

01;05;12

Критерий инкубационного времени в задачах импульсного разрушения и электрического пробоя

© Ю.В. Петров, П.А. Глебовский

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: yp@yp1004.spb.edu, pietr@mail.ru

(Поступило в Редакцию 3 февраля 2004 г.)

Рассматриваются проблемы импульсной прочности сплошных сред с позиции структурно-временного подхода, основанного на понятии инкубационного времени разрушения. Такой подход позволяет описывать эффекты, возникающие при высокоскоростном воздействии. На основе структурно-временного подхода предлагается предельное условие, определяющее момент разрыва или пробоя. Предлагается способ интерпретации и определения инкубационного времени. Предложена феноменологическая модель электропробоя твердых диэлектриков. Рассмотрены примеры применения структурно-временного подхода в задачах откольного разрушения, старта трещины и импульсного пробоя диэлектриков. Подробно изложена методика для описания временной зависимости электрической прочности (вольт-секундной характеристики). Получено хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными.

Исследование динамического разрушения твердых тел и диэлектриков, происходящего при высокоскоростном импульсном воздействии внешней среды при различных условиях, представляет большой интерес с точки зрения физики и механики сплошной среды. Результаты этих исследований используются в работе и при создании разнообразных систем в машиностроении и энергетике.

Эксперименты по динамическому разрушению выявляют целый ряд эффектов, которые показывают принципиальное отличие быстрого динамического разрыва (пробоя) материалов от аналогичного процесса при квазистатических воздействиях. Например, одной из основных проблем исследования динамического разрушения является зависимость предельных характеристик от истории и способа приложения нагрузки. Этот эффект проявляется почти во всех ситуациях быстрого разрушения. В частности, при разрушении „бездефектного“ континуума под предельной характеристикой понимается минимальная амплитуда импульса напряжения, приводящего к разрыву материала. Такая характеристика обеспечивает некоторый предел для интенсивности локального силового поля, по достижении которого наступает разрушение. Попытки установить величины критической интенсивности локального поля, отвечающей определенным скоростям нагружения, не приводят к однозначному результату. Зависимость от способа приложения воздействия проявляется как изменение предельных величин при изменении продолжительности действия, амплитуды, скорости нарастания внешнего воздействия, а также целого ряда других факторов. В то время как при квазистатическом воздействии критическая величина оказывается константой материала, в динамике, экспериментально, определенные значения критических характеристик характеризуются сильной неустойчивостью и в итоге их поведение оказывается непредсказуемым.

Указанные, а также некоторые другие особенности поведения материалов, подвергаемых импульсным воз-

действиям, являются общими для, казалось бы, совершенно различных физических процессов, таких как динамическое разрушение твердых тел и электрический пробой в твердых диэлектриках. В работе рассматриваются примеры, иллюстрирующие динамические эффекты в данных физических процессах. Предлагается единая интерпретация разрушения твердых тел и электрического пробоя в диэлектриках на основе структурно-временного подхода [1,2], основанного на понятии инкубационного времени.

Основная причина затруднений при моделировании вышеупомянутых эффектов механической и электрической прочности состоит в отсутствии адекватного предельного условия, определяющего момент образования разрыва или пробоя. Данная проблема может быть решена на основе структурной макромеханики разрушения и понятия инкубационного времени разрушения, учитывающего кинетические процессы формирования макро-разрывов [1,2]. Указанные выше динамические эффекты становятся существенными тогда, когда осуществляется переход от медленных воздействий к воздействиям с периодами, сравнимыми по величине с масштабом, определяемым инкубационным временем разрушения. Природа инкубационного времени обусловлена подготовительными релаксационными процессами развития микродефектов в структуре материала.

Предложенный в [1,2] критерий инкубационного времени разрушения позволяет рассчитывать наблюдаемые в экспериментах по разрушению твердых тел эффекты неустойчивого поведения динамических прочностных характеристик. В обобщенном виде данный критерий может быть представлен условием

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{F(t')}{F_c} \right)^\alpha dt' \leq 1, \quad (1)$$

где $F(t)$ — интенсивность локального силового поля, вызывающего разрушение среды; F_c — статический

предел локального силового поля; τ — инкубационное время, связанное с динамикой подготавливающего разрыв релаксационного процесса; время разрушения определяется как момент выполнения в условии (1) знака равенства; параметр α характеризует чувствительность к уровню напряженности силового поля, вызывающего разрушение.

