

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.04

УДК 621.791.75

И.С. Пономарев, Е.А. КривоносоваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ПРИ МИКРОПЛАЗМЕННОМ ОКСИДИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Повышение качества механических характеристик деталей и механизмов из алюминия и его сплавов при уменьшении себестоимости их обработки на сегодняшний день является актуальной задачей в технологиях, использующих легкие материалы. Для повышения эксплуатационных характеристик алюминия и его сплавов применяются различные способы поверхностной обработки и модифицирования. Одним из наиболее эффективных способов поверхностной обработки деталей из алюминиевых сплавов является микроплазменное оксидирование. Получаемое при данном способе обработки оксидное покрытие обладает высокими механическими и тепловыми характеристиками, способствующими увеличению области применения алюминиевых сплавов и срока службы изготавливаемой продукции. Однако данный способ поверхностной обработки в настоящее время не получил широкого применения из-за значительных энергетических и временных затрат. В большинстве случаев для микроплазменного оксидирования применяют устаревшее оборудование, работающее на низких частотах и имеющее недостаточно высокий КПД. Кроме того, существенным недостатком покрытий при микроплазменном оксидировании является их недостаточная толщина и высокая пористость. Объектом данного исследования является оксидное покрытие, образованное путем микроплазменного оксидирования при высоких плотностях тока. Целью исследования является определение влияния высокой пористости в полученном оксидном покрытии на его механические свойства, выявление распределения напряжений по всей толщине покрытия. С помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics была получена модель распределения напряжений на участке оксидного покрытия. Составлена графическая картина распределения напряжений и выявлены наиболее нагруженные участки по всей толщине оксидного слоя. Проведен анализ полученных данных и сравнение с распределением напряжений в аналогичной модели покрытия с искусственно уменьшенной пористостью и измененной геометрией.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, микроплазменное оксидирование, оксидное покрытие, распределенная нагрузка, пористость, контур распределения напряжений, неравномерные напряжения, защитное покрытие, электрический режим, плотность тока.

I.S. Ponomarev, E.A. Krivosova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODELLING OF THE TENSION IN COVERINGS AT MICROPLASMA OXYGENATING OF ALUMINIUM ALLOYS

Improving the quality, mechanical characteristics and performance of details and mechanisms while reducing the cost of their production today is an actual problem. The performance of aluminum and its alloys are various methods of surface treatment and inoculation are improving. One of the most

effective methods of surface treatment of aluminum alloy is a micro plasma oxidation. Obtained in this processing method, the oxide coating has a high mechanical and thermal properties, thereby increasing the area of application of aluminum alloys, the lifetime of the products. However, this surface treatment method, the present time is not widely used due to high energy cost and time for carrying out the process. In most cases, for micro plasma oxidation with old equipment operating at low frequencies and has a high enough efficiency. In addition, a significant drawback of coatings with micro plasma oxidation is their insufficient thickness and high porosity. The object of this study is the oxide coating formed by micro plasma oxidation at high current densities. The purpose of this study is to determine the influence of the high porosity of the resulting oxide coating on its mechanical properties, revealing the distribution of stresses throughout the thickness of the coating. Using the software Comsol Multiphysics model was obtained stress distribution at the site of the oxide coating. Compiled graphic picture of the distribution of stresses and conducted to identify the most loaded sections through the entire thickness of the oxide layer. The analysis of the data obtained and compared with the distribution of stresses in a similar model to cover artificially reduced porosity and revised geometry.

Keywords: aluminum alloy, microplasma oxidation, oxide covering, distributed loading, porosity, contour of distribution of tension, uneven tension, covering, electric mode, current density.

Введение

Главной задачей машиностроения является повышение качества и эксплуатационных характеристик изготавливаемой продукции. Применение в производстве новых материалов, а также поиск эффективных методов повышения прочностных и специальных характеристик традиционных материалов является необходимым условием для решения поставленной задачи. Применение алюминиевых сплавов позволило значительно улучшить механические характеристики машин и механизмов за счет малого удельного веса и высокой прочности данного материала. Однако ряд недостатков алюминия, таких как высокая теплопроводность, низкая коррозионная стойкость и сопротивление на износ, ограничивают его использование в производстве [1, 2].

На сегодняшний день существует большое разнообразие методов поверхностной обработки и упрочнения алюминиевых сплавов. Повышение механических свойств деталей из данного материала, как правило, достигается путем модифицирования их поверхностного слоя. Универсального метода поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов не существует, большинство способов специфичны для каждого типа конструкций и механизмов, что требует разработки отдельных методик обработки деталей [3–5].

