

Разработана 3D-модель тигельной печи сопротивления, выполнены расчеты стационарных тепловых полей при работе печи с различной подведенной мощностью. Качественная адекватность расчетов позволяет использовать инструменты программного пакета SolidWorks для автоматического поиска оптимальных конструктивных и технологических решений.

Библиографические ссылки

1. Гутман М. Б., Кацевич Л. С., Лейканд М. С. Электрические печи сопротивления и дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
2. SolidWorks Russia [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solidworks.ru> (дата обращения 06.03.2014).
3. Константинов А. Д., Щербakov А. Н. Оптимизация отбора тепла нагретых газов // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров : материалы Междунар. науч.-техн. конф. ААИ, посвященной 145-летию МГТУ МАМИ. Сер. 9, Техническая физика. С. 58–68.
4. Митясов С., Есавкин К. Технологии SolidWorks для проектирования приборов точной механики // САПР и графика. 2010. № 12. С. 102–104.
5. Дударева Н. Ю., Загайко С. А. SolidWorks 2009 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 544 с.
6. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 448 с.

References

1. Gutman M. B., Kacevich L. S., Lejkand M. S. *Jelektricheskie pechi soprotivlenija i dugovye pechi* [Electric resistance furnaces and arc furnaces]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 360 p.
2. SolidWorks Russia, Available at: <http://www.solidworks.ru> (accessed 6 March 2014).
3. Konstantinov A. D., Shherbakov A. N. Optimizing choice heated gases [Optimizacija otbora tepla nagretyh gazov]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii AAI "Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: prioritety razvitija i podgotovki kadrov", posvjashhennoj 145-letiju MGTU MAMI, serija 9 "Tehnicheskaja fizika"* [Materials of the International Scientific and Technical Conference AAI "Automobile and Tractor in Russia: Development Priorities and training", dedicated to the 145th anniversary of Moscow State Technical University MAMI Series 9 "Technical Physics"]. Moscow, 2012, p. 58–68 (In Russ.).
4. Mitjasov S., Esavkin K. [SolidWorks technology for designing devices for precision mechanics]. *SAPR i grafika*. 2010, no. 12, p. 102–104 (In Russ.).
5. Dudareva N. Ju., Zagajko S. A. *SolidWorks 2009 na primerah* [SolidWorks 2009 examples]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2009, 544 p.
6. Alyamovskij A. A. *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi* [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2012, 448 p.

© Пискажова Т. В., Завизин А. В.,
Линейцев А. В., Тинькова С. М., 2014

УДК 620.197

МОРФОЛОГИЯ И ПОРИСТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ*

Т. В. Трушкина, А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Р. В. Алякрецкий, Д. В. Раводина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: michla@mail.ru

Изучена морфология поверхности покрытий, полученных микродуговым окислением в силикатно-щелочном электролите при различных режимах обработки. Выявлено, что морфология поверхности зависит от толщины покрытия и соотношения катодной и анодной составляющих тока. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению и расчету общей пористости МДО-покрытий. Установлено, что при повышении времени обработки количество пор в покрытии становится меньше, а их размеры увеличиваются.

Ключевые слова: МДО-покрытие, морфология поверхности, пористость.

MORPHOLOGY AND POROSITY OF THE SURFACE OF OXIDE COATINGS

T. V. Trushkina, A. E. Miheev, A. V. Girn, R. V. Alykretsky, D. V. Ravodina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: michla@mail.ru

The morphology of the surface coatings obtained by microarc oxidation in silicste-alkalin electrolyte under different processing conditions has been studied. It is revealed that the surface morphology depends on the coating thickness and ratio of the cathode and anodic current components. The results of experimental studies on the definition and calculation of the total porosity with frame surface micrographs of MAO coating are given. It is determined that the processing time increases the number of pores in the coating becomes smaller and their longer dimensions.

Keywords: MAO coating, surface morphology, porosity.

Алюминиевые сплавы широко применяются в аэрокосмической и других областях промышленности, что связано с их высокими удельными характеристиками. Однако существуют области, где применение этих сплавов ограничено из-за невысокой твердости, износо- и коррозионной стойкости. В связи с этим актуальной является задача повышения поверхностных характеристик алюминиевых сплавов. Перспективным методом осуществления этой задачи является микродуговое оксидирование (МДО) [1].

