

УДК 004.65

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МДО-ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ В СИЛИКАТНО-ЩЕЛОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ АК4-1

Н. Ю. ДУДАРЕВА<sup>1</sup>, Н. Х. МУСИН<sup>2</sup>, Р. В. КАЛЬЩИКОВ<sup>3</sup>,  
С. Р. ШЕХТМАН<sup>4</sup>, Д. А. АХМЕДЗЯНОВ<sup>5</sup>, А. Е. КИШАЛОВ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>natalia\_jd@mail.ru, <sup>2</sup>niyaz.musin@yandex.ru, <sup>3</sup>roman\_for\_work@mail.ru,  
<sup>4</sup>shex@inbox.ru, <sup>5</sup>ada@ugatu.ac.ru, <sup>6</sup>kishalov@ufanet.ru

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

Поступила в редакцию 22.07.2017

**Аннотация.** Представлены результаты исследования толщины, микротвердости и износостойкости покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования на образцах из алюминиевого сплава АК4-1. В качестве факторов эксперимента использовались концентрации компонентов электролита (едкого калия – КОН и метасиликата натрия –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и емкость установки. Исследования проводились при планировании дробного факторного эксперимента. Установлено, что формируемое покрытие имеет износостойкость в 94 раза выше, чем у образца без покрытия. При режимах, обеспечивающих максимально высокую микротвердость покрытия, износа образца не происходило, при этом наблюдался износ контртела. Корреляционным анализом установлено, что наибольшее влияние на микротвердость поверхностного слоя оказывает емкость установки, а на толщину – концентрация компонентов электролита.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы широко используются в авиастроении, в космической промышленности и двигателестроении. В перспективе объем применения этих сплавов будет только увеличиваться [1]. Детали из алюминиевых сплавов обладают множеством достоинств: низкой массой, достаточно высокой прочностью и небольшой стоимостью. Однако у них имеется существенный недостаток – низкая износостойкость поверхностей. Обычно для решения этой проблемы пользуются различными способами: наносят износостойкие покрытия или используют методы модификации поверхностей, применяют специальные системы

смазки поверхностей или упрочняющие вставки [2, 3].

Одним из наиболее перспективных способов повышения износостойкости поверхностей деталей из алюминиевых сплавов на сегодняшний день является метод микродугового оксидирования (МДО). Суть технологии МДО заключается в формировании керамического слоя на поверхности деталей под действием искровых разрядов [4]. Методом МДО можно обрабатывать детали из алюминиевых, магниевых, титановых и др. сплавов. Толщина упрочненного слоя, формируемого на алюминиевых сплавах, может достигать 400 мкм, а микротвердость – 22 ГПа [4–6]. МДО-слои характеризуются высокой износостойкостью, тепло- и коррозионной стойкостью [5, 7, 8]. Такие свойства во многом объясняются составом и структурой формируемой поверхности.

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан в рамках научного проекта № 17-48-020083 п\_а.

Свойства упрочненных поверхностей во многом зависят от марки обрабатываемого сплава, а также от состава электролита и электрических режимов проведения процесса. Одним из основных эксплуатационных свойств покрытия является его износостойкость. Довольно большое количество работ, посвященных исследованию триботехнических свойств МДО-слоев, проводились на деформируемых алюминиевых сплавах Д16 и В95 [9–12]. При этом информация о эксплуатационных свойствах МДО-покрытий, формируемых на других алюминиевых сплавах является либо разрозненной, либо вообще отсутствует.

Значительный интерес для поршневого двигателестроения представляет деформируемый алюминиевый сплав АК4-1, который может использоваться для производства поршней и гильз [13, 14]. Изготовление из этого сплава гильз подразумевает применение износостойких покрытий типа МДО.

Поэтому цель данной работы заключается в исследовании влияния режимов процесса МДО на износостойкость покрытий, формируемых на сплаве АК4-1.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на образцах из алюминиевого сплава АК4-1, которые представляли собой диски диаметром 29 мм и высотой 5 мм, вырезанные из прутка (рис. 1). Исходная поверхность образцов формировалась как результат операции точения, при этом шероховатость поверхности составила  $Ra = 0,96 \pm 0,05$  мкм. Шероховатость измерялась профилографом-профилометром TR-220.

