

Энергоемкость разрушения материалов в условиях импульсного нагружения микросекундной длительности

© А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров

Научно-исследовательский центр „Динамика“ Санкт-Петербургского государственного университета,
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Россия

E-mail: dyn@unicorn.math.spbu.ru

(Поступила в Редакцию 14 мая 2002 г.

В окончательной редакции 22 октября 2002 г.)

По результатам экспериментального изучения разрушения образцов из полиметилметакрилата и сферопластика с помощью магнитно-импульсной установки оценивается удельная работа по образованию новой поверхности, аналогичная описываемой константой Гриффитса для квазистатических испытаний. Полученная величина на порядок превосходит значение, определенное по данным квазистатических испытаний, и обнаруживает тенденцию к росту при уменьшении длительности нагружения.

Работа выполнена при поддержке конкурсного центра СПбГУ (грант № E00-4.0-174), грантов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-01-01035 и 00-01-05020), ФЦП Минпромнауки 40.010.11.1195, а также Федеральной целевой программы „Интеграция“.

1. Энергетический подход к проблеме разрушения

Классический подход к механике разрушения основывается на теории Гриффитса, базовым положением которой является утверждение, что распространение трещины происходит в том случае, если при этом понижается полная энергия системы \mathcal{E} [1–3]. Для пластинки единичной толщины условие роста трещины записывается в виде

$$\frac{d\mathcal{E}}{dL} = 2\gamma. \quad (1)$$

Величина 2γ первоначально интерпретировалась Гриффитсом как поверхностная энергия, поскольку она представляет собой удельную (на единицу площади) работу образования новой поверхности. В работах Ирвина и Орована [2,3] показано, что эту величину следует трактовать как полную работу (в том числе пластическую) в зоне разрушения. Она может быть рассмотрена как сопротивление некоторому диссипативному процессу, протекающему в небольшой области около вершины трещины. Изучение этой характеристики распадается на выяснение ее физической сущности (различной для различных классов материалов) и ее экспериментальное определение.

2. Квазистатические и динамические испытания

Для хрупкого разрушения в случае трещины, нагружаемой по моде I, критерий (1) оказывается эквивалентным критерию критического коэффициента интенсивности напряжений [1]

$$K_I = K_{Ic}.$$

Для линейно-упругого тела константа Гриффитса оказывается равной

$$\gamma = \frac{K_{Ic}^2}{2E}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга. Таким образом, в этом случае оказывается возможным косвенное определение γ на основании проведения стандартных испытаний по нахождению K_{Ic} . К числу прямых способов следует отнести метод R -кривых [2]. Измеряемые в эксперименте усилия и перемещения позволяют определить работу внешних сил по раскрытию трещины, что в сочетании с измерением длины трещины позволяет определить удельную энергоемкость процесса разрушения. Следует также упомянуть обобщенный метод Ирвина–Гриффитса [2], основанный на моделировании развития трещины посредством релаксации напряжений впереди нее.

При переходе к изучению разрушения под действием кратковременных нагрузок делались многочисленные попытки применения моделей, использующих в качестве основного параметра величину удельной энергоемкости разрушения. Однако величина, определяемая в квазистатических испытаниях, как правило, не позволяла достичь удовлетворительного соответствия с экспериментальными данными. То что затраты энергии на единицу площади поверхности разрушения существенно зависят от временного фактора, в настоящее время можно считать общепризнанным [1]. Также существенно зависят от временного фактора и другие параметры динамического разрушения (критический коэффициент интенсивности или амплитуда приложенной нагрузки). Это делает проблему определения удельной поверхностной энергии Гриффитса при высокоскоростном разрушении актуальной.

Традиционные способы создания кратковременных нагрузок не позволяют адекватно изучить энергетический баланс ввиду того, что довольно трудно оценить, какая часть энергии непосредственно передана образцу. Так,

при использовании ударного нагружения о параметрах воздействия можно судить лишь по достаточно приближительным оценкам. В общем случае происходит довольно сложный энергообмен между образцом и нагружающим устройством [4], не позволяющий достоверно судить о том, на какой именно стадии произошло разрушение. Сказанное в полной мере относится к широко распространенным копровым испытаниям (например, по методу Шарпи).

