

УДК 004.65

Трибологические параметры МДО-слоев, сформированных в силикатно-щелочном электролите на образцах из высококремниевом алюминиевого сплава АК12

Н. Ю. Дударева¹, Д. А. Ахмедзянов²

¹natalia_jd@mail.ru, ²ada@ugatu.ac.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.07.2018

Аннотация. Представлены результаты исследования толщины и микротвердости, а также трибологических параметров (интенсивности изнашивания и коэффициента трения) поверхностных слоев, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО) на лабораторных образцах из алюминиевого сплава АК12. Для проведения исследований спланирован и проведен дробный факторный эксперимент. В качестве факторов использовались электрические параметры установки (емкость конденсаторов) и состав электролита (концентрация едкого калия - КОН и метасиликата натрия – Na_2SiO_3). Установлено, что МДО-слой повышает износостойкость поверхности в режиме «сухого» трения более чем в 1,68 раз. Наименьшая интенсивность изнашивания наблюдается на слоях, сформированных при максимальной концентрации компонентов электролита и с минимальной емкостью установки. Средние значения коэффициента трения на образцах в режиме «сухого» трения составили $f_{\text{тр}} = 0,45\text{--}0,60$. Наибольшее влияние на микротвердость МДО-слоя оказывает концентрация метасиликата натрия в электролите. Для получения максимальной толщины покрытия необходимо повышать концентрацию компонентов электролита и емкость установки.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование; алюминиевые сплавы; износостойкость; микротвердость; электрические параметры.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и его сплавы в настоящее время широко применяются в авиастроении и двигателестроении. Анализ современных тенденций показывает, что объем использования алюминиевых сплавов в промышленности будет только расширяться [1]. При целом комплексе очевидных достоинств (низкой плотности, высокой механической прочности и относительно малой стоимости) эти

сплавы обладают существенным недостатком – поверхности не обеспечивают требуемую износостойкость деталей [2]. Для решения этой проблемы традиционно используют специальные износостойкие покрытия, создают поверхностный рельеф, улучшающий смазывание поверхности, разрабатывают алюминиевые сплавы специального состава и структуры (*Alusil*, *Lokasil* и др.) [2–4].

В настоящее время все большую популярность приобретает технология микродугового оксидирования (МДО), которая позволяет формировать на поверхности деталей покрытия, отличающиеся значительной микротвердостью (до 22 ГПа), и, соответственно, высокой износостойкостью [5–7]. Толщина МДО-слоев может достигать 400–450 мкм [5, 8, 9]. Обработке методом МДО подвергают в основном детали из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, но наиболее высокотвердые слои удается получить на деформируемых алюминиевых сплавах типа Д16, В95 и АК4-1 [5, 10, 11]. Свойства МДО-слоев существенно зависят от химического состава обрабатываемого сплава. При этом исследований трибологических свойств слоев, формируемых на высококремнистых алюминиевых сплавах, проведено недостаточно. Для промышленности и двигателестроения, в частности, особый интерес представляет эвтектический алюминиевый сплав АК12, который обладает хорошими литейными свойствами и широко применяется в поршневом двигателестроении для производства картеров, поршней, блоков цилиндров [1, 12, 13]. Использование технологии МДО для повышения износостойкости поверхностей деталей узлов трения позволило бы увеличить долговечность этих деталей.

Поэтому была сформулирована цель данной работы: исследовать трибологические свойства МДО-слоев, формируемых на эвтектическом алюминиевом сплаве АК12.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Все исследования проводились на образцах из алюминиевого сплава АК12 (10–13 % Si, 1,5 % Fe, 0,5 % Mn, 0,6 % Cu, 0,3 % Zn, 0,1 % Ti, 0,1 % Mg и 0,1 % Zr) [14]. Образцы имели вид дисков с диаметром 29 мм и высотой 5 мм (рис. 1). Шероховатость поверхности образцов, согласно чертежу, не превышала Ra 3,2 мкм.



