

УДК 621.794

ОСОБЕННОСТИ ТЕОРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ПОРШНЕВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ

Скрябин М.Л.¹, Смехова И.Н.²

¹ - Вятская государственная сельскохозяйственная академия (Киров, Россия)

² - Вятский государственный университет (Киров, Россия)

В статье рассмотрен один из перспективных методов поверхностного упрочнения поршневых алюминиевых сплавов – микродуговое оксидирование. Описаны принципиальные отличия микродугового оксидирования от анодирования и подобных электрохимических процессов. Рассмотрены схемы формирования барьерного и наружного слоев поверхностного покрытия в водных электролитах. Показан механизм образования границы раздела. Рассмотрено формирование слоев с большой пористостью и методами воздействия на нее. Также описана экспоненциальная зависимость плотности тока от напряженности электрического поля в поверхностной пленке основного металла. Обоснована роль микроразрядов в формировании оксидных слоев на обрабатываемой поверхности. Предложены и описаны особенности трех основных теорий формирования оксидных пленок на поверхности поршня: физико-геометрической модели Келлера; модели формирования оксидных пленок как коллоидных образований и плазменной теории (теории окисления с образованием плазмы в зоне оксидирования). Раскрыты особенности образования пленок в каждой из моделей. Для модели Келлера пористая оксидная пленка представляет собой плотноупакованные оксидные ячейки, имеющие форму призмы. В их основе лежит гексагональная призма. Эти ячейки имеют нормальную ориентацию к поверхности металла. В центре элементарной ячейки присутствует одна пора, которая представляет собой канал, размер которого определяется составом электролита, химическим составом основного металла и электрическими параметрами процесса оксидирования. В процессе микродугового оксидирования согласно этой модели начало формирования ячеек происходит с образования барьерного слоя, переходящего в пористый слой и, с течением времени, происходит удлинение пор, из-за постоянного травления электролитом. В теории образования оксидных пленок как коллоидных образований выявлено, что образование пор в пленке является следствием их роста. Анодный оксид представляет собой ориентированный электрическим полем гель оксида алюминия коллоидно-полимерной природы. Плазменная теория объясняет большинство вопросов, связанных с появлением характерного свечения при микродуговом оксидировании. Согласно этой теории постоянно существующего барьерного слоя нет – в момент отключения тока происходит его полимеризация из примыкающего непосредственно к аноду тончайшего слоя ионизированного газа. Он постоянно находится в состоянии бурления и обновления, что объясняет большую скорость полимеризации фазового оксида алюминия и разнородность параметров получаемого анодного оксида по толщине. Также в работе приведены основные характеристики, от которых зависит скорость формирования оксидных слоев на поверхности алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, пленочное покрытие, модель формирования пленки, пленочная пористость.

DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-04-381-388

В последнее время в связи с повышением удельной мощности современных двигателей внутреннего сгорания и возрастанием нагрузки на цилиндропоршневую группу остро встал вопрос о повышении надежности поршневых алюминиевых сплавов [1]. Кроме того, все больше транспортных средств переводится на альтернативные виды топлива, а при работе тепловых двигателей на таких топливах на поршень действуют более высокие механические (давление газов, силы инерции) и тепловые нагрузки, чем при работе на дизельном топливе [2]. Ввиду высоких температур поверхности днища поршня, достигающих обычно более 300°C, прочность мате-

риала поршня снижается, что может привести к образованию в нем трещин [3].

Одним из наиболее эффективных и перспективных методов упрочнения поверхности днища поршня является технология электрического осаждения на поверхности электрохимических покрытий на основе различных композиций. Такой метод осаждения состоит в том, что из гальванической ванны на поверхность днища поршня осаждаются неметаллические включения: бориды, сульфиды, карбиды, оксиды и т.д. Включения таких материалов в основное покрытие существенно изменяет его основные свойства, увеличивая тепло- и износостойкость [4]. Основным недостатком данных электрохимических покрытий - низкая производитель-

ность и токсичность технологических процессов.

