

УДК 620.197

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛАСТИН ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С МДО-ПОКРЫТИЕМ*

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

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

Проведены исследования излучающей способности покрытий на алюминиевых сплавах, нанесенных микродуговым окислением в электролитах различного состава при изменении технологических режимов. Определены режимы обработки для получения покрытий с коэффициентом излучения более 0,9. Представлены результаты сравнительного анализа по излучательной способности покрытий: МДО-покрытий и покрытий, применяемых на теплоизлучающих пластинах инфракрасных нагревателей (лакокрасочное и гальваническое покрытия). Исследования показали, что по техническим характеристикам нагреватели с МДО-покрытием не уступают существующим нагревателям по излучательной способности.

Ключевые слова: МДО-покрытие, коэффициент излучения, инфракрасные нагреватели.

STUDY OF EMISSIVITY INFRARED HEATERS COATED WITH MAO COATING

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

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

The researches of emissivity coatings on aluminum alloys deposited by microarc oxidation in electrolytes of different composition changing technological regimes have been conducted. The modes of processing to produce coatings with emissivity greater than 0.9 have been defined. The results of comparative analysis emissivity coatings: MAO coatings and coatings used on the heat radiating plate infrared heaters (paint and plating) are shown. The studies have shown that the technical characteristics heaters with MAO coating are as good as the existing heaters on emissivity.

Keywords: MAO coating emissivity, infrared heaters.

В настоящее время задача энергосбережения является актуальной во многих сферах деятельности. В частности, это касается систем теплоснабжения. В последнее время для обогрева бытовых и промышленных объектов широко применяются электрические панельные нагреватели с алюминиевыми излучающими пластинами. Достоинством таких нагревателей по сравнению с чугунными и стальными радиаторами водяного отопления является высокая теплоотдача, низкая стоимость, удобство монтажа и современный дизайн.

С другой стороны, передача тепла излучением у чистого алюминия низкая. Коэффициент излучения алюминия составляет 0,1. Для увеличения коэффициента излучения пластины инфракрасных (ИК) нагревателей покрывают порошковой краской или применяют гальваническое анодирование.

Окрашивание поверхности радиаторов снижает теплопроводность, что приводит к снижению теплоотдачи. К недостаткам анодирования можно отнести

необходимость предварительной подготовки и использования кислот в электролитах, что экологически небезопасно.

В работе предлагается наносить излучающие покрытия на поверхности ИК-нагревателей методом микродугового окисления (МДО), так как этот процесс более производителен и экологичен [1–3].

На первом этапе работы были выявлены технологические режимы обработки, позволяющие получать покрытия с наибольшим коэффициентом излучения ϵ на образцах из различных алюминиевых сплавов. Были проведены исследования по теплостойкости, шероховатости, электрической прочности, удельному сопротивлению полученных покрытий.

Для проведения исследования был использован тиристорный источник тока, который позволяет осуществлять независимую регулировку анодной и катодной составляющих тока и одновременно стабилизировать средние величины этих токов, что существенно упрощает проведение процесса МДО и ведет

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

к улучшению качества получаемых покрытий. Источник имеет следующие технические характеристики: диапазон регулируемых напряжений до 1000 В; диапазон регулируемых токов до 50 А/дм²; погрешность стабилизации тока до 5 %.

Время обработки в наибольшей степени зависит от состава электролита и влияет на толщину покрытий. Максимальное время обработки составляло 90 мин, а минимальное время выбиралось для каждого электролита опытным путем. Соотношение анодной и катодной составляющей по току влияет на толщину и твердость получаемых покрытий. Увеличение катодной составляющей приводит к получению более твердых, но менее толстых покрытий по сравнению с обработкой при увеличенной анодной составляющей по току. В работе I_k/I_a варьировалась в пределах 0,8 до 1,2.

