего слоя, мкм	Общая толщина, мкм
1	70	105
2	70	90
3	120	140
4	120	170
5	126	150

Выводы

Модифицирование поверхности алюминиевого сплава АК12ММГН методом микродугового оксидирования позволило установить, что сформировавшиеся покрытия имеют слоистую структуру, которая характерна для МДО-покрытий на алюминиевых сплавах. Увеличение емкости конденсатора установки увеличивает интенсивность процесса МДО, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества продуктов электрохимической реакции и, как следствие, к формированию более толстых покрытий [17–20].

Изучение поперечного сечения показало, что пористость характерна только для наружного технологического слоя. Увеличение емкости конденсаторов на установке МДО способствует уменьшению пористости. Измерение твердости позволило выявить неоднородность механических свойств МДО-покрытий по толщине в зависимости от фазового состава и наличия дефектов.

Образец №3 имеет следующие характеристики: плотная структура, толщина рабочего слоя 110 мкм, следовательно, он более износостойкий по сравнению с остальными. Лучшими характеристиками обладает образец №5: при толщине свыше 120 мкм пористость покрытия является максимальной по сравнению с пористостью всех изученных образцов, следовательно, он может применяться в качестве теплозащитного слоя деталей камеры сгорания ДВС. Образец №5 по сравнению с образцом №4 является более экономичным по компонентам электролита.

Результаты исследования свидетельствуют о возможности получения на силуминах высококачественных МДО-слоев с комплексом высоких механических свойств.

Библиографический список

1. Дударева Н.Ю. Повышение работоспособности поверхностей деталей двигателей внутреннего сгорания формированием наноструктурного поверхностного слоя методом микродугового оксидирования: Автореферат дис. ... доктора технических наук. — Уфа: Уфим. гос. авиац.-техн. ун-т, 2018. — 35 с.
2. Бутуев Ю.В., Каняев Н.О., Хохлов А.Л. Микродуговое оксидирование // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Ульяновского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина (20–21 июня 2018). — Ульяновск: УлГАУ, 2018. Ч. 1. С. 120–122.
3. Захарова И.В. Анализ факторов развития регионального авиационного кластера // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 192–200.
4. Тихонов А.И., Калачанов В.Д., Просвирина Н.В. Повышение конкурентоустойчивости предприятий авиационного двигателестроения в современных экономических условиях // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 218–226.
5. ГОСТ 1583-93 Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия // Цветные металлы. Алюминий. Технические условия. Марки: Сборник ГОСТов. — М.: Издательство стандартов, 2004. — 32 с.
6. Колонаков А.А., Кухаренко А.В., Деев В.Б., Абатурова А.А. Структура и химический состав поршневого сплава АК12ММГН, получаемого на разной шихте // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 3. С. 49–55. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-3-49-55
7. Жуков А.А. К вопросу оценки работоспособности поршней двигателей внутреннего сгорания // Машиностроение: инновационные аспекты развития. 2019. С. 93–96. DOI: 10.26160/2618-6810-2019-2-93-96
8. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В. Повышение ресурса деталей машин с использованием микродугового оксидирования // Технология машиностроения. 2014. № 9. С. 34–38.
9. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А. Анализ производительности процесса микродугового оксидирования алюминиевых сплавов // Сварка и диагностика: Сборник докладов международного форума. 2015. С. 152–157.
10. 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.
11. Дударева Н.Ю., Кальщикова Р.В., Домбровский О.П., Бутусов И.А. Экспериментальное исследование теплового состояния днища поршня ДВС с теплозащитным слоем, сформированным методом микродугового оксидирования // Машиностроение и компьютерные технологии. 2015. № 5. С. 115–125.
12. Матюхин Л.М. Влияние молекулярной массы топлива на наполнение и индикаторные показатели поршневого двигателя внутреннего сгорания // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 113–123.
13. Материалография. Оборудование, расходные материалы и принадлежности для подготовки и анализа материалов. URL: <http://промкаталог.рф/PublicDocuments/0403198.pdf>
14. Кристал М.М., Ивашин П.В., Полушин А.В., Боргардт Е.Д., Твердохлебов А.Я. Повышение эффективности технологии микродугового оксидирования алюминиево-кремниевых сплавов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-2(32-2). С. 86–93.
15. Скрябин М.Л., Смехова И.Н. Особенности физико-геометрической модели образования пористых структур оксидных пленок при микродуговом ок-