Одним из наиболее эффективных и экологичных способов является микроплазменное оксидирование поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов. В основе процесса лежит высокотемпературная реакция создания керамикоподобного покрытия на поверхности деталей, обладающего низкой тепло- и электропроводностью, высокой твердостью и износостойкостью [6–8].

Процесс микроплазменного оксидирования представляет собой создание покрытия на поверхности деталей, помещенных в среду электролита. В состав электролита входят гидроксиды натрия, калия, а также дополнительные элементы для легирования покрытия или создания покрытий с определенными оптическими свойствами. Для активации процесса в систему «ванна – электролит – изделие» подается переменный или постоянный пульсирующий ток напряжением 400–600 В. Плотность тока на поверхности обрабатываемого изделия составляет 10–30 А/дм² [9–11]. Длительность процесса микроплазменного оксидирования выбирается в зависимости от необходимой толщины получаемого покрытия и может составлять до 2,5 ч [12, 13]. Установки для микроплазменного оксидирования представляют собой ванну с электролитом, системой вентиляции, охлаждения и циркуляции электролита. Циркуляция необходима в случае добавления легирующих элементов в виде порошков или элементов с более высокой плотностью, чем у электролита.

В состав покрытия, получаемого при микроплазменном оксидировании алюминиевых сплавов, входят α - и γ -фазы оксида алюминия (Al_2O_3), а также различные соединения, такие как Al_2SiO_5 (силлиманит) и $K(AlSi_3O_8)$ (ортоклаз) и другие элементы, в зависимости от состава и свойств электролита [14–16]. Указанные соединения, входящие в состав оксидного покрытия, обладают высокой химической стойкостью к агрессивным средам, в частности коррозионной стойкостью, что позволяет решать большое количество задач при производстве деталей из алюминиевых сплавов, требующих специальной поверхностной обработки. Толщина покрытия может достигать 400 мкм, а микротвердость – 2500 кг/см². Важными преимуществами данного способа обработки являются неизменность размеров обрабатываемых деталей и высокая прочность сцепления покрытия с основным металлом (как правило, равна прочности основного металла) [17–19].

В исследованиях процесса микроплазменного оксидирования было выявлено, что повышение плотности тока при обработке значительно увеличивает толщину получаемого покрытия, что позволяет сократить время обработки [20, 21]. Однако при повышении плотности тока также значительно повышается и пористость в оксидном слое, достигая 30–40 % от общего объема покрытия. В некоторых исследованиях указано, что высокая пористость может положительно влиять на свойства оксидированных деталей, работающих на износ в условиях смазки

[14]. Однако в условиях, требующих высокой прочности покрытия, значительное количество пор недопустимо.

Целью данной работы является выявление влияния степени пористости на свойства покрытия при работе в условиях распределенной поверхностной нагрузки путем моделирования распределения напряжения в оксидном покрытии.

Методика и проведение эксперимента

С помощью программы Comsol Multiphysics методом конечных элементов были смоделированы условия воздействия поверхностных нагрузок на оксидные покрытия с различными значениями пористости. В качестве геометрической основы для создания модели взят фрагмент типичной микроструктуры оксидного покрытия, показанный на рис. 1. Покрытие на рис. 1 получено при микроплазменном оксидировании алюминиевого сплава Д16 на максимальных значениях плотности тока $j = 12,6 \text{ А/дм}^2$. Толщина покрытия составляла 52–54 мкм, процентная доля пористости 35 %.

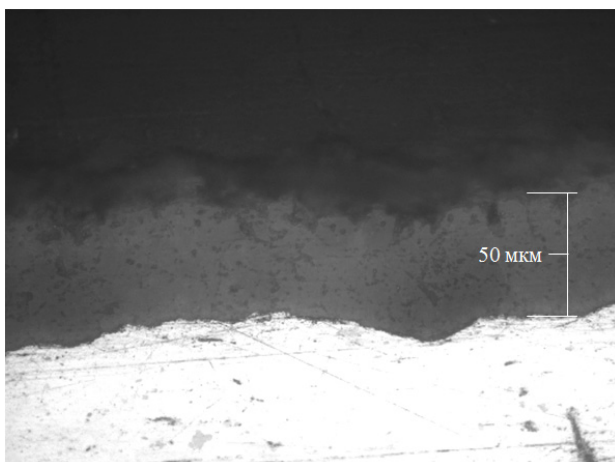


Рис. 1. Микроструктура поверхности оксидированного алюминиевого сплава Д16 ($\times 475$)

Расчет плотности тока $j \text{ (А/дм}^2\text{)}$ на поверхности покрытия выполнялся по формуле

$$j = \frac{I}{S}, \quad (1)$$

где I – значение электрического тока в цепи; $S = \sum_i^j S_i$ – общая площадь поверхности образца, состоящая из суммы площадей отдельных участков, подверженных оксидированию.