Рис. 1. Образцы из сплава АК12

Для определения оптимальных режимов процесса МДО, при которых можно создать поверхностные слои с требуемой микротвердостью и износостойкостью, был спланирован многофакторный эксперимент. В связи с тем, что МДО осуществлялось на емкостной установке в силикатно-щелочном электролите, в качестве независимых факторов были выбраны: концентрация в электролите гидроксида калия $KOH - C_{кон}$, г/л; концентрация метасиликата натрия Na_2SiO_3 (жидкого стекла) – $C_{жс}$, г/л; емкость конденсаторов установки – C , мкФ.

Исследования проводились в соответствии с планом дробного факторного эксперимента типа 2^{3-1} [15, 16], матрица которого приведена в табл. 1.

Таблица 1
Матрица планирования эксперимента

| Режим | $C_{кон}$, г/л | $C_{жс}$, г/л | C , мкФ |
|-------|-----------------|----------------|-----------|
| 1 | 1 | 1 | 200 |
| 2 | 3 | 6 | 200 |
| 3 | 1 | 6 | 100 |
| 4 | 3 | 1 | 100 |

Обработке методом МДО одновременно, на каждом режиме, подвергались три образца. Суммарная площадь образцов составляла

5308 мм². Температура электролита в процессе МДО не превышала 32 °С, соотношение анодного (I_a) и катодного (I_k) токов поддерживалось постоянным $I_a/I_k = 1$. Продолжительность процесса на каждом режиме составляла 3 часа. После обработки образцы промывались водопроводной водой и высушивались на воздухе.

Исследовались толщина, микротвердость и трибологические параметры МДО-слоев (интенсивность изнашивания и коэффициент трения). Толщина измерялась при помощи вихретокового толщиномера *ТТ-210*. Обычно в структуре МДО-слоев выделяют три подслоя: 1) переходный подслой, прилегающий к подложке; 2) технологический функциональный и 3) верхний рыхлый подслоя, который с поверхности деталей узлов трения обычно удаляют во избежание возникновения абразивного износа [5]. По этой причине толщина МДО-слоя на образцах измерялась дважды: с рыхлым слоем и после удаления рыхлого слоя, который снимался механическим способом при помощи наждачной бумаги типа Р-400. Измерение микротвердости, шероховатости и трибологические испытания также проводились на поверхности после удаления рыхлого подслоя.

Шероховатость поверхности образцов измерялась при помощи профилографа-профилометра *TR-220* и на всех образцах выдерживалось значение $Ra=1,66\pm 0,09$ мкм. Микротвердость МДО-слоя измерялась при помощи микротвердомера *HVS-1000* по методу Виккерса, с нагрузкой на индентор 200 г, время приложения которой составляло 10 с. При измерении микротвердости на образце без покрытия использовалась нагрузка 50 г, время приложения которой также составляло 10 с. При измерениях индентор прикладывался перпендикулярно поверхности образца.

Трибологические испытания образцов проводились на трибометре *Nanovea* по существующей методике [17]. При испытаниях реализовывался режим точечного контакта, в качестве индентора использовался шарик из стали ШХ15 диаметром 6 мм. Скорость

вращения индентора составляла 300 мин⁻¹, радиус траектории движения – 10 мм, а нагрузка на индентор – 5 Н. Испытания проводились без смазочного материала в течение 4 часов. Режим «сухого» трения был выбран из-за того, что он является наиболее жестким режимом трения и позволяет установить величину износа за короткое время, даже на высокотвердых МДО-покрытиях.

При проведении испытаний на износостойкость использовался один образец для каждого режима МДО. Для испытаний выбирался образец со «средними» значениями толщины и микротвердости. Также определялись трибологические характеристики на образце без МДО-слоя.

Износ образцов по массе определялся путем их взвешивания на микрограммовых аналитических весах марки *XP 26* до и после испытаний. Интенсивность изнашивания по массе образцов вычислялась по формуле [18, 19]:

$$I = \frac{\Delta m}{L}, \quad (1)$$

где Δm – массовый износ, мг; L – путь трения, м.

