

## О ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ ОТ ЭКСПОЗИЦИИ И СКОРОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОТ ПРОЧНОСТИ ТЕЛА

А. А. ВОРОБЬЕВ

### Введение

Представление о прочности и устойчивости твердых тел обычно связано с понятием катастрофического процесса разрушения, наступающего при достижении разрушающим фактором некоторой критической величины.

Представление о катастрофическом характере разрушения основано на наблюдении, что образец, находящийся под воздействием нагрузки ниже предельной, длительное время не разрушается. При визуальном наблюдении кажется, что при достижении или превышении нагрузки выше предельной, образец сразу разрушается. Таким образом, возникли технические характеристики тела: прочность на разрыв, электрическая прочность, температура плавления, практически необходимые и удовлетворительно описывающие поведение материала при соответствующей нагрузке.

Наблюдается аналогия закономерностей, описывающих механическое, температурное и электрическое разрушение твердых тел.

Время разрушения образца при растяжении (долговечность)  $t_{\text{разр}}$  растет экспоненциально или более быстро с уменьшением величины напряжения и понижением температуры. Такая же зависимость времени пробоя от перенапряжения наблюдается при электрическом пробое твердых диэлектриков.

При электрической форме пробоя электрическая прочность растет с повышением температуры твердого диэлектрика. При экспозициях меньше  $10^{-4}$  сек. механическая прочность на разрыв также растет с повышением температуры. В области больших экспозиций и высоких температур прочность на разрыв и прочность диэлектриков при электротепловом пробое понижаются, с повышением температуры.

Прямые, представляющие зависимость  $\ln t_{\text{разр}} = f(\sigma)$  при разных температурах  $T$  для образцов из данного вещества, или прямые  $\ln t_{\text{разр}} = f(T^{-1})$ , построенные для разных напряжений  $\sigma$ , пересекаются в одной точке.

Зависимость  $\ln t_{\text{разр}} = f(\beta)$ , где  $\beta$  — величина перенапряжения при электрическом пробое, снятые при разных температурах, пересекаются также приблизительно в одной точке. Следовательно, для данного ма-



териала имеется такая величина  $t_{\text{разр}}$  и отвечающее ей механическое напряжение  $\sigma$ , или электрическое перенапряжение  $\beta$ , которые не зависят от температуры. Прочность тела при этом оказывается независимой от экспозиции. При пробое кристаллов щелочно-галлоидных солей прочность не зависит от состава кристалла в области длительности  $10^{-9}$  сек. При экспозиции  $10^{-8}$  сек. прочность не зависит от температуры [1].

В случае температурного разрушения (испарения) тела наблюдается экспоненциальное возрастание времени испарения с понижением температуры тела.

Следовательно, при механическом, электрическом и температурном разрушении твердого тела время разрушения растет с понижением величины разрушающего фактора, т. е. напряжения, напряженности электрического поля или температуры.

Механическая прочность тонких нитей растет с уменьшением площади поперечного сечения нити, электрическая прочность и время пробоя тонких слоев диэлектриков растут с уменьшением толщины пробиваемого слоя. Время до разрыва тонких нитей не изучено.

Одинаковый ход зависимости прочности от температуры и длительности нагрузки при механическом, электрическом и температурном разрушениях твердых тел позволяют в известных пределах моделировать какой-либо из перечисленных способов разрушения с помощью другого.

Два возможных способа механического разрушения твердых тел „катастрофический“ и с подготовительными процессами и несколько возможных способов пробоя, в литературе противопоставляются друг другу и взаимно исключаются. Мне же кажется, что в зависимости от условий разрушения, возможно осуществить разрушение или одним способом, или другим. В связи с этим интересно рассмотреть законы разрушения твердого тела при условии или катастрофического разрушения, или в результате подготовительных процессов.

Практически имеется больше возможностей лучше регулировать процесс электрического разрушения твердого тела при его пробое. Возможные физические процессы при пробое также разработаны достаточно детально. Многочисленные физические теории электрического пробоя разделяются на две группы: одни теории описывают пробой как катастрофическое явление, наступающее при достижении в диэлектрике напряженности поля, равной его электрической прочности  $E_{\text{пр}}$ , другие теории исходят из предположения, что при достижении  $E_{\text{пр}}$  в диэлектрике развиваются процессы, например, ионизация ударом, приводящие к его разрушению.

Катастрофическое разрушение возможно только при кратковременной нагрузке, длительность которой должна быть меньше продолжительности элементарных актов, подготовляющих разрушение, т. е. в пределе меньше длительности процессов в возбужденных молекулах. В другом случае, разрушению предшествуют подготовительные процессы, например: при механическом разрушении (диффузионные, дислокационные), или другие процессы (ползучесть), а при электрическом пробое — ионизационные подготовительные процессы.