Напряжение анодной составляющей зависит от силы тока, электросопротивления электролита и материала обрабатываемого изделия. Увеличение напряжения ведет к снижению энергоэффективности процесса и увеличению стоимости конечной продукции. В исследованиях значение напряжения анодной составляющей не превышало 600 В.

Увеличение температуры электролита в процессе обработки ведет к увеличению пористости, снижению прочности и расходу электролита на испарение. Температура электролита не должна превышать 40 °С, поэтому для обработки использовалась электролитическая ванна с контуром водяного охлаждения.

Для исследования были выбраны широко распространенные алюминиевые сплавы: А5, Д-16, АМг-6, АМг-3 и АМц. Размеры образцов 100×100×3 мм, обработка производилась с двух сторон.

Обработка проводилась в слабощелочных водных электролитах следующих типов:

№ 1 – силикатно-щелочной (содержит NaOH и Na₂SiO₃) – цвет покрытия серый;

№ 2 – фосфатно-боратный (содержит Na₂HPO₄, Na₂B₄O₇, NaF) – цвет покрытия белый;

№ 3 – боратный (содержит H₃BO₃ и NaOH) – цвет покрытия светло-серый;

№ 4 – фосфатный, с добавками солей щелочных металлов (содержит Na₂HPO₄, K₄[Fe(CN)₆], Na₂MoO₄) – цвет покрытия – насыщенный черный.

Толщину покрытий контролировали толщиномером ТТ-260 с вихретоковым датчиком N-01, на поперечных шлифах – при помощи оптического микроскопа Neophot-32.

При обработке в электролите № 1 качественные равномерные покрытия получены на всех сплавах при следующих режимах:

- время обработки $t = 10\text{--}60$ мин;
- плотность тока $i = 5\text{--}20$ А/дм²;
- соотношения анодной и катодной составляющей по току $I_k/I_a = 0,8\text{--}1,2$;
- напряжение анодной составляющей $U_a = 530\text{--}600$ В;
- температура электролита $T = 15\text{--}40$ °С.

Для обеспечения необходимой толщины покрытия 20 ± 5 мкм время обработки для различных сплавов

$t = 2\text{--}5$ мин; процесс вели при следующих технологических параметрах: $i = 15$ А/дм², $I_k/I_a = 1$, $U_a = 550\text{--}560$ (в зависимости от сплава), $T =$ до 30 °С. Время обработки для различных сплавов составляло: А5 – 12 мин, АМг3 – 12 мин, АМг6 – 15 мин, АМц – 20 мин, Д-16 – 18 мин.

При обработке в фосфатно-боратном электролите № 2 качественные покрытия получены для всех сплавов, за исключением сплава АМГ-6. Режимы обработки:

- время обработки $t = 2\text{--}5$ мин;
- плотность тока $i = 20\text{--}40$ А/дм²;
- соотношения анодной и катодной составляющей по току $I_k/I_a = 0,8\text{--}1,2$;
- напряжение анодной составляющей $U_a = 200\text{--}400$ В;
- температура электролита $T = 15\text{--}40$ °С.

Покрытие на образцах из материала АМГ-6 получается с дефектами, углы обгорают. Это можно объяснить большим содержанием в сплаве магния, который активно взаимодействует с большим количеством элементов в составе электролита.

При обработке в боратном электролите № 3 качественные покрытия получены для всех сплавов:

- время обработки $t = 60\text{--}90$ мин;
- плотность тока $i = 5\text{--}20$ А/дм²;
- соотношения анодной и катодной составляющей по току $I_k/I_a = 1$;
- напряжение анодной составляющей $U_a = 590\text{--}650$ В;
- температура электролита $T = 15\text{--}40$ °С.

Толщина покрытия на образцах всех сплавов, полученная в данном электролите, не превышает 15 мкм. Поэтому обработка деталей большой площади в данном электролите экономически нецелесообразна.

