

УДК 621.315.3

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРЯДА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ТВЕРДЫХ СЛОИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

В.И. Меркулов, А.В. Почивалова

Томский политехнический университет

E-mail: mir742@elti.tpu.ru

Установлена связь величины разрядного напряжения на границе раздела твердых слоистых диэлектриков от длины разрядного расстояния. Обнаружено явление заглупления канала разряда в диэлектрик, прилегающий к границе раздела, выход его на внешнюю поверхность с последующим развитием по воздуху.

**Ключевые слова:**

Разряд на границе раздела, заглупление канала разряда, развитие трека, композиционные материалы.

Известно [1, 2], что широкое применение в качестве электрической изоляции высоковольтных электрических машин, трансформаторов и др. конструкций находят различные композиционные материалы, имеющие слоистую структуру. К таким материалам относят стеклолакоткань, имидофлекс, стекломиканит, текстолит, гетинакс и многие другие. Учитывая особенности электротехнических конструкций, такие материалы могут работать в условиях резконебалансированного электрического поля, где наряду с нормальной составляющей напряженности электрического поля будет значительная тангенциальная составляющая. Под действием тангенциальной составляющей напряженности электрического поля развитие разряда может происходить вдоль слоев такой изоляции или на границе раздела их с другим диэлектриком, что изучено недостаточно.

**Методика и техника эксперимента**

В данной работе проведены исследования развития электрического разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков в нормальных условиях на переменном напряжении частотой 50 Гц и постоянном токе в системе электродов игла – слой фольги, создающих резконебалансированное электрическое поле. В качестве образцов использовалась комбинация из различных диэлектрических материалов. Во всех случаях в качестве материала подложки применялся полиметилметакрилат (ПММА) толщиной 3 мм. В качестве другого материала использовались различные диэлектрики (ПММА, виниловый пластик, полиэтилен (ПЭ), стеклотекстолит, стекломиканит, стеклолакоткань, имидофлекс, полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и др.). Образцы представляли собой форму пластинок размером 50×100 мм<sup>2</sup>. В промежутке между пластинками разных материалов (на границе их раздела) располагались электроды игла – слой алюминиевой фольги (тип А). В качестве первого электрода использовались швейные иглы № 11, имеющие радиус закругления порядка 20...30 мкм, а в качестве второго электрода – алюминиевая фольга толщиной 12 мкм, край которой заворачивался в виде манжеты для выравнивания кромки.

Расстояние от края фольги до иглы регулировалось, чтобы исследовать зависимость значения разрядного напряжения от длины межэлектродного промежутка, и составляло 10...40 мм. Для регулирования величины тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в одном случае фольга дополнительно заворачивалась поверх исследуемого материала (тип В), в другом случае фольга заворачивалась в сторону подложки (тип В). Испытания проводились как при наличии воздушной прослойки на границе раздела между испытываемыми материалами, так и без воздушной прослойки. В этом случае исследуемые материалы склеивались с помощью эпоксидного компаунда холодного отверждения на основе смолы ЭДб и отвердителя – полиэтиленполиамина. Количество образцов на точку составляло не менее 10.

**Результаты эксперимента**

На рис. 1 приведены результаты исследования зависимости разрядного напряжения от длины разрядного промежутка на границе раздела испытываемых композиционных материалов с подложкой на переменном напряжении при наличии воздушной прослойки.

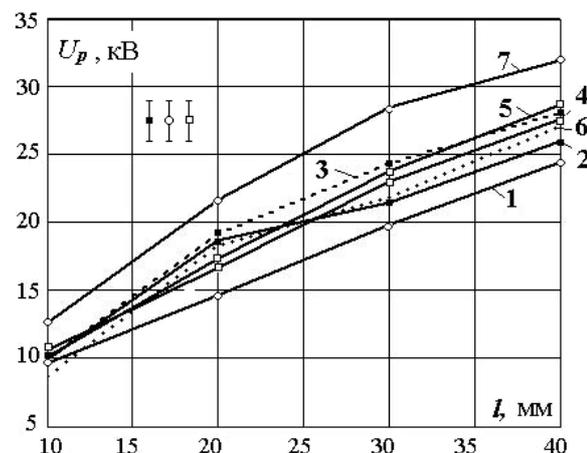


Рис. 1. Зависимость напряжения разряда  $U_p$  от длины межэлектродного промежутка  $l$  для образцов композиции ПММА с другим диэлектриком: 1) воздухом; 2) виниловым пластиком; 3) стеклопластиком; 4) ПЭ; 5) имидофлексом; 6) ПЭТФ; 7) ПММА

Как видно из рис. 1, наименьшее разрядное напряжение характерно для разряда по границе раздела оргстекло – воздух (кривая 1). В композициях ПММА – материал величина разрядного напряжения несколько увеличивается, однако сам разряд происходит только на границе их раздела, что согласуется с экспериментальными результатами, имеющимися в литературе. Можно отметить, что величина разрядного напряжения при наличии воздушной прослойки на границе раздела слабо зависит от вида композиции (кривые 2–6) и установить ее связь с типом исследуемого материала практически невозможно.

