

НГУ / В. А. Швец. Новосибирск : Издательство НГУ. 2002.

4. Керра эффект – Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс]. URL: [http://www.femto.com.ua/articles/part\\_1/1597.html](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1597.html). (дата обращения: 07.11.2011).

5. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1976. 367 с.

6. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры, 1961.

### References

1. Yihong Wu. Nano spintronics for data storage. *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology*. Ed. Nalva S. H. ACP, USA, 2004, vol. 10, p. 1–50.

2. Azzam R., Bashara N. *Jellipsometrija i poljarizovannyj svet* (Ellipsometry and polarized light). Moscow, Mir, 1981, p. 311–414.

3. Shvets V. A. *Ellipsometriya. Uchebnoe posobie dlya studentov starshikh kursov fizicheskogo fakul'teta NGU* (Ellipsometry. Study guide for senior students of the Physics department of Novosibirsk state university). Novosibirsk, Izdatel'stvo NGU, 2002.

4. *The Kerr effect – encyclopedia of physics and technology*. Available at: [http://www.femto.com.ua/articles/part\\_1/1597.html](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1597.html). (accessed 07.11.2011).

5. Krinchik G. S. *Fizika magnitnyh javlenij* (Physics of Magnetic Phenomena). Moscow, MSU, 1976.

6. Sokolov A. V. *Opticheskie svojstva metallov* (Optical Properties of Metals). Moscow, GIFML, 1961.

© Максимова О. А., Овчинников С. Г., Hartmann U., Косырев Н. Н., Варнаков С. Н., 2013

УДК 629.78.002.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ\*

А. Е. Михеев<sup>1,2</sup>, А. В. Гирн<sup>1,2</sup>, С. С. Ивасев<sup>1</sup>, И. В. Евкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: michla@mail.ru

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского, Сибирское отделение Российской академии наук Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38

<sup>3</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» Россия, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

*Получены образцы покрытий микродуговым окислением (МДО) на алюминиевой фольге для защиты элементов космического аппарата (КА) от воздействия стационарных плазменных двигателей (СПД). Выявлены оптимальные режимы обработки, проведены исследования структуры и свойств, защитных покрытий, нанесенных микродуговым окислением. Проведены исследования МДО покрытий на воздействие факторов хранения и эксплуатации, измерения терморадационных характеристик, электрического сопротивления и испытания на эрозионную стойкость. Приведено описание экспериментальной установки по определению воздействия плазмы на эрозионную стойкость МДО покрытий. Исследования показали, что характеристики покрытий, полученные методом МДО, удовлетворяют требованиям и могут быть использованы в качестве защитных покрытий космических аппаратов.*

*Ключевые слова:* космический аппарат, антиэрозионные покрытия, микродуговое окисление, плазма стационарных плазменных двигателей.

## INVESTIGATION OF THE SPACE VEHICLES COATINGS FEATURES

A. E. Miheev<sup>1,2</sup>, A. V. Girm<sup>1,2</sup>, S. S. Ivasev<sup>1</sup>, I. V. Evkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev 31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: michla@mail.ru

<sup>2</sup>Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS

50, building 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

<sup>3</sup>JSC “Information Satellite Systems” named after Academician M. F. Reshetnev 52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

*Samples of micro-arc oxidation coatings (MAO) on aluminum foil for the protection of the elements of spacecrafts (SC) against the stationary plasma thrusters (SPT) were obtained.*

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственные контракты № 14.513.11.0024 и № 02.G25.31.0043.

*The optimal treatment regimens were revealed, the investigations of the structure and properties of the protective coatings applied by micro-arc oxidation were carried out along with the investigations of MAO coatings for the impact factors of storage and use, measurements of the thermo-radiation characteristics of the electric resistance and erosion resistance test. The description of the experimental plant for determination of the plasma effects on the erosion resistance of MAO coatings is presented. The studies showed that the properties of coatings obtained by MAO satisfy the requirements and can be used as protective coatings for spacecrafts.*

*Keywords: spacecraft, anti-erosion coatings, microarc oxidation, coding, plasma of the stationary plasma thrusters.*

Для обеспечения функционирования космического аппарата (КА) в течение всего срока активного существования (САС) изделия необходимо, чтобы деградация ряда параметров аппаратуры и систем в процессе эксплуатации не приводила к нарушению его целевого использования [1–3].

Ужесточение требований по массе, энерговооруженности, и повышение требований к ресурсу и надежности КА приводят к уплотнению его компоновочной схемы. Как следствие, возрастает эрозионное воздействие СПД, используемых в качестве двигателей коррекции, на материалы конструкции КА. Обострение конкуренции на рынке космической техники вызывает необходимость в разработке новых и модернизации существующих защитных покрытий с требуемыми характеристиками.

