

А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Е. В. Вахтеев, А. А. Михеев, И. В. Евкин

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ АНТИЭРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проведено нанесение защитного покрытия микродуговым оксидированием на алюминиевую фольгу марки АД, отработаны режимы получения защитного покрытия из оксида алюминия. Выполнены тестовые испытания образцов покрытия на воздействие факторов эксплуатации.

Ключевые слова: антиэрозионные покрытия, микродуговое оксидирование, тестовые испытания.

Обеспечение конкурентоспособности современных высокоорбитальных космических аппаратов (КА) связи на мировом рынке требует снижения их стоимости и повышения надежности при длительной эксплуатации.

Одним из факторов, влияющих на надежность КА, является эрозионное воздействие плазмы стационарных плазменных двигателей (СПД) на элементы конструкции. Предварительная оценка эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой стационарными плазменными двигателями, на поверхности платформы «Экспресс-1000Н», показала, что данное воздействие может оказать существенное дестабилизирующее воздействие на функционирование платформы [1].

Для минимизации дестабилизирующего воздействия плазмы СПД на элементы конструкций КА необходимо на их внешних поверхностях применять материалы с высокой стойкостью к воздействию направленного потока ионов ксенона.

В данной работе предлагается защищать элементы конструкции КА, попадающие под действие плазмы СПД тонкой (до 100 мкм) алюминиевой фольгой с антиэрозионным покрытием, что приемлемо и по весовым характеристикам. К веществам, обладающим наибольшей стойкостью к воздействию струи плазмы инертных газов (аргона, ксенона), относятся оксиды, в частности Al_2O_3 , для нанесения которого предлагается использовать метод микродугового оксидирования (МДО) [2; 3].

По предварительным оценкам для обеспечения работоспособности КА свыше 15 лет необходимо обеспечить толщину покрытия не менее 30 мкм.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы защитного покрытия МДО. Исследования проводились на установке МДО-3, 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. Диапазон регулируемых напряжений источника до 1 000 В; диапазон регулируемых плотностей токов до 50 А/дм²; погрешность стабилизации тока до 5 %.

В качестве подложки использовались образцы фольги АД размерами 160 × 130 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).

Покрытия формировали при различных соотношении I_k/I_a от 0,6 до 1,4, плотностях тока в диапазоне от 10 до 40 А/дм², в течение 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:

- внешнего пористого слоя, состоящего из смеси оксидов $Al_2O_3 + SiO_2$;
- твердого слоя, примыкающего к металлу и содержащего, преимущественно оксид алюминия двух модификаций $\gamma-Al_2O_3$ и $\beta-Al_2O_3$.

Зависимость толщины плотного слоя покрытия ($h_{пл}$) от плотности тока представлена на рис. 1.

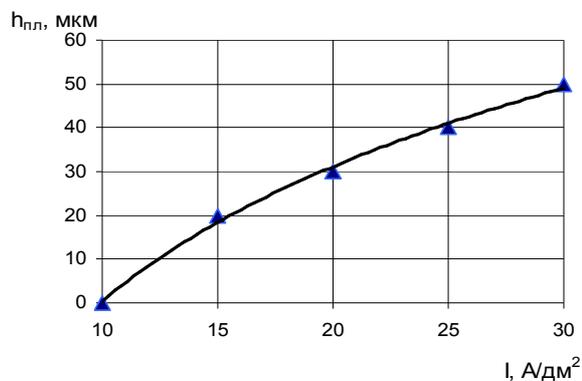


Рис. 1. Зависимость толщины плотного слоя покрытия из фольги АД от плотности тока при соотношении $I_k/I_a = 1,3$

Общая толщина покрытия складывается из толщины твердого (внутреннего) и наружного слоев, причем при высоких значениях плотности тока закономерно соотношение: $h_t/h_{общ} = (0,5...0,6)$.

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

Это говорит о том, что катодная составляющая тока приводит к повышению температуры в канале пробоя. При уменьшении соотношения I_k/I_a до 1 и более, микротвердость покрытия снижается.

Выявлено, что оптимальными режимами получения защитных покрытий 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 рис. 3, 4.