Измерение средней доли пористости выполнялось путем соотношения площадей покрытия и пор соответственно на снимках различных участков покрытия по формуле

$$П(\%) = \frac{\sum_i^n \frac{Sp_i}{Sc_i}}{n} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $Sp = \sum_i^m P_i$ – суммарная площадь пор на участке, P – площадь поры в покрытии; Sc – общая площадь участка покрытия; n – количество участков измерения пористости.

Для получения кривых распределения напряжения внутри оксидного покрытия изображение было преобразовано в двумерную модель в программе Comsol (рис. 2).

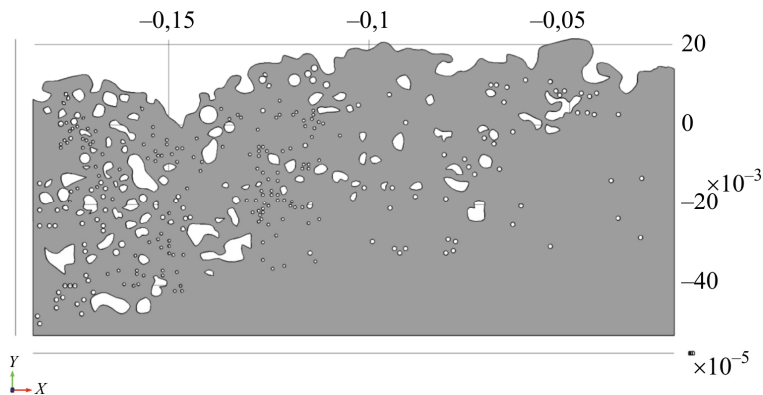


Рис. 2. Модель пористой структуры оксидированного покрытия алюминиевого сплава Д16

Размеры модели на рис. 2 соответствуют реальным физическим размерам покрытия, высота (ось Y) по шкале указана в $1 \cdot 10^{-3}$ мм, длина покрытия (ось X) – в миллиметрах. В качестве материала покрытия модели из базы данных программы было выбрано химическое соединение $Al_2O_3 - SiO_2$ (твердое вещество), наиболее подходящее по составу и свойствам. Для выявления влияния пористости также были смодели-

рованы покрытия с ровной поверхностью (рис. 4) и с меньшим количеством пор (рис. 5). Изменения параметров модели (геометрия поверхности, уменьшение пористости) производились на модели первоначальной структуры покрытия (см. рис. 2).

Исходя из характера эксплуатационных нагрузок на изделия с оксидированными покрытиями в качестве источника механических нагрузок при моделировании целесообразно принять воздействие равномерно распределенной нагрузки при сжатии.

Моделировалось воздействие на поверхность образца равномерно распределенной нагрузки q :

$$q = \frac{F}{S}, \quad (3)$$

где F – значение приложенной силы, Н; S – площадь участка с приложенной нагрузкой, м^2 . Величина нагрузки $q = 100 \text{ Н/м}^2$.

Результаты вычислений показаны на рис. 3–5.

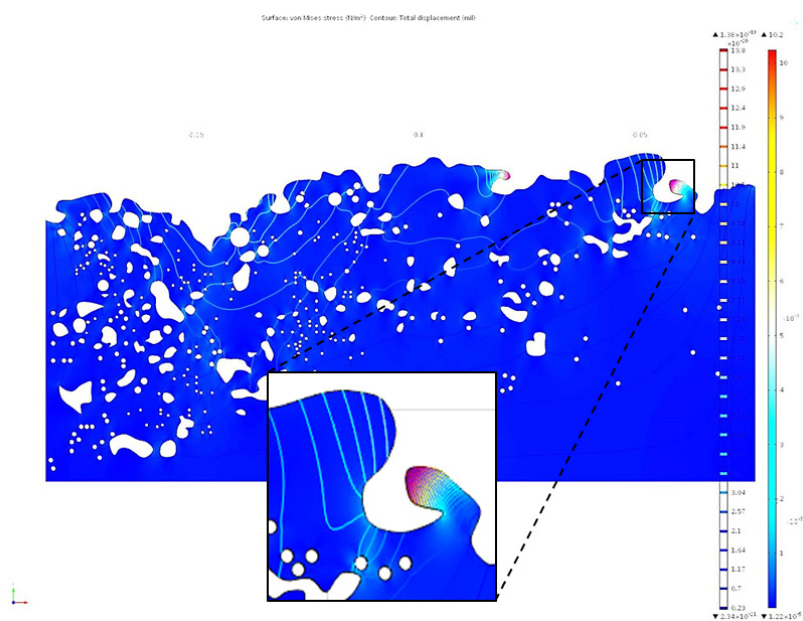


Рис. 3. Модель распределения напряжений в оксидированном слое алюминиевого сплава Д16 (геометрия поверхности соответствует реальной на рис. 1)

На данной модели, соответствующей реальной геометрии необработанного покрытия, видно, что максимальные напряжения (до $10,2 \text{ Н/м}^2$)

сосредотачиваются на неровных участках поверхности. Напряжения, распределенные по толщине покрытия, в данной модели значительно меньше, в средней части покрытия на глубине 20–30 мкм они достигают $4 \dots 6 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$, а на глубине 30–40 мкм – $2 \dots 3 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$. Самые низкие напряжения возникают вблизи поверхности основного металла, на глубине 50–60 мкм они достигают $1 \dots 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$.