3. Испытания на магнитно-импульсной установке

Отмеченного выше недостатка лишена методика, использующая магнитно-импульсную установку. Нагрузка формировалась магнитно-импульсным способом, при котором механическое давление определяется пространственной конфигурацией токоведущих элементов. При известном токораспределении существует однозначная связь между параметрами импульса тока и магнитного давления. Для системы плоских шин шириной l с равномерным токораспределением, при условии $h/l \ll 1$, где h — зазор между шинами, магнитное давление определяется следующим образом:

$$P_m(t) = \frac{\mu}{2} \left(\frac{I(t)}{l} \right)^2,$$

где $I(t)$ — ток, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м — магнитная постоянная. Используемая в экспериментах установка [5] позволяет реализовать импульсы нагрузки микросекундной длительности с амплитудой до 1000 МПа.

При этом сложная проблема определения параметров импульса механического давления сводится к простой задаче измерения параметров импульса электрического тока. Кроме того, во многих случаях оказывается возможным достаточно точное определение энергетического состояния образца в момент разрушения.

Это обеспечивается следующим образом. Во-первых, контролируется давление на берега разреза в течение всего импульса (порядка 1–10 μ s), во-вторых, высокоскоростное фотографирование процесса разрушения позволяет точно определить для трещины момент ее срагивания, которое в ряде случаев может происходить после исчезновения (снятия) внешнего импульса давления; в-третьих, после окончания действия импульса дальнейшего взаимодействия между образцом и установкой не происходит, следовательно, система становится энергетически замкнутой.

Указанные принципы реализованы при проведении серий испытаний образцов с имитирующим макротрещину вырезом. Образцы были изготовлены из сферопластика (размером 120 × 120 × 10 мм, вырез 60 × 2.2 мм) [6] и полиметилметакрилата (ПММА) (размером 200 × 200 × 10 мм, вырез 100 × 3 мм) [7]. В вершинах выреза делался тонкий надрез длиной 3 и

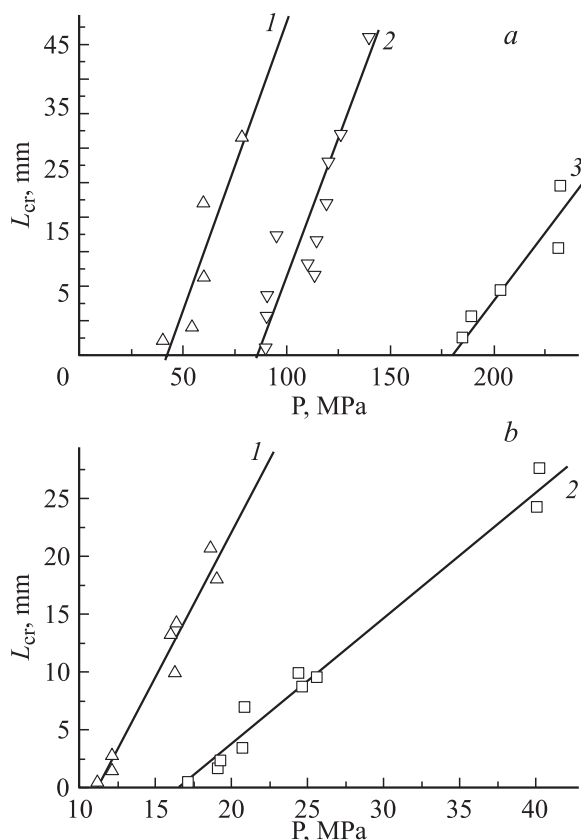


Рис. 1. Экспериментальные данные по исследованию порога разрушения образцов из ПММА и сферопластика. *a* — зависимость длины проросшей из вершины выреза трещины L_{cr} в образцах из ПММА от амплитуды разрушающего импульса давления P при различных временах нарастания до максимума t , μ s: 1 — 4.6, 2 — 2, 3 — 1. *b* — зависимость длины проросшей из вершины выреза трещины L_{cr} в образцах из сферопластика от амплитуды разрушающего импульса давления P при различных временах нарастания до максимума t , μ s: 1 — 4.4, 2 — 2.76.

шириной 0.2 мм. На берегах выреза создавалось равномерное давление, которое аппроксимировалось зависимостью

$$P(t) = A \sin^2 \frac{\pi t}{T}, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3)$$

Для каждой длительности импульса (T) изучалась зависимость длины прорастания трещины (L) от амплитуды приложенной нагрузки (A). Ставилась задача определения порогового значения амплитуды. Полученные зависимости хорошо аппроксимировались линейными (рис. 1)

$$\Delta L = k(A - A_0), \quad \text{при } A > A_0. \quad (4)$$

Величина A_0 имеет смысл пороговой амплитуды, при превышении которой начинался рост трещины. Эта величина находилась экстраполяцией экспериментальных данных на значение $\Delta L = 0$.