Рассмотрим один из возможных способов интерпретации и определения параметра τ на примере механического разрыва материала. Предположим, что растягиваемый стандартный образец из данного материала разрывается на две части при напряжении P , которое возникает в некоторый момент времени $t = 0$: $F(t) = PH(t)$, где $H(t)$ — функция Хевисайда. При квазихрупком разрушении происходит разгрузка материала и локальное напряжение в месте возникновения разрыва быстро (но не мгновенно) падает от значения P до нуля. При этом порождается соответствующая волна разгрузки, которая распространяется по образцу и может быть зарегистрирована известными (например, интерферометрическими) методами. История изменения напряжения в месте разрыва условно может быть представлена зависимостью $\sigma(t) = P - Pf(t)$, где функция $f(t)$ в течение некоторого временного промежутка T меняется от 0 до 1. Классической теории прочности соответствует случай $f(t) = H(t)$, т.е. согласно классическом подходу, разрыв происходит мгновенно ($T = 0$). В действительности же разрыв материала (образца) представляет собой процесс, протекающий во времени, а функция $f(t)$ описывает кинетику перехода от условно „бездефектного“ $f(0) = 0$ к полностью разрушенному $f(T) = 1$ состоянию в данной точке.

Применяя к данной ситуации критерий разрушения (1), получаем $T = \tau$ при $P = F_c$, т.е. введенное инкубационное время равно временному периоду разрушения после достижения напряжением в материале статической прочности на разрыв. Этот период может быть измерен в опытах по статическому разрушению образцов различными способами. Например, измерением времени нарастания давления на фронте волны разгрузки, снятой интерферометрическим способом по профилю скорости точек поверхности образцов.

Далее рассмотрим примеры реализации критериального условия (1) в различных физико-механических задачах.

1. Примером, иллюстрирующим сложное поведение динамической прочности твердых тел, является временная зависимость прочности, наблюдаемая при откольном разрушении твердых тел (рис. 1) [3]. Такая зависимость времени до разрушения t_* от критической амплитуды импульса P_* при различных его длительностях показывает, что динамическая прочность не является постоянной материала, но зависит также от времени до разрушения. Классический критерий критического напряжения $\sigma(t) \leq \sigma_c$, где σ_c — статическая прочность, хорошо описывает квазистатическое разрушение при больших временах, вызываемое длительными волновыми импульсами $\sigma(t) = Pf(t)$, где P — амплитуда,

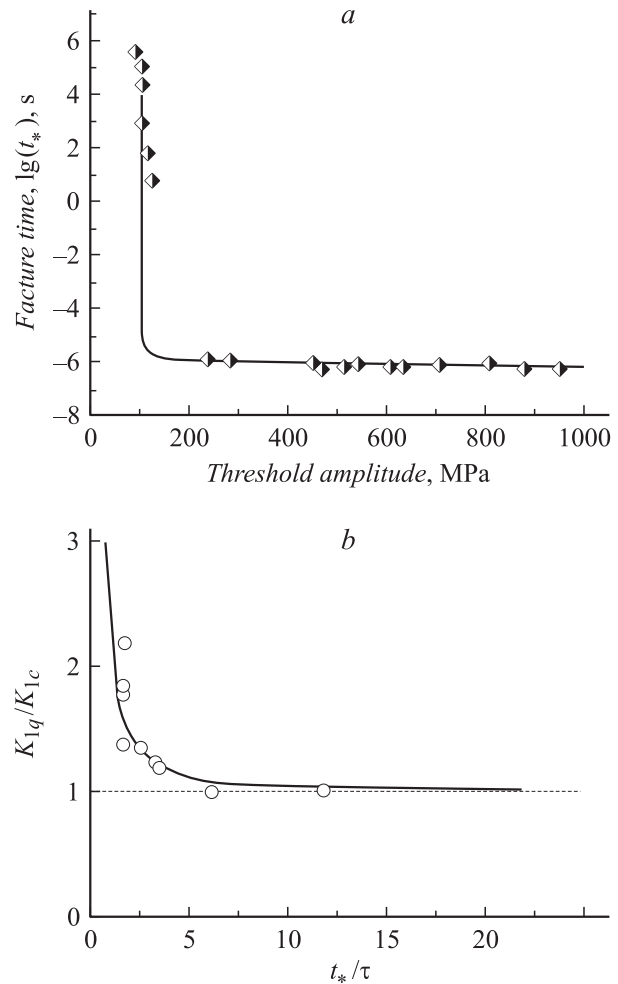


Рис. 1. Временная зависимость прочности алюминия при отколе [3,4] (t_* — время до разрушения) (a) и динамической вязкости разрушения при старте трещины в Normalite-100 [5] (t_* — время до разрушения, K_{Iq} — критический коэффициент интенсивности) (b).