Эрозионное воздействие плазменных струй СПД заключающееся в уносе материала конструкции, в результате длительной бомбардировки ионами газа, приводит к загрязнению внешних поверхностей КА продуктами распыления. Основной характеристикой данного вида воздействия является глубина эрозии, т.е. толщина распыленного слоя.

Предварительная оценка эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой стационарными плазменными двигателями, на поверхности панелей солнечных батарей и терморегулирующих покрытий (ТРП) радиатора системы терморегулирования (СТР) КА показала, что данное воздействие может оказать существенное дестабилизирующее воздействие на функционирование КА [1].

Предварительная оценка уровня эрозии углепластика КМУ-4, из которого состоит штанги и каркас БС, составляет от 103,5 до 827,6 мкм при длительности работы СПД 4500 часов. Максимальный уровень загрязнения. ТРП радиатора СТР продуктами эрозии панелей БС  $1,5 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>2</sup>. Полученное значение деградации коэффициента поглощения солнечной радиации  $\Delta A_S$  ТРП радиатора СТР вследствие загрязнения продуктами эрозии панелей БС равно 0,12 недопустимо высоко, так как допустимое значение деградации коэффициента поглощения  $\Delta A_S$  ТРП радиатора СТР платформы «Экспресс-1000Н» от воздействия всех факторов составляет 0,16.

Еще одно негативное воздействие плазменных струй СПД проявляется с эрозией электропроводящего слоя (ПЭП) с терморегулирующих покрытий КА, что приводит к накоплению статического заряда и возникновению электропробоев на поверхности КА.

При этом решить проблему эрозионного воздействия плазмы СПД на материалы элементов конструк-

ции КА с помощью разуплотнения компоновочной схемы КА невозможно в связи с ужесточением требований по массе и энерговооруженности КА.

Таким образом, с целью повышения качества изготовления изделий космической техники необходимы разработка и применение на критичных поверхностях КА покрытий с повышенной стойкостью к эрозионному воздействию плазмы СПД.

Проведенный предварительный анализ показал, что к веществам, обладающим наибольшей стойкостью к воздействию струи плазмы инертных газов (аргона, ксенона), относится оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) [2]. Оценочные расчеты показывают, что необходимая толщина защитного покрытия из  $Al_2O_3$  должна быть не менее 33 мкм.

В данной работе предлагается защищать элементы конструкции КА, попадающие под действие плазмы СПД, тонкой (до 100 мкм) алюминиевой фольгой с антиэрозионным покрытием из оксида алюминия, нанесенного микродуговым оксидированием (МДО), что приемлемо по весовым характеристикам [3–5].

Нанесение покрытий на фольгу проводилось на установке ИАТ-Т, источник питания которой позволяет осуществлять независимую регулировку анодной и катодной составляющих тока, и одновременно стабилизировать средние величины этих токов, что существенно упрощает проведение процесса МДО и ведет к улучшению качества получаемых покрытий. Источник имеет следующие технические характеристики: диапазон регулируемых напряжений – (0–800) В; диапазон регулируемых токов – (0–120) А/дм<sup>2</sup>; погрешность стабилизации тока до 5 %.

В качестве подложки использовались образцы фольги АД размерами 160x130 мм и толщиной 100 мкм. Микродуговое оксидирование образцов проводили в слабощелочных водных электролитах следующих составов: № 1 – NaOH (5 г/л) +  $Na_2SiO_3$  (10 г/л); № 2 – KOH (5 г/л) +  $Na_2SiO_3$  (10 г/л).

Покрытия формировали при различных соотношениях  $I_k / I_a$  (от 0,6 до 1,4), плотностях тока (в диапазоне от 10 до 40 А/дм<sup>2</sup>), продолжительности обработки составляла 10–60 мин. Толщину покрытий контролировали толщиномером ТТ260 и на поперечных шлифах при помощи оптического микроскопа. Микроструктуру защитного покрытия нанесенного МДО изучали с использованием металлографического исследовательского комплекса SIAM на базе оптического микроскопа ЛабoМет И2.

Металлографический анализ показал, что покрытие состоит из двух слоев:

1) внешнего пористого слоя, состоящего из смеси оксидов  $Al_2O_3 + SiO_2$ ;

2) твердого слоя, примыкающего к металлу и содержащего, преимущественно оксид алюминия двух модификаций  $\gamma-Al_2O_3$  и  $\alpha-Al_2O_3$ .

Зависимость толщины плотного слоя покрытия ( $h_{пл}$ ) от плотности тока представлена на рис. 1. Общая толщина покрытия складывается из толщины твердого (внутреннего) и наружного слоев, причем, при высоких значениях плотности тока закономерно соотношение:  $h_m / h_{общ} = (0,5 \div 0,6)$ .