Микродуговое оксидирование (МДО) – еще один эффективный и перспективный вид упрочнения поршневых алюминиевых материалов, заключающийся в непосредственной поверхностной обработке. Основа данного процесса взята с электрохимического процесса анодирования поверхности, но сам процесс МДО имеет некоторые принципиальные особенности. С помощью микродугового оксидирования можно получать перспективные покрытия с множеством функций, которые имеют комплекс свойств, кардинально отличающихся от основного материала [5]. К таким свойствам относятся теплостойкость, износостойкость, коррозионностойкость и некоторые другие. Это особенно важно для поршневых алюминиевых сплавов, работающих в условиях повышенных температур и давлений. Именно эти свойства определяют надежность функционирования поршневых сплавов в условиях повышенных нагрузок и высокой «жесткости» рабочего процесса [6].

Характерным принципиальным отличием МДО от подобных электрохимических процессов является наличие в технологическом процессе формирования рабочего покрытия поршня микроарядов. Получаемые микроаряды находятся около рабочей плоскости поршня и оказывают специфическое, принципиальное воздействие на получаемое покрытие. В результате данного воздействия осаждаются неметаллические включения и структура оксидных слоев поверхности поршня имеет принципиальное отличие от обычных пленок, получаемых при анодировании [7]. Кроме того, процесс микродугового оксидирования отличается высокой экологичностью и отсутствием высокой трудоемкости проведения начальной подготовки рабочей поверхности в начале технологического процесса. Также для получения особых свойств днища поршня не требуется получения толстых поверхностных покрытий, что значительно сказывается на основном времени оксидирования [8].

Известные работы в большинстве носят исследовательский или прикладной характер, а теоретические разработки по механизму МДО практически отсутствуют. В целом

количество работ, посвященных МДО-воздействию на поверхность металлических материалов постоянно растет, что характеризует данный процесс упрочнения как перспективный [8,9]. Задачи данной работы – обобщить и структурировать основные модели формирования оксидных пленок в процессе МДО.

Последние исследования, проводимые в области микродугового оксидирования показали, что анодные оксидные пленки на поверхности алюминиевых сплавов, которые формируются в растворяющих оксид алюминия водных электролитах, состоят из двух основных слоев. Эти слои имеют четко выраженную границу раздела. Первый слой – барьерный – прилегает непосредственно к основному металлу. Имеет достаточно высокую плотность и характеризуется практически полным отсутствием пор. Второй слой – наружный с большой пористостью, образованной от множества микродуговых разрядов.

Основной характеристикой, от которой зависит скорость формирования оксидных слоев, согласно классической теории является плотность ионного тока i_u , представляющая собой физическую величину силы электрического тока, который протекает через единицу площади поверхности. Плотность тока экспоненциально зависит от напряженности электрического поля E в поверхностной пленке основного металла. Кроме того, важнейшим показателем является толщина барьерного слоя h , от которого зависит качество оксидированной поверхности основного металла [9]:

$$h = \frac{\beta U}{\ln i_u - \ln \alpha} = m_{\beta c} U,$$

где $m_{\beta c}$ – эффективная скорость роста барьерного слоя в основном металле при постоянной плотности ионного тока i_u в гальваностатическом режиме; U - падение напряжения на плёнке.

В настоящее время не существует однозначных теорий и единого механизма формирования структуры покрытий во время МДО. Но, на наш взгляд, основными являются модели коллоидно-электрохимическая, физико-геометрическая и плазменная.

Рассматривая наглядную физико-геометрическую модель Келлера, можно отметить, что в начальный момент времени при мик-

родуговом оксидировании на поверхности основного металла возникает барьерный слой. Его формирование на начальном этапе происходит в активных центрах на поверхности основного металла [10]. Из образовавшихся активных центров растут полусферические линзообразные микроячейки, которые впоследствии срастаются в однородный барьерный слой. Согласно теории замкнутых множеств начинает образовываться мозаика, в которой соприкасающиеся шесть ячеек образуют форму гексагональной призмы, в основании которой лежит полусфера. В результате влияния местных и множественных воздействий ионов в однородном барьерном слое начинают зарождаться поры, находящиеся в центре ячеек. Количество пор будет пропорционально падению напряжения на оксидной пленке. В центре ячейки барьерный слой становится меньше и в результате этого увеличивается напряженность поля. В этот момент происходит увеличение плотности ионного тока с одновременным увеличением скорости оксидирования. Рост температуры в канале поры способствует ее уменьшению, в результате чего, образуется равновесная динамическая система, удерживающая толщину барьерного слоя в четких границах.