МДО-покрытия обладают высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью, а также электроизоляционными и декоративными свойствами. В настоящее время широкое применение МДО ограничено недостаточными сведениями о влиянии технологических параметров на структуру и свойства оксидных покрытий. Данная работа посвящена изучению влияния технологических параметров процесса МДО на структуру и свойства покрытий [2–4].

Экспериментальные исследования по определению морфологии и пористости МДО-покрытий были проведены на алюминиевом сплаве АМг-6, который широко применяется в машиностроении при производстве летательных и космических аппаратов. Для изготовления образцов был использован листовой прокат толщиной 1 мм, из которого были изготовлены образцы размером 100×100 мм. Формирование покрытий производилось на установке ИАТ-Т в силикатно-щелочном электролите, содержащем КОН (4 г/л) и Na₂SiO₃ (10 г/л). В процессе обработки менялись следующие технологические параметры:

- время обработки 30 и 60 мин;
- плотность тока в диапазоне от 10 до 30 А/дм²;
- соотношение катодной и анодной токовых составляющих (0,6–1,2).

Исследования стехиометрии и фазового состава полученных покрытий описаны в работе [4], выявлено, что покрытия состоят из двух основных слоев:

1) внешнего очень пористого и непрочного слоя, содержащего муллит и различные химические комплексы, которые образуются за счет электрохимических реакций;

2) твердого слоя, примыкающего к металлу и содержащего преимущественно кристаллический оксид алюминия двух модификаций: α -Al₂O₃ и γ -Al₂O₃.

Металлографический анализ поперечных шлифов выявил четкую границу раздела фаз верхнего пористого очень рыхлого слоя и глубже – плотного менее пористого твердого слоя (рис. 1).

Важным параметром процесса МДО является соотношение катодной и анодной составляющих, которое наряду со временем обработки сильно влияет на толщину покрытия, пористость и шероховатость поверхности. Анализ морфологии поверхности проводился с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра ARL QUANT’X Thermo Fisher Scientific.

На рис. 2 представлены микрофотографии морфологии поверхности полученных МДО-покрытий.

На электронно-микроскопических изображениях видны поры, диаметр которых достигает 3–5 мкм. С увеличением соотношения катодной и анодной составляющих по току идет изменение структуры морфологии поверхности с уменьшением размера пор. Также наблюдаются внутренние поры, диаметр которых составляет 0,1–0,2 мкм.

Поры могут иметь разнообразную форму (точечная, канальчатая пористость) и значительно отличаться по размерам. Пористость МДО-покрытий варьируется в интервале от 5 до 50 %, размеры пор колеблются от 0,01 до 10 мкм. Строение пор при толщине покрытия более 5–10 микрон сложное, разветвленное, с множеством ответвлений и замкнутых пространств. При необходимости пористость может быть понижена с помощью пропитки различными материалами либо с помощью нанесения слоя полимера (красителя). Наиболее часто применяется пропитка фторопластами и нанесение полимерных порошковых красок. Покрытия, не содержащие пор, получить невозможно, что обусловлено природой процесса. В ряде случаев пористость является положительным фактором. При работе покрытия на износ в условиях смазки, последняя входит в поры покрытия и обеспечивает постепенное поступление в зону трения. В медицине биоактивные МДО-покрытия могут содержать в порах лекарственные препараты [2].

Значительную площадь на поверхности занимают поры в виде кратера, которые образуются при воздействии локальных разрядов. Их микроструктура визуализируется с оплавленными краями (рис. 3).

Быстрое затвердевание расплавленного оксида алюминия образует микротрещины и скопления частиц на разрядных каналах и вокруг них. Пора-кратер состоит из наружной стенки с центральным кратером, внутренней стенки и внутренней полости между ними. Большое количество альфа-фазы находится во внутренних слоях покрытия из-за низкой скорости охлаждения расплавленного оксида алюминия. При высокой скорости охлаждения формируется большое количество гамма-фазы оксида алюминия.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 02.G2531.0043.

