

DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.04

УДК 621.436.12

**Н.Ю. Дударева, И.А. Бутусов, Р.В. Кальщиков**Уфимский государственный авиационный технический университет,  
Уфа, Россия**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

Представлены результаты экспериментального исследования влияния режимов микродугового оксидирования (МДО) на предел текучести и временное сопротивление образцов из алюминиевого сплава Д16Т. Приведено описание методики исследования, включающей формирование упрочненного слоя на поверхности лабораторных образцов методом МДО и исследование на прочность посредством эксперимента на растяжение.

Исследования проводились в соответствии с теорией планирования эксперимента для факторного эксперимента типа  $2^{3-1}$ . Процесс МДО осуществлялся с использованием щелочного электролита, поэтому в качестве факторов процесса МДО были выбраны концентрация компонентов электролита (едкого калия – КОН и жидкого стекла –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и электрические параметры процесса, определяемые емкостью конденсаторов технологической установки. Кроме условного предела текучести и временного сопротивления на поперечных шлифах определяли толщину и микротвердость МДО-слоя. На основе полученных данных были составлены уравнения регрессии и сделаны выводы о степени влияния режимов микродугового оксидирования на механические свойства образцов. Результаты исследования показали, что наличие МДО-слоя практически не влияет на величину временного сопротивления образцов, но способствует повышению условного предела текучести, значение которого в зависимости от режима процесса обработки может увеличиваться до 18 %.

Работа проведена с целью исследования перспектив использования технологического метода модификации поверхностей – микродугового оксидирования для повышения не только износостойкости, но и прочностных свойств деталей из алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** микродуговое оксидирование, прочность, поверхность, алюминиевые сплавы, микротвердость, временное сопротивление, условный предел текучести, надежность.

**N.Yu. Dudareva, I.A. Butusov, R.V. Kalschikov**

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

## **INFLUENCE OF MICRO-ARC OXIDATION MODES ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY SAMPLES**

This paper presents the results of the experimental study influence of micro-arc oxidation (MAO) modes on the yield strength and temporary resistance of aluminum alloy samples marked 2024. The paper describes the research methodology, including the formation of hardened MAO layer on the surface of experimental samples and strength studies by means of experiments with tensile.

The studies were conducted according to the theory of experiment planning for a fractional factorial experiment type  $2^{3-1}$ . MDO process was carried out using an alkaline electrolyte that is why component concentration of electrolyte (potassium hydroxide – KOH and sodium silicate –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and electrical parameters of the process, determined by capacity of technological plant, were selected as MAO process factors. Thickness and microhardness of MAO-layer on the cross-sections were determined as well as the yield strength and tensile strength. Regression equations were developed based on data that has been obtained and the conclusions about the degree of influence of modes of micro-arc oxidation on the mechanical properties of the samples were obtained. The results showed that the existence of MAO-layer had almost no effect on the tensile strength of the samples, but it promotes the yield strength increase, the value of which may be increased to 18% depending on the mode of processing.

This work was conducted to study the prospects of using the technological method of surface modification – micro-arc oxidation method to improve not only durability but also the strength characteristics of aluminum alloy details.

**Keywords:** micro-arc oxidation, strength, surface, aluminum alloys, microhardness, temporary resistance, conditional yield strength, reliability.

### **Введение**

Традиционно для изготовления многих деталей и узлов в машиностроении широко применяются сплавы из алюминия. Детали из алюминиевых сплавов на 25–30 % легче деталей, изготовленных, к примеру, из чугуна. При этом теплопроводность алюминиевых сплавов в 3–4 раза выше, чем у стали и чугуна, и это позволяет снизить температуру деталей, работающих в условиях высокой теплонапряженности [1, 2]. В качестве достоинства алюминиевых сплавов можно выделить хорошие механические свойства, сравнимые со свойствами сталей и чугунов [3]. Недостатками алюминиевых сплавов являются высокий коэффициент линейного расширения и низкая износостойкость [4, 5].

Для повышения износостойкости деталей из алюминиевых сплавов обычно используют различные покрытия и методы модификации поверхности [5]. В настоящее время развивается и получает распространение метод микродугового оксидирования (МДО), который относится к методам модификации поверхностей [6, 7].