С ростом плотности тока наблюдается увеличение твердости оксидного слоя защитных покрытий. Увеличение твердости покрытий с ростом плотности тока происходит за счет повышения содержания модификации  $\alpha-Al_2O_3$  в покрытии, что подтверждает график изменения количественного соотношения фазовых составляющих покрытия, представленный на рис. 2.

Выявлено что оптимальными режимами получения защитных покрытий являются режимы обработки в электролите № 1, при высоких плотностях тока (более  $20 A/dm^2$ ), и соотношении анодной и катодной составляющей тока менее 1. Оптимальное время обработки от 30 до 45 мин. Результаты исследований по оптимизации технологических параметров приведены на рис. 3-4.

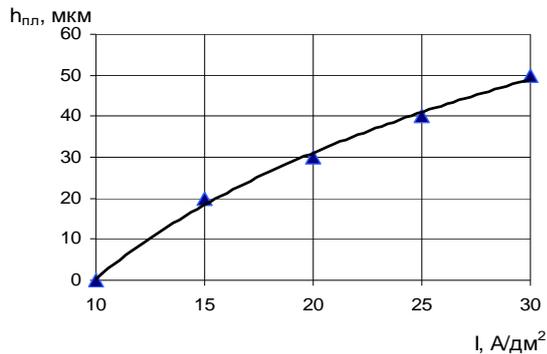


Рис. 1. Зависимость толщины плотного слоя покрытия из фольги А99 от плотности тока при соотношении  $I_k/I_a = 1,3$

Для проведения испытаний защитных покрытий на воздействие факторов хранения и эксплуатации были изготовлены образцы защитного покрытия на алюминиевой фольге АД по ГОСТ 4784-74 с МДО размерами  $100 \times 100$  мм.

Покрытия подверглись следующим видам испытаний:

- циклическому сгибанию на диаметре 20 мм;
- ускоренным климатическим испытаниям (УКИ);
- радиационному воздействию;
- термоциклированию.

Перед УКИ образцы защитных покрытий были подвергнуты циклическому сгибанию по боковой поверхности цилиндра, диаметром 20 мм и последующему разгибанию в плоскость. Количество циклов 50. Внешний вид покрытий после воздействия не изменился.

Измерение терморadiационных коэффициентов поглощения солнечной радиации  $As$  и степени черноты  $En$  проводилось в соответствии с ОСТ92-0909-69. Измерение коэффициента  $As$  проводилось фотометром ФМ-59М, коэффициента  $En$  – терморadiометром ТРМ-И. В качестве образца сравнения при измерении коэффициента  $As$  защитного покрытия с МДО использовали образец АД с анодным оксидированием,  $As = 0,47$ .

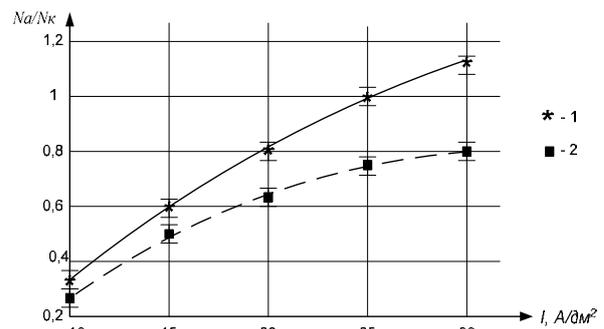


Рис. 2. Зависимость количественного соотношения  $N_\alpha$  и  $N_\gamma$  фазовых составляющих  $Al_2O_3$  покрытия от плотности тока

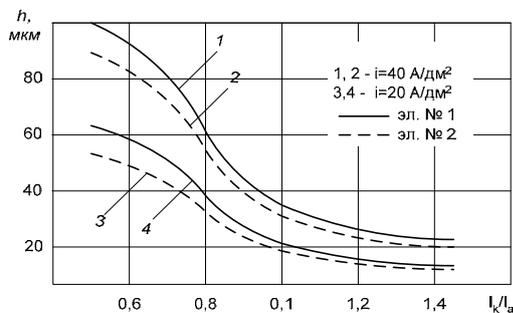


Рис. 3. Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от соотношения катодной и анодной составляющей токов (время обработки  $t = 30$  мин)

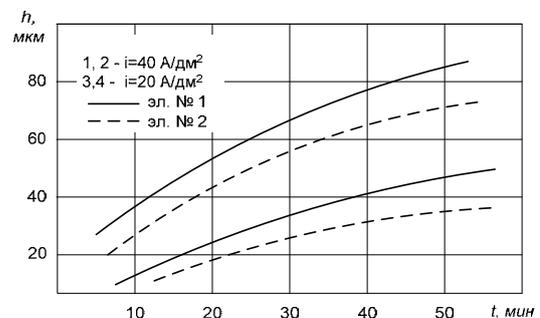


Рис. 4. Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от времени обработки при  $I_k/I_a = 0,8$

Измерение поверхностного сопротивления проводилось на тераомметре Е6-13А с использованием электрода из резины, обернутого оловянной фольгой. Толщина фольги 0,02 мм. Площадь электрода 20×20 мм. Давление на образец при измерении 100 г/см<sup>2</sup>, напряжение 100 В. Погрешность измерения не более 5 %.