Рассмотрим на примере ионных кристаллов [1, 2, 3] выражения для прочности, получающиеся при ее вычислении в каждом рассмотренном случае разрушения.



## Вычисление теоретической прочности твердых тел при их механическом или электрическом разрушении

Сила взаимодействия между двумя ионами изменяется по известной кривой, представлена на рис. 1. Расчет теоретической прочности можно провести при различных приближенных выражениях для этой кривой. Кривая на интересующем нас участке, включающем максимальную силу притяжения  $F_{\text{макс}}$ , которую для разрушения тела нужно преодолеть, приближенно может быть представлена участком синусоиды с указанными параметрами [4, 5].

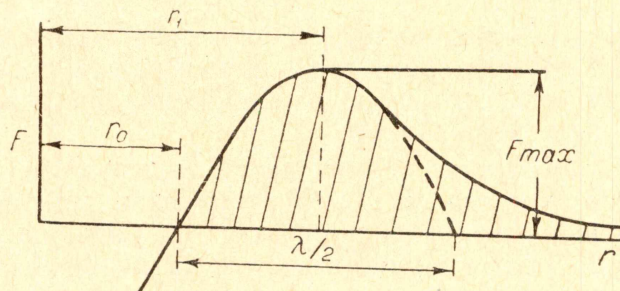


Рис. 1.

Работа, затраченная при разрушении и рассчитанная на единицу площади, соответствует заштрихованной площади (рис. 1) и приблизительно выражается

$$\int_{r_0}^{\lambda/2} F_{\text{макс}} \sin \frac{2\pi r}{\lambda} dr = \frac{\lambda}{\pi} F_{\text{макс}} = 2U_s, \quad (1)$$

так как при разрушении эта работа затрачивается на образование поверхностей и проявляется как поверхностная энергия двух новых поверхностей, равная  $2U_s$ , где  $U_s$  — поверхностная энергия. Величина  $F_{\text{макс}}$  — максимальная сила, которую выдерживает рассматриваемая система при ее растяжении

$$F_{\text{макс}} = \frac{2\pi}{\lambda} U_s. \quad (2)$$

Закон Гука для системы имеет вид

$$F = E \frac{r}{r_0}, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль упругости,  $r_0$  — равновесное расстояние между ионами, когда результирующие силы притяжения и отталкивания равны нулю. Из (3) и рис. 1 имеем

$$\frac{dF}{dr} = \frac{E}{r_0} = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Величина теоретической механической прочности при упругом растяжении и хрупком разрушении определится условием

$$F_{\text{макс}} = \left( \frac{EU_s}{r_0} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Если разрушение происходит также без подготовительных процессов, силами электрического поля  $E$ , действующего на заряды, то теоретическая прочность определится из условия

$$F_{\text{макс}} = eE_{\text{пр}},$$



где  $E_{\text{пр}}$  — электрическая прочность

$$E_{\text{пр}} = e^{-1} F_{\text{макс}} = e^{-1} (r_0^{-1} E U_s)^{1/2} \quad (5)$$

растет с уменьшением параметра решетки  $r_0^{-1/2}$ , увеличением модуля упругости  $E$ , механической прочности на растяжение  $F_{\text{макс}}$  и поверхностной энергии тела  $U_s$ .

А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская [6] предложили критерий пробоя кристаллов при условии, что разрушение наступает тогда, когда энергия, передаваемая электроном решетке, достигает величины энергии решетки, а при возможности последовательного накопления энергии частицами в процессе ее возбуждения доли этой величины.

Энергия, накапливаемая электроном за единицу времени в поле  $E$ , составляет

$$\Delta W = eE \cdot v, \quad (6)$$

где  $v$  — его групповая скорость.

Подвижность  $b$  электронов в зоне проводимости определяется

$$b = \frac{l}{m} t, \quad (7)$$

где  $l$ ,  $m$  и  $t$  — соответственно заряд, масса и время свободного движения электрона. Так как вероятность столкновения электрона составляет  $t^{-1}$ , то скорость сноса электронов в поле  $E$  определится

$$v = bE = \frac{e}{m} \cdot t \cdot E. \quad (8)$$

Прирост энергии электроном в поле

$$\Delta W = \frac{e^2 E^2}{m} \cdot t. \quad (9)$$

Энергия, накопленная электроном за время  $t$ , равняется

$$W = t \Delta W = \frac{(e \cdot E \cdot t)^2}{m}. \quad (10)$$

При пробое энергия, накопленная электроном на длине свободного пути за время  $t$ , передается решетке и затрачивается на разрыв связей между частицами, который наступит, когда энергия, передаваемая электронами узлам решетки будет равняться энергии решетки, т. е.  $W \simeq U$ . При возможности накопления возбуждений решетки от отдельных взаимодействий электронами следует написать соотношение пропорциональности, т. е.

