

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ К ДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

*В.В.Шалимов, Е.Б.Беспалова, Г.А.Зорин, Т.Б.Кандиболоцкая*

### Введение

Использование тонкопленочных пластиковых композиционных материалов для формирования систем изоляции электрических машин обуславливает повышенные к ним требования по радиационной стойкости и работоспособности в условиях воздействия электрических разрядов [1].

Для получения пленочных электроизоляционных материалов с удовлетворительными характеристиками, обеспечивающими в конечном итоге надежную работу энергетического оборудования, необходимы детальное изучение физико-химических процессов деградации свойств этих материалов в условиях длительной эксплуатации электромашин, управление этими процессами старения путем подбора компонентов композиционных материалов с требуемыми характеристиками, разработка оптимальных технологических конструкций [2]. Из литературы [3] известно, что разрушающее действие атмосферных разрядов, в том числе и частичных, на диэлектрики связывается с комплексным воздействием на поверхностный слой изоляционного материала электронно-ионной бомбардировки, теплового удара, ультрафиолетового излучения и химических продуктов газового разряда. Согласно современным представлениям, именно эти факторы главным образом и вызывают эрозийное разрушение самого диэлектрика; что же касается полимерных материалов, то время их разрушения определяется интенсивностью частичных разрядов и обратно пропорционально их среднему току [1]. Учитывая это обстоятельство, а также установленную в [4] пропорциональность срока жизни образца под действием разрядов толщине испытываемого слоя  $d$  (мкм), в качестве удельной характеристики стойкости электроизоляционных материалов действию частичных разрядов вводится величина  $V_p$ , полученная в теории разрушения диэлектриков под действием частичных разрядов, описанной в [2],

$$V_p = \frac{d}{\tau \cdot j}, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока разряда (мкА/мм<sup>2</sup>),  $\tau$  — время жизни образца (с),  $V_p$  имеет физический смысл удельной скорости разрушения материалов частичными разрядами.

Данные о скоростях разрушения пленочных материалов электрическими разрядами позволяют классифицировать сами материалы по стойкости к действию газовых разрядов.

Изучение скорости эрозии пленочных материалов под воздействием атмосферных разрядов осуществлялось нами на установке, схема которой представлена на рис. 1. В разрядной ячейке данной установки в системе электродов острие-плоскость возбуждался барьерный разряд (БР) с плотностью тока  $j \leq 25$  мкА/мм<sup>2</sup>, расстояние между электродами  $\sim 1$  мм. Барьерный разряд формировался на частоте  $f = 50$  Гц, рабочее напряжение  $U_p$  варьировалось от 3 до 10 кВ.

В нашей работе в качестве объектов исследования использовались следующие материалы.

1. Полиимидные пленки ПМ-1 толщиной 40 мкм, полученные методом полива раствора полиамидокислоты в диметилформамиде на стеклянную подложку. В процессе последующей обработки при  $T=570$  К в течение 900 с происходили удаление растворителя и циклизация полиамидокислоты в полиамид.

2. На основе пленки ПМ-1 изготавливались комбинированные слоистые полиимидно-фторопластовые материалы с двусторонним покрытием пленки ПМ-1 фторопластом Ф-4Д. Такие материалы являются полным аналогом пленки ПМФ-352, которую широко выпускает химическая промышленность. Она применяется в электротехническом производстве для формирования систем пазовой и межвитковой изоляции [5] электромашин.

3. Композиционные слоистые материалы на основе пленок ПМ-1 со слоями оксида кремния  $\text{SiO}_2$  различной толщины, напыленными электронно-лучевым методом.

4. Пленки ПЭТФ толщиной 10 мкм и композиционные слоистые материалы на их основе со слоями  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм.

В таблице приведены способы получения, толщины и значения скорости эрозии  $V_p$  композиционных слоистых материалов.