Осмотр внешнего вида образцов проводился визуально. При визуальном осмотре контролировалось наличие трещин, отслоений покрытия, сохранение цвета.

Результаты измерения характеристик образцов показали, что As образцов с покрытием составляет 0,53–0,36 и зависит от режимов обработки, Ep – составляет от 0,8–0,33. Отношение As/Ep составляет более 0,5, что соответствует требованиям, предъявляемым к материалам для КА.

Сопротивление поверхности составляет  $7,1 \cdot 10^7$ – $8,6 \cdot 10^7,1$  Ом/Г. Внешний вид образцов после испытаний не изменился.

Испытания на радиационное воздействие проводились на электронном ускорителе ЭЛУ-4 в НИИ интроскопии. Образцы облучались электронами в среде азота до поглощенной дозы  $6 \cdot 10^8$  рад. Средняя энергия электронов в плоскости размещения образцов – 4 МэВ, средняя плотность потока электронов  $4,2 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Испытание на воздействие термоциклов проводилось в вакуумной камере УКГ-1000, при остаточном давлении не более  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. Образцы располагались на термостоле, сверху закрывались ЭВТИ. Нагрев и охлаждение осуществлялись за счет теплового контакта и радиационного излучения с поверхности термостола. Нагрев термостола осуществлялся лампами типа КГ-127-1000, а охлаждение жидким азотом. Скорость нагрева-охлаждения составляла от 5

до 10 градусов в минуту. Излучение от ламп на поверхность образцов не попадало. Температура контролировалась с помощью датчиков температуры типа «термометры платиновые ТП 018-03». Выдержка при крайних температурах в течение 10 минут. Термоциклирование проводилось в диапазоне температур от –150 °С до +170 °С в количестве 100 циклов.

Образцы защитных покрытий из алюминиевой фольги АД по ГОСТ 4784–74 с оксидным слоем, нанесенным МДО выдержали испытания на воздействие радиации дозой  $6 \cdot 10^8$  рад и последующего воздействия 100 термоциклов в вакууме в диапазоне температур от минус 150 до 170 °С.

Для испытания МДО покрытия на стойкость к воздействию СПД была разработана испытательная установка имитационной аргоновой плазмы на базе вакуумной камеры «Булат», которая позволяет при испытаниях сравнивать характеристики стойкости материалов к воздействию плазмы и получить предварительную оценку распыления материалов, выбрать из них наиболее стойкие, рекомендовать их на КА.

Испытания проводили на вакуумной установке, оснащенной ионным источником, позволяющим получать плазму ионов аргона (ксенона) с энергией до 300 эВ и системой контроля параметров плазмы в заданном энергетическом диапазоне.

Эксперимент по определению влияния плазмы на оптические свойства и эрозионную стойкость материалов проводили на испытательном стенде, оснащенной устройством ионной обработки УТП.ПД-150-014 и системой измерения параметров плазмы СИПП Semion™. Общий вид установки «Булат» представлен на рис. 5.

Технические характеристики УТП.ПД-150-014 представлены в табл. 1.

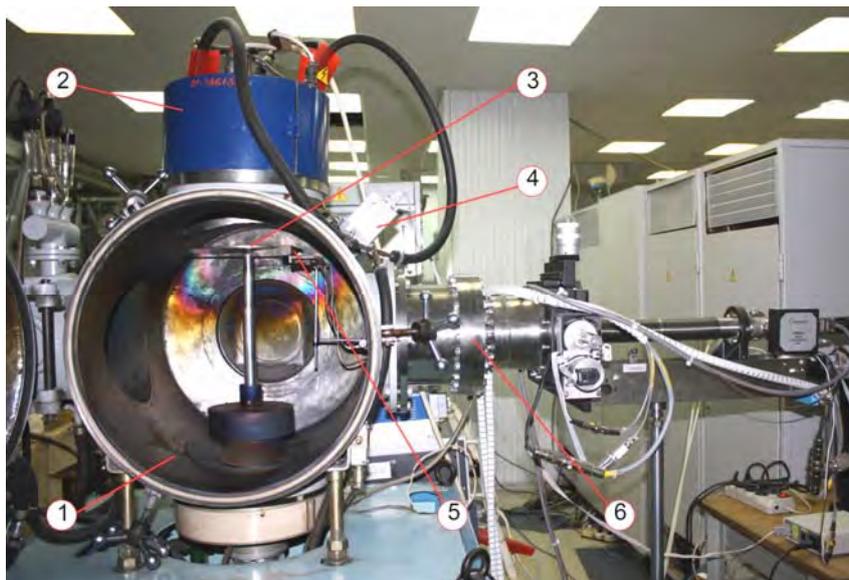


Рис. 5. Общий вид установки «Булат»:

1 – вакуумная камера «Булат»; 2 – ионный источник; 3 – столик с образцами; 4 – система напуска газа РРГ-12; 5 – зонды СИПП; 6 – система перемещения зондов

Технические характеристики УТП.ПД-150-014

№	Характеристика	Значение
1	Ток на электромагните	2,5 А
2	Плотность тока ионов (паспортное значение)	0,5...2 мА/см <sup>2</sup>
3	Средняя энергия ионов (паспортное значение)	0,2...0,5 кэВ
4	Ускоряющее напряжение	600...4000В

На первом этапе эксперимента проводили измерения плотности ионного тока и энергии ионов по нескольким точкам пучка плазмы на расстоянии 120 мм от источника при нормальном падении ионов. При этом ускоряющее напряжение на источнике изменяли от 600 до 4000 В. По результатам измерений определяли равномерность пучка плазмы, энергетическое распределение ионов струи плазмы, и зависимость ионного тока плазмы УТП.ПД-150-014 при различном ускоряющем напряжении и выбирали режим работы ионного источника наиболее близкие по энергетическим характеристикам плазмы к параметрам плазмы СПД М100, работающего на ксеноне: энергия ионов Хе+ при нормальном угле падения ионов на расстоянии 1 м от среза сопла до 250 эВ, плотность ионного тока до 1,7мА/см<sup>2</sup>.

Испытания по определению эрозионного воздействия плазмы на образцы материалов проводили по выбранному режиму работы ионного источника на первом этапе. Для оценки деструктивного воздействия плазмы двигателей коррекции проводили эксперименты, позволяющие определить влияние плазмы на оптические свойства и эрозионную стойкость таких материалов как:

- полиимидная пленка, используемая как внешний слой экранно-вакуумной теплоизоляции;
- алюминиевая фольга АД1 с односторонним микродуговым оксидированием поверхности как вариант покрытия, обладающего высокой эрозионной стойкостью. Общей идеей эксперимента является облучение образцов в течение заданного времени при контролируемых параметрах плазмы и определение на соответствующих измерительных приборах требуемых физических характеристик до и после воздействия плазмы. Время экспозиции образцов: 30, 60, 120 минут.

Для всех образцов рассчитывали относительное и прямое изменение массы в процессе испытаний путем взвешивания до и после воздействия плазмы на прецизионных электронных весах типа HR-202 с дальнейшим расчетом коэффициента распыления, методика расчета которого приведена ниже.

Расчет прямого ( $\Delta M$ ) и относительного изменения массы (ПМ) по следующим формулам:

$$\Delta M = M'_{\text{обр}} - M''_{\text{обр}} \quad (1)$$

$$\text{ПМ} = \frac{M'_{\text{обр}} - M''_{\text{обр}}}{M'_{\text{обр}}} \times 100 \% \quad (2)$$

где  $M'_{\text{обр}}$  – масса образца до испытаний, г;  $M''_{\text{обр}}$  – масса образца после испытания, г.

Далее проводили оценку коэффициента распыления исследуемых материалов, который определяется как отношение равное числу выбитых атомов, приходящихся на один ион (атом/ион):

$$K = \frac{A}{I} \quad (3)$$

Количество атомов можно найти по формуле:

$$A = \frac{\Delta M}{m_{\text{а.е.м}} \cdot \mu} \quad (4)$$

где  $\Delta M$  – разница массы образца до и после испытания, г;  $m_{\text{а.е.м}}$  – атомная единица массы, равная  $1,6597 \cdot 10^{-24}$  г;  $\mu$  – молекулярная масса молекул распыляемого вещества. для покрытия МДО ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – 102, для полиимидной пленки – 12.

Количество ионов можно найти по формуле:

$$I = (nv) \cdot S \cdot t, \quad (5)$$

где  $(nv)$  – плотность потока ионов в месте расположения образца;  $S$  – площадь образца, см<sup>2</sup>;  $t$  – суммарное время воздействия струи плазмы на образец, с.

Таким образом коэффициент распыления образцов находим по формуле:

$$K = \frac{\Delta M}{(nv) \cdot m_{\text{а.е.м}} \cdot \mu \cdot S \cdot t} \quad (6)$$

Плотность потока ионов  $(nv)$  и поверхностная плотность ионного тока  $J$  связаны соотношением:

$$(nv) = J / e, \quad (7)$$

где  $J$  – плотность ионного тока, А/см<sup>2</sup>;  $e$  – заряд электрона, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  К.