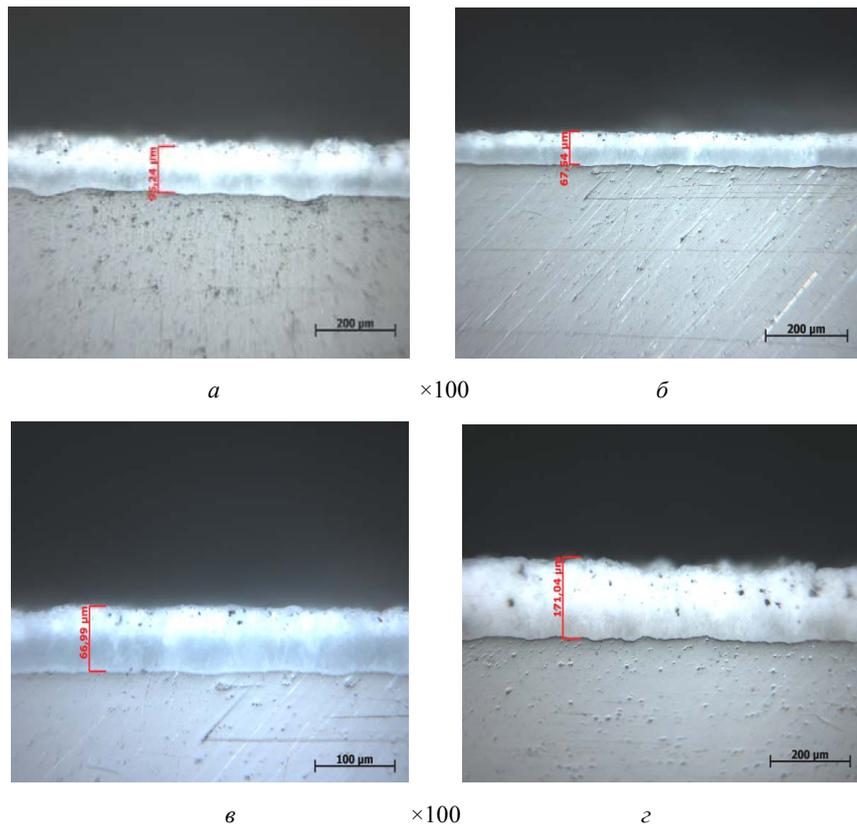


Рис. 1. Микрофотографии поперечного шлифа с МДО-покрытием:
 а – $I_k/I_a = 0,6$; б – $I_k/I_a = 0,8$; в – $I_k/I_a = 0,1$; г – $I_k/I_a = 1,2$

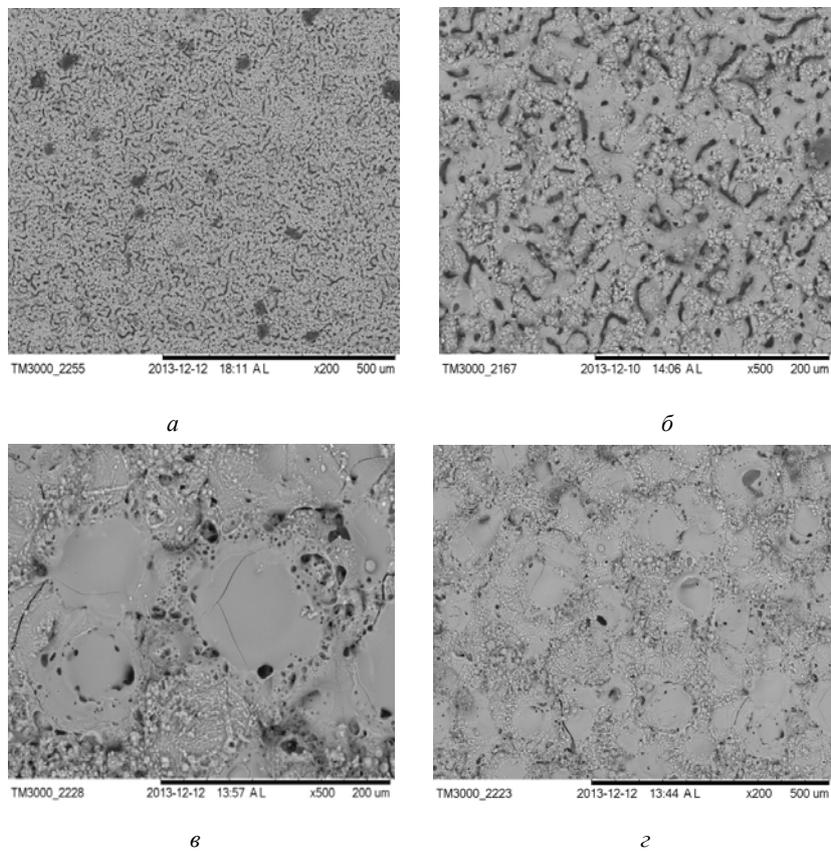


Рис. 2. Морфология поверхности образцов:
 а, б – тонкослойное МДО-покрытие 19 мкм; в, г – толстослойное МДО-покрытие 61 мкм

