

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ ПЛЕНОК

*Наведені результати експериментальних досліджень характеристик поліетилентерефталатної плівки. Визначені структура алюмінієвого покриття плівки, товщина окисного шару на ньому. Одержані значення питомого та поверхневого опорів покриття, його стійкості до електричних розрядів. Наведені значення пробивної напруги та пробивної напруженості для плівки. Зроблено оцінку надійності роботи плівки.*

*Изложены результаты экспериментальных исследований характеристик полиэтилентерефталатной пленки. Определены структура покрытия пленки, толщина окисного слоя на нем. Получены значения удельного и поверхностного сопротивлений покрытия, его стойкости к электрическим разрядам. Приведены значения пробивного напряжения и пробивной напряженности для пленки. Сделана оценка надежности работы пленки.*

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть внешних поверхностей современных космических аппаратов (КА) покрыта диэлектрическими материалами, свойства которых при нахождении в космической плазме определяют возникновение и дальнейшее взаимодействие объемных зарядов, которые в конечном итоге могут приводить к развитию высоковольтных разрядов.

Такие разряды приводят как к деградации диэлектриков, так и к созданию электромагнитных помех для радиоэлектронной аппаратуры КА.

Возможности решения указанных проблем рассмотрены в [1], где обращено внимание на необходимость тщательного определения электрофизических свойств диэлектрических материалов, используемых в конструкциях космических объектов.

Одним из таких материалов, которые следует использовать в изделиях космической техники, является полиэтилентерефталатная пленка (ПЭТ-пленка), металлизированная с одной или обеих сторон. Эскизы таких видов пленки изображены на рис. 1.

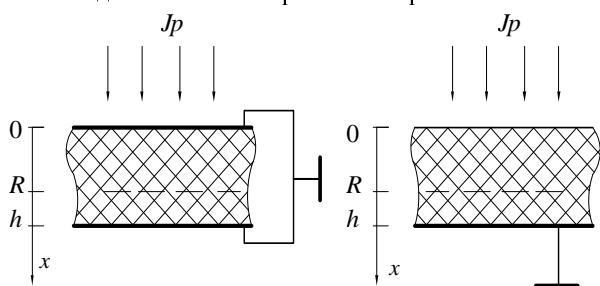


Рис. 1. Эскизы пленок

В имеющейся информации по таким пленкам [2] отсутствуют многие параметры, имеющие важное значение для оценки возможности их использования в изделиях космической техники, что обуславливает необходимость проведенной работы.

В качестве параметров исследуемых видов пленки, способных влиять на функционирование элементов конструкций КА (например, соотоснований батарей фотопреобразователей), принимались следующие:

- полное  $R$  и поверхностное  $R_s$  сопротивления алюминиевого покрытия пленки и его контактных

соединений с точкой "общей массы". Указанные параметры важны с точки зрения обеспечения равномерного стекания и распределения зарядов по всей конструкции КА;

- толщины алюминиевого покрытия  $d$  и собственно ПЭТ-пленки  $D$ , а также ее электрическая проводимость  $\gamma$ , оказывающие существенное влияние на процесс накопления и сохранения инжектированного в пленку электрического заряда;

- вероятность разрушения алюминиевого покрытия из-за процессов электродиффузии;

- стойкость алюминиевого покрытия к высоковольтным разрядам.

### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

При оценке степени металлизации в качестве основных контролируемых параметров алюминиевых покрытий на ПЭТ-пленке были приняты удельное  $\rho$  и поверхностное  $R_s$  электрические сопротивления.

Для определения  $R_s$  использовался четырехзондовый компенсационный метод [3]. В результате измерений для образцов чистой пленки с металлизацией и пленки, наклеенной на СО, были получены значения  $R_s = 2,7 \pm 0,2$  Ом/см<sup>2</sup>.

Определение толщины алюминиевого покрытия пленки выполнялось оптическими методами на интерферометре МИИ-4. Результаты измерений показали, что толщины покрытия  $d$  не превосходят величин 0,1 мкм. При проведении более точных измерений методом Оже-спектроскопии с помощью прибора JAMP-10S (Япония) была получена величина  $d \leq 0,05$  мкм. Учитывая, что согласно [2] толщина покрытия должна составлять величину 0,04 мкм, в дальнейшем ее принимали равной 0,04 мкм. Размер зерна, определенный с помощью растрового электронного спектрографа, составлял  $(0,3-0,5) \cdot 10^{-2}$  мкм, что свидетельствует о мелкозернистости пленки. Для тонких пленок (толщиной менее 1 мкм) справедливо соотношение [3]:

$$R_s = \rho/d, \quad (1)$$

из которого для удельного сопротивления покрытия следует значение  $\rho \approx 1,1 \cdot 10^{-7}$  Ом·см.