На рис. 1 представлена схема идеальной структуры пористой оксидной пленки при микродуговом оксидировании. Представленная схема полностью отвечает представлению физико-геометрической модели Келлера.

Рассматривая данную модель, можно выделить следующие основные положения:

- пористая оксидная пленка представляет собой плотноупакованные оксидные ячейки, имеющие форму призмы, в основе которой лежит шестиугольник (гексагональная призма);

- оксидные ячейки имеют нормальную ориентацию к поверхности металла;

- в центре элементарной ячейки присутствует одна пора, которая представляет собой канал, размер которого определяется составом электролита, химическим составом основного металла и электрическими параметрами процесса оксидирования (на рис. 1 – 35 нм);

- основой оксидной ячейки является барьерный слой беспористого типа (на рис. 1 –

0,145 мкм), имеющий ячеистую структуру с равными размерами сопряженных ячеек;

- в процессе микродугового оксидирования начало формирования ячеек происходит с образования барьерного слоя, переходящего в пористый.

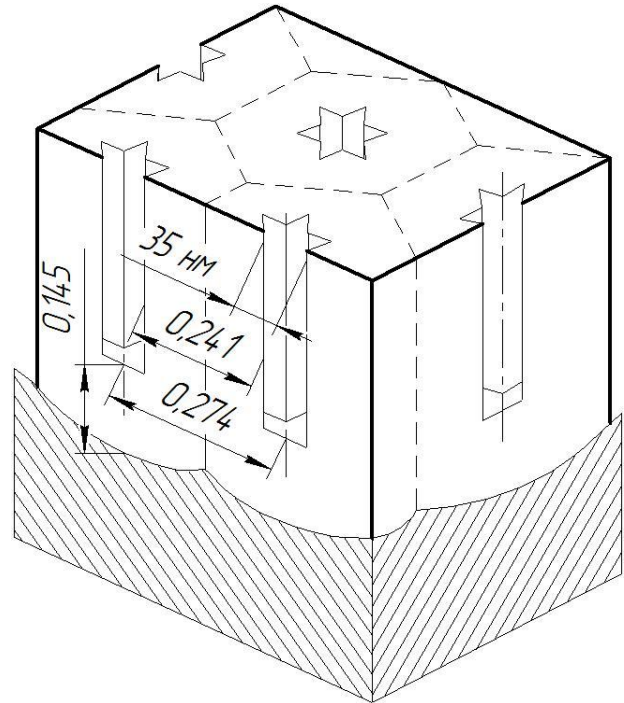


Рис. 1. Схематическое изображение идеальной структуры (согласно физико-геометрической модели Келлера)

В процессе МДО происходит удлинение пор из-за того, что дно пор (поверхность барьерного слоя) подвергается постоянному травлению электролитом.

Следующая теория рассматривает оксидные пленки как коллоидные образования (теория А.Д. Богоявленского) [11]. Согласно этой теории образование пор в пленке является следствием их роста, а анодный оксид представляет собой ориентированный электрическим полем гель оксида металла коллоидно-полимерной природы. Этот гель существует на базе бемитно-гидраргиллитных цепей ($AlOOH - Al(OH)_3$) [12].

В результате химических реакций на активных центрах анода возникает множество мелкодисперсных частиц (мононы) - зародыши будущих мицелл. С течением времени мононы растут и постепенно достраиваются до полион, которые представляют собой волокнистые палочкообразные мицеллы кол-

лоидной степени дисперсности [13]. Эти мицеллы и образуют скелет геля оксида алюминия. В сформированный скелет внедряются анионы разогретого электролита, причем в это время происходит частичная потеря гидратной оболочки. Адсорбция анионов и воды, осуществляемая благодаря их доставке по межмицеллярным порам, обуславливает отрицательный заряд монон и мицелл, заставляя их плотно прижиматься к аноду и срачиваться с металлом, препятствуя слиянию мицелл в беспористый слой [14]. Размеры элементарных ячеек Келлера практически равны размерам мицелл геля $Al(OH)_3$. Структура анодного оксида, который формируется в соответствии с рассмотренной моделью, показана на рис. 2.