Изолинии распределения напряжений по длине покрытия имеют сильные искажения, что говорит о негативном влиянии разнотолщинности покрытия на прочностные характеристики. Кроме того, в случае образования разнотолщинного покрытия большая часть нагрузки воспринимается поверхностным неровным слоем покрытия, что приводит к очаговому износу поверхности, затрагивает внутренние слои основного металла и ведет к полной потере износостойкости.

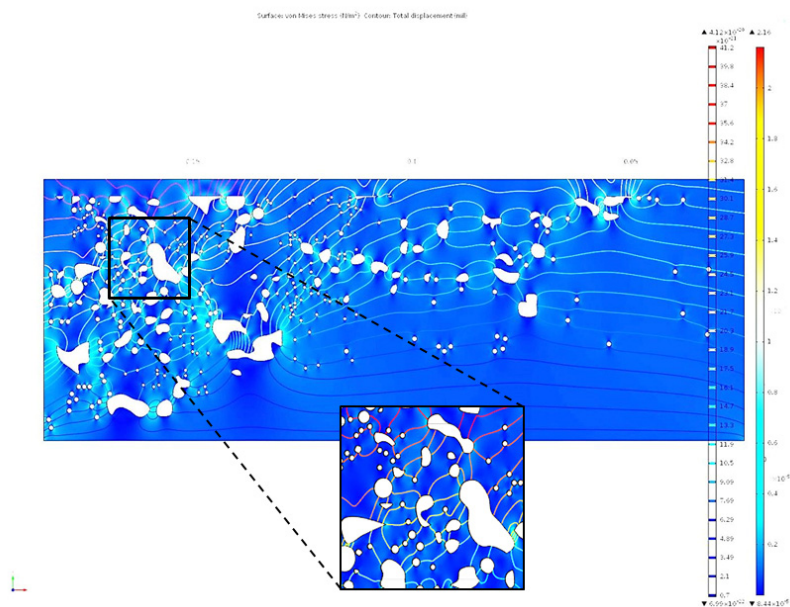


Рис. 4. Модель распределения напряжений в оксидированном слое алюминиевого сплава Д16 (измененная геометрия поверхности)

На рис. 4 показана расчетная модель распределения напряжений в оксидном покрытии с ровной поверхностью, сглаживание на модели аналогично поверхностной механической обработке реальных покрытий. Наибольшие искажения изолиний распределения напряжений и, как следствие, значений напряжений, располагаются в области повышенной пористости, на глубине 30 мкм напряжения составляют

около $1...1,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м². Максимальные напряжения располагаются непосредственно у границ пор и составляют $1,8...2,16 \cdot 10^{-3}$ Н/м². В области с меньшей пористостью (на расстоянии 80...120 мкм с левого края) контуры напряжений более равномерны, значения напряжений у границ пор меньше, чем в местах их интенсивного скопления, и не превышают $0,8...1 \cdot 10^{-3}$ Н/м².

Таким образом, полученная модель распределения напряжений и контуров их искажения показывает, что наличие большого количества пор в покрытии, а также равномерное их распределение по всей глубине негативно влияют на механические свойства, снижая прочность покрытия и повышая хрупкость.

На рис. 5 показана модель покрытия с ровной поверхностью и значительно меньшей, чем в предыдущем случае, пористостью (около 10 %). Уменьшение пористости в модели задавалось путем удаления пор в покрытии предыдущей модели в хаотичном порядке.