Микродуговое оксидирование (МДО) на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных технологических методов поверхностной обработки деталей из Al, Mg, Ti, Ta, Nb, Zr, Вe и их сплавов [7–9]. Но в основном эта технология используется для создания многофункциональных износостойких, диэлектрических, теплостойких, декоративных и коррозионно-стойких покрытий на алюминиевых сплавах. Суть метода МДО заключается в формировании на поверхности детали под воздействием микродуговых разрядов высокопрочного керамического слоя (МДО-слоя), состоящего преимущественно из  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (корунда) и других окислов алюминия [7, 10]. Метод МДО позволяет получать покрытия толщиной до 400 мкм, обладающих высокой микротвердостью, 5–24 ГПа [7, 11, 12].

### **1. Постановка задачи**

Ранее проведенные исследования показали, что метод МДО способствует повышению износостойкости деталей пар трения в 2,5–3 раза [13], позволяет создавать теплозащитные поверхности [14–16]. В работах [17, 18] показано повышение механических свойств образцов из алюминиевых сплавов после МДО-обработки. В то же время в работах [19–21] обнаружено ухудшение механических свойств после МДО. Для объяснения этих противоречий авторами была высказана гипотеза, что механические свойства образцов зависят от режима процесса МДО. Эта гипотеза базируется на том, что условия проведения процесса упрочнения определяют комплекс физических воздействий на обрабатываемую поверхность и должны оказывать влияние на механические характеристики образцов с МДО-слоем.

Цель данной работы заключается в исследовании влияния режимов микродугового оксидирования на механические свойства образцов из алюминиевых сплавов.

### **2. Методика исследований**

В связи с тем, что МДО является сложным многофакторным процессом, при проведении исследований целесообразно использовать многофакторный эксперимент. Исследования проводились в соответствии с теорией планирования эксперимента для дробного факторного эксперимента типа  $2^{3-1}$ , матрица планирования представлена в табл. 1 [22]. При планировании эксперимента были определены факторы процесса микродугового оксидирования, которые

оказывают наиболее существенное влияние на свойства формируемого поверхностного слоя:

- концентрация едкого калия  $C_{\text{конц}}$ , г/л ( $X_1$ );
- концентрация жидкого стекла  $C_{\text{ж.с.}}$ , г/л ( $X_2$ ) в электролите;
- емкость конденсаторов установки  $C$ , мкФ ( $X_3$ ).

Обычно в качестве электрических параметров процесса МДО используют плотность тока [23]. Однако этот фактор не является независимым, так как на его значение напрямую влияет концентрация компонентов электролита и емкость конденсаторов установки [23, 24]. Поэтому в данном эксперименте для характеристики электрических параметров процесса МДО был выбран независимый фактор – емкость конденсаторов установки.

В качестве параметров выхода использовались:

- $y_1$  – среднее значение микротвердости МДО-слоя,  $H_{\mu}$ , ГПа;
- $y_2$  – среднее значение толщины МДО-слоя,  $h_{\text{ср}}$ , мкм;
- $y_3$  – условный предел текучести,  $\sigma_{0,2}$ , МПа;
- $y_4$  – временное сопротивление,  $\sigma_b$ , МПа.

Таблица 1

Матрица планирования дробного факторного эксперимента

Режим	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	+	–	–	+
2	+	+	+	+
3	+	–	+	–
4	+	+	–	–

Для работы применялись специально спроектированные лабораторные образцы, которые изготавливались из прутка деформируемого алюминиевого сплава Д16Т ГОСТ 21488–97. Выбор материала образцов обусловлен тем, что наиболее качественные МДО-слои формируются на деформируемых сплавах [7]. Геометрия и размеры образцов соответствовали ГОСТ 1497–84: диаметр – 3 мм, рабочая длина – 15 мм. Размеры образцов были выбраны наименьшими для того, чтобы эффект от покрытия был наиболее ощутим. Рабочая поверхность образцов обрабатывалась методом МДО, для чего было спроектировано и изготовлено специальное приспособление (рис. 1). Предварительной промывке и обезжириванию поверхность перед обработкой не подвергалась.