$$W = cU, \quad (11)$$

где  $c = \text{const}$  величина, зависящая от числа актов взаимодействий электронов проводимости с узлами решетки, после которых произойдет ее разрушение. Из условия (10) и (11) получим

$$cU = \frac{(e \cdot E_{\text{пр}} \cdot t)^2}{m}, \quad (12)$$

откуда следует, что

$$E_{\text{пр}} = (c \cdot m \cdot U)^{1/2} \cdot (et)^{-1} \quad (13)$$

электрическая прочность твердых диэлектриков растет с увеличением энергии решетки пропорционально  $U^{1/2}$  и уменьшению времени сво-



бодного пробега  $t$  электронов, т. е. времени развития пробоя  $t_{пр}$ . Из (13) следует, что

$$E_{пр} = \text{const } t_{пр}^{-1}. \quad (14).$$

Экспериментально показано, что электрическая прочность кристаллов растет с увеличением механической прочности поверхностной энергии, энергии решетки и уменьшением параметра решетки [6], т. е. (13) подтверждается.

В кристаллах щелочно-галлоидных солей при напряженности поля, равной электрической прочности, возникают внутренние механические напряжения, достигающие технической прочности диэлектрика [7].

Таким образом, из условия разрыва решетки силами электростатического поля, или разрушения решетки электронами при ударной ионизации, а также разрушения решетки пондеромоторными силами в электрическом поле получаются согласные результаты о теоретической прочности твердых диэлектриков при электрическом пробое и зависимости электрической прочности кристаллов от их состава и структуры.

#### **О зависимости теоретической электрической или механической прочности тел от экспозиции**

Из описания пробоя, как следствия передачи энергии движущимися электронами, следует гиперболическая зависимость между величиной электрической прочности  $E_{пр}$  и временем пробоя  $t_{разр}$ . Такая зависимость для кристаллов щелочно-галлоидных солей наблюдается экспериментально до времени пробоя  $10^{-9}$  сек [8]. При времени пробоя порядка наносекунд электрическая прочность оказывается одинаковой для щелочно-галлоидных кристаллов различного химического состава.

Из условия (14) следует, что если пробой развивается в диэлектрике в продолжение времени  $t_{разр}$  и на его завершение требуется затратить какое-то постоянное для данного диэлектрика количество энергии, то выполняется гиперболическая зависимость между электрической прочностью  $E_{пр}$  и временем пробоя  $t_{разр}$  (14).

Зависимость (14) вытекает также из следующих общих физических соображений. С увеличением электрической прочности диэлектриков  $E_{пр}$ , в более сильных предпробивных полях, электроны будут двигаться быстрее и накапливать необходимую для разрушения структуры энергию за более короткое предпробивное время  $t_{разр}$ . Поэтому в простейшем случае можно написать условие (14) или более сложную функцию  $t_{разр} = f(E^{-1})$ .

Если разрушение происходит после пластической деформации, то подвижность дислокаций с увеличением механического напряжения для тел высокой прочности быстро растет [11]. В таком случае время на подготовительные процессы разрушения сокращается. Возрастание величины прочности тела на разрыв и его электрической прочности с уменьшением экспозиции следует из условия затраты постоянной величины энергии на его разрушение. Уменьшение экспозиции должно сопровождаться повышением мощности и амплитуды разрушающей нагрузки [12].

Величины механической прочности, определяемой условием (2), и электрической прочности (5) для случаев разрушения тела без подготовительных физических процессов от времени не зависят.

При хрупком разрушении тела, или его пробое вследствие разрыва в электрическом поле, время разрушения не входит в формулы (2) и (5). Эти формулы описывают разрушение без предварительной подготовки



со скоростью распространения упругой волны в теле, которая является характеристикой тела, а не условий его нагружения.

Из приведенного также следует и обратный вывод. При наличии зависимости времени разрушения от величины прочности разрушаемого тела его разрушению предшествуют некоторые подготовительные процессы. При электрическом пробое твердых диэлектриков практически возможно осуществить оба описанных вида разрушения. До экспозиций  $10^{-9}$  наблюдалось увеличение электрической прочности с уменьшением времени пробоя.

### Заключение

Из формул теорий, описывающих разрушение как катастрофическое явление, наступающее при достижении разрушающим фактором величины, равной прочности тела, не следует зависимости прочности от экспозиции и скорости разрушения от прочности тел. При учете кинетики развития процесса разрушения в формулах теории появляется гиперболическая или экспоненциальная зависимость между временем разрушения и величиной разрушающего фактора. Уменьшение стойкости тел с увеличением времени до разрушения наблюдается экспериментально при механическом, электрическом (пробой) и температурном (испарение) разрушении твердых тел.