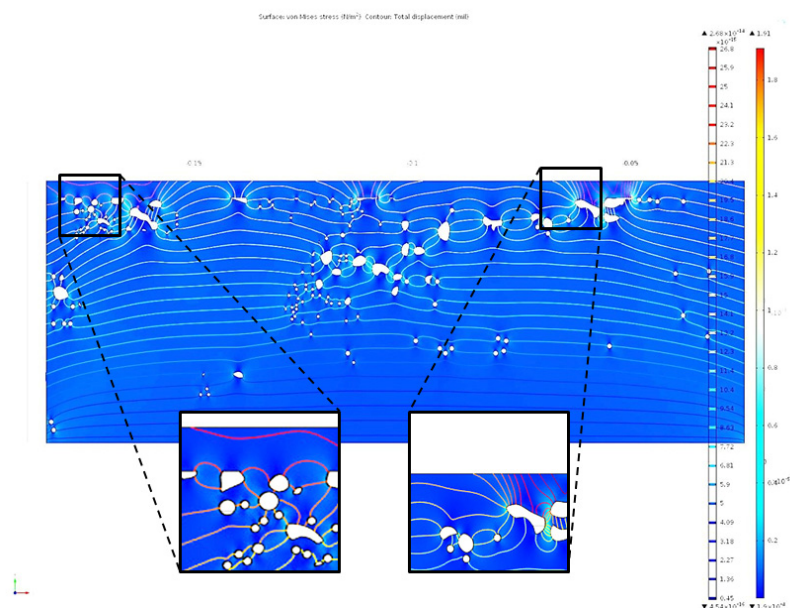


Рис. 5. Модель распределения напряжений в оксидированном слое с меньшей пористостью для алюминиевого сплава Д16

В полученной модели видно, что линии напряжений внутри данного оксидного покрытия распределены более равномерно, значения напряжений, возникающие вокруг пор, меньше, чем у предыдущей модели на рис. 4. Большинство линий напряжений в данной мо-

дели сосредоточены вблизи поверхности образца, за счет чего наибольшие напряжения вокруг пор расположены именно там и составляют $1,6...1,9 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2$. Искажения контуров распределения напряжений вокруг пор в нижних слоях покрытия значительно меньше, и они практически не влияют на общую картину. Среднее значение напряжения по всей толщине покрытия $0,6-1 \text{ Н/м}^2$.

В работе [21] представлены данные о распределении микротвердости по толщине покрытия 130 мкм, по параметрам и структуре пористости схожего с моделью на рис. 5. Измерение микротвердости в данной работе проводилось по методу Виккерса по нескольким полям замеров, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение микротвердости по толщине оксидированного слоя сплава Д16

Отпечатки	HV, МПа		Высота покрытия h , мм
	Поле замера 1	Поле замера 2	
1	493	334	-0,05
2	2953	3185	0
3	2615	3166	0,021
4	2920	4097	0,028
5	2723	3487	0,031
6	3203	3092	0,035
7	3021	3444	0,042
8	3110	3281	0,052
9	2970	3242	0,062
10	3598	2380	0,069
11	–	2043	0,08
12	–	1361	0,088

Графически распределение микротвердости по толщине оксидированного слоя сплава Д16 приведено на рис. 6.

Полученный график распределения микротвердости по толщине оксидного покрытия доказывает, что доля пористости и локализация пор существенно влияют на микротвердость. Наибольшая микротвердость, в пределах 3200–4097 МПа, наблюдается в средних и нижних слоях оксидного покрытия, где пористость минимальна. Вблизи поверхности, где наблюдаются густые скопления пор, значения микротвердости существенно ниже и составляют 1300–2300 МПа.

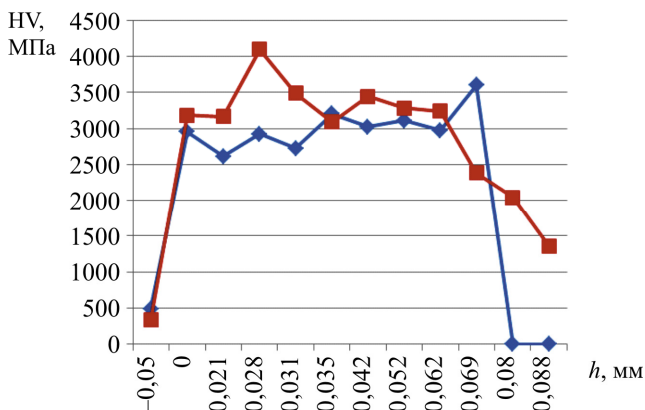


Рис. 6. График зависимости микротвердости по толщине оксидированного слоя сплава Д16:

—◆— группа отпечатков № 1; —■— группа отпечатков № 2

Проводились измерения износостойкости в паре трения «диск – тормозная колодка». В качестве материалов использовались алюминиевый сплав АМгб с оксидным покрытием и инструментальная легированная сталь Х12М. Результаты измерения износостойкости покрытия указаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения износостойкости