$f(t)$ — функция временного профиля. Однако в случае кратковременных импульсов появляется слабая зависимость времени разрушения от пороговой амплитуды с некоторой асимптотой. Этот эффект получил название явления динамической ветви временной зависимости прочности [3].

Явление динамической ветви не имеет объяснения ни в рамках традиционных теорий прочности, ни в рамках известных временных критериев.

Полная временная зависимость прочности может быть получена на основе критерия инкубационного времени (1), который в рассматриваемом случае откольного разрушения принимает вид

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_c \tau, \quad (2)$$

где $\sigma(t')$ — временная зависимость локального напряжения в месте разрыва.

Расчет проводился для импульсов треугольной формы, реализованных в условиях экспериментов [3], и параметров алюминия $\tau = 0.75 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 103 \text{ МПа}$. Полученная в [4] по критерию (2) временная зависимость прочности для алюминия [3] показана на рис. 1, *a* сплошной кривой.

2. Рассмотрим упругую пластину с трещиной, симметрично нагружаемую по двум берегам равномерным давлением, которое линейно нарастает в течение времени t_0 , а затем удерживается постоянным и равным P , т.е. компоненты тензора напряжений на берегах трещины задаются в виде

$$\sigma_y = P[tH(t) - (t - t_0) \times H(t - t_0)]/t_0, \quad \sigma_{xy} = 0,$$

где $H(t)$ — функция Хевисайда.

Соответствующий эксперимент был реализован в [5–7]. Изменением скорости приложения давления на участке нарастания t_0 были получены разные времена разрушения t_* и измерены соответствующие началу роста трещины стартовые значения коэффициента интенсивности (динамической вязкости разрушения) $K_{Iq} = K_I(t_*)$. Один из результатов, полученный в [5] для стеклообразного полимера Nomalite-100, представлен на рис. 1, *b*. Эксперимент демонстрирует эффект роста критического коэффициента интенсивности с уменьшением времени до разрушения, т.е. с увеличением скорости приложения нагрузки. При этом получаемые скоростные зависимости динамической вязкости разрушения характеризуются сильной неустойчивостью и могут заметно изменяться при изменении длительности стадии нарастания нагрузки, формы временного профиля нагружающего импульса, геометрии образцов, способа приложения нагрузки. Так, полученные в [6,7] результаты показывают заметно отличающиеся друг от друга скоростные (временные) зависимости K_{Iq} для одних и тех же материалов, а также демонстрируют возможность немонотонных зависимостей динамической вязкости разрушения от времени старта трещин при ударно-волновом воздействии.

Получаемые в экспериментах результаты показывают, что динамическая вязкость разрушения не является характеристикой материала и введение в теорию критерия критического коэффициента интенсивности $K_I(t) \leq K_{Iq}$ и характеристики K_{Iq} в качестве определяющего динамического разрушения материального параметра (по аналогии со статическим K_{Ic}) не является корректным.

Объяснение и расчет поведения динамической вязкости разрушения возможны в рамках критерия инкубационного времени (1), который в рассматриваемом случае принимает вид [2]:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t K_I(t') dt' \leq K_{Ic}. \quad (3)$$

Результаты проведенного в [2] расчета для экспериментальных данных [5] показаны на рис. 1, *b* сплошной кривой. При расчете было принято $K_{Ic} = 0.48 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\tau = 9 \mu\text{s}$.

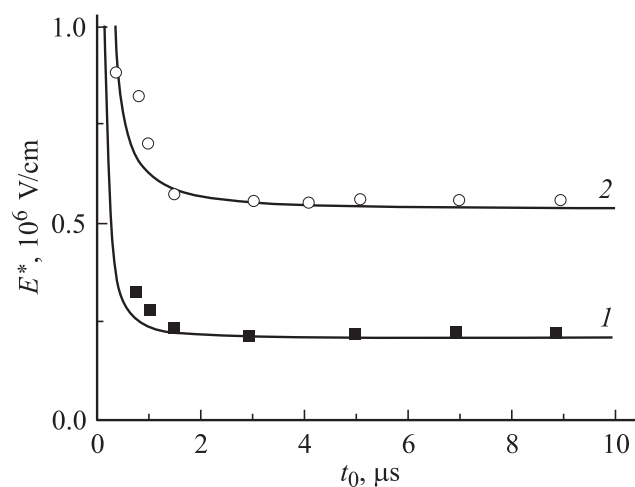


Рис. 2. Расчетная зависимость (сплошная кривая) электрической прочности E^* перхлората аммония от длительности переднего фронта импульса. Расстояния между электродами различны: 1 — 0.03, 2 — 0.01 см.