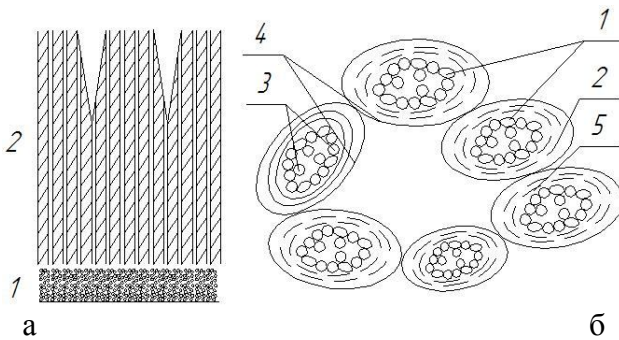


Рис. 2. Структура оксидной пленки согласно коллоидно-электрохимической теории:
 а – формирование слоев при оксидировании (1 – барьерный слой; 2 – пористый слой);
 б – схема образования палочкообразных мицелл коллоидной степени дисперсности (1 – мононы; 2 – агломератмононполионы; 3 – мицеллы; 4 – субмикropоры; 5 – микropоры)

Субмикropоры и микropоры образуют межмононные и межмицеллярные пространства. Мицеллы могут скручиваться так, что пористый слой напоминает сноповидные образования, субволока которых диаметром 15...60 нм построены из цепеобразно расположенных моно- и тригидратов оксида алюминия аморфной структуры, в которую внедрены электролитные группы (структурные анионы), участвующие в процессе образования оксидного покрытия и определяющие некоторые свойства анодных оксидов. В целом, с точки зрения коллоидно-мицеллярной теории, анодная оксидная пленка на алюминии состоит в основном из

частиц гидроксидов алюминия коллоидной степени дисперсности, образующих неорганический полимер [15].

Теория окисления с образованием плазмы в зоне оксидирования (плазменная теория) объясняет большинство вопросов, которые связаны с появлением характерного свечения при микродуговом оксидировании. Исходя из плазменной теории, постоянно существующего барьерного слоя нет – в момент отключения тока происходит его полимеризация из примыкающего непосредственно к аноду тончайшего слоя плазмы (количество ионизированного газа в этот момент достигает максимума). Поток этого газа постоянно находится в состоянии бурления и обновления. Схема плазменной теории показана на рис. 3. Здесь можно выделить 3 основных стадии [16].

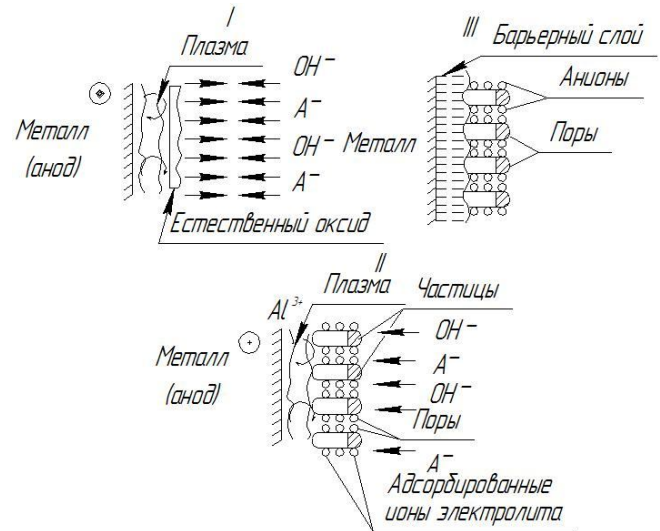


Рис. 3. Схема плазменной модель образования оксидных слоев при МДО

Стадия № 1:

- ионизация Al на аноде- $Al \square Al^{3+}_{aq} + 3e$;
- образование ядра оксида- $2Al^{3+}_{aq} + 6OH^- \square Al_2O_3 + 3H_2O$;
- полимеризация ядер- $nAl_2O_3 \square [Al_2O_3]_n$.

Стадия № 2:

- частичная гидратация оксида $Al^{3+} + 3OH^- \square Al(OH)_3$; $Al_2O_3 + Al(OH)_3 \square 3NAIO_2$ (входит в ядро вместе с Al_2O_3).

Стадия № 3:

- после включения тока концентрированные на частицах анионы создают препятствие их слиянию потока в общий сплошной слой.