При обработке в электролите № 4 качественные покрытия получены для всех сплавов:

- время обработки $t = 5\text{--}15$ мин;
- плотность тока $i = 10\text{--}20$ А/дм²;
- соотношения анодной и катодной составляющей по току $I_k/I_a = 1$;
- напряжение анодной составляющей $U_a = 200\text{--}300$ В;
- температура электролита $T = 15\text{--}40$ °С.

Для определения микроструктуры были изготовлены поперечные шлифы образцов. Поверхность шлифов перед исследованием подвергалась химическому травлению. Исследования проводили с использованием металлографического исследовательского комплекса SIAM на базе оптического микроскопа Neophot 32 при увеличениях ×100–800.

В результате исследования выявлено, что в покрытии на всех образцах можно выделить две характерные зоны, имеющие достаточно четкие границы раздела:

- внешний очень пористый и непрочный слой, содержащий муллит;
- переходный твердый слой, примыкающий к металлу, содержащий преимущественно кристаллический оксид алюминия двух модификаций $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, которые образуются только при участии микродуговых разрядов.

На образцах, полученных в силикатном электролите, наблюдается четкая граница раздела верхнего пористого, рыхлого слоя и плотного твердого слоя.

На образцах, полученных в фосфатно-боратном электролите, наблюдается снижение неровностей на поверхности образца, поверхность ровная, верхний рыхлый слой отсутствует или имеет минимальное значение по толщине. На образцах, полученных в фосфатном электролите с добавками солей переходных металлов, наблюдается значительная неровность поверхности и пористость покрытия.

Исследования показали, что характер пористости оксидного покрытия зависит от плотности и соотношения токов, времени микроплазменной обработки и состава электролита. Из результатов исследования выявлено, что минимальная пористость покрытий получена в фосфатно-боратном электролите. Максимальная пористость покрытий получена в фосфатном электролите с добавками солей переходных металлов.

Результаты исследования стехиометрического состава МДО-покрытий приведены в работе [2], выявлено, что в поверхности покрытия присутствуют оксид алюминия Al_2O_3 , который получается в результате плазмохимических реакций, и элементы, перешедшие в покрытие из электролита в результате химических реакций (SiO_2 , P_2O_5 и др.). Также в покрытии в небольших количествах присутствуют оксиды металлов, содержащихся в алюминиевых сплавах. Например, для сплава Д16 наблюдается повышенное содержание в покрытии оксида меди, поскольку содержание меди в этом сплаве составляет 3,8–4,9 %.

Шероховатость покрытия, сформированного МДО, определяли с помощью профилометра Г145. Значение шероховатости покрытия определялось как среднее арифметическое между пятью измерениями на отрезке 5 мм на одном образце.

Шероховатость варьировалась от 2,2 до 4,5 Ra. Максимальное значение шероховатости (от 4 до 4,5 Ra) – на образцах, обработанных в фосфатном электролите с добавками солей переходных металлов. Минимальное значение шероховатости (от 2,2 до 2,5 Ra) достигнуто на образцах, обработанных в фосфатно-боратном электролите. Значения шероховатости образцов, обработанных в силикатном электролите, составило 3–3,8 Ra.

Для определения теплостойкости МДО-покрытий образцы выдерживали при температурах 400, 500 и 600 °С в течение 60 мин. Теплостойкость покрытия определяли по изменению внешнего вида образцов с покрытием.

Результаты исследований показали, что на образцах, обработанных в фосфатном электролите с добавками солей переходных металлов, происходит отслаивание покрытия при температуре 400 °С. На образцах, обработанных в остальных электролитах, не наблюдалось отслоения покрытия, изменения цвета, появления трещин и прочих дефектов (рис. 1).