Дополнительно проводили оценку плотности теплового потока, создаваемого плазменной струей по следующей формуле:

$$Q = J \cdot U, \quad (8)$$

где  $J$  – плотность ионного тока, измеренная плоским зондом СИПП, А/см<sup>2</sup>;  $U$  – разрядное напряжение ионного источника, В.

Влияние плазмы на полиимидную пленку определяли по глубине эрозии измеряя толщину образцов до и после испытаний контактным способом с использованием индикатора многооборотного с ценой деления 2 мк. Изменение оптических свойств определяли по изменению спектрального коэффициента пропускания образцов в диапазоне длин волн от 250 до 2500 нм.

Для образцов алюминиевой фольги с МДО измеряли коэффициенты поглощения солнечной радиации  $A_s$  и степень черноты  $E_n$  до и после испытаний на приборах ТРМ-И и ФМ-59 со стороны распыляемой поверхности.

Контроль изменения толщины слоя МДО проводили с использованием прибора измерения геометрических параметров многофункционального Константа-К5 методом вихревых токов.

При проведении испытаний сравнивали стойкость трех материалов: алюминиевой фольги (алюминий покрывает покрывает большинство поверхностей КА) полиимидной пленки (которая в настоящее время используется для в качестве защитного покрытия от воздействия плазмы СПД) и алюминиевых образцов с МДО покрытием.

Режимы испытания в камере «Булат»: ток на катушке соленоида – 2,5 А, напряжение на аноде – в пределах 800 В, ток разряда – 15мА. Расчетное значение плотности теплового потока, создаваемого плазменной струей ионного источника, составила 0,008 Вт/см<sup>2</sup>.

Расстояние от столика с образцами до генератора плазмы равно 150 мм. Угол падения ионов на поверхности образцов – около 90°. Длительность обработки – 60 мин.

До и после воздействия пучком ионов на образцы производилось взвешивание образцов на прецизионных электронных весах HR-202, а также измерение толщины контактным способом с использованием многооборотного индикатора. Толщину образцов измеряли в нескольких точках, затем вычисляли среднее значение. Процентное значение изменения массы образца в результате распыления плазмой рассчитывали по формуле:

$$\Delta M = \frac{M_{\text{до}} - M_{\text{после}}}{M_{\text{до}}} 100 \%$$

где  $M_{\text{до}}$  – масса образца покрытия до испытаний, г;  $M_{\text{после}}$  – масса образца покрытия после испытания, г.

Полученные экспериментальные данные по изменению массы и толщины исследуемых образцов сведены в табл. 2 и 3.

На рис. 6–8 показаны поверхности образцов МДО в исходном состоянии и после воздействия плазмы снятых с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6380.

Таблица 2

Изменение массы образцов до и после испытания

Образцы		Масса образцов, г		Изменение, г ( $M_{\text{до}} - M_{\text{после}}$ )	$\Delta M$ , %
		$M_{\text{до}}$	$M_{\text{после}}$		
ПМ	1	0,22837	0,22679	0,00158	0,692
	2	0,23180	0,23021	0,00159	0,686
	3	0,23860	0,23713	0,00147	0,616
	4	0,23080	0,22951	0,00129	0,559
Среднее значение				0,00148	0,638
МДО	1	0,42791	0,42728	0,00063	0,147
	2	0,42808	0,42751	0,00057	0,133
	3	0,46758	0,46683	0,00075	0,160
	4	0,45192	0,45072	0,000120	0,265
Среднее значение				0,00079	0,177
АД1	1	0,41936	0,41904	0,00032	0,076
	2	0,42135	0,42104	0,00031	0,073
	3	0,42358	0,42329	0,00029	0,068
	4	0,42582	0,42552	0,00030	0,070
Среднее значение				0,00031	0,072

Таблица 3

Изменение толщины образцов до и после испытания

Образцы		Толщина образцов, мм		Изменение ( $T_{\text{до}} - T_{\text{после}}$ ), мм
		$T_{\text{до}}$	$T_{\text{после}}$	
ПМ	1	0,097	0,096	0,001
	2	0,105	0,098	0,007
	3	0,103	0,099	0,004
	4	0,100	0,097	0,003
Среднее значение				0,00375
МДО	1	0,100	0,099	0,001
	2	0,100	0,099	0,001
	3	0,125	0,125	0
	4	0,111	0,110	0,001
Среднее значение				0,00075
АД1	1	0,096	0,095	0,001
	2	0,096	0,095	0,001
	3	0,096	0,092	0,004
	4	0,096	0,094	0,002
Среднее значение				0,002