Процесс нанесения покрытия осуществлялся в электролите, который был приготовлен на основе дистиллированной воды с добавками жидкого стекла ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и едкого калия (KOH) в соответствии с планом эксперимента (табл. 2). Экспериментальная область по концентрации обоих компонентов электролита находилась в диапазоне 1–2 г/л и выбиралась на основе ранее проведенных исследований [25], которые показывают возможность получения качественных МДО-слоев в силикатно-щелочном электролите с малой концентрацией компонентов. Соотношение анодных ( $I_a$ ) и катодных токов ( $I_k$ ) в процессе обработки сохранялось постоянным  $I_a/I_k=1$ . Общий объем электролита, используемого для каждого опыта, составлял 30 литров. Формирование упрочненного слоя продолжалось до момента прекращения искрения на поверхности образцов и для режимов № 1, 2, 3 составило 3 часа, а для режима № 4 – 1,5 часа. Схема установки МДО показана на рис. 2.



Рис. 1. Образцы для исследования на прочность, закрепленные на приспособлении

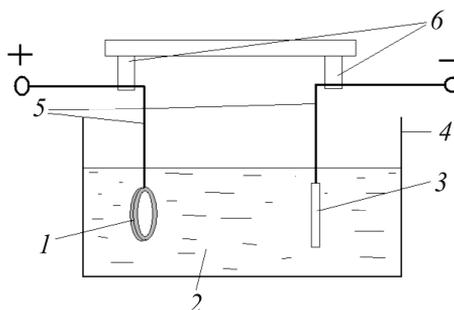


Рис. 2. Схема установки МДО: 1 – упрочняемый образец (анод); 2 – электролит; 3 – катод из нержавеющей стали; 4 – ванна, наполненная электролитом; 5 – токоподвод; 6 – крепление для электродов

Таблица 2

Значения факторов в эксперименте

Режим	Концентрация $C_{\text{конц}}$ , г/л	Концентрация $C_{\text{ж.с.}}$ , г/л	Емкость конденсаторов $C$ , мкФ
1	1	1	100
2	2	2	100
3	1	2	50
4	2	1	50

В результате на поверхности образцов были сформированы МДО-слои (рис. 3). В каждом опыте одновременно обрабатывались 4 образца, один из которых использовался для измерения толщины и микротвердости МДО-слоя, а остальные – для определения временного сопротивления и условного предела текучести.

Толщина и микротвердость МДО-слоя измерялись на поперечном шлифе, для чего образец разрезался и заливался в эпоксидную смолу. Для измерения использовали исследовательский комплекс на базе микротвердомера HVS-1000 и цифровой видеокамеры. Измерения микротвердости производились в соответствии с ГОСТ 9450–76 с использованием в качестве индентора пирамиды Викерса, на которую прикладывалась нагрузка  $P = 100$  г. На каждом образце осуществлялось не менее двух замеров.

Толщина определялась на фотографии шлифа, которая формировалась с использованием специальной программы для обработки изображений *NEXSIS ImageExpert MicroHardness 2*. При измерении толщины проводилось не менее трех замеров.

Исследования на прочность проводились в соответствии с ГОСТ 1497–84 на электромеханической машине *Instron 5982*, которая позволяет испытывать образцы при растяжении, сжатии и изгибе. Режимы и условия испытаний были следующие: скорость приложения нагрузки – 1 мм/мин, температура испытаний – от 20 до 22 °С. Обработка результатов осуществлялась при помощи управляющего программного обеспечения *Bluehill*.



Рис. 3. Образец для исследования на прочность с МДО-слоем

Излом образцов исследовался при помощи растрового электронного микроскопа *JEOL JSM-6490LV*.

### 3. Результаты и обсуждение

Поперечное изображение излома образцов после испытаний представлено на рис. 4. Анализ мест разрушения образцов без МДО-слоя (рис. 4, а, б) и образцов с МДО-слоем (рис. 4, в, г) позволяет утверждать, что характер разрушения не зависит от наличия или отсутствия покрытия. На изображении излома не видны сколы и отслоения МДО-слоя (см. рис. 4, в, г), что подтверждает его высокую адгезионную прочность.