Съемка треков износа выполнялась на растровом электронном микроскопе *JEOL JSM-6490LV* с увеличением 500х.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Значения толщины и микротвердости МДО-слоев, сформированных на образцах из сплава АК12, приведены в табл. 2. Анализ этих данных позволяет сделать вывод, что режим процесса МДО оказывает существенное влияние как на микротвердость формируемого слоя, так и на его толщину. МДО-слой с наименьшей микротвердостью (~1,68 ГПа) и с наибольшей толщиной (~139 мкм) был сформирован на режиме с максимальной концентрацией компонентов электролита и максимальной емкостью установки (режим № 2). Максимальная микротвердость слоя составила ~4,32 ГПа (режим № 4). Микротвердость необработанного образца из сплава АК12 составляла $H_u=0,60\pm 0,06$ ГПа.

Таблица 2
Свойства МДО-покрытия на сплаве АК12

| Режим | Микротвердость H_{μ} , ГПа | Толщина с рыхлым подслоем h_{μ} , мкм | Толщина без рыхлого подслоя h , мкм |
|-------|--------------------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | $2,92 \pm 0,88$ | $37,4 \pm 3,9$ | $23,9 \pm 3,8$ |
| 2 | $1,68 \pm 0,17$ | $139,1 \pm 3,9$ | $106,4 \pm 3,5$ |
| 3 | $2,28 \pm 0,76$ | $59,3 \pm 3,0$ | $42,2 \pm 2,5$ |
| 4 | $4,32 \pm 1,07$ | $61,1 \pm 3,2$ | $39,6 \pm 2,6$ |

Анализ толщины покрытия с рыхлым подслоем и без него показывает, что толщина этого подслоя (h_p) составляет в среднем $h_p=21,3 \pm 8,4$ мкм.

Степень влияния факторов процесса МДО на параметры слоя была оценена при помощи корреляционного анализа, выполненного с использованием программного обеспечения *MS Excel*. В результате было установлено:

- наибольшее влияние на микротвердость слоя оказывает концентрация метасиликата натрия в электролите, увеличение концентрации этого компонента электролита снижает микротвердость покрытия;

- толщина слоя в наибольшей степени коррелирует с концентрацией гидроксида калия $C_{\text{кон}}$ и метасиликата натрия $C_{\text{жс}}$, повышение концентрации обоих компонентов приводит к росту толщины слоя.

Для всех опытов была рассчитана дисперсия S_y и проведена оценка ее однородности по критерию Кохрена [15]. Также был проведен расчет статистической значимости коэффициентов регрессии в уравнениях. В результате были получены уравнения регрессии:

$$H_{\mu} = 3,95 - 0,33 \cdot C_{\text{жс}}, \quad (2)$$

$$h_{\mu} = -54,45 + 25,85 \cdot C_{\text{кон}} + 10 \cdot C_{\text{жс}} + 0,28 \cdot C, \quad (3)$$

$$h = -53,05 + 19,75 \cdot C_{\text{кон}} + 8,6 \cdot C_{\text{жс}} + 0,243 \cdot C. \quad (4)$$

Проведенная оценка показала адекватность линейных уравнений регрессии (2)–(4).

Результаты трибологических испытаний представлены в табл. 3. Анализ полученных данных показал, что образец с МДО-слоем, обработанный на режиме № 4, имеет самую высокую износостойкость: зафиксирован износ контр-тела и отсутствие износа у об-

разца. Наименьшая износостойкость отмечена на образце, обработанном на режиме №1: интенсивность изнашивания в 1,68 раза ниже по сравнению с образцом без покрытия.