Определение толщины окисного слоя на покрытии выполнялось с помощью эллипсометра ЛЭФ-3М, а также методом Оже-спектроскопии на приборе JAMP-10S. При этом были получены толщины слоя  $Al_2O_3$ , равные 3,5-4,0 нм, что составляет величину порядка 10 % толщины алюминиевого покрытия. Указанные значения толщин окисного слоя, определенного в условиях отсутствия данных по длительности хранения пленки, можно считать удовлетворительными.

При величине характерной плотности расчетного электронного тока на сотооснование (равной  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ А/м}^2$  для орбиты с высотой 600 км), которое выполнено из стеклопластика с поверхностным слоем наполнителя, с площадью поверхности, равной  $0,251 \text{ м}^2$  ( $660 \times 380$ ) мм<sup>2</sup> и площадью контактной площадки  $1 \text{ см}^2$ , плотность тока через ее сечение составляет  $j \cong 3,76 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$ , что в целом является вполне удовлетворительным с точки зрения величины разности потенциалов и нагрева площадки.

Таким образом, в "худшем" случае существования значительной разности потенциалов между сотопанелью и другими частями конструкции КА, алюминиевое покрытие на ПЭТ-пленке сотооснования должно обеспечивать стекание зарядов через контактную площадку и выравнивание потенциалов по конструкциям с идентичной металлизацией.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПЛЕНКИ

Как известно в высоковольтном материаловедении, разрядные напряженности изоляции существенно зависят от длины разрядного промежутка, уменьшаясь при его увеличении даже в случае однородного поля.

Справочные данные по пробивным напряженностям электроизоляционных пленок из различных материалов обычно приводятся к толщинам, большим 0,1 мм, в то время как пробивные напряженности тонких пленок, отнесенные к их конкретным толщинам, могут быть значительно выше и зависеть от толщины применяемой пленки. В связи с указанным выполнены испытания ПЭТ-пленки на пробой на установке УПН-5000 на постоянном напряжении при сравненном с поверхности пленки слоем алюминия.

Полученные значения пробивного напряжения ( $U_{пр}$ ) укладывались в диапазон  $165 \pm 15 \text{ В}$ , что соответствует величинам минимальной пробивной напряженности порядка 50 МВ/м.

#### НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ АЛЮМИНИЕВОГО ПОКРЫТИЯ ПЭТ-ПЛЕНКИ

Наибольшая вероятность отказов в работе проводящих пленочных покрытий обусловлена их разрушением из-за процессов электродиффузии [4].

Электродиффузия, т.е. перенос ионов, который наблюдается в металле при прохождении электрического тока, приводит к выгоранию пленки в местах его повышенной плотности (например, там, где пленка имеет меньшую толщину, в местах контактных площадок и пр.).

При этом получено, что время наработки на отказ ( $\tau$ ) тонкопленочных металлических проводников вследствие электродиффузии, вычисляется из соотношения:

$$\frac{b \cdot d}{\tau} = A \cdot j^n \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{k \cdot T}\right], \quad (2)$$

где  $b, d$  – ширина и толщина пленочного покрытия;  $j$  – плотность тока;  $n = f(j)$  – показатель степени плотности тока;  $E_a$  – энергия активации (для мелкозернистых пленок  $E_a = 0,77 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ );  $A = 2,43 \cdot 10^{-16} \text{ А}^{-1} \text{ ч}^{-1} \text{ см}^4$  – коэффициент (для мелкозернистых пленок).

График рассчитанного в соответствии с приведенной зависимостью времени наработки на отказ  $\tau$  контактной площадки при различных температурах  $t$  °С и характерных величинах электронного тока для передней и задней поверхностей сотооснования представлен на рис. 2.