- сидировании поршневых алюминиевых сплавов // Информационно-технологический вестник. 2017. Т. 14. № 4. С. 200-207.
16. *Скрябин М.Л., Смехова И.Н.* Этапы формирования пористых структур при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов // Ползуновский вестник. 2017. № 4. С. 192-196.
17. *Полунин А.В., Ивашин П.В., Растегаев И.А., Богардт Е.Д., Кристал М.М.* Исследование износостойкости оксидных слоев, сформированных микродуговым оксидированием на силумине АК9ПЧ в модифицированном наночастицами диоксида кремния электролите // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 2. С. 21-25.
18. *Гринь Р.Р., Галлямова Р.Ф., Дударева Н.Ю., Сиренко А.А., Мусин Ф.Ф.* Особенности строения модифицированного слоя, полученного микродуговым оксидированием на сплаве АК12Д // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 3(15). С. 175-178.
19. *Киселева С.К., Зайнуллина Л.И., Абрамова М.М., Дударева Н.Ю., Александров И.В.* Микродуговое оксидирование высокремнистого алюминиевого сплава АК12Д // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 7. С. 115-128. DOI: 10.7463/0715.0779403
20. *Чавдаров А.В., Скоропупов Д.И., Першин П.Н.* Условия существования и стадии роста покрытия при микродуговом оксидировании // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 117. С. 268-272.

SURFACE MODIFICATION OF THE AK12MMGH ALUMINUM ALLOY BY MICRO-OXIDATION TECHNIQUE TO IMPROVE OPERATING CHARACTERISTICS

Sergeev S.V. *, Al-Bdeiri M.S.H. **, Dubrovina N.A. ***

*Belgorod State national research University,
85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia*

** e-mail: sergeyev72@gmail.com*

*** e-mail: engmahmood86@gmail.com*

**** e-mail: natysia2601@mail.ru*

Abstract

Coatings formed by micro-arc oxidation on aluminum alloys have a unique combination of properties such as high heat resistance, wear resistance, adhesive strength and corrosion resistance. This combination of properties is largely stipulated by the nanocrystalline structure, which, according to a number of studies, is represented in the MAO-layers by small-scale pores and crystallites with sizes not more than 100 nm.

For modifications employing MAO the AK12MMGH aluminum alloy was selected. Oxidation was performed in an alkaline electrolyte with addition of liquid glass. Capacitors capacity of MAO installation, was 78 μF , except for the mode of the sample No 3, when MAO was being performed at 100 μF . This was done to significantly reduce the processing time and increase the coating thickness. The processing time τ was determined by the process intensity decrease (arc discharge occurrence on the ribs).

Samples No. 1 and No. 2 have the thinnest coating. This is associated with the lower concentration of liquid glass. The thickest coating was formed on the sample No. 4, due to the increase in

the electrolyte concentration. Despite this, being compared with the sample No. 5, it has a more porous technological layer. The same as samples No. 4 and No. 5, sample No. 3 has a thick coating. In this case, it is stipulated by the fact that capacitor capacitance increase of the MAO installation led to the increase of micro-arc discharges, and, as a consequence, the volume of reaction products, formed per unit time, increases.

The surface modification of the AK12MMGH aluminum alloy by micro-arc oxidation method allowed that formed coatings had a layered structure intrinsic to MAO-coatings of aluminum alloys. The installation capacitor capacitance increasing steps up the MAO process intensity, which leads, in its turn, to the number of electrochemical reaction products build-up, and, as a consequence, to the thicker coatings forming.

