

УДК 629.78.002.3

Разработка антиэрозионных покрытий для силовых элементов космических аппаратов

Алякреткий Р.В.*, **Раводина Д.В.****, **Трушкина Т.В.*****,

Вахтеев Е.В.****, **Алексеева Е.Г.*******

*Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф.
Решетнёва, СибГАУ, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660014,
Россия*

*e-mail: ankain-romario@yandex.ru

**e-mail: dashaorlova12@yandex.ru

***e-mail: tatyana.si@mail.ru

****e-mail: evahteev@gmail.com

*****e-mail: alekseevaelena@iss-reshetnev.ru

Аннотация

В работе предлагается нанесение защитного покрытия методом микродугового оксидирования (МДО) на алюминиевую фольгу марки АД для защиты элементов космических аппаратов от эрозионного воздействия струй стационарных плазменных двигателей (СПД). Отработаны технологические режимы получения защитного покрытия. Проведены тестовые испытания образцов покрытия на воздействие факторов хранения и эксплуатации. Исследования показали, что характеристики покрытий, полученные методом МДО, удовлетворяют требованиям и могут быть использованы в качестве защитных покрытий на космических аппаратах.

Ключевые слова: космический аппарат, рефлекторы антенн, радиоотражающие покрытия, антиэрозионная защита, микродуговое оксидирование.

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 стационарных плазменных двигателей (СПД), используемых в качестве двигателей коррекции, на материалы элементов 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 уменьшению их толщины и 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].

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.

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.

В настоящее время для КА, функционирующих на геостационарных орбитах, для защиты от эрозии элементов конструкции применяется полиимидная пленка с липким слоем Л1-ПМ (ТР №370-762-48-274), что не вполне удовлетворяют современным требованиям по эрозионной стойкости данного материала.

Проведенный предварительный анализ показал, что к веществам, обладающим высокой 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 для активного существования КА 15 лет должна быть не менее 30 мкм [3-5].

В данной работе предлагается защищать элементы конструкции КА попадающие под действие плазмы СПД тонкой (до 100 мкм) алюминиевой фольгой с покрытием из оксида алюминия толщиной до 30 мкм, нанесенного микродуговым оксидированием (МДО), что приемлемо и по весовым характеристикам. На конструкции КА, изготовленных из алюминиевых сплавов, покрытия могут наноситься непосредственно на защищаемые поверхности.

Покрытия наносились 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/дм²; 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) + Na₂SiO₃ (10 г/л); № 2 – KOH (5 г/л) + Na₂SiO₃ (10 г/л).

Покрyтия формировали при различных соотношении I_k / I_a (от 0,6 до 1,4), плотностях тока (в диапазоне от 10 до 40 А/дм²), продолжительность обработки составляла 10-60 мин. Толщину покрyтий контролировали толщиномером ТТ260 и на поперечных шлифах при помощи оптического микроскопа. Микроструктуру защитного покрyтия нанесенного МДО изучали с использованием металлографического исследовательского комплекса SIAM на базе оптического микроскопа ЛабоМет И2.

Металлографический анализ показал, что покрyтие 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 покрyтия ($h_{пл}$) от плотности тока представлена на рисунке 1. Общая толщина покрyтия 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 покрyтий. Увеличение твердости покрyтий с ростом плотности тока происходит за счет повышения содержания модификации $\alpha-Al_2O_3$ в покрyтии, что подтверждает график изменения количественного соотношения фазовых составляющих покрyтия, представленный на рисунке 2.

Выявлено что оптимальными режимами получения защитных покрyтий являются режимы обработки в электролите № 1, при высоких плотностях тока (более 20 А/дм²), 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 рисунках 3-4.

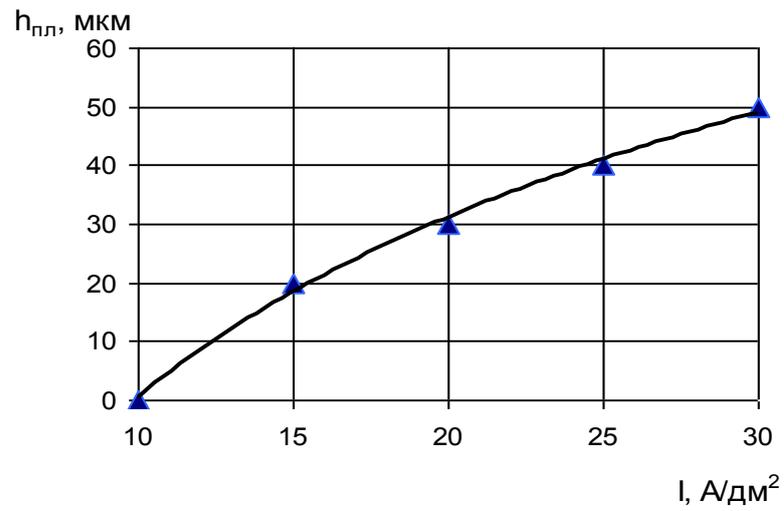


Рисунок 1 – Зависимость толщины плотного слоя покрытия из фольги А99 от плотности тока при соотношении $I_k / I_a = 1,3$