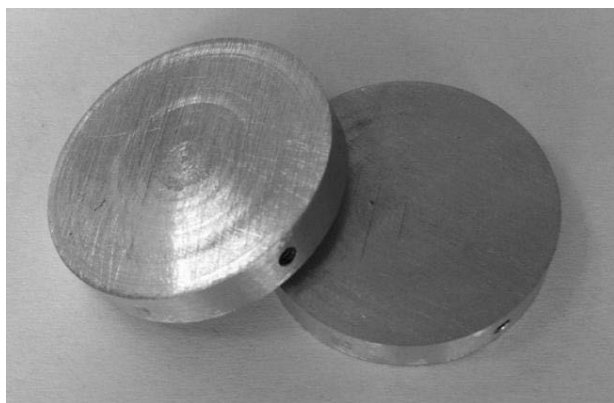


Рис. 1. Образцы из сплава АК4-1

В качестве независимых факторов использовались параметры, управление которыми возможно на используемой емкостной установке МДО:

- концентрация гидроксида калия КОН в электролите,  $C_{\text{КОН}}$ , г/л;
- концентрация метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  в электролите,  $C_{\text{ЖС}}$ , г/л;
- емкость конденсаторов,  $C$ , мкФ.

Для сокращения числа опытов был спланирован эксперимент в виде полурепублики полного факторного эксперимента  $2^{3-1}$  [15, 16]. Итоговая матрица планирования приведена в табл. 1. На рис. 2 показаны образцы в процессе МДО. Образцы закреплялись на специальное приспособление, которое позволяло одновременно обрабатывать три образца. Суммарная площадь всех образцов составляла 5300 мм<sup>2</sup>.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Режим	$C_{\text{КОН}}$ , г/л	$C_{\text{ЖС}}$ , г/л	$C$ , мкФ
1	1	1	200
2	3	6	200
3	1	6	100
4	3	1	100

В процессе обработки обеспечивалось постоянное соотношение катодного и анодного токов –  $I_a/I_k = 1$ . Температура электролита не превышала 45 °С.



Рис. 2. Образцы в процессе МДО

После МДО образцы промывались водой и высушивались. Затем проводилось измерение толщины покрытия с учетом верхнего рыхлого слоя (муллита). Далее пу-

тем механической обработки удалялся верхний рыхлый слой и измерялись толщина и микротвердость покрытия. Удаление верхнего слоя осуществлялось при помощи водостойкой наждачной бумаги типа Р-400. В результате шероховатость МДО-поверхности составила  $Ra = 1,66 \pm 0,09$  мкм.

Толщина покрытия определялась неразрушающим методом при помощи вихретокового толщиномера ТТ-210. Перед началом измерений толщины МДО-слоя вихретоковый толщиномер был откалиброван на образце-основании из алюминиевого сплава с использованием калибровочной пленки с толщиной 93,5 мкм.

Микротвердость поверхностей исследовалась на микротвердомере HVS-1000 по методу Виккерса. Для покрытия использовалась нагрузка 200 г, время приложения составляло 10 с, на поверхность образца без покрытия прикладывалась нагрузка 50 г также в течение 10 с.

Испытания на износостойкость проводились на трибометре *Nanovea* в соответствии с существующей методикой [17]. Условия испытаний были следующие:

- режим работы – вращающийся, по схеме «стержень–диск»;
- индентор – шарик из стали ШХ15, диаметр 6 мм;
- скорость вращения – 300 мин<sup>-1</sup>;
- радиус траектории перемещения – 10 мм;
- тип контакта – точечный;
- нагрузка на индентор – 5 Н;
- режим трения – без смазочного материала;
- время испытания – 4 ч.

Режимы испытаний выбирались на основе технических возможностей машины трения. При выборе нагрузки учитывалась хрупкость покрытия и вероятность его разрушения при использовании жесткого индентора со значительной нагрузкой. Как известно, чем больше твердость покрытия по сравнению с твердостью основного материала, тем легче оно разрушается даже при незначительных деформациях [18]. Для испытаний был выбран режим «сухого» трения по причине того, что покрытие, обладая высокой микротвердостью, харак-

теризуется также и высокой износостойкостью. И только испытания без смазочного материала позволяют добиться ощутимых результатов по износу за короткое время.

