

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАРОЖДЕНИЯ КАНАЛОВ НЕПОЛНОГО ПРОБОЯ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ, М. С. ЗЕМЕРОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной
и кабельной техники)

Процесс развития пробоя твердых диэлектриков в неоднородном электрическом поле можно разделить на стадии: зарождение каналов неполного пробоя, развитие каналов пробоя и завершающую стадию. Соответственно этому время до пробоя выразится

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_z + \tau_p + \tau_k, \quad (1)$$

где τ_z — время от начала приложения напряжения до появления первого необратимого разрушения (микроканала) в твердом диэлектрике;

τ_p — время роста каналов неполного пробоя от момента зарождения микроканала до касания противоположного электрода;

τ_k — время от момента соединения электродов каналом до короткого замыкания.

В данной работе исследуется τ_z , которое можно оценить, исходя из термофлюктуационной теории разрушения полимеров [1, 2].

При действии электрического поля и механического напряжения τ_z выразится формулой

$$\tau_z = \tau_0 \exp \left\{ \frac{D}{2KT} \left[V \sqrt{1-2x} - x \ln \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$x = \sqrt{\left(\frac{A \cdot e^{-bT} \cdot \beta \cdot f \cdot E}{D} \right)^2 + (\gamma \sigma)^2};$$

$\frac{1}{\tau_0}$ — собственная частота колебаний атомов;

D — энергия диссоциации связи, приближенно равная энергии разрыва;

K — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

A, γ — структурно-чувствительные коэффициенты;

b — коэффициент, учитывающий изменение плотности и модуля упругости диэлектрика с изменением температуры;

β — коэффициент, учитывающий неоднородность в диэлектрике;

σ — механическое напряжение;

$f \cdot E$ — максимальная напряженность электрического поля.

Исследование τ_z проводилось на образцах из оргстекла (ПММА), полистирола (ПС) и эпоксидного компаунда холодного отверждения

(ЭК) (100 в. ч. ЭД-5 + 9 в. ч. ПЭПА) в системе электродов «игла—плоскость» при комнатной температуре. Иглы, имеющие радиус закругления 10 ± 1 мк, вдавливались в ПММА и ПС при температуре выше температуры стеклования. В ЭК иглы заливались обычным способом. Образцы проходили следующий режим отверждения: $20^\circ\text{C} - 24$ час, $80^\circ\text{C} - 12$ час. с последующим снижением температуры со скоростью 10 град/час.

Расстояние между электродами в ПММА, ПС и ЭК составляли соответственно 4 мм, $4,2$ мм и 3 мм. Плоским электродом служил полупроводящий слой из смеси эпоксидного компаунда и графита. Образцы испытывались по 20 штук в партии при переменном (50 гц) напряжении $27-36$ кв. В качестве изолирующей среды применяли трансформаторное масло.

Через определенные промежутки времени образцы просматривались в микроскоп и регистрировалось τ_3 .

Максимальную напряженность электрического поля возле иглы определяли по формуле (3)

$$fE = \frac{2 \cdot U}{r \ln \left(1 + \frac{4d}{r} \right)}, \quad (3)$$

где u — приложенное напряжение;

r — радиус закругления иглы;

d — расстояние между электродами.

По экспериментальным значениям $\tau_3 = f(E)$ можно рассчитать коэффициенты D и $A \cdot e^{-bT} \cdot \beta$, входящие в уравнение (2). В табл. 1 приведены значения этих параметров, рассчитанных по результатам наших испытаний и экспериментальным данным, приведенным в [7, 8]. В расчетах принято, что внутренние механические напряжения около игл равны нулю ($\sigma = 0$).

Таблица 1

Материал	$D_{\text{теор}} \cdot 10^{19}$	$D_{\text{эксп}} \cdot 10^{19}$	$Ae^{-bT}_{\text{теор}} \cdot 10^{28}$	$Ae^{-bT} \beta_{\text{эксп}} \cdot 10^{28}$	α
	$\text{дж} \cdot \text{св}^{-1}$	$\text{дж} \cdot \text{св}^{-1}$	$\text{дж} \cdot \text{м} \cdot \text{св}^{-1} \cdot \text{в}^{-1}$	$\text{дж} \cdot \text{м} \cdot \text{св}^{-1} \cdot \text{в}^{-1}$	—
ПММА	4,4—5,5	4,55	0,21	0,28	1,33
ПММА [7]	"	3,6	"	0,21	1,0
ПС	"	4,75	0,206	0,39	1,9
ЭК	"	5,0	0,147	0,36	2,44
ЭК [8]	"	4,4	"	0,19	1,29
ПЭ [7]	"	3,82	0,043	0,13	3,1

Из табл. 1 видно, что $D_{\text{эксп}}$ хорошо согласуется с энергией разрыва связи С—С ($4,4-5,5 \cdot 10^{19}$ дж · св⁻¹ [4]), которая является основной связью в полимерных цепях.