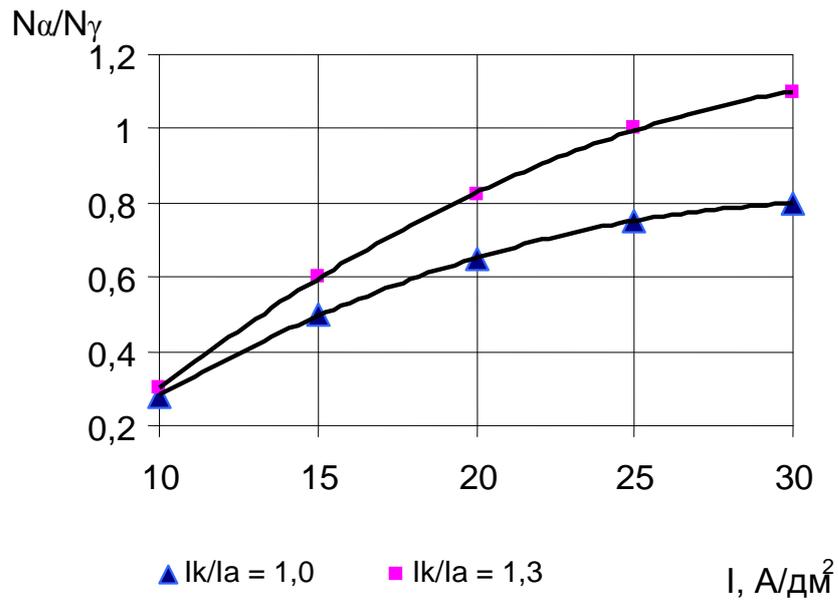


Рисунок 2– Зависимость количественного соотношения N_α и N_γ фазовых составляющих Al_2O_3 покрытия от плотности тока

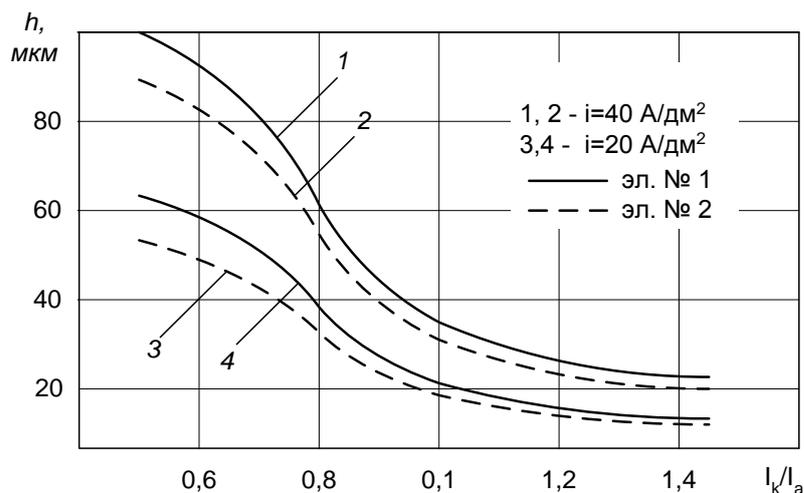


Рисунок 3 – Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от соотношения катодной и анодной составляющей токов (время обработки $t = 30$ мин).