На рис. 2 приведены результаты исследования зависимости разрядного напряжения от длины разрядного промежутка на границе раздела испытываемых композиционных материалов с подложкой на переменном напряжении, когда воздушная прослойка заменена слоем эпоксидного клея.

Из рис. 2 видно, что наибольшее разрядное напряжение наблюдается в композиции ПММА – имидофлекс (кривая 1). Более низкие значения разрядного напряжения характерны для композиций ПММА – ПЭ и ПММА – ПЭТФ (кривые 3, 4). В этих композициях развитие разряда сопровождается пробоем пленки около иглы и выходом канала разряда на внешнюю поверхность исследуемого материала. Поэтому величина разрядного напряжения в таких композициях незначительно отличается от разрядного напряжения на границе раздела ПММА – воздух.

В композиции ПММА – имидофлекс развитие разряда имеет более сложный характер и происходит с заглублением канала в исследуемый материал и последующим его развитием в виде трека во внутреннем слое имидофлекса между двумя полиимидными пленками, т. е. в слое стеклоткани. Вид канала разряда в таких образцах показан на рис. 3.

Аналогичный характер развития разряда наблюдается также в композициях ПММА – стеклолакоткань и ПММА – стекломиканит.

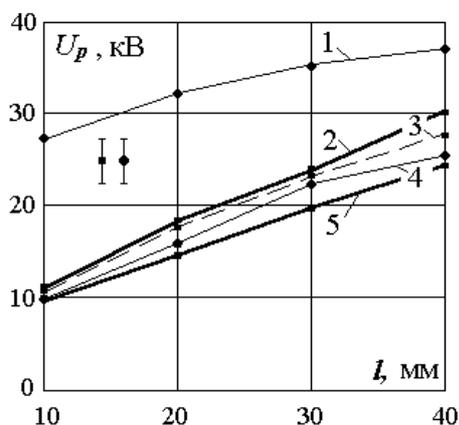


Рис. 2. Зависимость напряжения разряда  $U_p$  от длины межэлектродного промежутка  $l$  для образцов композиции ПММА с другим диэлектриком: 1) имидофлексом; 2) виниловым пластиком; 3) ПЭ; 4) ПЭТФ; 5) воздухом

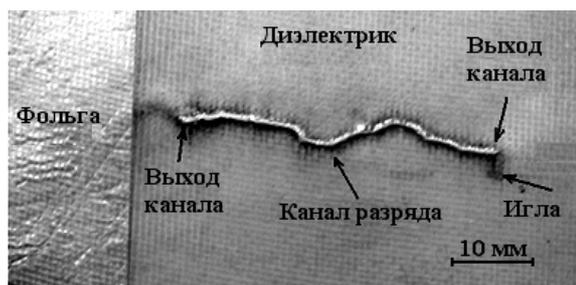


Рис. 3. Вид канала разряда в композиции ПММА – имидофлекс

Для регулирования величины тангенциальной составляющей напряженности электрического поля использовались образцы типа Б и В. Результаты испытаний показаны на рис. 4.

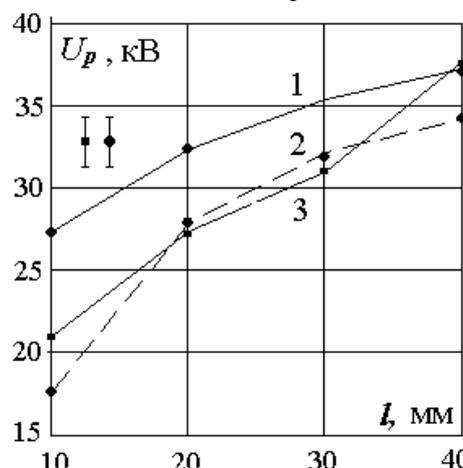


Рис. 4. Зависимость разрядного напряжения  $U_p$  от длины промежутка  $l$  для композиции ПММА – имидофлекс в системе электродов типа: 1) А; 2) Б; 3) В

Как видно из рис. 4, более высокое разрядное напряжение имеет место в образцах с системой электродов типа А (кривая 1). Для образцов, испытываемых в системе электродов типа Б и В (кривые 2, 3), напряжение развития разряда более низкое, что, по-видимому, связано с возрастанием степени неоднородности электрического поля. В ряде случаев для образцов данной композиции в системе электродов типа Б изменялся и путь канала разряда (рис. 5). В этом случае наблюдался полный пробой пленки имидофлекса и выход канала разряда на внешнюю поверхность.