Эта закономерность является следствием необходимости затраты на разрушение постоянной величины энергии, которая для ионных соединений равна энергии решетки [13].

При энергетическом описании разрушения твердого тела можно условно выделить три стадии: формирование разрушения, его протекание и завершение разрушения. Формирование происходит на возрастающей части импульса нагрузки. В процессе динамического разрушения скорость подвода энергии равняется или превышает скорость ее поглощения. Если разрушение начинается на переднем фронте импульса, то оно происходит в условиях, когда подводимая мощность превышает мощность потребления.

Во второй стадии разрушение может протекать также в условиях, когда подводимая мощность равняется расходуемой. В таком случае разрушение происходит при неизменной величине разрушающего фактора, например, электрического напряжения. При условии, что требуемая для разрушения потребляемая мощность превышает мощность источника, тогда разрушение протекает в нестационарных условиях при уменьшающейся величине амплитуды. В завершающейся стадии расходуется большая часть энергии, необходимой для разрушения.

Для разрушения тела необходимо затратить постоянную величину энергии  $U$ , равную произведению экспозиции  $t_{\text{разр}}$  на мощность  $W$ , выделяемую в разрушаемом объеме  $U = W t_{\text{разр}}$ . С уменьшением экспозиции  $t_{\text{разр}}$  возрастает величина мощности  $W$ , которая пропорциональна квадрату амплитуды разрушающего фактора  $A^2$

$$U = W \cdot t_{\text{разр}} \approx A^2 t_{\text{разр}} = \text{const.} \quad (15)$$

Откуда величина амплитуды разрушающего фактора и экспозиции оказываются связаны условием

$$A \approx t_{\text{разр}}^{-0,5}$$

Следовательно, из общих энергетических соображений также следует, что с уменьшением времени до разрушения  $t_{\text{разр}}$  величина импульсной механической, электрической или при температурной прочности разрушении (испарении) должны расти.



Величина энергии, необходимой для разрушения тела и его прочность растут с увеличением энергии связи между частицами тела. Поэтому кривые, описываемые уравнением (14), для тел разного химического состава не будут совпадать. Из условия постоянств в (2) получается, что с увеличением прочности тела время до его разрушения  $t_{\text{разр}}$  уменьшается, а скорость процесса разрушения растет.

Условия (14) и (15) формально описывают и катастрофическое разрушение тел. В этом случае скорость разрушения определяется распространением упругих волн в теле, которая является величиной, постоянной для данного тела. Она растет с увеличением прочности связи между частицами тела.

Наращение разрушающего фактора и разрушение тела может заканчиваться при его величине, значительно превышающей истинную прочность тела. Величина энергии связи между частицами тела и энергии его разрушения являются постоянными. Рассматриваемый эффект увеличения измеряемой импульсной прочности следует рассматривать как „приборный эффект“, связанный с условиями опыта, а не сутью явления разрушения в рассматриваемом случае [14].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев. Аналогии и различия при температурном, механическом, термическом и электрическом разрушениях твердых тел. Сб. Пробой диэлектриков и полупроводников. Изд-во Энергия, М.-Л., стр. 111, 1964.
2. А. А. Воробьев. Изоляционные свойства — прочность и разрушение диэлектриков. Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1960.
3. А. А. Воробьев и Г. А. Воробьев. Электрическая прочность и электрический пробой диэлектриков. Изд-во Высшая школа, Москва, 1962 (в печати).
4. А. А. Воробьев. Известия Томского политехнического института, **95**, 16, 1958.
5. Petch N. I., Progress in Metal Physics **5**, London, 1954.
6. К. А. Осипов. Вопросы теории жаропрочности металлов и сплавов. Изд. АН СССР, Москва **17**, 1960.
7. А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская. Электрическая прочность твердых диэлектриков, ГИТТЛ, М., 1956.
8. Е. К. Завадовская. ДАН СССР, **81**, 541, 1951.
9. М. А. Мельников. Диссертация. Политехн. институт, Томск, 1960.
10. F. W. Reek. Pr. A. I. E. E. **49**, 1956.
11. А. А. Горев, Л. Е. Машкилейсон. Электричество, **13**, 32, 1935.
12. В. Л. Инденбом. Сб. Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов. М., Изд-во, АН СССР, стр. 117, 1960.
13. А. А. Воробьев. Временная зависимость прочности твердых тел при импульсном, электрическом, механическом и тепловом (испарении) разрушениях. Удостоверение о регистрации № 39160 от 18. 6. 1963.
14. А. А. Воробьев. О теоретической прочности твердых тел при электрическом пробое. Сб. Пробой диэлектриков и полупроводников. Изд-во Энергия, М.-Л. стр. 108, 1964.