Пара трения		Условия работы	Коэффициент трения	Скорость износа, мг/с	Износостойкость по отношению к стали Х12М
Диск	Тормозная колодка				
Сталь Х12М	Сталь Х12М	Масло	0,213	$11,3 \cdot 10^{-2}$	1
		Без масла	Адгезия	–	–
Сталь Х12М	Сплав АМгб с оксидным покрытием	Масло	0,021	$6,18 \cdot 10^{-3}$	18,2
		Без масла	0,28–0,35	$48,6 \cdot 10^{-3}$	2,33
Сплав АМгб с оксидным покрытием (пористость 10 %)	Сплав АМгб с оксидным покрытием (пористость 10 %)	Масло	0,01–0,015	$36,8 \cdot 10^{-3}$	30,7
		Без масла	0,04–0,06	$67,3 \cdot 10^{-3}$	16,79
Сплав АМгб с оксидным покрытием (пористость 30 %)	Сплав АМгб с оксидным покрытием (пористость 30 %)	Масло	0,01–0,012	$30,1 \cdot 10^{-3}$	37,5
		Без масла	0,05–0,07	$80,5 \cdot 10^{-3}$	14,03

Из табл. 2 видно, что износостойкость алюминиевого сплава АМгб с оксидным покрытием значительно выше, чем у инструментальной стали Х12М. При работе алюминиевого сплава в качестве колодки скорость износа составила $6,18 \cdot 10^{-3}$ мг/с в условиях смазки и $48,6 \cdot 10^{-3}$ без нее. При работе и колодки, и диска из алюминиевого сплава с оксидным покрытием скорость износа составляла $36,8 \cdot 10^{-3}$ и $67,3 \cdot 10^{-3}$ мг/с соответственно. Износостойкость сплава АМгб с оксидным покрытием, таким образом, в 2,33–30,7 раз выше, чем у инструментальной износостойкой стали. Увеличение пористости на 20 % увеличивает износ поверхности образца при работе без масла до $80,5 \cdot 10^{-3}$ мг/с, износостойкость по отношению к стали уменьшается до 14,03.

Заключение

Построена модель распределения напряжений под действием распределенной по поверхности нагрузки в пористом оксидированном покрытии на алюминиевом сплаве Д16. Получены данные по распределению нагрузки для моделей покрытия с различными параметрами.

Модельные результаты свидетельствуют, что неравномерная толщина покрытия и наличие пор как концентраторов напряжений могут привести к возникновению очага износа, неравномерному износу покрытия в целом и быстрой потере его механических свойств. При нагружении нагрузки на необработанное оксидированное покрытие основными напряженными участками становятся поверхностные неровности.

Снижение пористости в средних и нижних по глубине участках оксидированного покрытия положительно влияет на картину распределения напряжений в оксидном покрытии: более равномерное распределение напряжений и отсутствие мощных концентраторов в средних слоях покрытия увеличивают твердость покрытия и его устойчивость к поверхностным нагрузкам.

Повышение плотности тока процесса оксидирования сверх 13 А/дм^2 (необходимое для уменьшения времени и увеличения производительности процесса) негативно влияет на механические характеристики покрытия за счет повышения его пористости.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности № 11.1196.2014/К от 17.07.2014.

Список литературы

1. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд [и др.]. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
2. Krivonosova Ye.A., Gorchakov A.I., Scherbakov Yu.V. Structure and properties of coatings in microarc oxidation // *Welding International*. – 2014. – Vol. 28, № 10. – P. 816–819.
3. Влияние параметров режимов микродугового оксидирования на свойства формируемых на алюминиевых сплавах покрытий / О.Н. Дунькин, А.П. Ефремов, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, С.В. Семенов, И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд // *Физика и химия обработки материалов*. – 2000. – № 2. – С. 49–53.
4. 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*. – 1999. – Vol. 116. – P. 1055-1060. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00089-4
5. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Влияние режимов оксидирования на микротвердость оксидированных покрытий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 56–61.
6. Формирование микроплазменных покрытий в высококремнистом сплаве алюминия и их характеристики / А.И. Слонова, О.П. Терлеева, В.И. Белеванцев, А.Б. Рогов // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2012. – Т. 48, № 24. – С. 66–72.
7. Факторович А.А., Галанина Е.К. Электрические разряды в электролитах // *Электрохимическая обработка металлов*. – Кишинев: Штиинца, 1971. – С. 122–129.
8. Источник питания для устройств микродугового оксидирования / А.В. Большенко, А.В. Павленко, И.В. Васюков, В.С. Пузин // *Известия вузов. Техн. науки*. – 2011. – № 1. – С. 69–74.
9. Микродуговое оксидирование защищает металл / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, А.М. Борисов, Е.А. Романовский, О.В. Беспалова // *Наука в России*. – 1999. – № 4. – С. 21–25.
10. Корреляции состояния электролита и характеристик микроплазменных покрытий с количеством пропущенного электричества / О.П. Терлеева, А.И. Слонова, В.И. Белеванцев, И.Б. Киреенко,

А.П. Рыжих // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2011. – Т. 24, № 1. – С. 72–77.

