

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ, Л. И. КОРНИЛОВА

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной
и кабельной техники)

Механическое разрушение твердых диэлектриков связано с разрывом внутримолекулярных и межмолекулярных связей. Разрыв внутримолекулярных связей сопровождается образованием радикалов [1], разделением зарядов [2—4], что приводит к образованию высоких электрических полей в месте разрушения.

Электрические явления, происходящие при механическом разрушении твердых диэлектриков, имеют следующие этапы: 1) разрыв связей с разделением зарядов, остающихся на противоположных стенках трещин; 2) увеличение расстояния между стенками трещины сопровождается

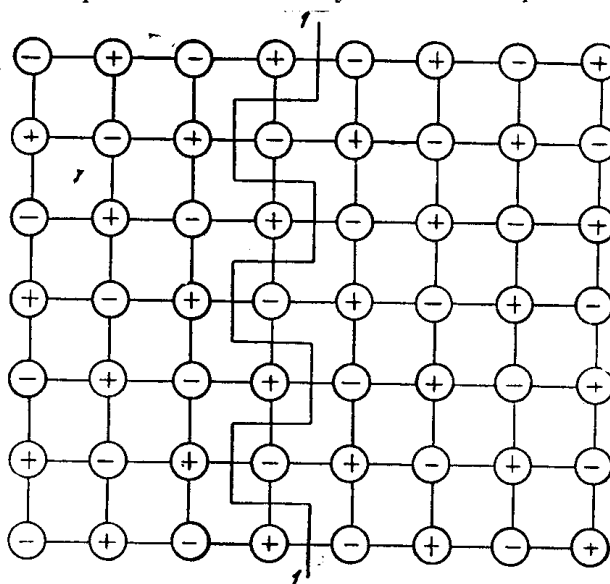


Рис. 1. Схема границы разрушения твердого диэлектрика с ионной структурой

ся повышением разности потенциалов между ними; 3) при определенной разности потенциалов происходит разряд в газе, заполнившем пространство между трещинами.

Плотность образующихся на стенках трещины зарядов и напряженность поля в полости можно оценить, если предположить, что разрушение диэлектрика происходит по направлению 1—1 (рис. 1):

$$q = \kappa q_0 z \frac{N_A p a}{M}, \quad (1)$$

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{\kappa}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{z N_A \rho a}{M}, \quad (2)$$

где q — плотность заряда на поверхности трещины;

q_0 — заряд электрона;

N_A — число Авогадро;

z — отношение заряда иона к заряду электрона;

ρ — плотность диэлектрика;

a — постоянная решетки;

M — молекулярный вес;

ϵ_0 — электрическая постоянная;

ϵ — диэлектрическая проницаемость газа, заполняющего трещину;

κ — коэффициент, учитывающий уменьшение плотности заряда за счет отклонения направления разрушения от 1—1.

Рассчитанная плотность заряда при разрыве кристалла LiF равна $1,96 \text{ К/м}^2$. Эксперименты при разрыве кристалла LiF в вакууме дали плотность заряда $4,8 \cdot 10^{-5} \text{ К/м}^2$ [4], т. е. примерно в 10^5 раз меньшую расчетной. При расщеплении слюды измеренная плотность заряда достигала $0,33 \text{ К/м}^2$ [2], что значительно ближе к теоретически рассчитанному значению. В табл. 1 приводятся подсчитанные по формулам (1) и (2) значения q и E в предположении, что $\kappa = 10^{-3}$. В этой же таблице приводится значение энергии кристаллической решетки (W_K), взятой из [5].

Таблица 1

Кристалл	$q \cdot 10^3$ к. м ²	$E \cdot 10^{-7}$ В/м	W_K дж/св	x_1 мкм	x_2 мкм
LiF	1,96	2,39	16,5	21,9	0,184
NaCl	1,0	2,01	12,25	28,80	0,195
KCl	0,81	1,98	11,2	29,80	0,196
KI	0,641	1,48	9,9	50,0	0,215

Образующаяся при механическом разрушении трещина заполняется воздухом. Разность потенциалов между стенками трещины может вызвать разряд в газе при условии, что электрическая прочность воздуха будет меньше или равна напряженности поля в трещине. Электрическая прочность воздуха зависит от величины зазора между стенками

$$\ln E_{\text{пр}} = \frac{46,8}{\ln 2,4 \cdot 10^6 x}, \quad (3)$$

где $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность воздуха в кВ/см;

x — величина зазора в см.