Полученные минимальные (пороговые) разрушающие амплитуды позволяют определить инкубационное время

разрушения материала [1]. Для исследуемых материалов оно составляет для ПММА — $32 \mu\text{s}$ [5], для сферопластика — $5.3 \mu\text{s}$ [6].

Скоростное фотографирование процесса разрушения выявило эффект задержки старта трещины по отношению к моменту достижения максимума коэффициентом интенсивности напряжений [8]. Показано, что при пороговых нагрузках разрушение происходит с задержкой, близкой к инкубационному времени разрушения. При этом время старта трещины оказывается заметно больше времени действия внешнего импульса давления.

Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что при нагружении образцов импульсами длительностью меньше инкубационного времени разрушения вся энергия внешнего воздействия переходит в упругую и кинетическую энергию материала, и процесс продвижения трещины определяется в дальнейшем величиной этой внутренней энергии. Поскольку потенциал внешних сил на момент разрушения у вершины трещины равен нулю, можно считать, что функция \mathcal{E} в соотношении (1) совпадает с внутренней энергией образца.

4. Энергетический баланс

Произведем аналитическую оценку энергии, переданной образцу в результате взаимодействия с установкой. За время действия нагрузки волна не успевает пройти вдоль берегов выреза, поэтому в первом приближении можно рассмотреть задачу о плоской волне в полупространстве (рис. 2)

$$U_{tt} - c^2 U_{xx} = 0,$$

$$U_x(0, t) = -\frac{P(t)}{c^2 \rho}, \quad U(x, 0) = 0, \quad U_t(x, 0) = 0.$$

Здесь x , U — координата и смещение в продольном направлении, c — скорость продольной волны, t — время, ρ — плотность. Решение задачи может быть легко получено методом Даламбера. Оно имеет вид

$$U(x, t) = \begin{cases} 0, & x > ct; \\ \frac{1}{c\rho} \int_0^{t-x/c} P(\xi) d\xi, & x < ct. \end{cases} \quad (5)$$

Энергия, переданная образцу (на единицу площади поверхности контакта), определяется соотношением

$$\mathcal{E}_{\text{спец}} = \int_0^T P(t) dU(0, t). \quad (6)$$

Из формулы (5) находится $U_t(0, t)$ — скорость движения границы контакта. Подстановка ее в соотношение (6) позволяет окончательно получить

$$\mathcal{E}_{\text{спец}} = \frac{1}{c\rho} \int_0^T P^2(t) dt. \quad (7)$$

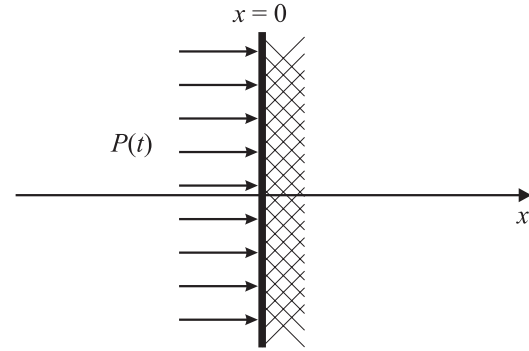


Рис. 2. Идеализированная схема для расчета энергии, переданной образцу.

Соотношение (7) справедливо для любой формы импульса. Очевидно, что площадь поверхности контакта равна HD , где D — длина выреза, H — толщина пластины. С учетом (3) имеем

$$\mathcal{E} = \frac{HDA^2}{c\rho} \int_0^T \sin^4 \frac{\pi t}{T} dt = \frac{3DHA^2 T}{8c\rho}. \quad (8)$$

Полученное соотношение позволяет оценить энергию, переданную образцу. Аналогичная оценка также выполнена методом конечных элементов [9]. Для этого достаточно было провести вычисления лишь на ранней стадии процесса без учета процесса разрушения. Результаты расчетов методом конечных элементов хорошо совпали с оценками энергии по формуле (8).

Учитывая, что рост трещины происходит при $A > A_0$, находим пороговое значение энергии \mathcal{E}_0 . Это критическая величина энергии, которую образец может принять без разрушения. Считаем, что к продвижению трещины приводит избыток энергии, локализованной в зоне, примыкающей к ее вершине, радиуса $D_* = ct_*$, где t_* — время от момента приложения нагрузки до момента разрушения. Иначе говоря, следует учитывать избыток энергии в зоне досягаемости сигнала за время t_* , исходящего из вершины трещины. На основании этого предположения оценим затраты энергии на единицу длины приращения трещины в момент ее старта.