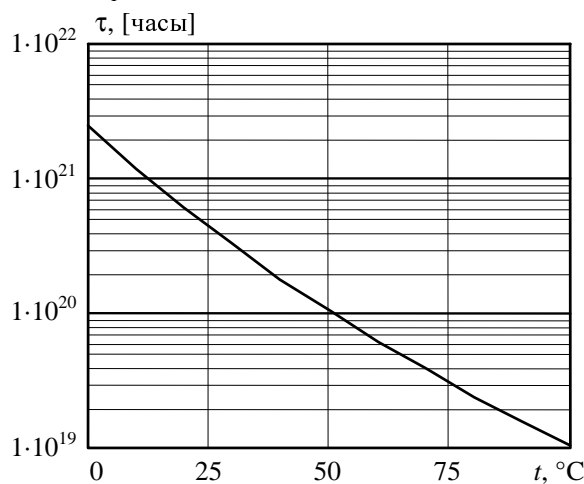


Рис. 2. Зависимость  $\tau = f(t)$

Как следует из графика, полученные времена является вполне достаточным для всего срока активного существования КА.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ПЛЕНКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

В случае неполного выполнения требований по эквипотенциализации конструкций КА на различных частях его поверхностей возможно возникновение высоковольтных электрических разрядов, характеристики которых и рекомендации по проведению испытаний на стойкость к которым приведены в [1].

В соответствии с указанными рекомендациями были проведены исследования образцов ПЭТ-пленки с односторонним слоем алюминиевой металлизации. Испытательная установка представляла собой высоковольтный генератор импульсных токов [5] и обеспечивала следующие параметры импульса:

- ток разряда, А: 50...100;
- длительность импульса тока, мкс: 1...3;
- длительность фронта импульса, мкс: 0,05...0,1;
- испытательное напряжение, кВ: 1...5.

Испытания проводились как при нормальном атмосферном давлении, так и в вакууме ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$ ).

мм.рт.ст. Заметной разницы в результатах испытаний при этом обнаружено не было.

Во всем диапазоне указанных параметров прохождение импульса тока приводило к деградации алюминиевого покрытия (в первую очередь в местах изгибов профиля поверхности или наличия острых кромок), что приводило к потере электропроводности в указанных местах. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами [6], согласно которым при превышении критического значения интеграла удельного действия ( $j_k^2 t$ ) происходит взрывное испарение материала покрытия. Для алюминия  $j_k^2 t = 1,1 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^4$ , в связи с чем толщина металлического проводящего покрытия особенно в месте контактной площадки  $1 \times 1 \text{ см}^2$  должна превышать 1 мкм.

### ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование электрофизических параметров ПЭТ-пленки показали:

1. Расчетный срок деградации покрытия по механизму электродиффузии обеспечивает необходимый ресурс в течение срока активного существования КА;

2. Алюминиевое покрытие на ПЭТ-пленке не обладает необходимой стойкостью к возможным электрическим разрядам, поскольку при прохождении импульсов тока происходит разрушение покрытия;

3. В процессе хранения КА возможна значительная деградация алюминиевого покрытия из-за его коррозии по глубине, что требует проведения дополнительного исследования.

Суммируя вышеизложенное, можно утверждать, что использование ПЭТ-пленки в конструкциях элементов космической техники, например, сотооснований, возможно при доведении толщины алюминиевого покрытия пленки до величины более 1 мкм и двухсторонней металлизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Графодатский О., Исляев Ш.Н. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. – Томск: МГП "РАСКО", 1993.
2. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы: Справочник. – Л.: Химия, 1982. – 317 с.
3. Симонов В.В., Корнилов Л.А., Шашелев А.В., Шокин Е.В. Оборудование ионной имплантации. – М.: "Радио и связь", 1988. – 184 с.
4. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. – М.: Высш. шк., 1987. – 376 с.
5. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. радио, 1974. – 256 с.
6. Котов Ю.А., Лучинский А.В. Усиление мощности емкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрываеваемых проволочках. – В кн.: Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П.Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

Поступила 30.08.2009

*Облакевич Сергей Викторович*, науковий співробітник  
ТОВ "Альтіс-Енерго", директор  
Україна, 02100, Київ, вул. Краківська, 6А  
тел. (044) 296-04-31, факс (044) 296-04-46

*Хомініч Віктор Іванович*, к.т.н., доц.  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут",  
кафедра техніки та електрофізики високих напруг  
Україна, 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37  
тел. (044) 454-95-08

*S.V. Oblakyevich, V.I. Khominich*

### **Experimental tests of electrophysical parameters of polyethylene-tereftalate films**

Results of experimental tests of polyethylene-tereftalate (PET) films characteristics are given. The structure of the film coating and the thickness of its oxide layer are determined. Results and values of specific and superficial resistance of the coating and its resistance to electrical discharges are obtained. Values of breakdown voltage and breakdown stresses for PET films are revealed. Estimation of the film reliability degree is made.

**Key words – dielectric polyethylene-tereftalate films, structure of coating, thickness of oxide layer, electrical discharges, breakdown voltages and stresses, reliability**