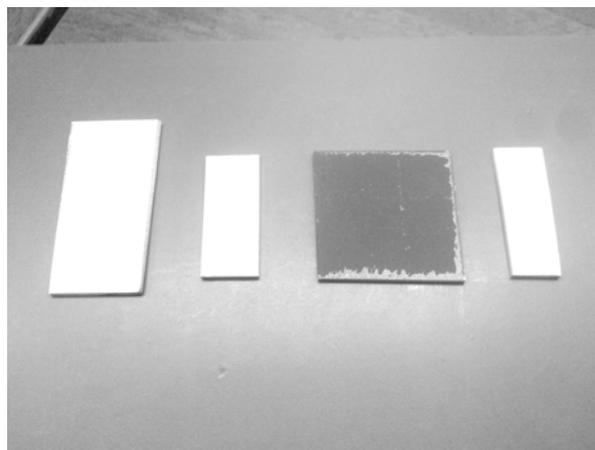
Испытания электрической прочности покрытия проводили на универсальной пробойной установке УПУ-1М переменным напряжением до 10 кВт.

Результаты исследования показали, что напряжение пробоя для образцов составляет:

– обработанных в силикатном электролите – 620–680 В;

– обработанных в фосфатно-боратном электролите – 420–450 В;

– обработанных в фосфатном электролите с добавками солей переходных металлов – 280–320 В.



а



б

Рис. 1. Внешний вид образцов с покрытием:
а – до испытания на теплостойкость;
б – после испытания на теплостойкость

Удельное сопротивление измеряли на приборе «тераомметр Е6-13А». Выявлено, что в зависимости от выбора электролита, параметров обработки и марки алюминиевого сплава удельные сопротивления покрытий изменялись в пределах от $6 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{14}$ Ом·м.

Измерение коэффициента E_n проводили рефлектометром ТРМ-И. Результатом контроля является среднее арифметическое значение из 3-х измерений на образце.

Измерение толщины оксидного покрытия МДО проводилось прибором ТТ-260 с вихретоковым датчиком. Измерение проводили в пяти точках образца. Результатом контроля является среднее арифметическое значение.

Результаты измерений E_n и толщины покрытий представлены в таблице.

Результаты экспериментальных измерений толщины и коэффициентов излучения

Электролит	Технологические режимы обработки	Алюминиевый сплав (номер образца)	Толщина, мкм	Коэффициент излучения En
Силикатный (содержит КОН и Na_2SiO_3)	$I_k/I_a = 1$ $I_a = I_k = 30 \text{ A}$ $U_a^+ = 508\text{--}560 \text{ B}$ $t = 20 \text{ мин}$ $S = 2 \text{ Дм}^2$	A5	42	0,881
		Д-16	37	0,896
		АМг-6	41	0,903
		АМг-3	42	0,897
		АМц	26	0,843
Фосфатно-боратный (содержит Na_2HPO_4 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, NaF)	$I_k/I_a = 1$ $I_a = I_k = 60 \text{ A}$ $U_a^+ = 240\text{--}310 \text{ B}$ $t = 3 \text{ мин}$ $S = 2 \text{ Дм}^2$	A5	13	0,832
		Д-16	12	0,821
		АМг-3	18	0,845
		АМц	13	0,816
Фосфатный, с добавками солей щелочных металлов (содержит Na_2HPO_4 , $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, Na_2MoO_4)	$I_k/I_a = 1$ $I_a = I_k = 25 \text{ A}$ $U_a^+ = 220\text{--}250 \text{ B}$ $t = 10 \text{ мин}$ $S = 2 \text{ Дм}^2$	A5	15	0,891
		Д-16	18	0,884
		АМг-6	20	0,889
		АМг-3	19	0,891
		АМц	18	0,891

Для выявления зависимости влияния толщины покрытия на коэффициент излучения были проведены дополнительные исследования. Обработке подвергались образцы алюминиевых сплавов АМг-6 и А-5 в электролитах № 1 и 2. Для получения образцов с различной толщиной в процессе обработки изменялось время и плотность тока. Результаты исследований, представленные на рис. 2, показывают, что с увеличением толщины покрытия коэффициент излучения повышается, при этом толщина покрытия должна составлять не менее 20 мкм.