Следует отметить, что с увеличением длины межэлектродного промежутка разница между значениями разрядного напряжения в различных электродных системах нивелируется, и различием в значениях разрядного напряжения можно пренебречь. Аналогичные зависимости разрядного напряжения от длины межэлектродного промежутка и типа электродной системы также наблюдались нами при испытании композиции ПММА – стеклолакоткань. При испытании композиций ПММА – ПЭТФ и ПММА – ПЭ различий в значениях разрядного напряжения в разных электродных системах нами не установлено. Возможно, это

связано с меньшей толщиной ПЭ и ПЭТФ пленок (20 мкм) в сравнении с пленкой имидофлекса (60 мкм), что облегчало пробой этих пленки и выход разряда на поверхность.



Рис. 5. Вид канала разряда в композиции ПММА – имидофлекс в системе электродов типа Б

Чтобы оценить степень изменения неоднородности электрического поля при переходе системы электродов типа А к системе электродов типа В, нами производился расчет напряженности поля в таких конструкциях с использованием программы моделирования двумерных полей ELCUT, разработанной ПК «ТОР» г. Санкт-Петербург [4]. Картина распределения эквипотенциальных линий напряженности электрического поля в системе электродов типа А и В представлена на рис. 6.

Как видно из рис. 6, в системе электродов типа В, когда фольга дополнительно заворачивалась поверх исследуемого материала, наблюдалось появление дополнительного участка высокой напряженности электрического поля у верхнего края фольги. Существенного изменения степени неоднородности электрического поля в средней части разрядного промежутка по сравнению с системой электродов типа А не происходило. Это согласуется с полученными нами результатами, приведенными на рис. 5.

При проведении испытаний используемых композиционных материалов на постоянном токе было установлено, что развитие разряда на границе раздела этих материалов протекает аналогично разряду на переменном напряжении.

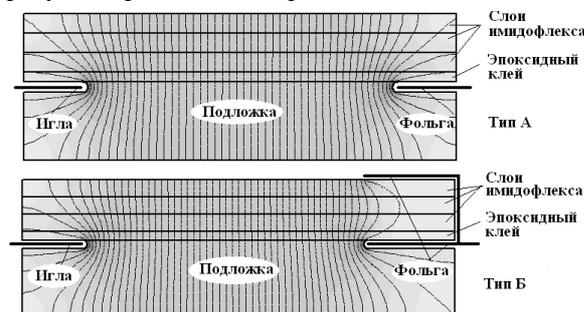


Рис. 6. Картина распределения эквипотенциальных линий напряженности электрического поля в системе электродов типа А и В для композиции ПММА – имидофлекс

Влияния полярности иглы на величину разрядного напряжения не было обнаружено, что объясняется высокой напряженностью электрического

поля не только у иглы, но и на крае фольги. Установлено, что, как и при испытании на переменном напряжении, наиболее высокие значения напряжения разряда на постоянном токе наблюдались в образцах композиции ПММА – имидофлекс. Можно отметить, что в отличие от испытаний на переменном токе развитие разряда на постоянном токе часто сопровождалось расслоением исследуемого материала (имидофлекса, стеклолакоткани). Вероятной причиной этого явления является более высокая проводимость лаковой (клеящей) основы композиции, за счет чего происходит ее нагрев и размягчение. При резком повышении температуры клеящей прослойки могло происходить выделение газообразных продуктов, под действием которых происходило расслоение исследуемого материала. Кроме того, можно также отметить, что при испытаниях на постоянном токе происходит увеличение количества образцов, в которых развитие разряда сопровождалось выходом канала разряда через исследуемый материал на его внешнюю поверхность. Такая картина в основном наблюдалась для материалов, толщина которых не превышала 50 мкм (ПЭ и ПЭТФ пленки, лакоткань). По-видимому, в материалах, имеющих толщину более 50...100 мкм (винипласт, стеклотекстолит, стекломиканит), выход канала разряда на внешнюю поверхность материала затрудняется из-за более высокого напряжения, необходимого для пробоя.

Подобная картина развития разряда имеет место не только при непрерывно возрастающем напряжении, но и в процессе электрического старения, т. е. при длительном воздействии испытательного напряжения. В этом случае напряжение на образце поднималось ступенчато с интервалом в 10 мин до наступления полного разряда. Было установлено, что развитие канала разряда в процессе электрического старения, как правило, происходит с его заглублением в исследуемый материал, т. е. по механизму, показанному на рис. 3.