Таблица 3

Результаты испытаний

| Режим | Δm_k , мг | Δm , мг | L , м | I_k , мг/м $\cdot 10^{-5}$ | I , мг/м $\cdot 10^{-5}$ |
|-------|-------------------|-----------------|---------|------------------------------|----------------------------|
| 1 | 8,04 | 27,10 | 4521,9 | 177,89 | 599,19 |
| 2 | 3,18 | 13,83 | 4521,8 | 70,33 | 305,85 |
| 3 | 3,79 | 3,15 | 4521,7 | 83,82 | 69,66 |
| 4 | 5,68 | -1,05 | 4249,7 | 133,70 | -24,71 |
| б/р | -0,03 | 45,57 | 4521,8 | -0,66 | 1007,79 |

Примечание: Δm_k – величина износа контр-тела, Δm – величина износа образца, L – путь трения, I_k – интенсивность изнашивания контр-тела, I – интенсивность изнашивания образца; б/р – образец без МДО.

Дисперсию значений интенсивности изнашивания по массе оценивали из серии специально проведенных экспериментов, по результатам которых установлено, что дисперсия отдельного опыта составляет $\sim 7,1$ %. При обработке данных была оценена статистическая значимость коэффициентов регрессии. В результате получены следующие уравнения регрессии интенсивности изнашивания по массе образца (I_G) и контр-тела (I_{kG}):

$$I_G = (-123,1 - 90,8 \cdot C_{\text{кон}} - 22,4 \cdot C_{\text{жс}} + 4,18 \cdot C) \cdot 10^{-5}; \quad (5)$$

$$I_{kG} = (177,35 - 4,42 \cdot C_{\text{кон}} - 15,74 \cdot C_{\text{жс}} + 0,15 \cdot C) \cdot 10^{-5}. \quad (6)$$

В *MS Excel* был проведен анализ уравнений (5) и (6), который показал, что индекс корреляции R для всех уравнений равен $R=1$, что говорит об адекватности этих уравнений.

В процессе трибологических испытаний регистрировались значения коэффициентов трения (рис. 2). Обработка этих данных позволила установить максимальное, минимальное и среднее значения коэффициентов трения для всех образцов (табл. 4).

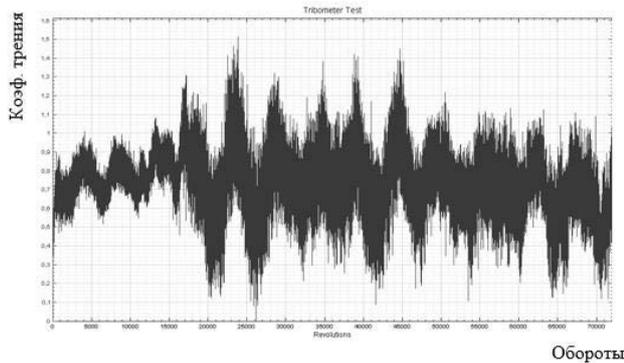


Рис. 2. Изменение коэффициента трения при испытаниях на образце с МДО (режим № 3)

Таблица 4
Значения коэффициентов трения

| Ре- жим | Значения коэффициентов трения, $f_{тр}$ | | |
|------------|---|-------------------|---------|
| | минималь- ное | максималь- ное | среднее |
| 1 | 0 | 0,668 | 0,448 |
| 2 | 0 | 1,368 | 0,760 |
| 3 | 0 | 1,126 | 0,570 |
| 4 | 0,002 | 0,816 | 0,596 |
| б/р | 0 | 2,675 | 0,549 |

Проведенный парный корреляционный анализ показал наличие тесной взаимосвязи между коэффициентом трения и толщиной МДО-слоя. Увеличение толщины повышает коэффициент трения. Средние значения коэффициентов трения на МДО-слое составляют $f_{тр} = 0,45-0,60$, а на образце без МДО-слоя – $f_{тр} = 0,55$.

Визуальный анализ треков износа позволяет сделать вывод, что износ МДО-слоев происходит из-за царапания поверхности (рис. 3).