3. Импульсный электрический пробой твердых диэлектриков также является типичным примером явления, где наблюдаются эффекты, описанные выше. Например, при малых временах воздействия напряжения обычно наблюдается возрастание пробивного напряжения с уменьшением длительности воздействия. Канал пробоя в щелочно-галлоидных кристаллах, вызываемый электрическим полем длительностью порядка 10 ns, возникает при напряжении в несколько раз превышающем квазистатические (т.е. с длительностью порядка 1 μs и более [8]). Этот эффект наблюдается при пробое целого ряда материалов. В качестве примера на рис. 2 представлена полученная в [9] зависимость пробивного электрического поля E^* монокристаллов перхлората аммония от длительности t_0 переднего фронта импульса, которая также характеризует зависимость электрической прочности от величины скорости подъема электрического напряжения в образце. Представленная таким образом зависимость может быть названа временной зависимостью электрической прочности, аналогичной той, что наблюдается в вышеописанном случае динамического разрушения материалов (рис. 1). В эксперименте [9,10] тонкие пластинки из монокристаллов перхлората аммония помещались в импульсное электрическое поле. Электрический пробой образцов приводил к их выгоранию с образованием сквозного канала. Приведенные на рис. 2 экспериментальные данные (обозначены точками) соответствуют двум расстояниям между электродами: 0.01 см и 0.03 см. Видно, что при значениях $t_0 \leq 1.5 \mu\text{s}$ электрическая прочность материала возрастает с уменьшением длительности переднего фронта импульса напряжения (с увеличением скорости роста напряжения в образце). При $t_0 \geq 1.5 \mu\text{s}$ пробивное напряжение практически перестает зависеть от t_0 .

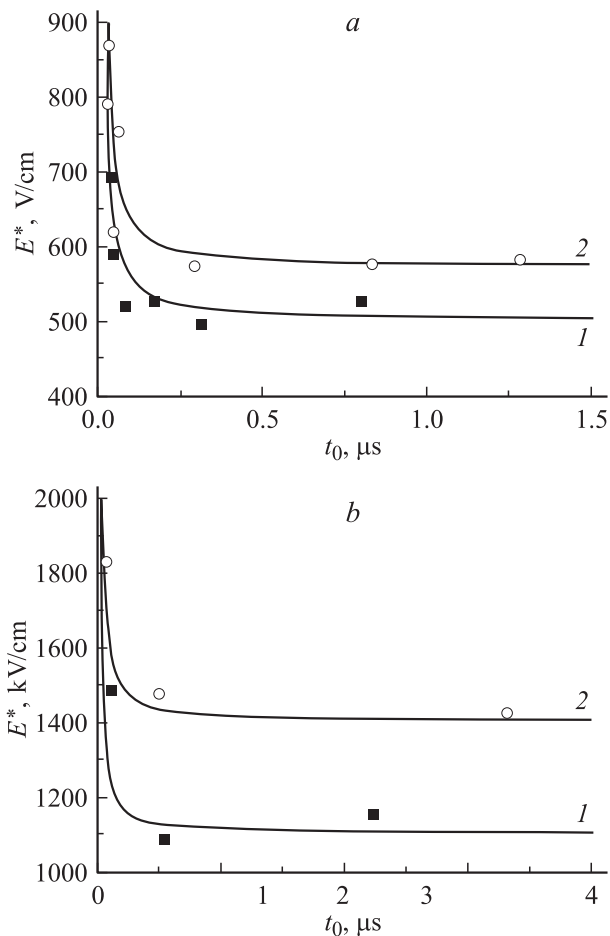


Рис. 3. *a* — расчетная зависимость (сплошная кривая) электрической прочности E^* фарфора от длительности переднего фронта импульса в поле, близком к однородному (среда — дистиллированная вода). Расстояния между электродами различны: 1 — 1.8, 2 — 1 mm. Экспериментальные данные [10]. *b* — расчетная зависимость электрической прочности E^* каменной соли от длительности переднего фронта импульса в однородном поле. Расстояния между электродами различны: 1 — 0.3, 2 — 0.15 mm. Экспериментальные данные [8].