Величина удельной скорости эрозии определяется по формуле (1). Погрешность измерения  $V_p$  составляет  $\pm 20\%$ . Из анализа результатов,

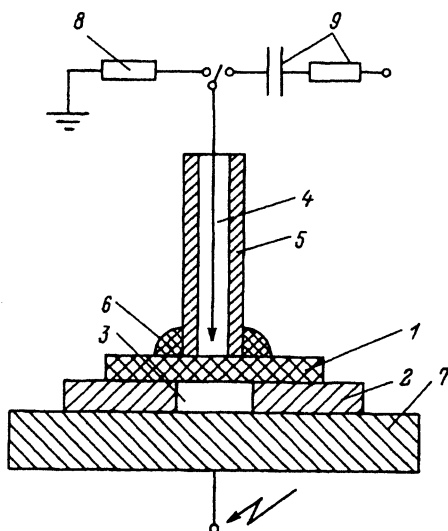


Рис. 1. Схема установки для измерения скорости эрозии пленок.

- 1 — исследуемый образец;
- 2 — диэлектрическая подложка;
- 3 — отверстие в диэлектрической подложке;
- 4 — игольчатый электрод;
- 5 — диэлектрический капилляр;
- 6 — капля жидкого диэлектрика;
- 7 — плоский электрод;
- 8 — устройство, регистрирующее интенсивность частичных разрядов;
- 9 — схема срабатывания установки на отключение при пробое испытуемого образца.

Материал	Способ получения покрытия	Толщина двухстороннего покрытия пленки полимера $d$ , мкм	$V_p$ , м/А · с
ПМ-1 (40 мкм)	—	0	$3.5 \cdot 10^{-4}$
ПМ-1-SiO <sub>2</sub>	Электронно-лучевое напыление	2	$3.3 \cdot 10^{-5}$
ПМ-1-4ФД	Из водной суспензии	40	$1.3 \cdot 10^{-3}$
ПЭТФ (7 мкм)	—	0	$2.0 \cdot 10^{-2}$
ПЭТФ-SiO <sub>2</sub>	Плазмохимический синтез	1	$1.0 \cdot 10^{-3}$

приведенных в таблице, следует, что для различных сочетаний компонент в композициях полимерная основа-покрытие при изменении свойств покрытий в широких пределах изменяется эрозионная скорость композиционного слоистого материала (КСМ). Так, в ряду рассматриваемых КСМ на основе пленки ПМ-1 величина эрозии  $V_p$  для слоистых систем ПМ-1-фторопласт 4ФД увеличивается с увеличением толщины фторопластового покрытия и достигает значения  $1 \cdot 10^{-2}$  м/А · с (рис. 2). С другой стороны, для различных сочетаний полимерная пленка (ПМ-1, ПЭТФ)-неорганическое покрытие SiO<sub>2</sub> величина  $V_p$  в пределах погрешности определения значительно меньше значения  $V_p$  для несущей пленки полимера. Следовательно, неорганические слои оксида кремния, нанесенные на поверхность полимера, могут выполнять функции изоляционного барьера, обеспечивать защиту поверхности пленок полимера от воздействия частичных разрядов, стабилизировать характеристики диэлектрического материала (рис. 3)

В нашем случае барьерный разряд, возбуждаемый в системе электродов острие-пленка полимера-плоскость, может моделировать процессы,

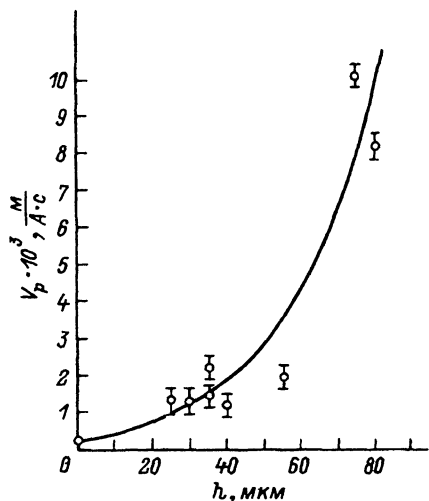


Рис. 2. Зависимость скорости эрозии  $V_p$  от толщины пленки фторопласта, нанесенной на ПМ-1.

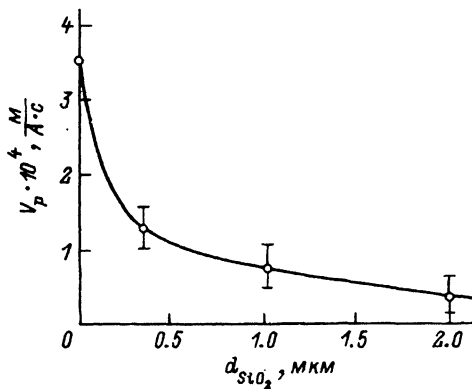


Рис. 3. Зависимость скорости разрушения композиционных слоистых материалов  $V_p$  от толщины пленки.