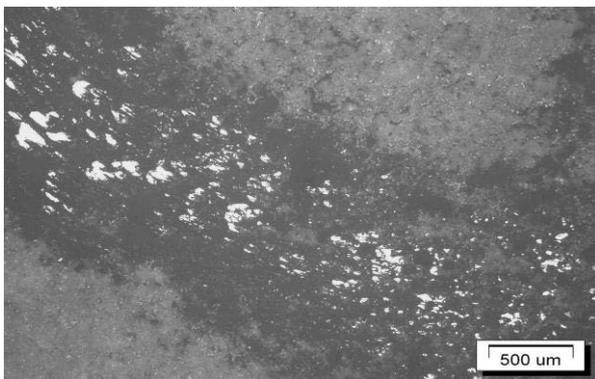


Рис. 3. Область износа на МДО-слое

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследования показали, что наличие МДО-слоя на образцах из сплава АК12 повышает износостойкость их поверхностей при испытаниях в режиме «сухого» трения как минимум в 1,68 раза. Степень повышения износостойкости и образца, и контр-тела зависит от режима процесса МДО. Максимально износостойкость поверхности с МДО повысилась более чем в 14,5 раз.

Установлено, что МДО-слои с наименьшей интенсивностью изнашивания формируются при максимальной концентрации компонентов электролита и с минимальной емкостью установки. Снижению интенсивности изнашивания по массе контр-тела также способствует повышение концентрации КОН и Na_2SiO_3 и снижение емкости установки.

Корреляционный анализ, проведенный при помощи *MS Excel*, показал, что интенсивность изнашивания образца с МДО обратно пропорциональна микротвердости поверхности. Этот, не вполне ожидаемый факт, можно объяснить, проанализировав составляющие уравнения интенсивности изнашивания для технической керамики [20]:

$$I_v = \alpha \left(\frac{f_{тр}}{HV} \right)^a \cdot \left(\frac{E\sqrt{Ra}}{K_{1C}} \right)^b \cdot \left(\frac{d \cdot \sigma_{II}}{K_{1C}^2} \right)^c \cdot \left(\frac{R \cdot T}{E_x} \right)^d \cdot \left(\frac{q \cdot \sigma_m}{\lambda \cdot T_{кр}} \right)^e, \quad (7)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения; HV – твердость менее твердого из контактирующих тел; E – модуль упругости керамики; Ra – шероховатость более твердого тела; K_{1C} – вязкость разрушения керамики; d – средний размер зерна керамики; σ_{II} – прочность на изгиб керамики; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура контакта; E_x – энергия активации распада межатомных связей поверхностных соединений; q – плотность теплового потока; σ_m – толщина теплового пограничного слоя; λ – коэффициент теплопроводности материала; $T_{кр}$ – критическая температура; эмпирические коэффициенты: $a=0,8$; $b=0,64$; $c=0,18$; $d=1$; $e=0,14$; α – коэффициент, который зависит от вида керамического материала, способа его получения и схемы испытаний.

Уравнение (7) позволяет сделать вывод, что интенсивность изнашивания не зависит напрямую от микротвердости керамики. Повышение интенсивности изнашивания возможно из-за роста среднего размера зерна керамики (d) и прочности на изгиб ($\sigma_{\text{н}}$), что вероятно и наблюдается у высокотвердых МДО-слоев.

Средние значения коэффициентов трения у образцов с МДО-слоем находятся в диапазоне $f_{\text{тр}} = 0,45-0,60$. Эти величины незначительно отличаются от среднего коэффициента трения для образца без МДО-слоя $f_{\text{тр}} = 0,55$. Однако максимальные значения коэффициентов трения у образцов с МДО-слоем в 1,96-4,00 раза меньше, чем у образца без покрытия.