Соответствующий структурно-временному подходу [1,2] критерий электрического пробоя в рассматриваемом случае может быть записан в виде

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t E(t') dt' \leq E_c, \quad (4)$$

где E_c — статическая электрическая прочность материала, которая может зависеть от межэлектродного расстояния; τ — инкубационное время электрического пробоя материала, определяемое кинетикой размножения электронов при электрическом разряде.

Будем считать, что пробой происходит на переднем фронте импульса напряжения и в первом приближении, напряжение в образце нарастает линейно. Электриче-

ское поле однородное. Тогда падающий импульс напряжения будет иметь следующую форму:

$$U(t) = \frac{U^*}{t_0} [tH(t) - (t - t_0)H(t - t_0)]$$

или с учетом однородности электрического поля

$$E(t) = \frac{U^*}{t_0 d} [tH(t) - (t - t_0)H(t - t_0)], \quad (5)$$

где U^* — амплитуда импульса, t_0 — его длительность переднего фронта, d — межэлектродное расстояние, $H(t)$ — функция Хевисайда.

Подставляя (5) в (4) и учитывая, что пробой происходит на фронте импульса, получаем выражения: при $t_0 \leq \tau$ условие (4) примет вид

$$\frac{E^*}{\tau} \int_0^{t_0} t' dt' \leq E_c,$$

а в случае $t_0 \geq \tau$ условие будет

$$\frac{E^*}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} t' dt' \leq E_c,$$

где $E^* = U^*/d$.

Поскольку время разрушения определяется как момент выполнения в условии (4) знака равенства, получаем следующие зависимости электрической прочности от длительности переднего фронта импульса:

$$\begin{cases} E^* = \frac{E_c}{1 - \frac{\tau}{2t_0}}, & t_0 \geq \tau, \\ E^* = \frac{2E_c\tau}{t_0}, & t_0 \leq \tau. \end{cases} \quad (6)$$

Рассчитанные по системе (6) временные зависимости электрической прочности для ряда материалов показаны на рис. 2, 3 сплошными кривыми. Значения параметров, использованные при расчете, приведены в таблице. Время начала нарастания пробивного поля на представленных зависимостях полностью определяется величиной τ . В [9] отмечается, что это время практически не зависит от межэлектродного расстояния. Это также следует из произведенных расчетов, представленных на рис. 2 и 3 сплошными кривыми. Поэтому инкубационное время в рассматриваемых случаях можно считать характеристикой материала.

Расчетные данные временной зависимости импульсного пробоя

Материал	τ , μs
Каменная соль	0.025
Фарфор	0.02
Перхлорат аммония	0.33

Таким образом, показано, что экспериментальные данные импульсного пробоя хорошо описываются с помощью структурно-временного подхода. Рассмотренные примеры различных физических процессов указывают на принципиальную важность изучения инкубационных процессов, подготавливающих резкие структурные изменения (разрушение и фазовые переходы) в сплошных средах при интенсивных импульсных воздействиях. Представленные результаты свидетельствуют о фундаментальности структурно-временного подхода, позволяющего адекватно описывать как динамическое разрушение твердых тел, так и импульсный пробой твердых диэлектриков.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования России (грант № А03-2.10-270), РФФИ (гранты № 03-01-39010, 02-01-01035).

Список литературы

- [1] *Петров Ю.В.* // ДАН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66–68.
- [2] *Morozov N., Petrov Y.* Dynamics of Fracture. Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag, 2000. 98 p.
- [3] *Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М.* // ФТТ. 1974. Т. 16. Вып. 6. С. 1752–1755.
- [4] *Глебовский П.* // Труды Международной конф. „Ломоносов 2001“. МГУ, 2001. С. 246–247.
- [5] *Ravi-Chandar K., Knauss W.G.* // Int. J. Fract. 1984. Vol. 25. P. 247–262.
- [6] *Kalthoff J.F.* // Engng. Fract. Mechanics. 1986. Vol. 23. P. 289–298.
- [7] *Dally J.W., Barker D.B.* // Experimental Mechanics. 1988. Vol. 28. P. 298–303.
- [8] *Воробьев А.А., Воробьев Г.А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 234 с.
- [9] *Ханефт И.Г., Ханефт А.В.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 42–45.
- [10] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: ГИФМЛ, 1958, 907 с.