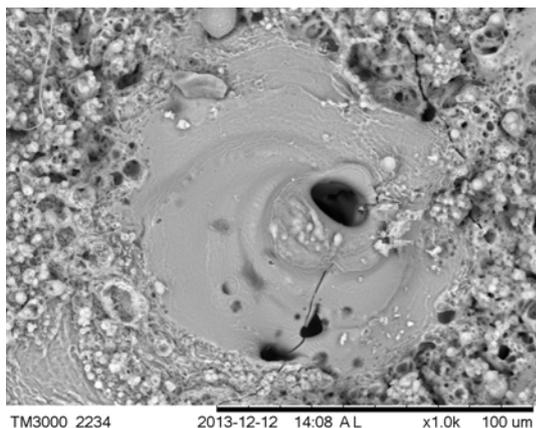
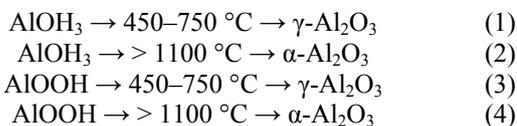


Рис. 3. Микрофотография поры-кратера

Гидрооксид алюминия и бемит, образовавшиеся в начальный момент, при повышении температуры преобразовываются в одну из фаз оксида алюминия:



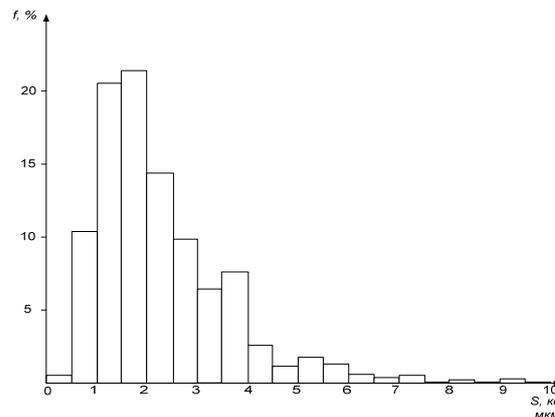
Основными химическими элементами, присутствующими в МДО-покрытии, является Al, O, Si. Наиболее вероятными соединениями и фазами на поверхности обработанного с помощью МДО алюминия в силикатно-щелочном электролите являются фазы оксида алюминия, фазы кремнезема, фазы алюмосиликата [2]. Вблизи кратера наблюдается повышенное содержание оксида алюминия, при удалении от кратера содержание оксида алюминия снижается, в то время как содержание оксида кремния увеличивается.

Определение общей пористости проводили с помощью программы Siams 700, для чего с кадров микрофотографий морфологии поверхности полученных образцов при увеличении $\times 200$ производили визуальный подсчет пор-кратеров методом выделения каждой области темного цвета на фоне общей светлой площади образца. Результаты определения количества и размеров пор представлены в таблице.

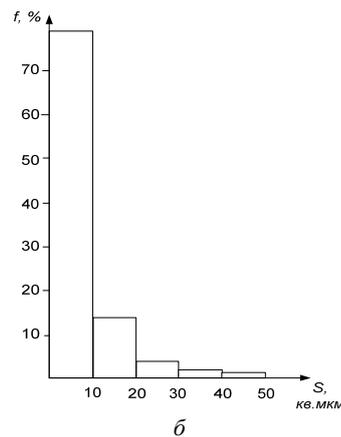
Результаты измерения пористости МДО-покрытий

Параметры	Толщина покрытия, мкм				
	17	19	28	37	61
Число пор на 1 см^2	$5,013 \cdot 10^5$	$2,016 \cdot 10^5$	$1,941 \cdot 10^5$	$0,985 \cdot 10^5$	$0,893 \cdot 10^5$
Площадь:					
минимальное значение, мкм^2	0,56	9,20	0,44	0,43	0,88
максимальное значение, мкм^2	62,01	395,07	9,67	75,18	221,63
среднее значение, мкм^2	8,22	30,41	2,30	7,32	8,21
СКО, мкм^2	8,83	24,76	1,34	12,02	13,28
Медиана, мкм^2	4,80	24,09	1,76	2,61	4,84
Размах, мкм^2	6,59	14,61	0,98	4,19	4,24