Плазменная теория подтверждается рядом фактов:

- наличие нетеплового свечения вещества, которое происходит после поглощения определенного количества внешней энергии (люминесцентное свечение) [17]. Для данного свечения характерна зависимость «яркость – напряжение». Своеобразный спектр токовых шумов соответствует потоку ионизированного газа тлеющего разряда высокого давления;

- наличие плазмы объясняет быструю скорость полимеризацию фазового оксида алюминия, разнородность параметров получаемого анодного оксида по толщине (в зоне воздействия происходит уплотнение металла) и нормальную ориентацию полионов к поверхности основного металла;

- добавки, вводимые в электролит, делают оксид практически непрозрачным и гасят свечение, в результате этого создается впечатление, что свечение происходит под оксидной пленкой [18].

Рассматривая предложенные теории формирования поверхностного слоя при микродуговом оксидировании и сопоставляя их с результатами проведенных экспериментов, нельзя в той или иной мере выделить единый механизм получения оксидных слоев. Механизмы реализации микродуговых разрядов и роста оксидных покрытий в граничных областях достаточно сложные и требуют комплексных теорий, учитывающих коллоидно-электрохимическую, физико-геометрическую и плазменную модели [19].

Состав и внутренняя структура пленочных оксидных слоев, вне зависимости от теории образования, определяются локальными условиями их формирования. Важную роль играет состав электролита. Его компоненты входят в структурное оксидное покрытие, параметры которого задаются источником тока и режимом технологического воздействия микроразрядов на поверхность.

Список литературы

1. Скрыбин, М.Л. Обзор современных материалов для поршней двигателей внутреннего сгорания / М.Л. Скрыбин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Междунар. научно-практ. конф. «Наука–Техно-

логия–Ресурсосбережение»: Сб. научн. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2016. – Вып. 13. – С.272-278.

2. Лиханов, В.А. Изменение образования оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на метаноле / В.А. Лиханов, А.А. Анфилатов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 4. С. 3-5.

3. Гоц, А.Н. Моделирование теплонапряженного состояния головки цилиндра тракторного дизеля воздушного охлаждения / А.Н. Гоц // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6. – С. 1061-1067.

4. Эпельфельд, А.В. Характер разряда в системе металл-оксид-электролит при микродуговом оксидировании на переменном токе / А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, О.Н. Дунькин, О.С. Невская // Известия АН. Серия физическая. – 2000. – Т.64. – № 4. – С. 759-762.

5. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. – М.: ЭКО-МЕТ, 2005. – 368 с.

6. Скрыбин, М.Л. Особенности выбора современных материалов для поршневой группы при работе дизеля на альтернативных видах топлива / М.Л. Скрыбин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Междунар. научно-практ. конф. «Наука–Технология–Ресурсосбережение»: Сб. научн. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2016. – Вып. 13. – С.279-285.

7. Мамаев, А.И. Параметры импульсных микроплазменных процессов на алюминии и его сплавах / А.И. Мамаев, Ю.Ю. Чеканова, Ж.М. Рамазанова // Защита металлов. 2000. – Т. 36. – №6. – С. 659-662.

8. Дударева, Н.Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности / Н.Ю. Дударева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 217–222.

9. Гюнтершульце, А. Электролитические конденсаторы / А. Гюнтершульце, Г. Бетц. – М.: Оборонгиз, 1938. – 272 с.

10. Томашев, Н.Д. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов / Н.Д. То-

машев, Ф.П. Заливалов, М.М. Тюкина. - М.: Машиностроение, 1968. - 220 с.

11. Богоявленский, А.Ф. О механизмах образования оксидной пленки на алюминии / А.Ф. Богоявленский // В кн.: Анодная защита металлов. - М., 1964. - С. 22-27.

12. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. - М.: Наука, 1987. - 593 с.

13. Суминов, И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. - М.: Техносфера, 2011. - 464 с.

14. Розен, А.Е. Упрочнение поверхности деталей из алюминиевых, титановых и циркониевых сплавов микродуговым оксидированием / А.Е. Розен, А.Ю. Артемьев. - М.: Наука, 2015. - 145с.

15. Crossland A.S., Thompson G.E., Wan J., Habazaki H., Shimizu K., Skeldon P., Wood G.C. // J. Electrochem. Soc., Vol. 144, No.3, 1999, pp. 847-855.