11. Исследование пористости оксидных покрытий на алюминиевых сплавах [Электронный ресурс] / Д.В. Орлова, Т.В. Трушкина, Е.В. Вахтеев, Р.В. Алякрещкий // Тр. МАИ. – 2013. – № 68. – URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/5dc/5dc5d1458aefa7634301151ea824177b.pdf> (дата обращения: 13.02.2015).

12. Износостойкость и защитные свойства композиционных покрытий, полученных микродуговым оксидированием / Ж.И. Беспалова, И.Н. Паненко, А.В. Большенко, А.В. Бородай // Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. науки. – 2012. – № 1. – С. 123–125.

13. Борилов В.А., Баранов П.Ф. Концепция системы контроля и управления технологическим процессом формирования микроплазменных покрытий // Известия Том. политехн. ун-та. – 2011. – Т. 318, № 5. – С. 120–125.

14. Krivonosova E., Gorchakov A. Micro-arc oxidation as efficient technology of increasing of wear resistance of aluminum alloy // *Electrotechnica&Electronica E+E*. – 2013. – № 5. – P. 57–59.

15. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А. Особенности процесса микродугового оксидирования алюминиевых сплавов при работе с типовыми промышленными источниками питания [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/120-16037> (дата обращения: 13.02.2015).

16. Investigation of a novel self-sealing pore micro-arc oxidation film on AM60 magnesium alloy / Yingwei Song, Kaihui Dong, Dayong Shan, En-Hou Han // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2013. – Vol. 1. – P. 82–87. DOI: 10.1016/j.jma.2013.02.009

17. Effects of Hybrid Voltages on Oxide Formation on 6061 Al-alloys During Plasma Electrolytic Oxidation / Kai Wang, Bon Heun Koo, Chan Gyu Lee, Young Joo Kima, Sunghun Leeb, Eungsun Byonb // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2008. – Vol. 22. – P. 564–568. DOI: 10.1016/S1000-9361 (08) 60142-9

18. Казакова А.С., Дербень Т.А., Снежко А.А. Влияние состава электролита на свойства и структуру МДО-покрытий, сформированных на вентильных сплавах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 1, № 8. – С. 265–266.

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

20. Артемова С.Ю. Формирование микроплазменных покрытий методами защитных оксидных покрытий из водных электролитов различного химического состава и степени дисперсности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1996. – 22 с.

21. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Влияние режимов оксидирования на микротвердость оксидированных покрытий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 56–61.

References

1. Suminov I.V., Epel'fel'd A.V. [et al.]. Mikrodogovoe oksidirovanie (teoriia, tekhnologiya, oborudovanie) [Microarc oxidation (theory, technology, equipment)]. Moscow: EKOMET, 2005. 368 p.

2. Krivonosova Ye.A., Gorchakov A.I., Scherbakov Yu.V. Structure and properties of coatings in microarc oxidation. *Welding International*, 2014, vol. 28, no. 10, pp. 816-819.

3. Dun'kin O.N., Efremov A.P., Krit B.L., Liudin V.B., Semenov S.V., Suminov I.V., Epel'fel'd A.V. Vliianie parametrov rezhimov mikrodogovogo oksidirovaniia na svoistva formiruemykh na aliuminievykh splavakh pokrytii [Influence of mode parameters on the properties of micro-arc oxidation on aluminum alloys formed coatings]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 2000, no. 2, pp. 49-53.

4. Nie X., Leyland A., Song H.W., Yero-khin A.L., Dowe 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. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00089-4

5. Ponomarev I.S., Krivonosova E.A., Gorchakov A.I. Vliianie rezhimov oksidirovaniia na mikrotverdost' oksidirovannykh pokrytii [Effect of oxidation on the microhardness oxidized coatings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 56-61.

6. Slonova A.I., Terleeva O.P., Belevantsev V.I., Rogov A.B. Formirovanie mikroplazmennyykh pokrytii v vysokokremnistom splave aliuminiia

i ikh kharakteristiki [Formation of micro plasma coatings in high-silicon aluminum alloy and their characteristics]. *Fizikokhimiia poverkhnosti i zashchita materialov*, 2012, vol. 48, no. 24, pp. 66-72.

7. Faktorovich A.A., Galanina E.K. Elektricheskie razriady v elektrolitakh [Electrical discharges in electrolytes]. *Elektrokhimicheskaiia obrabotka metallov*. Kishinev: Shtiintsa, 1971, pp. 122-129.

8. Bol'shenko A.V., Pavlenko A.V., Vasiukov I.V., Puzin V.S. Istochnik pitaniia dlia ustroystv mikrodogovogo oksidirovaniia [Power supply devices for micro-arc oxidation]. *Izvestiia vuzov. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 1, pp. 69-74.