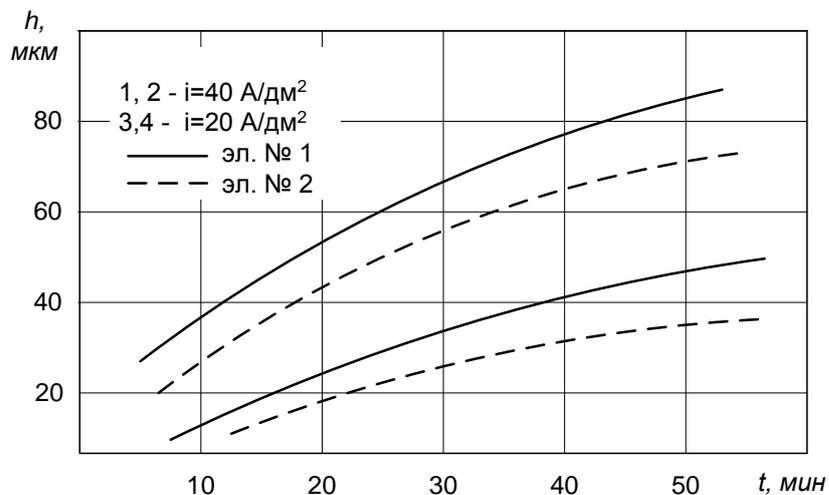


Рисунок 4– Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от времени обработки при $I_k/I_a = 0,8$

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 100x100 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 A_s и степени черноты E_n проводилось в соответствии с ОСТ92-0909-69. Измерение коэффициента A_s проводилось фотометром ФМ-59М, коэффициента E_n – терморadiометром ТРМ-И. В качестве образца сравнения при измерении коэффициента A_s защитного покрытия с МДО использовали образец АД с анодным оксидированием, $A_s = 0,47$.

Измерение поверхностного сопротивления проводилось на тераомметре Е6-13А с использованием электрода из резины, обернутого оловянной фольгой. Толщина фольги 0,02 мм. Площадь электрода 20x20 мм. Давление на образец при измерении 100 г/см², 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 A_s образцов с покрытием составляет 0,53 – 0,36 и зависит от режимов обработки, E_n составляет от 0,8 – 0,33. Отношение A_s/E_n 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/м. 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 $4,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

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 минус 150°C до плюс 170°C 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°C .

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™.

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.

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 большинство поверхностей КА) полиимидной пленки (которая в настоящее время используется 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/см². 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 измерили в нескольких точках, затем вычисляли среднее значение. Процентное значение изменения массы образца в результате распыления плазмой рассчитывали по формуле:

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

где: $M_{до}$ - масса образца покрытия до испытаний, г;

$M_{после}$ - масса образца покрытия после испытания, г.

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

Таблица 1

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	0,00053	0,124
	2	0,42808	0,42751	0,00067	0,156
	3	0,46758	0,46683	0,00075	0,160
	4	0,45172	0,45112	0,00060	0,133
Среднее значение				0,00079	0,154
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 2

Изменение толщины образцов до и после испытания

Образцы	Толщина образцов, мм		Изменение ($T_{\text{до}} - T_{\text{после}}$),
	$T_{\text{до}}$	$T_{\text{после}}$	

				мм
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

На рисунках 8-10 показаны поверхности образцов МДО в исходном состоянии и после воздействия плазмы снятых с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6380.

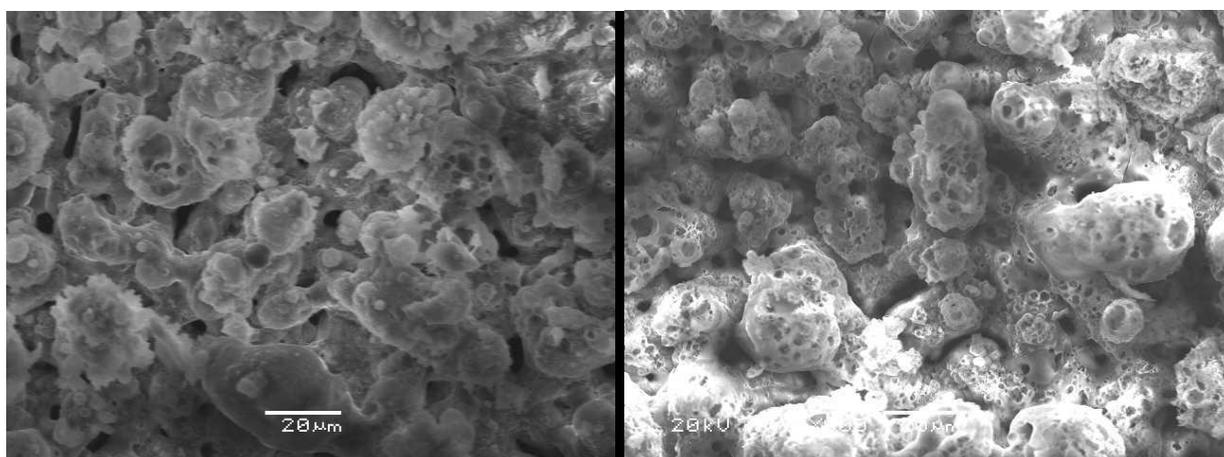


Рисунок 8 - покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз.(Образец №2)