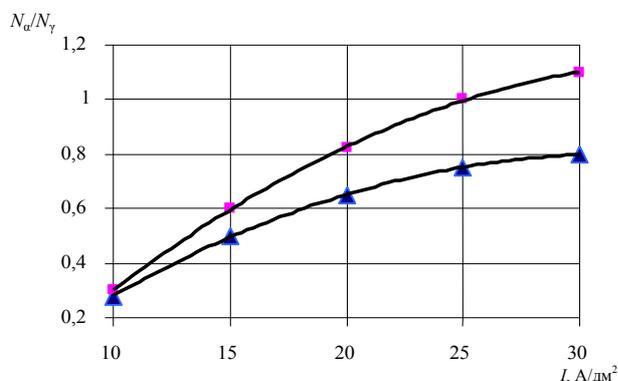


Рис. 2. Зависимость количественного соотношения N_α и N_γ фазовых составляющих Al_2O_3 покрытия от плотности тока:

▲ – $I_k/I_a = 1,0$; ■ – $I_k/I_a = 1,3$

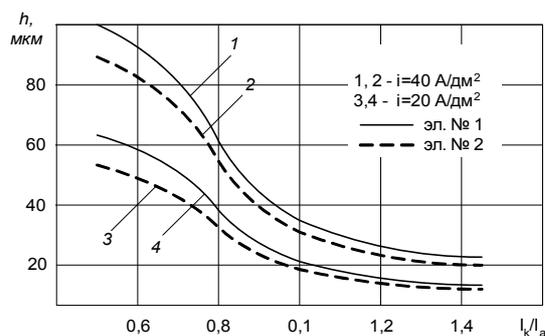


Рис. 3. Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от соотношения катодной и анодной составляющей токов (время обработки $t = 30$ мин)

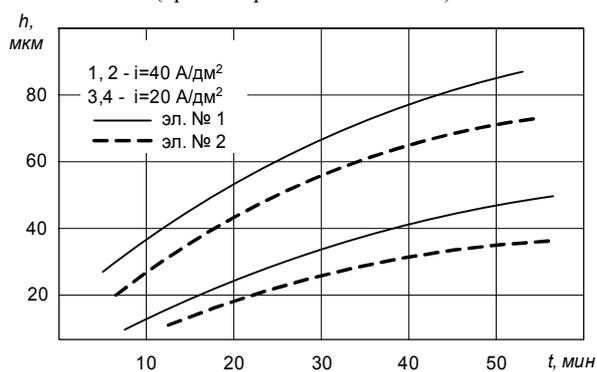


Рис. 4. Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от времени обработки при $I_k/I_a = 0,8$

Исследование микроструктуры защитного покрытия показало, что соотношение катодной и анодной составляющих тока оказывает существенное влияние на структуру защитного покрытия. При соотношении катодной и анодной составляющей тока более 1 ($I_k/I_a > 1$) покрытие имеет монолитную структуру (рис. 5).

Для проведения испытаний защитных покрытий на воздействие факторов хранения и эксплуатации были из-

готовлены образцы защитного покрытия из алюминиевой фольги АД по ГОСТ 4784–97 с МДО поверхности размером не менее 100 × 100 мм.

Защитные покрытия подверглись следующим видам испытаний:

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

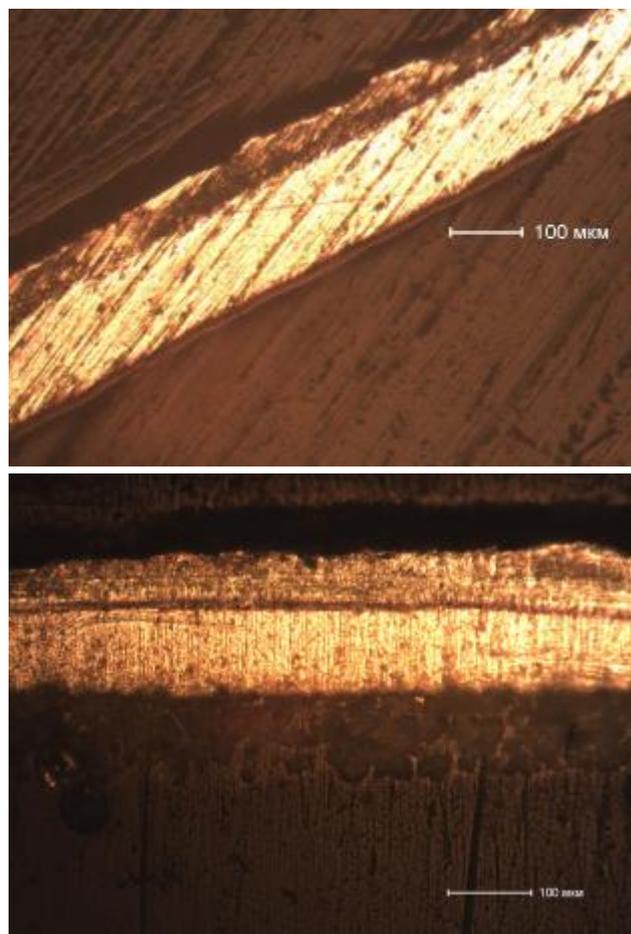


Рис. 5. Поперечные шлифы фольги АД с МДО-покрытием

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

Измерение поверхностного сопротивления проводилось на тераомметре Е6-13А с использованием электрода из резины, обернутого оловянной фольгой. Толщина фольги 0,02 мм. Площадь электрода 20 × 20 мм. Давление на образец при измерении 0,01 МПа, 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 $0,53 \dots 0,36$ и зависит от режимов обработки, E_n – составляет от $0,8 \dots 0,33$.

Значение коэффициентов A_s и E_n образцов защитных покрытий после испытаний изменились незначительно. Изменения коэффициентов находятся в пределах погрешности измерений прибора ТРМ-И. Отношение A_s/E_n составляет более 0,5, что соответствует требованиям, предъявляемым к материалам для КА.

Сопротивление поверхности составляет $7,1 \cdot 10^7 \dots 8,6 \cdot 10^7$ Ом/м. Величина поверхностного электрического сопротивления после испытаний незначительно увеличилась на отдельных образцах. 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⁻²с⁻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° 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 мин. Термоциклирование проводилось в диапазоне температур от –150 °С до +170 °С в количестве 100 циклов.

Образцы защитных покрытий из алюминиевой фольги АД по ГОСТ 4784–97 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 –150 до 170 °С.

Также были проведены испытания защитных покрытий на стойкость к воздействию плазмы. Для обеспечения равного воздействия плазмы на испытываемые образцы, из каждого из образцов 100×100 мм вырезались по три образца размером 30×30 мм и укладывались в зоне облучения в шахматном порядке. После воздействия плазмы у образцов алюминиевой фольги с микродуговым оксидированием поверхности внешний вид остался без изменений. Измерение толщины защитных покры-

тий производили контактным способом с использованием многооборотного индикатора.

При визуальном осмотре у образцов алюминиевой фольги с микродуговым оксидированием поверхности внешний вид не изменился. Также в процессе проведения испытаний контролировали толщину подложки из алюминиевой фольги АД, в исходном состоянии имеющей толщину 100 мкм. В процессе воздействия плазмы толщина алюминиевой фольги АД уменьшилась на 3 мкм.

Таким образом, изменение оптических коэффициентов A_s и E_n образцов алюминиевой фольги с МДО поверхности после воздействия плазмы изменились незначительно, величина изменения коэффициентов находится в пределах погрешности измерений приборов ФМ-59 и ТРМ-И. Отношение A_s/E_n составляет более 0,5, что соответствует необходимым требованиям.

Приведенные результаты испытания защитных покрытий из алюминиевой фольги АД по ГОСТ 4784–97 с оксидным слоем, нанесенным МДО на воздействие плазмы, имитирующей плазму СПД, в вакуумной камере установки АРМ НТП-2, позволяют сделать следующие выводы:

1. Измерение коэффициентов A_s и E_n образцов алюминиевых фольг с микродуговым оксидированием поверхности до и после воздействия плазмы показало незначительное изменение коэффициентов, величина изменения коэффициентов находится в пределах погрешности измерительных приборов. Отношение A_s/E_n составляет более 0,5, что соответствует необходимым требованиям.

2. В ходе облучения процентное уменьшение массы образцов составило $0,32 \dots 0,25$ %.