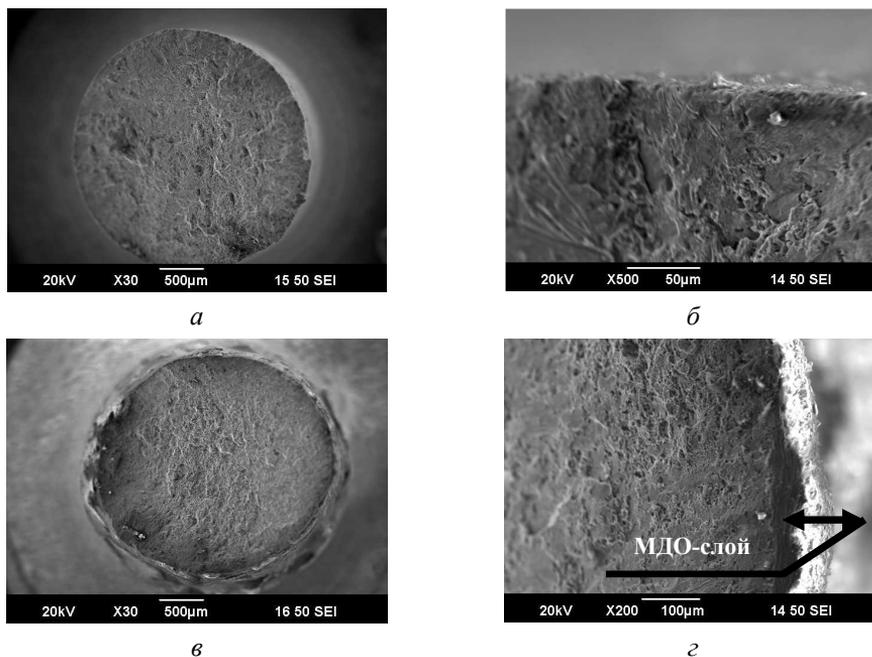


Рис. 4. Область разрушения образцов: *а* – образец без МДО-слоя,  $\times 30$ ; *б* – кромка образца без МДО-слоя,  $\times 500$ ; *в* – образец с МДО-слоем, обработанный на режиме № 1,  $\times 30$ ; *г* – кромка образца с МДО-слоем, полученным на режиме № 1,  $\times 200$

Результаты механических испытаний для каждого образца представлялись в виде диаграммы растяжения (рис. 5), а также в виде автоматически определяемых при испытаниях значений предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и временного сопротивления  $\sigma_B$ .

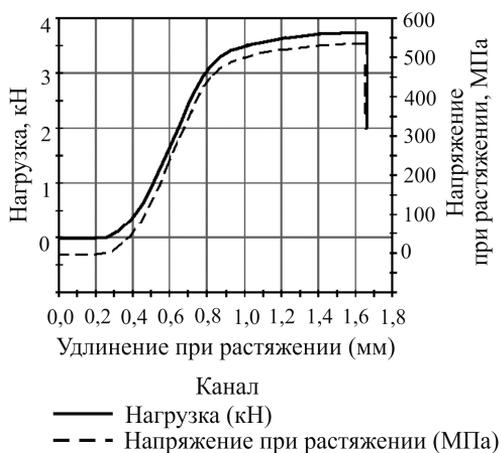


Рис. 5. Зависимость удлинения образца от нагрузки и напряжения при растяжении

Полученные значения микротвердости, толщины, условного предела текучести и временного сопротивления приведены в табл. 3. Все значения указаны с доверительным интервалом для доверительной вероятности 0,95.