Приравнявая $E_{\text{пр}}$ в формуле (3) напряженности поля, образующейся при механическом разрушении твердого диэлектрика, находим минимальную ширину трещины, при которой произойдет разряд в воздухе (частичный разряд). Рассчитанные из этого условия ширины трещины x_1 и x_2 даны в табл. 1. Величина x_1 подсчитывалась при $\kappa = 10^{-3}$, а x_2 — $\kappa = 1$. Подсчеты показали, что пробой газа в трещине должен наблюдаться при минимальной ширине от 0,2 до 2,5 мкм.

Газовый разряд сопровождается видимым свечением и электромагнитным излучением. Эти явления наблюдались при образовании микротрещин в LiF [6]. Нами проведено исследование количества электромагнитных импульсов (количество частичных разрядов), возникающих при изгибном разрушении некоторых твердых диэлектриков. Образцы

диэлектриков представляли собой балочки прямоугольного сечения, свободно устанавливаемые на двух опорах. С нижней стороны в центре балочки делался надрез с целью локализации места разрушения. Нагрузка прикладывалась в центре балочки. Некоторые эксперименты проводились на балочках, закрепленных с одного конца и приложенной нагрузкой с другого конца. Материалом образцов были выбраны силикатное стекло, полиметилметакрилат, эпоксидная смола, полистирол. Площадь поперечного сечения образцов составляла 0,5—0,75 см², и только образцы из полистирола имели площадь поперечного сечения 3 см². Количество частичных разрядов измерялось счетчиком ПС-10000 с чувствительностью 10⁻² в. Для улавливания электромагнитных излучений использовались два электрода, которые приклеивались к образцу.

Исследования показали, что частичные разряды появлялись при механическом разрушении диэлектриков: неорганического с ионными связями (силикатное стекло) и органических с ковалентными связями: полярных (полиметилметакрилат, эпоксидная смола) и неполярного (полистирол). Плотность заряда q и напряженность поля в трещине будет тем больше, чем выше плотность разрываемых связей. Из табл. 1 видно, что q и E возрастают с увеличением энергии кристаллической решетки. В [7] было установлено, что прочностные свойства ионных диэлектриков (напряжение при механическом разрушении, электриче-

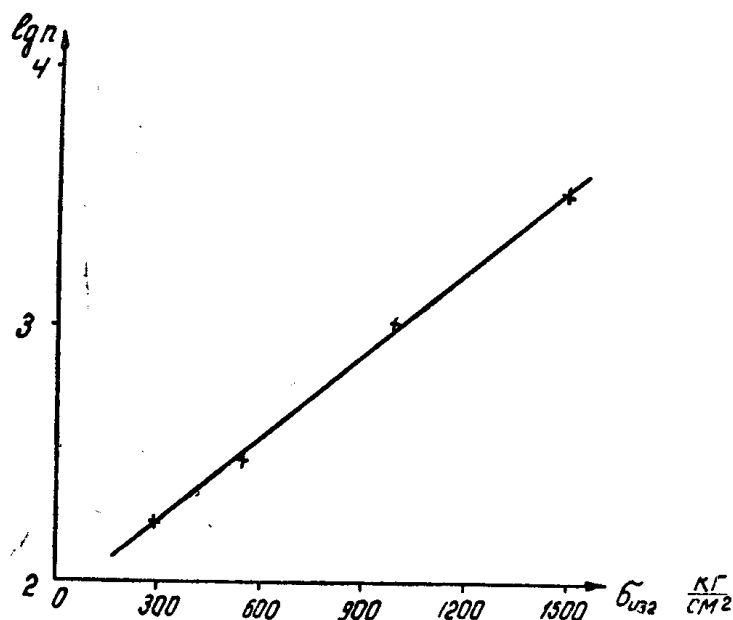


Рис. 2. Зависимость числа частичных разрядов от механической прочности твердого диэлектрика при изгибе

ская прочность) определяются энергией кристаллической решетки, т. е. прочностью и плотностью связей в материале. Позднее было показано, что электрическая прочность неорганических и органических диэлектриков зависит от энергии каналообразования, которая определяется как энергия диссоциации связей и ионизации атомов, составляющих молекулу веществ, отнесенная к молю материала [8].