3. Изменение толщины образцов составило $1 \dots 3$ мкм.

Таким образом, образцы из алюминиевой фольги с оксидным покрытием, нанесенным МДО, являются стойкими к воздействию плазмы, изготовленные по технологическому процессу с выбранными оптимальными технологическими режимами.

На основании полученных результатов по воздействию плазмы, выбран состав защитного покрытия из алюминиевой фольги АД по ГОСТ 4784–97 с оксидным слоем, нанесенным МДО.

Библиографические ссылки

1. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на космическом аппарате «Экспресс-АМ» / В. А. Смирнов [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып 2(10). 2006. С. 46–50.

2. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов [и др.] М. : ЭКОМЕТ, 2005.

3. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник машиностроения. 2003. № 2. С. 56–63.

A. E. Mikheev, A. V. Girn, E. V. Vakhteev, A. A. Mikheev, I. V. Evkin

TECHNOLOGY OF OVERCOATING OF DESIGN ELEMENTS OF SPACE VEHICLES WITH ANTIEROSIVE COATING

In the article we describe overcoating of aluminium foil of AD mark with antierosive coating by microarc oxydation, along with modes of production of protective coating from aluminum oxide. Final tests of samples of covering under the influence of factors of operation are performed.

Keywords: antierosive coverings, microarc oxydation, final tests.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Вахтеев Е. В., Михеев А. А., Евкин И. В., 2010

УДК 62-837

А. А. Фадеев, И. Я. Шестаков, О. Е. Артюкова

КОНСТРУИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Представлены особенности конструирования исследовательской установки для электрообработки на основе линейного электродинамического привода. Рассмотрены особенности конструкции установки и основные технические характеристики, приведены примеры использования установки для отработки режимов различных технологических процессов.

Ключевые слова: исследовательская установка, электродинамический привод, электрообработка, привод подачи инструмента.

Для проведения различных технологических процессов обработки деталей в машиностроительном и приборостроительном производствах используют различные электрохимические и электрофизические методы обработки. Приводы подач большинства современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ, в том числе и электроэрозионных (ЭЭ), строятся по традиционной схеме (перемещения рабочего органа РО осуществляется от двигателя постоянного тока через ременную передачу на ходовой винт). Недостатки указанных видов приводов достаточно известны и очевидны: большое количество промежуточных элементов, громадная инерционность этих элементов, трение во множестве сопрягаемых деталей и др.

Одним из вариантов устранения этих недостатков является использование в качестве приводов подач станков линейного электродинамического двигателя.

Практическое использование линейных электродинамических двигателей началось с его традиционных областей применения: быстродействующие технологические устройства – привод электрода-инструмента в установках импульсной электрохимической и электроконтактной обработки. Линейный электродинамический привод наилучшим образом подходил для перемещения электрода-инструмента на каждый импульс технологического тока, следующего с частотой до 800 Гц.

Совмещение рабочего органа стационарных машин и ротора электродвигателя позволяет уменьшить массу и размеры машины (привода), исключить из электропривода преобразователь движения в виде редуктора или

другого передаточного механизма, улучшить условия теплоотдачи, охлаждения и вентиляции [1].

Сотрудниками СибГАУ была предложена конструкция привода подачи электрода-инструмента на основе линейного электродинамического вибропривода (рис. 1) [2; 3].

Разработка конструкции установки осуществлялась в несколько этапов. Расчет привода строился исходя из определения электромагнитной силы, необходимой для проведения процессов обработки.

Электромагнитная сила электродинамического привода, возникающая в результате взаимодействия тока подвижной катушки с магнитным полем электромагнита, определяется по известной формуле:

$$F = IBL, \quad (1)$$

где F – электромагнитная сила; I – ток в подвижной катушке; B – магнитная индукция электромагнита в рабочем зазоре, где расположена подвижная катушка; L – длина проводника подвижной катушки.

Для предложенного устройства электромагнитная сила определяется следующим образом:

$$F = IBk, \quad (2)$$

где k – конструктивный параметр привода, рассчитывается по выражению

$$k = \frac{\pi d N t}{L},$$

где d – средний диаметр подвижной катушки; N – число витков подвижной катушки; t – ширина рабочего зазора,