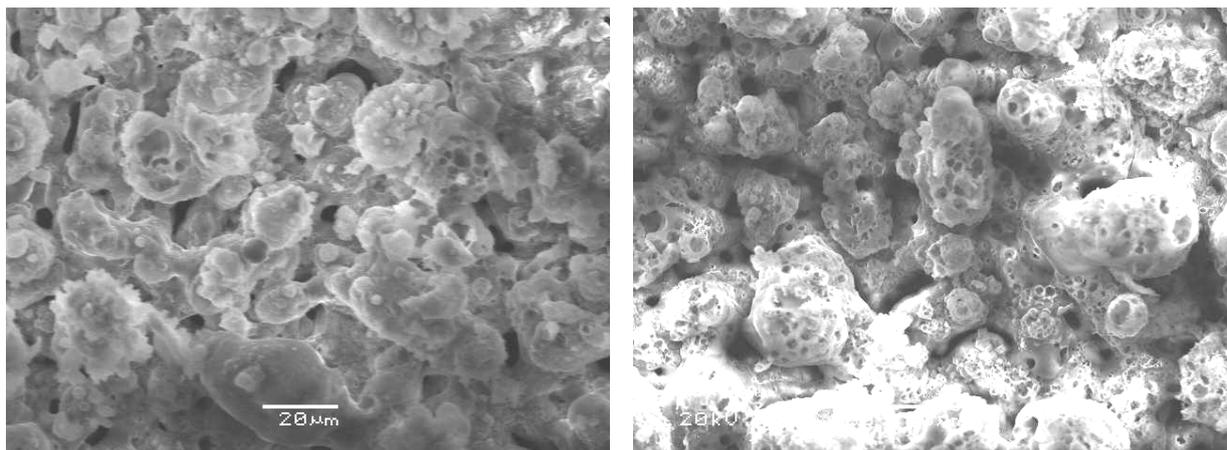


Рис. 6. Покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз (Образец № 2)

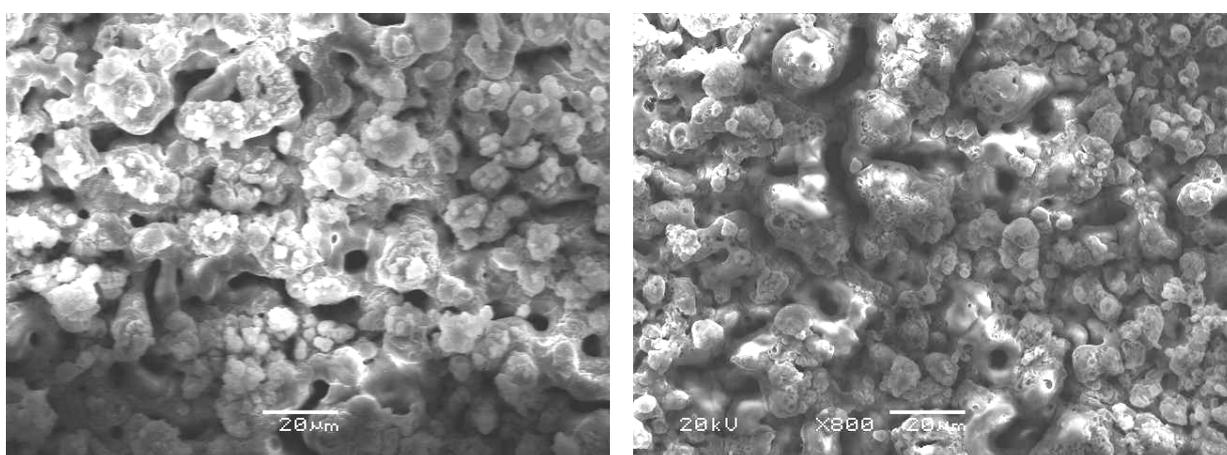


Рис. 7. Покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз (Образец № 4)