Массовый износ образца определялся по потере массы путем взвешивания на микрограммовых аналитических весах марки ХР 26. Интенсивность изнашивания определялась по формуле [19]

$$I = \frac{\Delta m}{L},$$

где  $\Delta m$  – массовый износ, г;  $L$  – путь трения, м.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с матрицей планирования (табл. 1) были обработаны 12 образцов: по 3 образца на каждом режиме МДО. В табл. 2 приведены результаты измерения толщины и микротвердости сформированных покрытий.

Анализ данных в табл. 2 показывает, что наименьшая микротвердость (~7,2 ГПа) и толщина (~73 мкм) у покрытия формируется при обработке образцов на режиме № 1 с минимальной концентрацией компонентов электролита. Покрытие с максимальной толщиной (~153 мкм) сформировано на режиме № 2, который характеризуется максимальной концентрацией используемых компонентов электролита. Максимальная микротвердость покрытия (~11,7 ГПа) зафиксирована на образцах, обработанных в режиме № 3 с максимальным содержанием в электролите метасиликата натрия. Видно, что значения по толщине и микротвердости покрытия для режимов № 3 и № 4 отличаются незначительно и с учетом статистических данных являются неотличимыми.

Таблица 2  
Свойства МДО-покрытия

Режим	Микротвердость $H_v$ , ГПа	Толщина с муллитом $h_m$ , мкм	Толщина без муллита $h$ , мкм
1	7,18±1,09	73,74±12,59	62,01±6,04
2	9,37±1,55	152,39±39,95	109,85±12,27
3	11,70±0,86	89,70±9,66	74,01±14,58
4	10,91±0,58	93,39±19,00	78,25±17,70

При этом микротвердость образца из сплава АК4-1 без покрытия составила  $H_{\mu} = 0,85 \pm 0,09$  ГПа.

Для оценки влияния факторов на качество МДО-слоя был проведен корреляционный анализ, в результате чего установлено, что:

- наибольшее влияние на микротвердость формируемого покрытия оказывает емкость конденсаторов установки –  $C$ ;

- увеличение емкости конденсаторов приводит к снижению микротвердости покрытия;

- толщина покрытия имеет заметную корреляцию с концентрацией гидроксида калия  $C_{\text{кон}}$ ;

- корреляция между емкостью конденсаторов  $C$  и толщиной покрытия может быть охарактеризована как слабая.

Уравнения регрессии, полученные на основе результатов эксперимента и описывающие влияние технологических факторов процесса МДО на качество покрытия, выглядят следующим образом:

$$H_{\mu} = 14,14 - 0,03 \cdot C,$$

$$h_{\text{м}} = 34,3 + 21,2 \cdot C_{\text{кон}} + 7,3 \cdot C_{\text{жс}},$$

$$h = 41,6 + 13,2 \cdot C_{\text{кон}} + 4,3 \cdot C_{\text{жс}}$$

При составлении уравнений регрессии на основе известных методик [15, 16] была проведена проверка значимости коэффициентов уравнения. При оценке адекватности линейных уравнений регрессии гипотеза об адекватности всех представленных математических моделей, подтвердилась.

В испытаниях на износостойкость были использованы по одному образцу для каждого режима обработки, а также один образец без покрытия. Результаты испытаний приведены в табл. 3. На рис. 3 показаны образцы с покрытием и без после экспериментов.

Результаты испытаний (табл. 3) показали, что образцы с МДО-покрытием, обработанные на режимах № 1, № 2 и № 3, в ходе эксперимента не только не изнашивались, но и прибавили массу, что связано с переносом материала контртела в процессе истирания. Необходимо отметить, что испытания образца, полученного при режиме № 3, кото-

рый обладает наибольшей микротвердостью (табл. 2), были остановлены по причине значительного износа контртела и возникновения задира. Путь трения для этого образца составил 595 м, в то время как для остальных образцов – 4522 м.