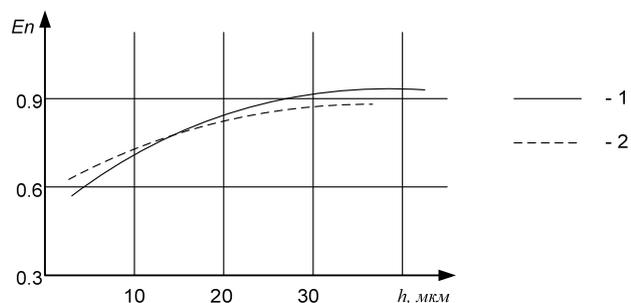


Рис. 2. Зависимость коэффициента излучения En от толщины покрытия:
1 — обработка в электролите № 1 сплава АМг-6;
2 — обработка в электролите № 2 сплава А-5

Исследования свойств покрытий позволили выявить технологические режимы обработки для получения покрытий с высоким коэффициентом излучения. Такими свойствами обладают образцы, полученные в фосфатно-боратном и силикатном электролитах.

При проведении исследований было выявлено следующее:

– нанесение покрытий в электролите № 3 нецелесообразно, поскольку полученные в данном электролите покрытия обладают низкими физико-механическими

характеристиками: низкой твердостью, большой пористостью и шероховатостью, низкой теплостойкостью (при нагреве происходит отслаивание покрытия);

– для нанесения покрытий на инфракрасные обогреватели приемлемыми являются силикатный и фосфатно-боратный электролиты;

– с увеличением толщины покрытия коэффициент излучения повышается, при этом толщина покрытия должна составлять не менее 20 мкм.

На следующем этапе исследований было нанесено МДО-покрытие на пластины ИК-нагревателей. Испытания излучательной способности проводили для пластин без покрытия № 1, с МДО-покрытием двух типов – силикатным (№ 2) и фосфатно-боратным (№ 3), а также с покрытием, полученным гальваническим анодированием (№ 4).

Схема испытания приведена на рис. 3. К пластине ИК-нагревателя тепло подводилось через электронагреватель (ТЭН). Через каждые 10 мин проводили замеры температуры поверхности нагревателя и нагреваемого тела (медной пластины).

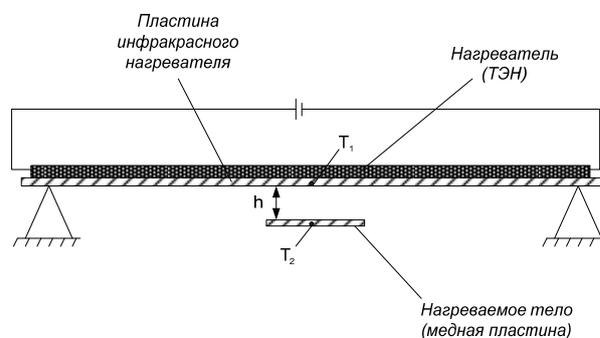


Рис. 3. Схема измерения температур нагревателя и нагреваемого тела

На гистограмме (рис. 4) видно, что МДО-покрытия по своим характеристикам близки к покрытиям, полу-

ченным гальваническим анодированием. Пластина без покрытия значительно нагревается и обладает меньшей теплоотдачей, что также подтверждается результатами измерения тепловизора (рис. 5).

Результаты измерений тепловизором подтверждают данные измерения температур контактным методом.

По полученным данным можно сделать вывод, что покрытия, получаемые методом МДО, практически не уступают по теплоотдаче анодным. Возможно увеличение коэффициента излучения путем подбора технологических режимов обработки.