Анализ уравнения (2) показал, что на микротвердость МДО-слоя из всех учитываемых факторов процесса влияет лишь концентрация Na_2SiO_3 в электролите. Повышение концентрации метасиликата натрия снижает микротвердость поверхности. Этот факт объясняется тем, что при увеличении концентрации Na_2SiO_3 в МДО-слое образуется значительное количество кремнийсодержащих соединений с рыхлой структурой и невысокой микротвердостью.

Согласно уравнению (3) для формирования МДО-слоя значительной толщины необходимо увеличивать концентрацию компонентов электролита и емкость установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beer S. Verbesserung der Anlaufperformance durch den Einsatz von Frontloading-Maßnahmen // Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen : Ein Leitfaden für die Praxis / G. Schuh, W. Stözle, F. Straube. Kolbenschmidt Aluminium-Technologie AG; Springer, 2008. Part of the VDI-Buch book series. P. 43–52.
2. Луц А. Р., Сулина А. А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 81 с. [A. R. Luc, A. A. Suslina, *Aluminum and its alloys*, (in Russian). Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2013. 81 p.]
3. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов / Под ред. Ю. М. Барона. СПб.: Питер, 2012. 512 с. [*Technology of construction materials: the Textbook for high schools* / ed. Yu. M. Baron, (in Russian). SPb.: Piter, 2012. 512 p.]
4. Goodman J. "Nikasil and Alusil" in *Engine Professional*, pp. 18–22, oct - dec. 2008.
5. Эпельфельд А. В. Микродуговое оксидирование // Ресурсо-, энергосберегающие и наукоемкие технологии в машино- и приборостроении. 1991. С. 47–48. [A. V. Apelfeld, «Microarc oxidation» (in Russian), in *Resurso-, ehnergosberegayushchie i naukoemkie tekhnologii v mashino- i priborostroenii*, pp. 47-48, 1991.]
6. Федоров В. А., Великосельская Н. Д. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов // Трение и износ. 1989. Т. 10, № 3. С. 521–524. [V. A. Fedorov, N. D. Velikoselskaya, «Effect of microarc oxidation on the wear-resistance of aluminum alloys» (in Russian), in *Trenie i iznos*, vol. 10, no. 3, pp. 521-524, 1989.]
7. Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminum alloys / A. L. Yerokhina, et. al. // Surface and Coatings Technology, no. 110, pp. 140-146, 1998.
8. Малышев В. Н. Оценка упрочнения алюминиевых сплавов микродуговой обработкой по результатам статических и динамических испытаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2007. № 3. С. 131–137. [V. N. Malyshev, «Qualification of aluminum alloys hardening by microarc processing on the basis of the static and dynamic tests results» (in Russian), in *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region*, no. 3, pp. 131-137, 2007.]
9. Пономарев И. С., Кривonosова Е. А. Анализ производительности процесса микродугового оксидирования алюминиевых сплавов // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 25–27 ноября 2014 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 152–157. [I. S. Ponomarev, E. A. Krivonosova, «Analysis of the performance of the microarc oxidation process on aluminum alloys» (in Russian), in *Svarka i diagnostika: sbornik dokladov mezhdunarodno-go foruma* (Ekaterinburg, Nov. 25-27 2014), Ekaterinburg, Russia, 2015, pp. 152-157.]
10. Износостойкость покрытий, нанесенных анодно-катодным микродуговым методом / Г. А. Марков и др. // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 2. С. 286–290. [G. A. Markov, et. al., «Wear resistance of coatings applied by anodic-cathodic microarc method» (in Russian), in *Trenie i iznos*, vol. 9, no. 2, pp. 286-290, 1988.]
11. Y. Wang, S. C. Tung "Scuffing and wear behavior of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore" in *Wear*, vol. 226-229, no. 2, pp. 1100-1108, 1999.
12. Лобанов В. К., Чуйкова Е. В. Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2009. Вып. 46. [V. K. Lobanov, E. V. Chuikova, Material science aspects of the choice of manufacture technology for ICE pistons (in Russian), in *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, vol. 46, 2009.]
13. Технология производства деталей двигателей внутреннего сгорания / А. С. Ненишев и др. // Омск: СибАДИ, 2009. 92 с. [A. S. Nenashev, et. al., *Technology of production of parts of internal combustion engines*, (in Russian). Omsk: Siberian road Institute, 2009. 92 p.]
14. Характеристика материала АК12. Марочник стали и сплавов. URL: http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1375 (дата обращения 22.07.2018). [Characteristics of the material AK12. Brand of steel and alloys (2018, July 22). *NoSQL databases* [Online]. Available: http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1375/]
15. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с. [Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovsky, *Planning an experiment when searching for optimal conditions*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1976. 278 p.]