Таблица 3

Результаты экспериментов

Режим	Микротвердость МДО-слоя, $H_{ц}$ , ГПа	Толщина МДО-слоя, $h_{ср}$ , мкм	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа
1	7,2±0,8	63,8±28,2	444,8±38,5	532,5±48,8
2	16,7±0	68,2±2,8	437,4±24,2	538,9±4,9
3	10,7±3,6	70,5±12,0	368,6±7,1	511,9±4,4
4	2,6±0,6	58,4±18,8	372,6±6,8	524,8±8,1
Без МДО	–	–	376,5±0,5	536,4±0,2

Из табл. 3 видно, что механические свойства образцов, а также толщина и микротвердость МДО-слоя зависят от режима обработки. При этом можно утверждать, что наличие МДО-слоя не оказывает существенного влияния на величину временного сопротивления. В большей степени наличие покрытия сказывается на значении условного предела текучести. Этот показатель увеличивается на 16–18 % для образцов, обработанных на режимах № 1 и 2, а на режимах № 3 и 4 остается неизменным.

Наблюдаемые эффекты можно объяснить тем, что МДО-слои в силу своих свойств (толщины, микротвердости) препятствуют упругой деформации материала при растяжении, приводя к повышению условного предела текучести. Однако вследствие значительной хрупкости МДО-слои разрушаются на начальной стадии пластической деформации образца и не оказывают влияния на значение временного сопротивления. Этот факт подтверждается также тем, что характер разрушения образцов с МДО и без МДО-слоя не меняется (рис. 4).

При оценке всех рассматриваемых параметров упрочненного слоя наилучшие показатели были получены на режиме обработки № 2 (см. табл. 3). При удовлетворительной толщине сформированного МДО-слоя (61,4 мкм) было выявлено наибольшее среди всех сравниваемых режимов обработки значение микротвердости поверхности (16,7 ГПа) одновременно с высоким показателем предела текучести (437,4 МПа).

Для оценки влияния технологических режимов были составлены уравнения регрессии с использованием программы *Statistica 6*:

$$\sigma_{0,2} = 311,3 - 1,65C_{\text{конц}} - 5,75C_{\text{ж.с}} + 1,41C,$$

$$\sigma_{\text{в}} = 491,4 + 9,65C_{\text{конц}} - 3,25C_{\text{ж.с}} + 0,35C,$$

$$h_{\text{ср}} = 56,3 - 3,85C_{\text{конц}} - 8,25C_{\text{ж.с}} + 0,031C,$$

$$H_{\mu} = -12,89 + 0,74C_{\text{конц}} + 8,76C_{\text{ж.с}} + 0,106C,$$

где  $h_{\text{ср}}$  – средняя толщина МДО-слоя, мкм;  $H_{\mu}$  – среднее значение микротвердости, ГПа;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести, МПа;  $\sigma_{\text{в}}$  – временное сопротивление, МПа;  $C_{\text{конц}}$  – концентрация в электролите, г/л;  $C_{\text{ж.с}}$  – концентрация жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  в электролите, г/л;  $C$  – емкость конденсаторов установки МДО, мкФ.

Анализируя уравнения регрессии и результаты экспериментов (см. табл. 3), можно утверждать, что режим процесса МДО влияет на механические свойства формируемых поверхностных слоев. Проводя анализ уравнений, важно учитывать величину коэффициентов регрессии, так как они показывают влияние каждого фактора процесса на свойства МДО-слоя. Кроме этого, необходимо обращать внимание на порядок величин того или иного фактора.

МДО-слои состоят из кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , которые располагаются в мелкокристаллической матрице [12]. Количество и соотношение этих фаз определяет микротвердость формируемой поверхности и зависит от режима процесса обработки. Из анализа уравнений регрессии видно, что на рост микротвердости МДО-слоя наибольшее влияние оказывает емкость установки. Увеличение емкости конденсаторов приводит к росту плотности тока, что способствует увеличению интенсивности процесса обработки, мощности микродуговых разрядов и формированию высокотвердой фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . В результате образуются МДО-слои, характеризующиеся значительной прочностью атомных и межкристаллитных связей. Это, в свою очередь, способствует повышению значений условного предела текучести и временного сопротивления, что и наблюдается в уравнениях регрессии. В связи с тем, что на микротвердость МДО-слоя влияет также и состав электролита, непосредственной взаимосвязи между значением микротвердости МДО-слоя с условным пределом текучести в рамках данного исследования выявлено не было.