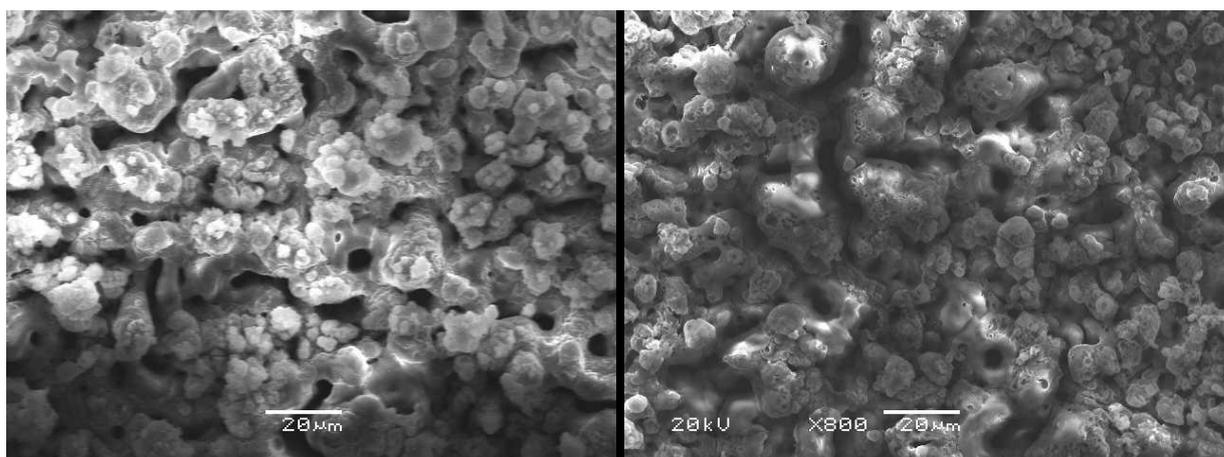


Рисунок 9 - покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз. (Образец №4)

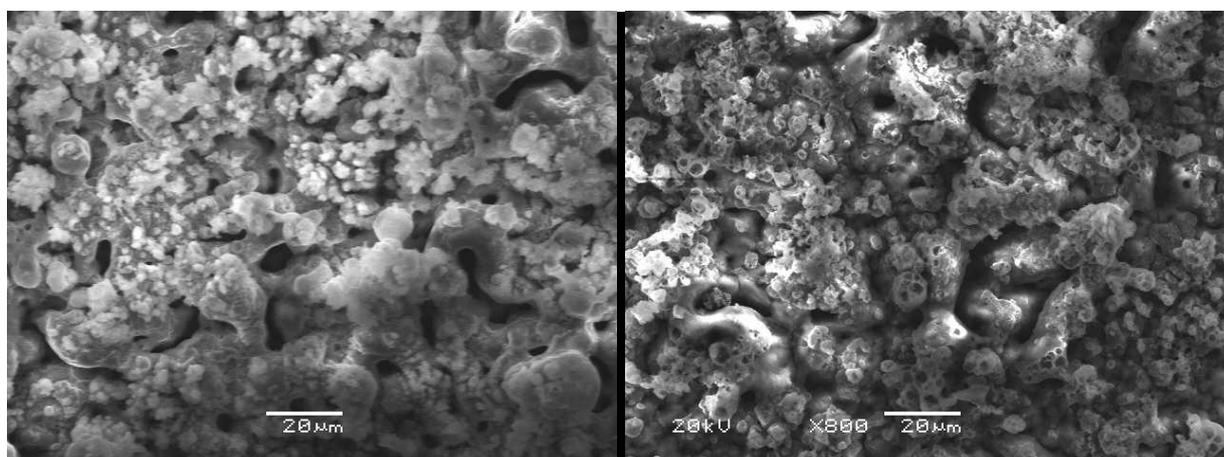


Рисунок 13 - покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз. (Образец №7)

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.

Библиографический список

1. В.А. Смирнов, А.Б. Надирадзе и др. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на космическом аппарате «Экспресс-АМ» / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева": сб. науч. тр. / под ред. проф. Г.П. Белякова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006. Вып 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. Михеев А.Е., Стацура В.В. и др. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов. // Вестник машиностроения. Москва. 2003г.№2. С.56-63.

5. Михеев А.Е., Гирн А.В. и др. Технология нанесения антиэрозионных покрытий на элементы конструкций космических аппаратов / Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та : сб. науч. тр. / под ред. проф. Г.П. Белякова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. Вып 4 (30). С 130 - 134.