16. **Спиридонов А. А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с. [A. A. Spiridonov, *Planning an experiment in the study of technological processes*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1981. 184 p.]

17. **Nanovea**. URL: <http://nanovea.com/tribometers/> (дата обращения 28.07.2017). [Nanovea (2017, July 28). *NoSQL databases* [Online]. Available: <http://nanovea.com/tribometers/>]

18. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с. [I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, V. S. Kombalov, *Basics of calculations for friction and wear*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1977. 526 p.]

19. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность). М.: «Издательство МСХА», 2001. 616 с. [D. N. Garkunov, *Tribotechnics (wear and tearlessness)*, (in Russian). Moscow: «Izdatel'stvo MSKHA», 2001. 616 p.]

20. **Дроздов Ю. Н., Савинова Т. М.** Расчет изнашивания технической керамики на основе теоретико-инвариантного метода // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева. 2006. № 2-1 (10). С. 353–356. [Yu. N. Drozdov, T. M. Savinova, *The calculation of the wear of technical ceramics based on theoretical invariant method* (in Russian), in Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2-1(10), pp 353-356, 2006.]

ОБ АВТОРАХ

ДУДАРЕВА Наталья Юрьевна, доц. каф. Двигатели внутреннего сгорания. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. повышения надежности ДВС применением покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования.

АХМЕДЗЯНОВ Дмитрий Альбертович, проф., декан ФАДЭТ. Дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2007). Исследования в области рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неустановившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

METADATA

Title: Tribological parameters of MAO-layers formed in silicate-alkaline electrolyte on samples of high-silicon aluminum alloy AK12.

Authors: N. Yu. Dudareva¹, D. A. Ahmedzyanov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹natalia_jd@mail.ru, ²ada@ugatu.ac.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. (81), pp. 10-16, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The results of the study of the thickness, microhardness and tribological properties (wear intensity and friction coefficient) of the surface layers formed by microarc oxidation (MAO) on the samples of aluminum alloy AK12 are presented. A fractional factorial experiment was planned and conducted. As the factors used electrical parameters of the installation (condenser capacity) and the composition of

the electrolyte (concentration of potassium hydroxide-KOH and sodium metasilicate - Na₂SiO₃). It was found that the MAO-layer increases the wear resistance of the surface in the "dry" friction more than 1.68 times. The lowest wear rate is observed on the layers formed at the maximum concentration of electrolyte components and with a minimum condenser capacity of the installation. Average values of the friction coefficient of the samples in the "dry" friction made $f_{\text{тр}} = 0,45-0,60$. The greatest influence on the microhardness of the MAO layer is the concentration of sodium metasilicate in the electrolyte. To obtain the maximum thickness of the coating, it is necessary to increase of the concentration of electrolyte components and the condenser capacity of the installation.

Key words: microarc oxidation; aluminum alloys; wear resistance; microhardness; electrical parameters.

About authors:

DUDAREVA, Natalia Yurievna, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines of USATU, Dipl. Engineer-mechanic (USATU, 1994). Ph. D. Candidate of Internal combustion engines (USATU, 1999).

AKHMEDZYANOV, Dmitry Albertovich, Dean of the aviation engines, energy and transport faculty of USATU, professor of the aviation engines department. Ph. D. Candidate of aircraft engines and power plants (USATU, 1997). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2007).