## **Выводы**

Анализируя полученные результаты, можно утверждать, что наличие МДО-слоя, режимы его получения и свойства практически не влияют на величину временного сопротивления образцов, но оказывают влияние на условный предел текучести, увеличивая его.

## **Библиографический список**

1. Промышленные цветные металлы и сплавы / А.П. Смирягин [и др.]. – М.: Металлургия, 1974. – 559 с.
2. Моделирование теплонапряженного состояния головки цилиндра тракторного дизеля воздушного охлаждения / А.Н. Гоц [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 6. – С. 1061–1067.
3. Справочник металлиста: в 5 т. Т. 2. / под ред. А.Г. Рахштадта и В.А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 720 с.
4. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. – Киев: Наукова думка, 1986. – 556 с.
5. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. Кн. 2. / под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
6. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. Т. 2. / гл. ред. М.С. Поляк. – М.: Л.В.М. Скрипт, Машиностроение, 1995. – 688 с.
7. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И.В. Суминов [и др.]. – М.: Экомет, 2005. – 368 с.
8. Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В.И. Черненко [и др.]. – Л.: Химия, 1991. – 128 с.
9. Основы технологии микродугового оксидирования / Б.В. Шандров [и др.]. – М.: Альянс, 2008. – 80с.
10. Горчаков А.И., Щербаков Ю.В., Бородин Н.М. Формирование покрытий увеличенной толщины на сплавах алюминия при микродуговом оксидировании // *Технология металлов*. – 2006. – № 1. – С. 39–41.
11. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / А.А. Петросянц [и др.] // *Трение и износ*. – 1984. – № 2. – С. 350–354.
12. Особенности микроструктуры упрочненных поверхностных слоев, получаемых микродуговым оксидированием / В.П. Алехин [и др.] // *Физика и химия обработки материалов*. – 1991. – № 5. – С. 121–126.

13. Бутусов И.А., Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость поршня ДВС [Электронный ресурс] // Наука и образование. – 2013. – № 9. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/606017.html>. (дата обращения: 28.09.2014). DOI: 10.7463/0913.0606017.

14. Исследование керамикоподобных оксидных покрытий на цирконии, полученных при плазменном воздействии в электролитах / А.М. Борисов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейронные исследования. – 2013. – № 4. – С. 76–80.

15. О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, на силумине АК9ПЧ / М.М. Криштал [и др.] // Вектор науки Тольятт. гос. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 169–172.

16. Микродуговое оксидирование циркония как способ создания элементов теплоразвязки в космических аппаратах [Электронный ресурс] / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов, О.П. Баженова, Т.В. Рожкова // Наука и образование. – 2014. – № 8. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/724519.html> (дата обращения: 28.09.2014). DOI: 10.7463/0814.0724519.

17. Ефремов А.П. Коррозионно-механическая прочность алюминиевых сплавов и покрытий в минерализованных сероводородсодержащих средах: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. – М., 1992.

18. Изучение влияния покрытия, выполненного микродуговым оксидированием, на жесткость и прочность протяженных силовых элементов космического аппарата [Электронный ресурс] / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов // Наука и образование. – 2014. – № 7. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717592.html>. (дата обращения: 28.10.2014). DOI: 10.7463/0714.0717592.

19. Evaluation of the mechanical properties of microarc oxidation coatings and 2024 aluminium alloy substrate / Xue Wenbin, Wang Chao, Deng Zhiwei, Chen Ruyi, Li Yongliang and Zhang Tonghe // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2002. – Vol. 14. – No. 44. DOI: 10.1088/0953-8984/14/44/407

20. Structure and tensile/wear properties of microarc oxidation ceramic coatings on aluminium alloy / Tong Wei Bo, Yuan Yan Feng, Wermmin Liu, Jun Tian // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2004. – Vol. 14. – No. 6. – P. 1162–1168.

21. Малышев В.Н. Оценка упрочнения алюминиевых сплавов микродуговой обработкой по результатам статических и динамических испытаний // Технические науки. Машиностроение и машиноведение. – 2007. – № 3. – С. 131–137.

22. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

23. Plasma electrolysis for surface engineering / A.L. Yerokhin [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 122. – P. 73–79.