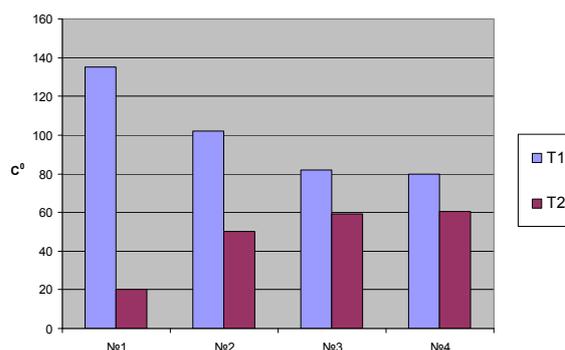


Рис. 4. Результаты измерений температур поверхности нагревателя (T1) и нагреваемого тела (T2)

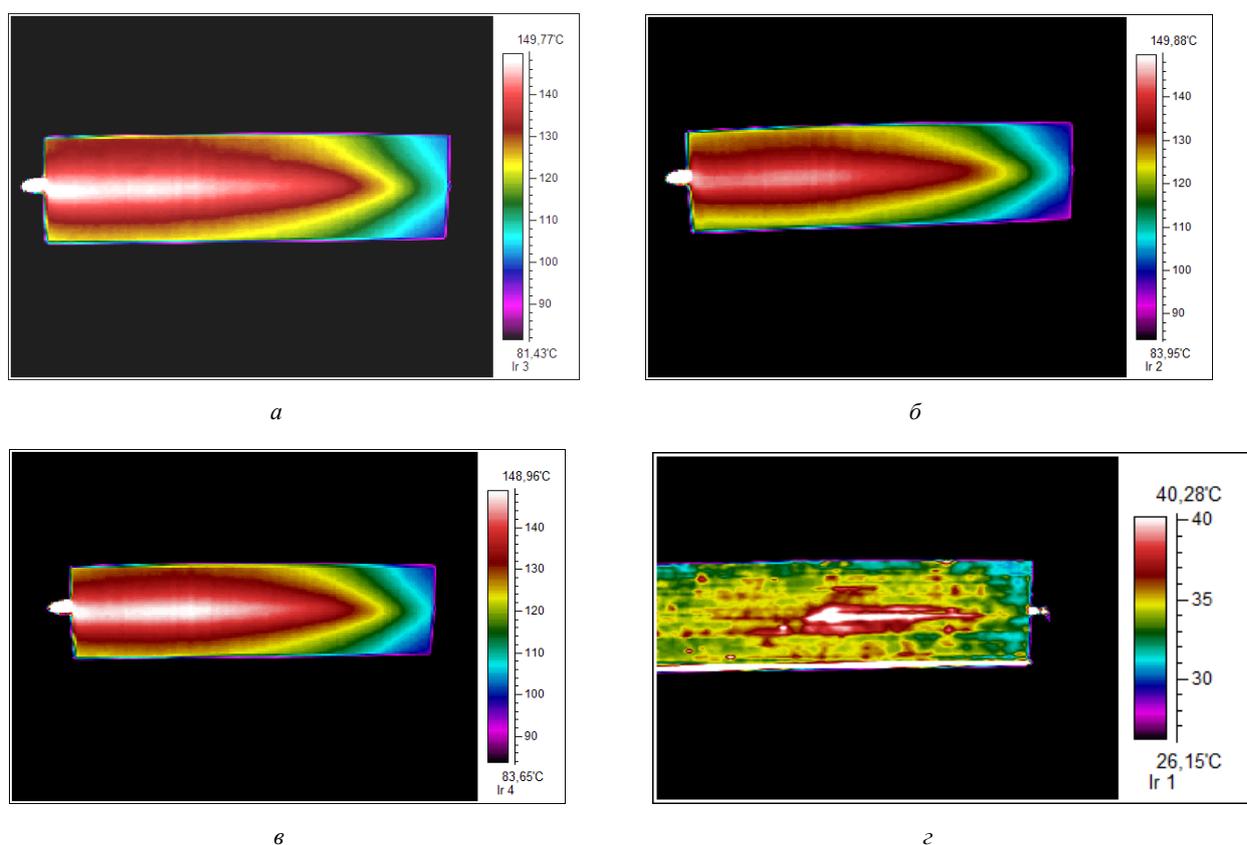


Рис 5. Распределение температур на поверхности нагревательных пластин:
 а – МДО-покрытие (фосфатно-боратный электролит); б – МДО-покрытие (силикатно-щелочной электролит);
 в – анодное покрытие; г – без покрытия