Таблица 3

Результаты испытаний

Режим	$\Delta m_k$ , г·10 <sup>-3</sup>	$\Delta m$ , г·10 <sup>-3</sup>	$L$ , м	$I_k$ , г/м·10 <sup>-8</sup>	$I$ , г/м·10 <sup>-8</sup>
1	3,79	-0,40	4522	83,82	—
2	2,77	-0,39	4522	61,26	—
3	1,08	-0,34	595	181,45	—
4	4,23	0,28	4522	93,54	6,19
б/р	0	26,4	4522	0	584,05

*Примечание:*  $\Delta m_k$  – износ контртела,  $\Delta m$  – износ образца,  $L$  – путь трения,  $I_k$  – интенсивность изнашивания контртела,  $I$  – интенсивность изнашивания образца; б/р – образец без МДО.

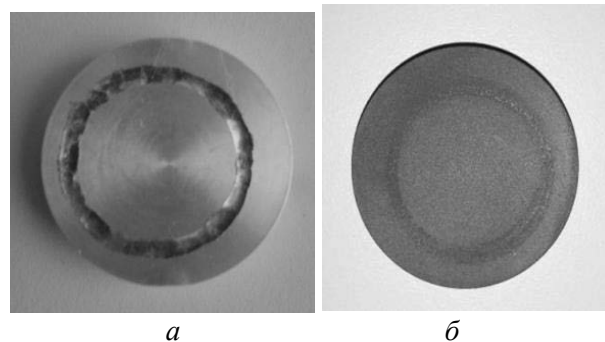


Рис. 3. Образцы после триботехнических испытаний: а – без покрытия; б – с МДО-слоем

В результате установлено, что интенсивность изнашивания образца из сплава АК4-1 без покрытия составила  $584,05 \cdot 10^{-8}$  г/м, при этом износ контртела не зафиксирован. Интенсивность изнашивания образца с МДО-покрытием, полученного при режиме № 4, составила  $6,19 \cdot 10^{-8}$  г/м, что в 94 раза ниже, чем для сплава АК4-1. Как отмечалось выше, для других образцов с МДО-покрытием наблюдалось увеличение массы, что говорит об отсутствии износа. Максимальная интенсивность изнашивания контртела при взаимодействии с МДО-покрытием составила  $181,45 \cdot 10^{-8}$  г/м, минимальная –  $61,26 \cdot 10^{-8}$  г/м.

В связи с тем, что износ МДО-слоя наблюдался лишь на одном образце, получить уравнение регрессии интенсивности изнашивания МДО-покрытия не представлялось возможным. Однако для интенсивности изнашивания контртела уравнение регрессии имеет вид:

$$I_k = (234,8 - 27,6 \cdot C_{\text{кон}} + 6,5 \cdot C_{\text{жс}} - 0,65 \cdot C) \cdot 10^{-8}.$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что покрытия, формируемые методом МДО, позволяют значительно повысить износостойкость алюминиевых сплавов. В то же время высокая микротвердость покрытия приводит к увеличению износа контртела. В связи с этим при проектировании узлов трения, в которых применяются МДО-покрытия, необходимо уделять особое внимание организации смазки и исключению режима сухого трения.

Микротвердость формируемого покрытия преимущественно зависит от конденсаторной емкости установки, которая оказывает непосредственное влияние на плотность тока. Толщина формируемого покрытия при этом в большей степени зависит от состава электролита, а именно – от концентрации компонентов.

Анализ уравнения для интенсивности изнашивания контртела  $I_k$  показал, что на износ контртела наибольшее влияние оказывает емкость конденсаторов установки МДО и концентрация едкого калия в электролите. При этом увеличение обоих факторов приводит к снижению интенсивности изнашивания контртела. Увеличение емкости установки снижает микротвердости МДО-слоя что, в свою очередь, уменьшает износ индентора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никитин В. И., Тихонов А. К., Никитин К. В.** О концепции развития производства автомобильных отливок из Al-сплавов // *Литейное производство*. 2012. № 8. С. 2–8. [ V. I. Nikitin, A. K. Tikhonov and K. V. Nikitin, "Concept of production development of automobile castings from Al-alloys", (in Russian), in *Liteinoe proizvodstvo*, no. 8, pp. 2-8, 2012. ]