Таким образом, можно ожидать, что число частичных разрядов, возникающих при разрушении твердых диэлектриков, должно быть связано с прочностными свойствами материала.

На рис. и 3 приводится зависимость числа частичных разрядов (n), возникающих при механическом разрушении твердых диэлек-

триков, от их электрической и механической прочности. Значения электрической и механической прочности взяты из [9, 10]. Каждая точка на графиках соответствует среднему значению n из 20—25 наблюдений. Зависимость $\lg n$ от электрической и механической прочности диэлектриков хорошо укладывается на прямую.

Попытки связать число частичных разрядов, возникающих при механическом разрушении твердых диэлектриков, с их удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью показали, что такой связи нет.

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Механическое разрушение твердых диэлектриков сопровождается образованием зарядов на противоположных стенках трещины разрушения.

2. В процессе механического разрушения в трещине развивается частичный разряд.

3. Число частичных разрядов не зависит от природы разрушаемых связей (ионная, ковалентная).

4. Число частичных разрядов при механическом разрушении хорошо коррелируется с прочностными характеристиками диэлектрика (электрической прочностью и прочностью при изгибе).

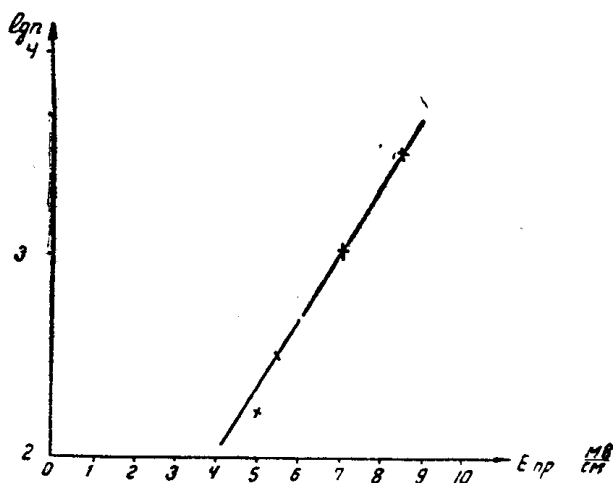


Рис. 3. Зависимость числа частичных разрядов от электрической прочности твердых диэлектриков

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Савостин, Э. Т. Томашевский. «Физика твердого тела», 1970, 12, № 10, 2857—2864.
2. Н. А. Кротова, В. Д. Карасев. ДАН СССР, 1953, 92, № 3, 607.
3. Л. М. Беляев, В. З. Набатов. «Кристаллография», 1962, 7, № 6, 576—580.
4. М. И. Корнфельд. «Физика твердого тела», 1968, 10, № 8.
5. Краткий справочник физико-химических величин. М., «Химия», 1967.
6. Л. М. Беляев, В. В. Набатов, Ю. Н. Мартышев, Г. Г. Бендрикова. Сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников». М., «Энергия», 1964, 343—346.
7. А. А. Воробьев. Изоляционные свойства, прочность и разрушение диэлектриков. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1960.
8. Ю. Н. Вершинин. Электрический пробой твердых диэлектриков. Новосибирск, «Наука», 1968.
9. J. Artbauer, J. Griac. Acta techn. CSAV. № 3, 1966, II, 416—428.
10. Справочник по электротехническим материалам. Том I, часть I. Под ред. Ю. В. Корицкого, Б. М. Тареева. М., Госэнергоиздат, 1958.