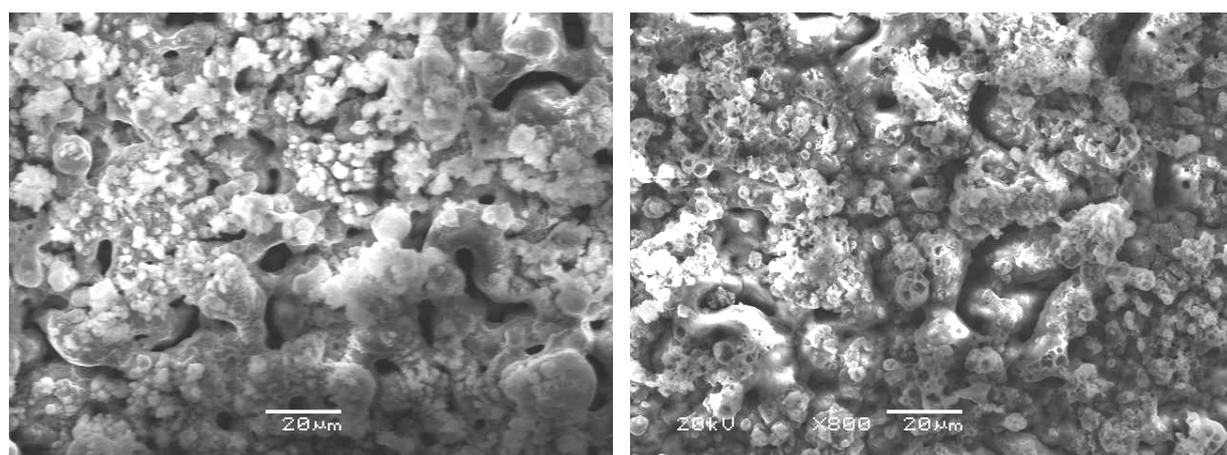


Рис. 8. Покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз (Образец № 7)

После воздействия плазмы у образцов алюминиевой фольги с микродуговым оксидированием поверхности внешний вид остался без изменений. Максимально изменились масса и толщина у образцов полиимидной пленки. Образцы МДО потеряли массу большую, чем образцы алюминиевой фольги, это

можно объяснить некоторой гигроскопичностью МДО покрытий.

Толщина покрытий практически не изменилась. Исследования показали, что покрытия полученные методом МДО, могут быть использованы в качестве защитных покрытий на КА.

### Библиографические ссылки

1. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на космическом аппарате «Экспресс-АМ» / В. А. Смирнов, А. Б. Надирадзе и др. // Вестник СибГАУ. 2006. № 2 (10). С 46–50.
2. Технология тонких пленок (справочник) / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга ; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. Т. 1. М. : Сов. радио, 1977.
3. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов и др. М. : ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
4. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев, В. В. Стацера и др. // Вестник машиностроения. 2003. № 2. С. 56–63.
5. Технология нанесения антиэрозионных покрытий на элементы конструкций космических аппаратов

/ А. В. Михеев, А. В. Гирн и др. // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С 130–134.

### References

1. Smirnov V. A., Nadiradze A. B. et al. *Vestnik SibGAU*, 2006, 2 (10), p. 46–50.
2. *Tehnologija tonkih plenok (spravochnik)* (The technology of thin films (NTP), ed. L. Majssela, R. Gljenga, from English. ed. M. I. Elinsona, G. G. Smolko, vol. 1. Moscow, Sov. radio, 1977.
3. Suminov I. V. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie (teorija, tehnologija, oborudovanie)* (Microarc oxidation (the theory, technology, equipment). Moscow, JeKOMET, 2005, 368 p.
4. Miheev A. E., Stacura V. V. et al. *Vestnik mashinostroenija*. Moscow, 2003, № 2, p. 56–63.
5. Miheev A. V., Girn A. V. et al. *Vestnik SibGAU*, 2010, 4 (30), p. 130–134.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Ивасев С. С., Евкин И. В., 2013

УДК 548.736.5

## СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ЭПР СПЕКТРЫ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ КУБИЧЕСКОГО ОКСИФТОРИДА $CsZnMoO_3F_3$ \*

М. С. Молокеев, Э. А. Петраковская, В. С. Бондарев, Е. М. Колесникова, Н. А. Иванов

Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38. E-mail: msmolokeev@mail.ru

*Оксифторид  $CsZnMoO_3F_3$  получен методом твердофазного синтеза. Установлено, что кристалл изоструктурен пирохлору и уточнена его кристаллическая структура при  $T = 298$  К методом Ритвельда. Несмотря на то, что основным структурным элементом в этом соединении является искаженный полиэдр, реализовалась кубическая фаза. Стабильность кубической фазы подтверждена исследованием теплоемкости в температурном интервале  $T = 110$ – $293$  К. Проанализированы ЭПР спектры исследуемого соединения в диапазоне температур  $T = 77$ – $295$  К. Установлено наличие дефектов в структуре. Проведено сравнение исследуемого соединения с родственными оксифторидами  $CsMnMoO_3F_3$ . Отмечено лишь небольшое изменение тепловых параметров и параметров ячеек.*

*Ключевые слова:* оксифторид, рентгеноструктурный анализ, ЭПР спектры, теплоемкость.

## SYNTHESIS, STRUCTURE, EPR SPECTRA AND HEAT CAPACITY OF CUBIC $CsZnMoO_3F_3$ OXYFLUORIDE

M. S. Molokeev, E. A. Petrakovskaya, V. S. Bondarev, E. M. Kolesnikova, N. A. Ivanov

Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS  
50, bld.38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: msmolokeev@mail.ru

*Oxyfluoride  $CsZnMoO_3F_3$  has been prepared with the solid state synthesis. It was found that crystal is isostructural to pyrochlore and its crystal structure was defined with the Rietveld method more exactly. Despite the fact that the main structural element in this compound is distorted polyhedron, the cubic phase has been realized.*

\*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., № 8379.