протекающие в самом диэлектрике во время развития предпробивных каналов-дендритов [6]. Это обуславливается следующими соображениями: 1) поверхность диэлектрика, на которой возникают эрозийные процессы, расположена по нормали к силовым линиям электрического поля, формирующего разряд; 2) плотность тока атмосферного разряда в предпробивных каналах-дендритах так же, как и в нашем случае, составляет величину порядка  $\sim 30 \text{ мкА/мм}^2$ .

Согласно литературным данным, разрушение пленки полимера в электрическом разряде происходит вследствие протекания сложных газодинамических процессов, возникающих при горении барьерного разряда на поверхности самого диэлектрика [7]. Решающую роль в разрушении полиимидной пленки играет бомбардировка ее поверхности электронами и ионами газового разряда. Энергия таких частиц, образующихся в атмосферном разряде, составляет величину порядка 25 эВ. Удар заряженных частиц о поверхность диэлектрика приводит к разрыву в поверхностных макромолекулах боковых (СR) и скелетных (СС) связей. В нашем случае разрушение поверхностных слоев полиимида (пленка ПМ-1) в результате комплексного воздействия электронно-ионных фрагментов, образующихся в зоне атмосферного разряда, мягкого УФ излучения, активных радикалов и ион-радикалов, агрессивных летучих продуктов распада самого полимера, приводит в конечном итоге в результате протекания сложных физических и физико-химических процессов к деструкции материала с удельной скоростью разрушения  $V_p = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ м/А} \cdot \text{с}$  (см. таблицу). При наличии слоя ПТФЭ на поверхности полиимидной пленки ПМ-1 в зоне атмосферного разряда при его горении образуется ряд фторсодержащих продуктов (CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>, HF, F<sub>2</sub>) [8] термического и радиационного разложения цепей, находящихся в поверхностном слое композиционного материала — пленки ПМФ-352.

В плазме газового разряда и на поверхности слоя ПТФЭ могут протекать реакции диссоциативного распада фрагментов макромолекул ПТФЭ, приводящие к образованию целого ряда сложных ионов, таких как C<sub>2</sub>F<sub>4</sub><sup>+</sup>, CF<sup>+</sup>, F<sup>+</sup> [9]. По-видимому, образование целого ряда высокоактивных фторсодержащих фрагментов в плазме атмосферного разряда в процессе взаимодействия потока частиц плазмы с поверхностью слоя фторопласта может ускорить процесс эрозии композиционного слоистого материала ПМФ-352 по сравнению с пленкой полиимида ПМ-1. Это предположение подтверждается видом функциональной зависимости скорости эрозии композиционного слоистого материала ПМФ-352 от толщины слоя пленки ПТФЭ на поверхности пленки ПМ-1 (рис. 2). По нашему мнению, увеличение скорости эрозии  $V_p$  от значения  $3.5 \cdot 10^{-4}$  (пленка ПМ-1) до значения  $1 \cdot 10^{-2} \text{ м/А} \cdot \text{с}$  с ростом толщины пленки фторопласта обусловлено эмиссией фторсодержащих ионов и радикалов в газоразрядный канал пробоя. Наличие фторсодержащих фрагментов в плазме газового разряда катализирует химическую деструкцию пленки полиимида ПМ-1. В результате комплексного воздействия электрического разряда и продуктов радиационно-химической деструкции фторопласта Ф-4Д примерно на порядок уменьшается время жизни комбинированного диэлектрика в зоне действия высокоинтенсивного разряда.

Исходя из рассмотренных выше проблем, можно сделать вывод о том, что применение фторопластового покрытия Ф4Д для расширения технологических возможностей функциональных возможностей пленки ПМ-1

(это покрытие придает пленке ПМ-1 способность свариваться с другими материалами, увеличивает химическую стойкость ПМ-1 и стойкость к термоокислительной деструкции) не является эффективным с точки зрения улучшения эксплуатационных диэлектрических характеристик полимера, поскольку резко (примерно в 10 раз) увеличивается скорость эрозии композиционного материала газовыми разрядами.