16. Лаврова, Г.В. Твердофазный эффект в процессах окисления алюминия в щелочных растворах / Г.В. Лаврова, С.В. Миловзорова, В.М. Белецкий // Украинский химический журнал. - 1987. - Т.53. - №44. - С. 361-364.

17. Nie, X. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc oxide coatings on aluminium alloys / X. Nie, A. Leyland, H.W. Song, A.L. Yerokhin, S.J. Dowey, A. Matthews // Elsevier Science. Surface and coatings technology. - 116. - 1999. - P. 1055-1060.

18. Paez, M.A. Barrier type anodic film formation on an Al-3,5wt%Cu alloy / M.A. Paez, T.M. Foong, C.T. Ni, G.E. Tompson, K. Shimizu, H. Habazaki, P. Skeldon, G.C. Wood // Cor. Science. -1996. - Vol. 38. - №1. - P. 59-72.

19. Шандров, Б.В. Основы технологии микродугового оксидирования / Б.В. Шандров, Е.М. Морозов, А.В. Жуковский. - М.: Альянс, 2008. - 80 с.

Сведения об авторах

Скрябин Максим Ленидович - кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение, сопротивление материалов и детали машин» ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», mx.dvs@mail.ru.

Смехова Ирина Николаевна - старший преподаватель кафедры «Материаловедение и основы конструирования» ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ira112012@yandex.ru.

FEATURES OF THE THEORIES OF THE FORMATION OF OXIDE FILMS ON ALUMINUM ALLOYS PISTON DIESEL ENGINES WITH MICRO-ARC OXIDATION

Skryabin M.L.¹, Smekhova I.N.²

¹ - Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russian Federation)

² - Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

The article considers one of the promising methods of surface hardening of piston aluminum alloy – microarc oxidation. Described fundamental differences from the micro-arc oxidation anodizing and similar electrochemical processes. The schemes of formation of the barrier and outer layers surface treatment in aqueous electrolytes. Shows the mechanism of formation of the interface. Considers the formation of layers with high porosity and method of exposure. Also describes the exponential dependence of the current density from the electric field in the surface film of the base metal. The role of discharges in the formation of oxide layers on the treated surface. Proposed and described features of the three main theories of formation of oxide films on the surface of the piston: physical and geometrical model of Keller; models of formation of oxide films as a colloid formations and plasma theory (theory of oxidation with the formation of plasma in the zone of oxidation). The features of formation of films in each of the models. For the model of Keller porous oxide film is a close-packed oxide cell, having the shape of a prism. They are based on a hexagonal prism. These cells have normal orientation to the surface of the metal. In the center of the unit cell there is one season that is a channel, whose size is determined by the composition of the electrolyte, the chemical composition of the base metal and the electrical parameters of the process of oxidation. In the micro-arc oxidation process according to this model, the beginning of the formation of cells occurs with the formation of the barrier layer, passing in the porous layer and, over time, the elongation of the pores, due to the constant etching electrolyte. In the theory of formation of the oxide films as kolloidnyh formations revealed that formation of pores in the film is a result of their growth. The anodic oxide is represented by a directed electric field, the alumina gel colloidal and polymeric nature. Plasma theory explains most of the issues related to the appearance of the characteristic luminescence with micro-arc oxidation. According to this theory, constantly existing barrier layer is not present at the time of current interruption is polymerization from the attached directly to the anode thin layer of ionized gas. He is constantly in a state of seething and updates that explains the high rate of polymerization and phase of aluminum oxide and heterogeneity parameters of the obtained anodic oxide thickness. The work also describes the main characteristics, which determine the rate of formation of oxide layers on the surface of aluminum alloys.

Key words: microarc oxidation, coating, model, film formation, film porosity.

DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-04-381-388

References

1. Scriabin M.L. Review of modern materials for pistons of internal combustion engines. *The performance Improvement of internal combustion engines. Proceedings of IX International scientific-practical conference "Science–Technology–Resource economy"*. Kirov, Vyatka state agricultural Academy, 2016, Vol. 13, pp. 272-278. (In Russian)
2. Likhonov V.A., Anfilatov A.A. Change of formation of nitrogen oxides in the cylinder of a diesel engine when operating on methanol. *Traktory i selkhoz mashiny*, 2015, No.4, pp. 3-5. (In Russian)
3. Gots A.N. Modeling of thermal stressed state of a cylinder head tractor diesel air cooling. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, No.6, pp. 1061-1067. (In Russian)
4. Appelfeld A.V., Lyudin V.B., Dunkin O.N., Neva O.S. Nature of the discharge in the metal oxide electrolyte in the micro-arc oxidation on alternating current. *Izvestiya AN. Seriya*

fizicheskaya, 2000, Vol.64, No.4, pp. 759-762. (In Russian)

5. Suminov I.V., Appelfeld A.V., Lyudin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. Microarc oxidation (theory, technology, equipment). Moscow, EKOMET, 2005. 368 p. (In Russian)

6. Scryabin M. L. Peculiarities of choice of modern materials for piston group of the diesel to alternative fuels // the performance Improvement of internal combustion engines. *The performance Improvement of internal combustion engines. Proceedings of IX International scientific-practical conference "Science–Technology–Resource economy"*. Kirov, Vyatka state agricultural Academy, 2016, Vol. 13, pp. 279-285. (In Russian)

7. Mamaev A.I., Chekanova Y.Y., Ramazanov Z.M. Parameters of pulsed microplasma processes on aluminum and its alloys. *Zashchita metallov*, 2000, Vol.36, No.6, pp. 659-662. (In Russian)

8. Dudareva N.Yu. The influence of modes of micro-arc oxidase-tion on the properties of

the formed surface. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No. 3, pp. 217-222. (In Russian)

9. Huntershouse A, Betz G. Electrolytic capacitors. Moscow, Oborongiz, 1938. 272 p. (In Russian)

10. Tomasev N.D., Zalivalov F.P., Tyukina M.M. Thick-layer anodizing of aluminium and its alloys. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 220 p. (In Russian)

11. Bogoyavlenskiy A.F. On the mechanisms of formation of oxide films on aluminum. In book *Anodnaya zashchita metallov*. Moscow, 1964, pp. 22-27. (In Russian)

12. Raizer Yu.P. Physics of gas discharge. Moscow, Nauka, 1987. 593 p. (In Russian)

13. Suminov I.V., Belkin P.N., Appelfeld A.V., Lyudin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. Plasma electrolytic surface modification of metals and alloys. Moscow: Tekhnosfera, 2011. 464 p. (In Russian)

14. Rosen A.E., Artemiev A.Yu. Surface Hardening of parts made of aluminum, titanium and zirconium alloys by micro-arc oxidation. Moscow, Nauka, 2015. 145 p. (In Russian)

15. Crossland A.S., Thompson G.E., Wan J., Habazaki H., Shimizu K., Skeldon P., Wood G.C. *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 144, No.3, 1999, pp. 847-855.

16. Lavrova G.V., Milovzorov S.V., Beletskiy V.M. Solid-phase effect in the oxida-

tion of aluminium in alkaline solutions. *Ukrain-skiy khimicheskiy zhurnal*, 1987, Vol.53, No.44, pp. 361-364. (In Russian)

17. Nie X., Leyland A., Song H.W., Yero-khin A.L., Dowey S.J., Matthews A. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc oxide coatings on aluminium alloys. *Elsevier Science. Surface and coatings technology*, 1999, Vol.116, pp. 1055-1060.

18. Paez M.A., Foong T.M., Ni C.T., Tomp-son G.E., Shimizu K., Habazaki H., Skeldon P., Wood G.C. Barrier type anodic film formation on an Al-3,5 wt%Cu alloy. *Cor. Science*, Vol.38, No.1, 1996, pp.59-72.

19. Shandrov B.V., Morozov E.M., Zhu-kovskiy V.A. The basic technology of micro-arc oxidation. Moscow, Alans, 2008. 80 p. (In Rus-sian)

Authors' information

Maksim L. Skryabin - Candidate of Tech-nical Sciences, associate Professor of Depart-ment of material science, resistance of materials and parts of machinery at Vyatka State Agricul-tural Academy, max.dvs@mail.ru.

Irina N. Smekhova - Senior teacher of the Department of Materials science and engineer-ing at Vyatka State University, iral12012@yandex.ru.

Дата принятия к публикации
(Date of acceptance for publication)
11.11.2017

Дата публикации
(Date of publication):
25.12.2017