Технологии микродугового оксидирования могут быть рекомендованы для получения покрытий для ИК-нагревателей, так как по сравнению с гальваническим анодированием этот процесс более производительный, экологически безопасный и не требующий предварительной подготовки поверхности под покрытие.

Библиографические ссылки

1. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов [и др.]. М. : Экомет, 2005. 368 с.

2. Михеев А. Е., Трушкина Т. В., Гирн А. В., Ивасев С. С. Химические процессы при микродуговом оксидировании // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 212–216.
 3. Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. М. : Наука, 1971. 266 с.

References

1. Suminov I. V. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* [Microarc oxidation

theory, technology, equipment]. Moscow, Ekomet Publ., 2005, 368 p.

2. Miheev A. E., Trushkina T. V., Girn A. V., Ivasev S. S. [Chemical processes at microarc oxidation]. *Vestnik SibGAU*. 2013, vol. 48, no. 2, p. 212–216 (In Russ.).

3. Tihonov V. N. *Analiticheskaya himiya aluminiya* [Analytical chemistry of aluminum]. Moscow, Nayka Publ., 1971, 266 p.

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

УДК 62.347

МАЛОГАБАРИТНЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МОТОР-РЕДУКТОР

Ц. Г. Надараиа¹, И. Я. Шестаков², А. А. Фадеев²

¹ООО «КВОНТ»

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 75

E-mail: svoy_2010@list.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: yakovlevish@mail.ru

Представлен мотор-редуктор, в котором бесколлекторные двигатели расположены внутри цилиндрической зубчатой передачи. Такой мотор-редуктор может работать в режимах редуцирования, редуцирования с усилением крутящего момента, мультиплицирования и рекуперации при торможении. На основе предложенной конструкции мотор-редуктора показаны различные механизмы: двухпоточный и планетарный редуктор, силовой электромеханический привод для рулевых поверхностей.

Ключевые слова: мотор-редуктор, бесколлекторный двигатель.

SMALL-SIZED MULTI-MOTOR-REDUCER

C. G. Nadaraia¹, I. Y. Chestakov², A. A. Fadeev²

¹”CVONT” LLC

75, Svobodniy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

E-mail: svoy_2010@list.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: yakovlevish@mail.ru

The work presents the motor-reducer, which brushless motors are located inside the cylindrical gears. Such a motor-reducer can work in modes reduction, reduction with increased torque, multiplicity and regenerative braking. Based on the proposed construction of a motor-reducer, the different mechanisms: bi-flow and planetary gearbox, power Electromechanical actuator for steering surfaces are shown.

Keywords: geared motor, brushless motor.

Редукторы широко применяются в различных отраслях машиностроения. Для уменьшения габаритов и массы применяют мотор-редукторы, представляющие агрегат, в котором объединены электродвигатель и редуктор [1]. Такие мотор-редукторы выполняют только одну функцию – редуцирование, имеют значительные габариты и массу. Поэтому на рынке появляются вентильно-индукторные двигатели с редукторами [2]. Бесколлекторные двигатели могут работать в режиме генератора, имеют небольшие габариты и

массу, что позволяет создать мотор-редукторы с расширенной сферой применения.

Однако для развития современной авиационной и космической техники нужны многофункциональные устройства малой массы и габаритов.

Проектирование электромеханических приводов для самолётов 5-го поколения потребует, прежде всего, разработки и совершенствования основных элементов, входящих в электромеханический привод – электродвигателей и редукторов с лучшими массога-