2. **Goodman J.** Nikasil and Alusil // *Engine Professional*. 2008. С. 18–22. [ J. Goodman, "Nikasil and Alusil", in *Engine Professional*, pp. 18-22. 2008. ]

3. **Wang Y., Tung S. C.** Scuffing and wear behavior of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore // *Wear*. 1999. Т. 226-229. № 2. С. 1100–1108. [ 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. ]

4. **Эпельфельд А. В.** Микродуговое окислирование // 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. ]

5. **Федоров В. А., Великосельская Н. Д.** Влияние микродугового окислирования 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. ]

6. **Koshuro V. A., Nechaev G. G., Lyasnikova A. V.** Composition and Structure of Coatings Formed on a VT16 Titanium Alloy by Electro Plasma Sputtering Combined with Microarc Oxidation // *Technical Physics*. 2014. Т.59. №10. С. 1570–1572. [ V. A. Koshuro, G. G. Nechaev, and A. V. Lyasnikova, "Composition and Structure of Coatings Formed on a VT16 Titanium Alloy by Electro Plasma Sputtering Combined with Microarc Oxidation", in *Technical Physics*, vol. 59, no. 10, pp. 1570-1572, 2014. ]

7. **Yerokhin A.L., Voevodin A. A., Lyubimov V. V., Zabinski J., Donley M.** Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminum alloys // *Surface and Coatings Technology*. 1998. № 110. С. 140–146. [ A. L. Yerokhin, A. A. Voevodin, V. V. Lyubimov, J. Zabinski, M. Donley, "Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminum alloys", *Surface and Coatings Technology*, no. 110, pp. 140-146, 1998.]

8. **Марков Г. А., Белеванцев В. И., Терлеева О. П., Шулупко Е. К., Кириллов В. И.** Износостойкость покрытий, нанесенных анодно-катодным микродуговым методом // Трение и износ. 1988. Т.9, № 2. С. 286–290. [ G. A. Markov, V. I. Belevantsev, O. P. Terleeva, E. K. Shulepko, V. I. Kirillov, "Wear resistance of coatings applied by anodic-cathodic microarc method", (in Russian), in *Trenie i iznos*, vol. 9, no. 2, pp. 286-290, 1988. ]

9. **Пономарев И. С., Кривоносова Е. А.** Анализ производительности процесса микродугового окислирования 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*, Ekaterinburg, Russia, 2015, pp. 152-157. ]

10. **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 basic of the static and dynamic tests results", (in Russian), in *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region*, no. 3, pp. 131-137, 2007. ]

## ОБ АВТОРАХ

11. **Желтухин А. В. и др.** Исследование характеристик МДО-покрытий на алюминиевом сплаве В95, сформированных в силикатно-щелочном электролите с присадкой наночастиц диоксида циркония // Научные ведомости. Серия: Математика, Физика. 2011. № 5 (100), вып. 22. С. 177–179. [ A. V. Zheltuhin, et. al. "Research of MDO-coatings of the aluminum alloy В95 wich are generated in the silicate-alkaline electrolyte with addition of zirconium dioxide nanoparticles", (in Russian), in *Nauchnye vedomosti. Seriya: Matematika, Fizika*, vol. 22, no. 5 (100), pp. 177-179, 2011. ]

12. **Дударева Н. Ю., Бутусов И. А., Кальщиков Р. В.** Влияние режимов микродугового оксидирования на механические свойства образцов из алюминиевого сплава // Вестник ПНИПУ. 2014. № 4, С. 102–117. [ N. Yu. Dudareva, I. A. Butusov, R. V. Kalschikov, "Influence of micro-arc oxidation modes on mechanical properties of aluminum alloy samples", (in Russian), in *Vestnik PNIPU*, no. 4, pp. 102-117, 2014. ]