Распределение пор по размеру представлено на рис. 4. Число пор в тонкослойных покрытиях высокое и достигает $5,013 \cdot 10^5$ на 1 см^2 . Из них примерно 98 % составляют поры с минимальной площадью $S = 0,56\text{ мкм}^2$ и примерно 1–2 % занимают поры с площадью до $S = 395\text{ мкм}^2$. В толстослойных покрытиях количество пор снижается и составляет $0,893 \cdot 10^5$ на 1 см^2 . Поры с максимальной площадью $S = 221,63\text{ мкм}^2$ занимают примерно 96 %, и 3–4 % занимают поры с площадью до $S = 0,88\text{ мкм}^2$.



a



b

Рис. 4. Распределение пор по размеру: a – тонкослойные МДО-покрытия; б – толстослойные МДО-покрытия

Зависимость количества пор от толщины покрытия представлена на рис. 5 .

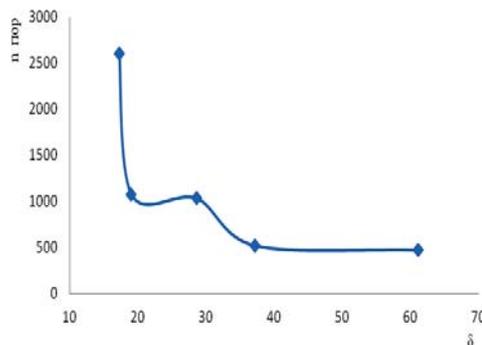


Рис. 5. Зависимость количества пор образцов с МДО-покрытием от толщины покрытия

По результатам расчетов среднего значения пор наблюдается тенденция к снижению количества пор с ростом толщины покрытия.

Исследования показали, что характер пористости оксидного покрытия зависит от толщины, а следовательно, от технологических режимов обработки. Установлено, что минимальная пористость покрытий получена при следующих режимах: плотность тока – 15 А/дм², напряжение до 520 В, $I_k/I_a = 0,8$ и время обработки – 60 мин. Объясняется это тем, что осаждение оксида происходит и внутри пор, что приводит к уменьшению их диаметра и постепенному зарастанию. Процесс зарастания пор ведет к снижению значения объемной пористости до 8–10 %.

Библиографические ссылки

1. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов [и др.]. М. : Экомет, 2005. 368 с.
2. Михеев А. Е., Трушкина Т. В., Гирн А. В., Ивасев С. С. Химические процессы при микродуговом оксидировании // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 212–216.
3. Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. М. : Наука, 1971. 266 с.

4. Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий в агрессивных средах // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (53). С. 179–184.

References

1. Suminov I. V. Epel'fel'd A. V., Lyudin V. B. [et al.] *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* [Microarc oxidation theory, technology and equipment]. Moscow, Ekomet Publ., 2005, 368 p.
2. Miheev A. E., Trushkina T. V., Girn A. V., Ivasev S. S. [Chemical processes at microarc oxidation]. *Vestnik SibGAU*. 2013, vol. 48, no. 2, p. 212–216 (In Russ.).
3. Tihonov V. N. *Analiticheskaya khimiya aluminiya* [Analytical chemistry of aluminium]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 266 p.
4. Trushkina T. V., Miheev A. E., Girn A. V. [Corrosion resistance of MAO coatings in corrosive environments]. *Vestnik SibGAU*. 2014, vol. 53, no. 1, p. 179–184 (In Russ.).

© Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В., Алякрецкий Р. В., Раводина Д. В., 2014

УДК 628.16.087

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ ПРИ БАРБОТИРОВАНИИ ВОЗДУХОМ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОАГУЛЯЦИЕЙ И ОТСТАИВАНИЕМ

И. Я. Шестаков¹, О. В. Раева²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: yakovlevish@mail.ru

²ОАО «Красмаш»
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29
E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований очистки воды от ионов металлов комбинированным способом, заключающимся в электрохимическом воздействии переменным током при барботировании воздухом с последующей коагуляцией и отстаиванием. Наибольшая степень очистки воды достигается при пропускании через очищаемую воду переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых разнородных электродов (нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0) при барботировании воздухом, введении коагулянта – сернокислого железа $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ в соотношении начальных концентраций иона-комплексообразователя и удаляемого иона 5:1 и отстаивании воды в течение 8 суток.

Ключевые слова: вода, электрохимическое воздействие, барботирование воздухом, переменный ток, коагулянт, отстаивание.