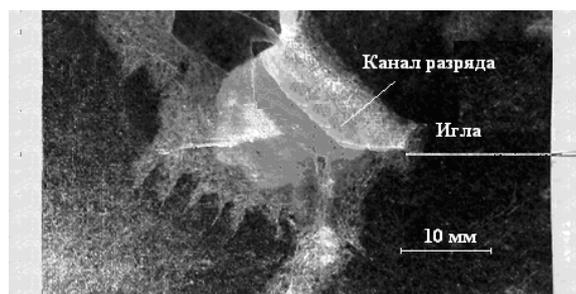


Рис. 7. Вид канала разряда в композиции ПММА – стекломиканит в системе электродов типа А при испытании на постоянном токе ( $I=10\text{мА}$ )

В случае электрического старения на постоянном токе развитие канала разряда сопровождается, как правило, расслоением исследуемого материала (имидофлекс, стеклолакоткань, стекломиканит). В ряде случаев за счет расслоения исследуемого материала при испытании на постоянном токе разряд выходил на край образцов и сопровождался перекрытием по

воздуху. В образцах композиции ПММА – стекломиканит разряд, как правило, сопровождался разрывом исследуемого материала, что показано на рис. 7.

#### Выводы

1. В композициях с тонкими слоистыми материалами толщиной порядка 20...40 мкм (лакоткань, ПЭ и ПЭТФ пленки) развитие разряда сопровождается пробоем пленки и выходом канала на их внешнюю поверхность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко А.Н. Электрическая прочность границы раздела полимерной композиционной изоляции: Дис. ... к.т.н. – Томск, 1986. – 168 с.  
 2. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.

2. В композициях слоистых материалов, имеющих толщину более 50...100 мкм (имидофлекс, стеклотекстолит, стекломиканит, стеклолакоткань и др.), происходит заглупление канала разряда в толщу и его последующее развитие по границе раздела клеящего лака и пленки.

3. На постоянном токе развитие разряда в композиционных материалах, как правило, сопровождается расслоением компонентов композиции за счет разогрева слоя клеящего лака.

3. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. – М.-Л.: Энергия, 1968. – 287 с.

4. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tor.ru/elcut/contact\\_r.htm](http://www.tor.ru/elcut/contact_r.htm). – 2007.

Поступила 03.06.2008 г.

УДК 537.521.7:621.315.6

## ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА, НАПОЛНЕННОГО ЦИРКОНАТОМ ТИТАНАТА СВИНЦА

С.Н. Ткаченко, О.С. Гефле, С.М. Лебедев

ОСП НИИ высоких напряжений ГОУ ВПО ТПУ  
 E-mail: polymer@hvd.tsk.ru

*Приведены результаты исследования полевой зависимости комплексной диэлектрической проницаемости полиэтилена, наполненного ультрадисперсным порошком цирконата титаната свинца. Установлено, что зависимость  $\epsilon^* = f(\epsilon')$  на комплексной плоскости до и после определенного уровня воздействующего напряжения аппроксимируется двумя функциями: линейной – при  $U \leq U_{ок}$  и дебаевской – при  $U > U_{ок}$ , где  $U_{ок}$  – значение напряжения при котором начинается нелинейная зависимость  $\epsilon^* = f(\epsilon')$ . Предложен способ расчета электрической прочности композиционных полимерных материалов по параметрам спектра диэлектрической релаксации.*

#### Ключевые слова:

*Диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность, полиэтилен, цирконат титанат свинца.*

#### Введение

В [1] показано, что метод диэлектрической спектроскопии дает полную информацию о поведении композиционных полимерных материалов (КПМ) в слабом электрическом поле в определенном температурно-частотном диапазоне и позволяет прогнозировать изменение их свойств в зависимости от состава полимерной матрицы и концентрации наполнителей. Однако для целенаправленного регулирования состава и свойств КПМ необходимо исследование комплексной диэлектрической проницаемости не только в слабом, но и в сильном электрическом поле. Это обусловлено тем, что введение в полимерную матрицу модифицирующих добавок неорганического происхождения может обуславливать иное поведение КПМ в сильном электрическом по-

ле вследствие усиления локального поля на границах раздела полимерная матрица – наполнитель [2].

Так, в [1] была сделана оценка величины локального поля для полиэтилена низкой плотности (ПЭНП), наполненного порошком цирконата титаната свинца (ЦТС) по формуле Лорентца. При концентрации ЦТС  $C=40$  об. % локальное поле в неполярной матрице увеличивается примерно в 3 раза по сравнению с  $E_0$ , что может приводить к локальному пробое диэлектрика в сильном электрическом поле.

Очевидно, что усиление поля в локальном объеме диэлектриков должно приводить к снижению их электрической прочности в любом диапазоне частот внешнего электрического поля. То есть, повышение электрофизических характеристик (удельного объемного сопротивления  $\rho_v$  и диэлектриче-