The cross-section study revealed that porosity is characteristic only for the outer technological layer. The MAO installation capacitors capacitance increasing helps the porosity reduction. Hardness measurement revealed heterogeneity of mechanical properties of MAO coatings in thickness depending on the phase composition and the presence of defects.

Keywords: micro-arc oxidation, AK12MMGH aluminum alloy, coating thickness, capacitor capacitance.

References

1. Dudareva N.Yu. *Povyshenie rabotosposobnosti poverkhnostei detalei dvigatelei vnutrennego sgoraniya formirovaniem nanostrukturnogo poverkhnostnogo sloya metodom mikrodogovogo oksidirovaniya* (Efficiency enhancing of combustion engines parts surfaces by nano-structural surface layer forming by micro-arc oxidation technique), Doctor's thesis, Ufa, Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2018, 35 p.
2. Butuev Yu.V., Kanyaev N.O., Khokhlov A.L. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (20-21 June 2018) "Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya"*, Ulyanovsk, UIGAU, 2018. Part 1, pp. 120-122.
3. Zakharova I.V. Regional aviation cluster evolution factors analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 192-200.
4. Tihonov A.I., Kalachanov V.D., Prosvirina N.V. Aircraft engine-building enterprises competitive stability enhancement in modern economic conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no 1, pp. 218-226.
5. *Splavy alyuminievye liteinye. Tekhnicheskie usloviya. GOST 1583-93* (Aluminum casting alloys. Specifications. State Standard 1583-93), Moscow, Standarty, 2004, 32 p.
6. Kolonakov A.A., Kukharenko A.V., Deev V.B., Abaturova A.A. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2015, no. 3, pp. 49-55. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-3-49-55
7. Zhukov A.A. *Mashinostroenie: innovatsionnye aspekty razvitiya*, 2019, pp. 93-96. DOI: 10.26160/2618-6810-2019-2-93-96
8. Kolomeichenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2014, no. 9, pp. 34-38.
9. Ponomarev I.S., Krivonosova E.A. *Materialy Mezhdunarodnogo foruma "Svarka i diagnostika"*, 2015, pp. 152-157.
10. Ponomarev I.S., Krivonosova E.A., Gorchakov A.I. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 55-62.
11. Dudareva N.Yu., Kal'shchikov R.V., Dombrovskii O.P., Butusov I.A. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*, 2015, no. 5, pp. 115-125.
12. Matiukhin L.M. The fuel molar weight impact on filling, and indicator indices of a piston combustion engine. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 113-123.
13. *Materialografiya. Oborudovanie, raskhodnye materialy i prinadlezhnosti dlya podgotovki i analiza materialov*. URL: <http://promkatalog.rf/PublicDocuments/0403198.pdf>
14. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V., Borgardt E.D., Tverdokhlebov A.Ya. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2(32-2), pp. 86-93.
15. Skryabin M.L., Smekhova I.N. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 200-207.
16. Skryabin M.L., Smekhova I.N. *Polzunovskii vestnik*, 2017, no. 4, pp. 192-196.
17. Polunin A.V., Ivashin P.V., Rastegaev I.A., Borgardt E.D., Krishtal M.M. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2015, no. 2, pp. 21-25.
18. Grin' R.R., Gallyamova R.F., Dudareva N.Yu., Sirenko A.A., Musin F.F. *Pis'ma o materialakh*, 2014, vol. 4, no. 3(15), pp. 175-178.
19. Kiseleva S.K., Zainullina L.I., Abramova M.M., Dudareva N.Yu., Aleksandrov I.V. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana*, 2015, no. 7, pp. 115-128. DOI: 10.7463/0715.0779403
20. Chavdarov A.V., Skoropupov D.I., Pershin P.N. *Trudy GOSNITI*, 2014, vol. 117, pp. 268-272.