24. Влияние параметров микродугового оксидирования на свойства покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах / О.Н. Дунькин, А.П. Ефремов, Б.Л. Крит [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 2. – С. 49–53.

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

## References

1. Smiriagin A.P. [et al.] Promyshlennye tsvetnye metally i splavy [Industrial Non-ferrous Metals and Alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 559 p.

2. Gots A.N. [et al.] Modelirovanie teplonapriazhennogo sostoiianiia golovki tsilindra traktornogo dizelia vozdušnogo okhlazhdeniia [Modeling of Thermal Stress State of the Cylinder Head of Tractor Diesel with Air Cooling]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 6, pp. 1061-1067.

3. Spravochnik metallista [Directory of Metalworker]. Eds. A.G. Rakhshadt, V.A. Brostrem. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 720 p.

4. Dubrovskii I.M., Egorov B.V., Ryaboshapka K.P. Spravochnik po fizike [Handbook on the Physics]. Kiev: Naukova dumka, 1986. 556 p.

5. Trenie, iznashivanie i smazka. Spravochnik [Friction, Wear and Lubrication. Directory]. Eds. I.V. Kragelskii, V.V. Alisin. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 358 p.

6. Tekhnologiya uprochneniia. Tekhnologicheskie metody uprochneniia [Hardening Technology. Technological Methods of Hardening]. Ed. M.S. Polyak. Moscow: L.V.M. – Skript, Mashinostroenie, 1995. 688 p.

7. Suminov I.V. [et al.] Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie [Micro-arc Oxidation: Theory, Technology, Equipment]. Moscow: Ekomet, 2005. 368 p.

8. Chernenko V.I. [et al.] Poluchenie pokrytii anodno-iskrovym elektrolizom [Obtaining coating by the anode-spark electrolysis method]. Leningrad: Khimiya, 1991. 128 p.

9. Shandrov B.V. [et al.] Osnovy tekhnologii mikrodrugovogo oksidirovaniya [Basics of micro-arc oxidation technology]. Moscow: Alyans, 2008. 80 p.

10. Gorchakov A.I., Shcherbakov Iu.V., Borodin N.M. Formirovanie pokrytii uvelichennoi tolshchiny na splavakh aliuminiya pri mikrodrugovom oksidirovanii [Formation of the coatings with increased thickness on aluminum alloys by microarc oxidation method]. *Tekhnologiya metallov*, 2006, no. 1, pp. 39-41.

11. Petrosiants A.A. [et al.] Kinetika iznashivaniya pokrytii, nanesennykh metodom mikrodrugovogo oksidirovaniya [The Wear Kinetics of Coatings Deposited by Micro-arc Oxidation]. *Trenie i iznos*, 1984, no. 2, pp. 350-354.

12. Alekhin V.P. [et al.] Osobennosti mikrostruktury uprochnennykh poverkhnostnykh sloev, poluchaemykh mikrodrugovym oksidirovaniiem [Features of the Microstructure of Hardened Surface Layers Produced by Micro-arc Oxidation]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1991, no. 5, pp. 121-126.

13. Butusov I.A., Dudareva N.Yu. Influence of Micro-arc Oxidation on Durability of IC-engine's Piston. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no. 9, available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/606017.html>. DOI: 10.7463/0913.0606017.

14. Borisov A.M. [et al.] Issledovanie keramikopodobnykh oksidnykh pokrytii na tsirkonii, poluchennykh pri plazmennom vozdeistvii v elektrolitakh [Research of Oxide Coatings on Zirconium Obtained by Plasma Exposure in Electrolytes]. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neironnye issledovaniya*, 2013, no. 4, pp. 76-80.

15. Krishtal M.M. [et al.] O teploprovodnosti oksidnykh pokrytii, poluchennykh metodom mikrodrugovogo oksidirovaniia, na silumine AK9PCh [Thermal Conductivity of Oxide Coatings Produced by Micro-arc Oxidation on Silumin AK9PCh]. *Vektor nauki Toliatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 169-172.