13. **Лобанов В. К., Чуйкова Е. В.** Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2009. Вып. 46. URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/Materialovedcheskie-aspektyvybora-tehnologii-izgotovleniya-porshney-dvs#ixzz2rbiel4d>. [ 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, URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/Materialovedcheskie-aspektyvybora-tehnologii-izgotovleniya-porshney-dvs#ixzz2rbiel4d> ]

14. **Дударева Н. Ю., и др.** Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра ДВС // Вестник ИрГТУ, Т. 16, № 9, 2013. С. 63–70. [ N. Yu. Dudareva, et. al., Study of the micro-arc oxide coating effect on the wear resistance of the ICE cylinder liner (in Russian), in *Vestnik IrGTU*, vol.16, no. 9, pp. 63-70, 2013. ]

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). М.: Nauka, 1976. ]

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). М.: Mashinostroenie, 1981. ]

17. Nanovea [Электронный ресурс]. 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). М.: Mashinostroenie, 1977. ]

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

**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.

**МУСИН Нияз Хамитович**, ст. преп. каф. Двигатели внутреннего сгорания. Дипл. магистра техники и технологии (УГАТУ, 2009). Готовит дисс. в обл. повышения надежности деталей ДВС с применением покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования.

**КАЛЬЩИКОВ Роман Владимирович**, инж. каф. Двигатели внутреннего сгорания. Дипл. инженера (УГАТУ, 2009). Готовит дисс. в обл. повышения надежности деталей ДВС с применением покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования.

**ШЕХТМАН Семен Романович**, Декан вечернего факультета УГАТУ при УМПО, проф. каф. Технология машиностроения. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1993). Докт. техн. наук (МАТИ, 2015). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазменных покрытий.

**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 неуставившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

**КИШАЛОВ Александр Евгеньевич**, доц. каф. Авиац. теплотехники и теплоэнергетики УГАТУ, дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неуставившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

## METADATA

**Title:** Investigation of wear-resistance of MDO-coatings formed in silicate-alkaline electrolyte on aluminum alloy AK4-1

**Authors:** N. Yu. Dudareva<sup>1</sup>, N. Kh. Musin<sup>2</sup>, R.V. Kalshchikov<sup>3</sup>, S.R. Shehtman<sup>4</sup>, D.A. Ahmedzyanov<sup>5</sup>, A.E. Kishalov<sup>6</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>natalia\_jd@mail.ru, <sup>2</sup>niyaz.musin@yandex.ru, <sup>3</sup>roman\_for\_work@mail.ru, <sup>4</sup>shex@inbox.ru, <sup>5</sup>ada@ugatu.ac.ru, <sup>6</sup>kishalov@ufanet.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 3 (77), pp. 12-18, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The results of the investigation of the thickness, microhardness and wear resistance of coatings formed by microarc oxidation on samples of the aluminum alloy AK4-1 are presented. As the experiment factors, the concentrations of the electrolyte components (caustic potassium-KOH and sodium metasilicate-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) were used and the capacity of the installation. The investigations were carried out with the planning of a fractional factor experiment. It is established that the formed coating has a wear resistance of 94 times higher than that of the uncoated sample. Wear was not observed on the samples with high microhardness. The wear of the indenter was significant. Correlation analysis established that the installation capacity exerts the greatest influence on the micro-hardness. The layer thickness is affected by the concentration of the electrolyte components.

**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).

**MUSIN, Niyaz Khamitovich**, Assistant Professor of the Department of Internal Combustion Engines. Dipl. of Master of Engineering and Technology (USATU, 2009).

**KALSCHIKOV, Roman Vladimirovich**, Engineer of Internal Combustion Engines of USATU, Dipl. Engineer (USATU, 2009).

**SHECHTMAN, Semen Romanovich**, Dean of the Faculty of USATU evening at UMPO. Dipl. Mechanical Engineer (USATU, 1993). Dr. Sc. by powder metallurgy and composite materials (MATI 2015). Inst. in the field of vacuum ion-plasma coatings

**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).

**KISHALOV, Alexander Evgenievich**, Associate professor of aviation heat power engineering department of USATU. Graduate engineer of aircraft engines and power plants (USATU, 2006). Ph. D. Candidate of thermal, electrical rocket engines and power plants of aircraft (USATU, 2010).