Из (4) следует, что приращение длины трещины связано с приращением амплитуды приложенного импульса давления зависимостью

$$dL = k dA.$$

Из соотношения (8) следует, что приращение энергии выражается формулой

$$d\mathcal{E} = \frac{3DHA^2 T}{4c\rho} dA.$$

Учитывая, что площадь поверхности, образующейся в результате роста трещины, выражается как $dS = H dL$,

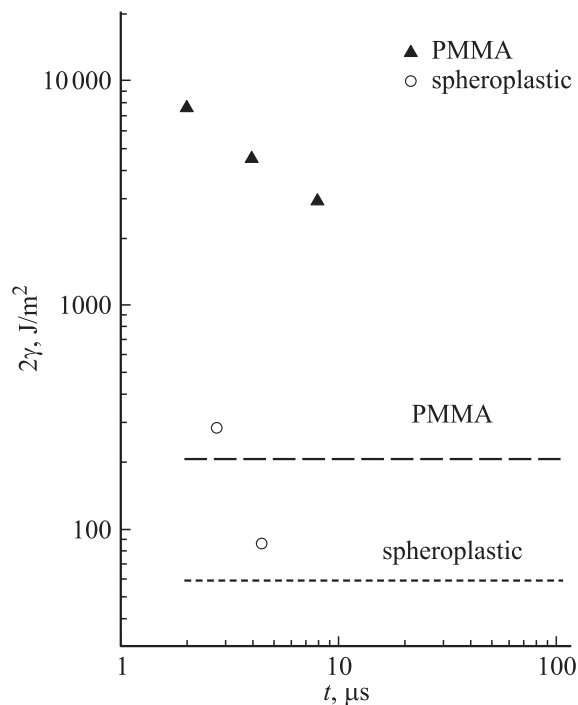


Рис. 3. Зависимость энергоемкости разрушения от длительности нагружающего импульса (штриховые линии соответствуют квазистатическим значениям).

получим удельную (на единицу площади) энергоемкость разрушения при старте трещины.

$$\left. \frac{d\mathcal{E}}{dS} \right|_{\Delta L=0} = \frac{3TA_0D}{4k\rho}. \quad (9)$$

Заменяя в (9) величину D на $D_* = ct_*$, где t_* — время до старта трещины, и учитывая второй берег выреза, получим

$$\frac{3TA_0t_*}{2k\rho} = 2\gamma_d. \quad (10)$$

Величина γ_d является аналогом величины γ в формуле (1). Поскольку c и ρ — известные параметры материала, а величины A_0 , k и t_* определены экспериментально для импульсов различной длительности (T), формула (10) позволяет построить зависимость этой величины от длительности нагружения.

5. Обсуждение результатов

Как видно из рис. 3, для обоих исследуемых материалов значение γ_d более чем на порядок превосходит соответствующее значение, вычисленное по формуле (2) на основе квазистатических испытаний. Однако по мере увеличения длительности нагружения эта величина заметно снижается. Для ПММА точки, рассчитанные по формуле (9), хорошо ложатся на прямую в логарифми-

ческих координатах

$$\lg \gamma_d + \alpha \lg T = \text{const},$$

т. е. для нагружения с длительностью в микросекундном диапазоне оказывается выполненным соотношение

$$\gamma_d \cdot T^\alpha = \text{const}. \quad (11)$$

Список литературы

- [1] Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. Проблемы динамики разрушения твердых тел. Изд-во СПбГУ, СПб (1997). 132 с.
- [2] А.Я. Карлсон. Теоретическая и прикладная механика. Труды XIV Межд. конгр. IUTAM. Мир, М. (1979). С. 300.
- [3] В. Вейс, С. Юкава. Прикладные вопросы вязкости разрушения. Мир, М. (1968). С. 25.
- [4] Ю.В. Петров, В.И. Смирнов. Нестационарные колебания и поведение внутренней энергии одномерных тел. Изд-во ИПМАШ РАН, СПб (2002). 64 с.
- [5] С.И. Кривошеев, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, Г.А. Шнеерсон. Изв. РАН. МТТ **165**, 5, 78 (1999).
- [6] С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров, А.А. Уткин, Г.Д. Федоровский. Междунар. конф. 3-е Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны. ВНИИЭФ, Саров (2001). С. 131.
- [7] С.И. Кривошеев, Г.И. Шнеерсон. Прочность и разрушение материалов и конструкций. Изд-во СПбГУ, СПб (1999). Вып. 18. С. 116.
- [8] А.Н. Березкин, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров, А.А. Уткин. Доклады РАН **375**, 3, 328 (2000).
- [9] В.А. Братов, А.А. Груздков. Межд. молодежная научная конф. XVII Гагаринские чтения. Тез. докл. Изд-во МАТИ, М. (2001). С. 119.