16. Shatalov V.K., Shtokal A.O., Rykov E.V., Dobrosovestnov K.B., Bazhenova O.P., Rozhkova T.V. Zirconium Micro-arc Oxidation as a Method for Producing Heat Insulation Elements in Spacecraft. *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 8, available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/724519.html>. DOI: 10.7463/0814.0724519.

17. Efremov A.P. Korrozionno-mekhanicheskaya prochnost' alyuminiyevykh splavov i pokrytii v mineralizovannykh sero-vodorodsoderzhashchikh sredakh [Corrosion mechanical strength aluminum alloys and coatings in mineralized gray-hydrogenous media]. Moscow: Synopsis, 1999.

18. Shatalov V.K., Shtokal A.O., Rykov E.V., Dobrosovestnov K.B. Investigating the Influence of Micro-Arc Oxide Coating on Rigidity and Strength of Long Force Elements of Spacecraft. *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 7, available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717592.html>. DOI: 10.7463/0714.0717592

19. Wenbin Xue, Chao Wang, Zhiwei Deng, Ruyi Chen, Yongliang Li and Tonghe Zhang. Evaluation of the mechanical properties of microarc oxidation coatings and 2024 aluminium alloy substrate. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, vol. 14, no. 44. DOI: 10.1088/0953-8984/14/44/407

20. Wei Tong Bo, Yan Feng Yuan, Liu Wermin, Tian Jun. Structure and tensile/wear properties of microarc oxidation ceramic coatings on aluminium alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2004, vol. 14, no. 6, pp. 1162-1168.

21. Malyshev V.N. Otsenka uprochneniya alyuminiyevykh splavov mikrodugovoi obrabotkoi po rezul'tatam staticheskikh i dinamicheskikh ispytaniy [Evaluation of Hardening of Aluminum Alloys by Micro-arc Treatment Based on the Results of Static and Dynamic Tests]. *Tekhnicheskie nauki. Mashinostroenie i mashinovedenie*, 2007, no. 3, pp. 131-137.

22. Adler Iu.P. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovii [Planning of Experiment with Finding the Optimal Conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 280 p.

23. Yerokhin A.L. [et al.] Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 122, pp. 73-79.

24. Dunkin O.N., Efremov A.P., Krit B.L. [et al.] Vliyanie parametrov mikrodugovogo oksidirovaniya na svoystva pokrytii, formiruemykh na alyuminiyevykh splavakh [The influence of parameters on the properties of micro-arc oxidation coatings formed on aluminum alloys]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2000, no. 2, pp. 49-53.

25. Dudareva N.Iu. Vliyanie rezhimov mikrodugovogo oksidirovaniya na svoystva formiruemoi poverkhnosti [Influence of modes of micro-arc oxidation on the properties of the formed surface]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 217-222.

### **Об авторах**

**Дударева Наталья Юрьевна** (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: natalia\_jd@mail.ru).

**Бутусов Илья Андреевич** (Уфа, Россия) – аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: butusrv.ilya@mail.ru).

**Кальщиков Роман Владимирович** (Уфа, Россия) – аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: roman\_for\_work@mail.ru).

### **About the authors**

**Natalia Yu. Dudareva** (Ufa, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Internal Combustion Engines, Ufa State Aviation Technical University (12 Karl Marx str., 450000, Ufa, Russian Federation, e-mail: natalia\_jd@mail.ru).

**Ilya A. Butusov** (Ufa, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Internal Combustion Engines, Ufa State Aviation Technical University (12 Karl Marx str., 450000, Ufa, Russian Federation, e-mail: butusrv.ilya@mail.ru)

**Roman V. Kalschikov** (Ufa, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Internal Combustion Engines, Ufa State Aviation Technical University (12 Karl Marx str., 450000, Ufa, Russian Federation, e-mail: roman\_for\_work@mail.ru).

Получено 19.09.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Дударева Н.Ю., Бутусов И.А., Кальчиков Р.В. Влияние режимов микродугового оксидирования на механические свойства образцов из алюминиевого сплава // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 102–117. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.04

Please cite this article in English as:

Dudareva N.Y., Butusov I.A., Kalschikov R.V. Influence of micro-arc oxidation modes on mechanical properties of aluminum alloy samples. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 4. Pp. 102-117. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.04