С уменьшением испытываемого объема v диэлектрика вероятность появления в этом объеме неоднородностей, приводящих к увеличению максимальной напряженности электрического поля, снижается, т. е. при $v \rightarrow 0$ коэффициент $\beta \rightarrow 1$. В испытанных образцах зарождение канала

происходило всегда около иглы в объеме полимера, ограниченном несколькими кубическими микронами, поэтому можно ожидать, что коэффициент β близок к единице.

Величина Ae^{-bT} оценена теоретически из соотношения [2]

$$Ae^{-bT} = \frac{\alpha \cdot e \cdot M \cdot V \sqrt{\epsilon \cdot G_m}}{3,22 \cdot N_A \cdot \rho \cdot n \left(1 - \frac{2 \cdot m}{m_{\text{ц}}}\right)}, \quad (4)$$

где α — коэффициент неупорядоченности молекулярных цепочек;
 M — молекулярный вес мономерного звена полимера;
 ϵ — диэлектрическая проницаемость;
 G_m — модуль упругости;
 N_A — число Авогадро;
 ρ — плотность;
 m — молекулярный вес конца цепи полимера, способного к проскальзыванию;
 $m_{\text{ц}}$ — молекулярный вес полимера;
 n — число связей С—С в основной цепи мономерного звена.

Динамический модуль упругости точнее отражает упругие свойства внутримолекулярных связей по сравнению со статическим, поэтому в расчетах коэффициента $Ae_{\text{теор}}^{-bT}$ был выбран динамический модуль упругости при температуре 293° К. Отношение $\frac{2m}{m_{\text{ц}}}$ принималось равным нулю. Величины, необходимые для вычислений и отражающие свойства полимеров, приведены в табл. 2 согласно литературе [5, 6].

Таблица 2

Материал	$\rho \cdot 10^{-3}$	$G_m \cdot 10^{-9}$	ϵ	$M \cdot 10^3$
	кг·м ⁻³	н·м ⁻²	—	к моль
ПММА	1,2	5,5	3,6	43
ПС	1,05	4,0	2,5	52
ЭК	1,2	3,5	4—5	34
ПЭ	0,94—0,96	2,0	2,4	14

Коэффициент α может изменяться в пределах от 1 до 3. В табл. 1. $Ae_{\text{теор}}^{-bT}$ рассчитано при $\alpha = 1$. Здесь же приведено значение $Ae^{-bT} \beta_{\text{эксп}}$. Принимая, что $\beta = 1$, определен коэффициент неупорядоченности молекулярных цепочек полимеров как отношение

$$\frac{Ae^{-bT} \cdot \beta_{\text{эксп}}}{Ae_{\text{теор}}^{-bT}}$$

Определенные таким образом коэффициенты α полимеров находятся в пределах, предсказанных теорией. Из таблицы видно, что наиболее неупорядоченной структурой обладают ПЭ и ЭК.

Проведенные эксперименты и расчеты показывают, что время зарождения микроканалов при длительном приложении напряжения в неравномерном поле хорошо описывается термофлюктуационной теорией разрушения материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев, В. С. Дмитриевский. Материалы Всесоюзной конференции «Физика диэлектриков и перспективы ее развития», т. 2, Л., 1973.
 2. В. С. Дмитриевский. Расчет электрической изоляции. Томск, ТПИ, 1971.
 3. Н. Н. Миролюбов и др. Методы расчета электрических полей. М., «Высшая школа», 1963.
 4. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. Изд. 6-е. Л., «Химия». 1972.
 5. Труды Ростовского института железнодорожного транспорта. Вып. 79, 1971.
 6. К. И. Черняк. Неметаллические материалы в судовой электро- и радиотехнической аппаратуре. Справочник «Судостроение». Л., 1970.
 7. M. Nawata, H. Kawamura and Jeda. Voltage and Temperature Dependences of Treeing Breakdown in Organic Solid Insulators. Electr. Eng. Jap., vol. 91, No. 4, 1971.
 8. W. Mosch, J. Pilling, B. Tschacher, K. Eckholz. Kanaleinsatzzeit und Durchschlagzeit zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Feststoffisolierungen. Elektr. 11, 1972.
-