Перспективным путем решения задач создания пленочных изоляционных материалов с улучшенными изоляционными свойствами является объединение полимерных пленочных материалов в составные композиции со сплошными неорганическими слоями, т.е. конструирование материалов с чередованием органико-неорганических слоев. В этом случае на поверхности пластиковой ленты формируются тонкие слои неорганических соединений. Их отличительной особенностью является высокая стойкость к тепловым воздействиям, к действию ионизирующих излучений, агрессивных сред частичных разрядов. Кроме того, некоторые оксидные компоненты могут замедлять деструкцию полимера. В качестве защитных покрытий для получения электроизоляционных материалов могут применяться различные неорганические диэлектрические соединения с высокой электрической прочностью. Согласно [10], наибольшей электрической прочностью в тонких слоях толщиной до 5 мкм обладают пленки диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ . В них пробивная напряженность электрического поля достигает значений порядка 1000 кВ/мм. С другой стороны, скорость эрозии твердых стеклообразных материалов под действием ионного пучка значительно ниже, чем у ПЭТФ [11]. Исходя из указанных соображений, комбинация органической ленты (пленки ПМ-1 или ПЭТФ-лавсан), обладающей гибкостью и высокой электрической прочностью, с пленкой  $\text{SiO}_2$  позволит создать композиционный материал, стойкий к действию высокоинтенсивных газовых разрядов. Результаты исследований скорости эрозии таких композиционных слоистых материалов приведены на рис. 3 и в таблице. Из анализа графической зависимости, представленной на рис. 3, следует, что скорость эрозии  $V_p$  композиционного слоистого материала, полученного напылением оксида  $\text{SiO}_2$  на пленку ПМ-1, по мере увеличения толщины слоя оксида снижается до значения  $V_p = 3.3 \cdot 10^{-5}$  м/Ас.

Таким образом, проведенные исследования электрофизического механизма пробоя комбинированных пленочных материалов открывают новые возможности для конструирования композиционных электроизоляционных материалов с улучшенными эксплуатационными параметрами. Сочетание специфических физико-химических и электрических свойств полимерных пленок и неорганических диэлектрических покрытий делает возможным создание композиционных слоистых материалов на их основе с уникальными характеристиками, позволяющими использовать эти материалы в самых различных отраслях техники.

### Список литературы

- [1] Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
- [2] Шалимов В.В. и др. Препринт ЛФ ИМАШ им. А.А.Благоднарова. № 23-Л. Л., 1989. 28 с.
- [3] Reed J.C., McMahon F.J., Percins J.R. Effect of High Voltage Etresses on JFE and FER Fluorcarbon Plastics. Insulation. USA, 1964. Vol. 5. N 57.

- [4] *Ваксер Б.Д., Житомирский А.А.* Способ определения стойкости пленочных и листовых диэлектриков к действию ЧР. А.С. № 966584. Кл. G01N 27/68, G01R31-02. 1982.
- [5] *Березин В.Б., Прогоров Н.С., Рыков Г.А., Хайкин А.М.* Электротехнические материалы. Справочник. М.: Энергоиздат, 1983. 504 с.
- [6] *Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С.* Электрические свойства полимеров. Л.: Химия, 1986. 224 с.
- [7] *Гаммал В.С., Демитсьев А.А., Ионин А.А.* // Тез. докл. II Всесоюз. совещания по физике электрического пробоя газов. Тарту, 1984. Т. 2. С. 411.
- [8] *Уэлл А.А.* Фторполимер. М.: Мир, 1975. С. 305-306.
- [9] *Шалимов В.В.* // Канд. дис. Л., 1984.
- [10] *Майссел Л., Глэнг Р.* Технология тонких пленок. Справочник. Т. 2. М.: Сов. радио, 1977. С. 433-477.
- [11] *Акшин А.Е., Исасев Л.Н., Тюрин Ю.И.* // ЖФХ. 1967. Т. 39. С. 3067.

Институт проблем машиноведения  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
14 июля 1992 г.  
В окончательной редакции  
11 февраля 1993 г.