9. Suminov I.V., Epel'fel'd A.V., Borisov A.M., Romanovskii E.A., Bepalova O.V. Mikrodogovoe oksidirovanie zashchishchaet metall [Microarc oxidation protects the metal]. *Nauka v Rossii*, 1999, no. 4, pp. 21-25.

10. Terleeva O.P., Slonova A.I., Belevantsev V.I., Kireenko I.B., Ryzhikh A.P. Korreliatsii sostoianiia elektrolita i kharakteristik mikroplazmennyykh pokrytii s kolichestvom propushchennogo elektrichestva [Correlations of electrolyte status and characteristics of the microplasma-coverings with the amount of electricity passed]. *Fizikokhimiia poverkhnosti i zashchita materialov*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 72-77.

11. Orlova D.V., Trushkina T.V., Vakhteev E.V., Aliakretskii R.V. Issledovanie poristosti oksidnykh pokrytii na aliuminievykh splavakh [Investigation of the porous oxide coatings on aluminum alloys]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, no. 68, available at: <http://www.mai.ru/upload/iblock/5dc/5dc5d1458aefa7634301151ea824177b.pdf> (accessed 13 February 2015).

12. Bepalova Zh.I., Panenko I.N., Bol'shenko A.V., Borodai A.V. Iznosostoikost' i zashchitnye svoistva kompozitsionnykh pokrytii, poluchennykh mikrodogovym oksidirovaniiem [Durability and protective properties of the composite coatings produced by micro-oxidizing]. *Izvestiia vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 1, pp. 123-125.

13. Borikov V.A., Baranov P.F. Kontseptsiiia sistemy kontroliia i upravleniia tekhnologicheskim protsessom formirovaniia mikroplazmennyykh pokrytii [The concept of monitoring and control of process of formation of micro-plasma coatings]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 120-125.

14. Krivonosova E., Gorchakov A. Micro-arc oxidation as efficient technology of increasing of wear resistance of aluminum alloy. *Elektrotechnika&Electronica E+E*, 2013, no. 5, pp. 57-59.

15. Ponomarev I.S., Krivonosova E.A. Osobennosti protsessa mikro-dugovogo oksidirovaniia aliuminievykh splavov pri rabote s tipovymi promyshlennymi istochnikami pitaniia [Features micro-arc oxidation process of aluminum alloys when working with standard industrial sources of supply]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2013, no. 6, available at: <http://www.science-education.ru/120-16037> (accessed 13 February 2015).

16. Yingwei Song, Kaihui Dong, Dayong Shan, En-Hou Han. Investigation of a novel self-sealing pore micro-arc oxidation film on AM60 magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2013, vol. 1, pp. 82-87. DOI: 10.1016/j.jma.2013.02.009

17. Kai Wang, Bon Heun Kooa, Chan Gyu Leea, Young Joo Kima, Sunghun Leeb, Eungsun Byonb. Effects of Hybrid Voltages on Oxide Formation on 6061 Al-alloys During Plasma Electrolytic Oxidation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, vol. 22, pp. 564-568. DOI: 10.1016/S1000-9361(08)60142-9

18. Kazakova A.S., Derben' T.A., Snezhko A.A. Vliianie sostava elektrolita na svoistva i strukturu MDO-pokrytii, sformirovannykh na ventilykh splavakh [Influence of electrolyte composition on the properties and structure of the MAO coatings formed on the gate alloys]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 2012, vol. 1, no. 8, pp. 265-266.

19. Mamaev A.I., Chekanova Iu.Iu., Ramazanova Zh.M. Parametry impul'snykh mikroplazmennykh protsessov na aliuminii i ego splavakh [The parameters of pulsed micro plasma processes in the aluminum and its alloys]. *Zashchita metallov*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 659-662.

20. Artemova S.Iu. Formirovanie mikroplazmennykh pokrytii metodami zashchitnykh oksidnykh pokrytii iz vodnykh elektrolitov razlichnogo khimicheskogo sostava i stepeni dispersnosti [Formation of coatings by micro plasma protective oxide coatings from aqueous electrolytes of different chemical composition and degree of dispersion]. Ph. D. thesis. Moscow, 1996. 22 p.

21. Ponomarev I.S., Krivonosova E.A., Gorchakov A.I. Vliianie rezhimov oksidirovaniia na mikrotverdost' oksidirovannykh pokrytii [Effect of oxidation on the microhardness oxidized coatings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 56-61.

Получено 28.10.2015

Об авторах

Пономарев Илья Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: cs8864@mail.ru.

Кривоносова Екатерина Александровна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

About the authors

Ilya S. Ponomarev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: cs8864@mail.ru.

Ekaterina A. Krivososova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.