

УДК 539.375

© 1993 г. Н. Ф. МОРОЗОВ, Ю. В. ПЕТРОВ

О СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОМ ОПИСАНИИ СКОРОСТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Проблема объяснения и описания скоростных зависимостей прочностных характеристик является одной из центральных в динамической механике разрушения. Природа скоростной зависимости и возможность формализации этого явления в рамках тех или иных моделей разрушения являются предметом многих исследований. В настоящей работе рассмотрена возможность трактовки и количественной оценки эффектов высокоскоростного разрушения на основе системы фиксированных параметров материала и структурно-временного критерия разрушения.

1. При формулировке критерия макроразрыва, дополняющего уравнения механики сплошной среды, должна учитываться важнейшая особенность динамического разрушения, состоящая в наличии не только пространственной, но и временной структуры процесса. Данное обстоятельство должно быть отражено при выборе определяющих параметров критерия и метода тестирования динамических прочностных свойств материалов.

Существенным вкладом в решение данной проблемы стала концепция инкубационного времени, предложенная в [1, 2]. Проведенные в этих работах опыты показали, что в случае инициирования роста макротрещин при помощи интенсивных коротких импульсов динамической нагрузки экспериментально найденные значения пороговой амплитуды оказываются заметно выше тех, которые предсказываются традиционным критерием максимального коэффициента интенсивности напряжений. Поэтому в [1] было предложено отказаться от традиционного критерия и считать, что разрушение наступает тогда, когда текущий динамический коэффициент интенсивности напряжений $K_d(t)$ превосходит динамическую вязкость разрушения K_{Id} в течение некоторого минимального времени t_{inc} . Инкубационное время t_{inc} считается константой материала, связанной со структурными процессами. Данный постулат получил название критерия минимального времени.

Экспериментальное определение инкубационного времени связано с весьма громоздкой процедурой, требующей многократных испытаний образцов при различных значениях длительности импульсной нагрузки и сложных численных расчетов [2]. Существенным для критерия минимального времени является также априорное знание функциональной зависимости динамической вязкости разрушения от истории нагружения.

В [3, 4] предложен другой подход к анализу разрушения, основанный на структурно-временном критерии:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t ds \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(s, r) dr \leq \sigma_c \quad (1)$$

где τ и d — структурное время и структурный размер разрушения, σ_c — статическая прочность материала, $\sigma(t, r)$ — максимальное растягивающее напряжение у вершины трещины ($r=0$). Структурный размер d определяется по данным

квазистатических испытаний образцов с трещинами и в случае обобщенного плоского напряженного состояния может быть выражен через квазистатическую вязкость разрушения и прочность по простой формуле [5]: $d = 2K_{IC}^2 / (\pi\sigma_c^2)$. В соответствии с данным подходом σ_c , K_{IC} и τ образуют систему определяющих параметров, описывающих прочностные свойства материала. Структурное время разрушения τ отвечает за динамические особенности хрупкого разрушения и для каждого материала должно быть найдено из экспериментов.

В [3, 4] показано, что структурно-временной критерий качественно объясняет ряд принципиальных эффектов хрупкого разрушения и описывает скоростные зависимости динамической прочности и вязкости разрушения материалов.

2. Покажем, что структурное время τ в условиях экспериментов [1, 2] может интерпретироваться как t_{inc} .

Пусть в бесконечной пластине имеется трещина $x \leq 0$, $y = 0$, к берегам которой прикладывается прямоугольный импульс нагрузки $\sigma_y = P [H(t) - H(t - T)]$, $\sigma_{xy} = 0$, $H(t)$ — функция Хевисайда. Найдем минимальную для данной продолжительности T разрушающую амплитуду внешнего импульса. Соответствующее асимптотическое выражение для максимального растягивающего напряжения на продолжении трещины имеет вид

$$\sigma_y = K_I(t) / \sqrt{2\pi r} + O(1), \quad r \rightarrow 0 \quad (2)$$

$$K_I(t) = P\Phi(c_1, c_2)f(t), \quad \Phi(c_1, c_2) = 4c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (c_1 \sqrt{\pi c_1})$$

$$f(t) = \sqrt{t} H(t) - \sqrt{t - T} H(t - T)$$

где c_1 , c_2 — скорости продольной и поперечной волн. В силу (1), (2) для минимальной разрушающей амплитуды будем иметь значение

$$P_1 = \tau K_{IC} / \left[\Phi(c_1, c_2) \max_t \int_{t-\tau}^t f(s) ds \right] \quad (3)$$

С другой стороны, из традиционного критерия максимума коэффициента интенсивности напряжений следует

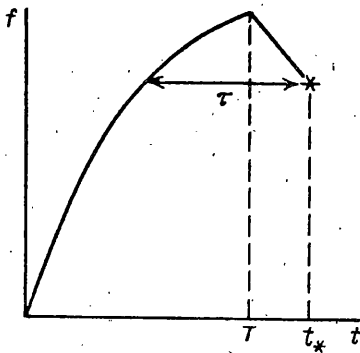
$$P_2 = K_{IC} / [\Phi(c_1, c_2) \max_t f(t)] \quad (4)$$

Заметим теперь, что

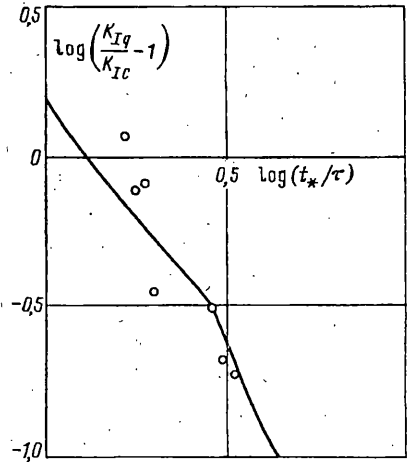
$$\max_t \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t f(s) ds < \max_t f(t)$$

Откуда следует $P_1 > P_2$, что и проявляется в экспериментах [1, 2], в которых было установлено, что для длинных трещин (коротких импульсов) значения минимальной разрушающей амплитуды оказываются больше, чем те, что следуют из традиционного критерия максимума коэффициента интенсивности.

Временная зависимость коэффициента интенсивности показана на фиг. 1. Как следует из критерия (1) инициирование роста трещины происходит с задержкой, т. е. на стадии снижения интенсивности локального поля напряжений у ее вершины. В момент разрушения t_* интеграл $\int f(s) ds$ ($t - \tau \leq s \leq t$) имеет максимальное значение, следовательно $f(t_* - \tau) = f(t_*)$. В силу свойств монотонности функции $f(t)$ получаем, что в рассматриваемом случае τ представляет собой время, в течение которого коэффициент интенсивности напряжений превышает значение $K_{Id} = K_I(t_*)$. Заметим также, что расчетные значения динами-



Фиг. 1



Фиг. 2

ческой вязкости разрушения при рассмотренных условиях оказываются ниже соответствующего квазистатического значения

$$K_{Id} = P_1 \Phi(c_1, c_2) f(t_*) = \tau K_{Ic} f(t_*) / \int_{t_* - \tau}^{t_*} f(s) ds < K_{Ic}$$

что и наблюдается в экспериментах [1, 2, 6].

Приведенные рассуждения останутся справедливыми при достаточно произвольном временном профиле одиночного импульса нагрузки, обеспечивающего монотонное нарастание и убывание интенсивности напряжений.

Таким образом, анализ разрушения пороговыми импульсами нагрузки показывает, что структурный параметр τ обладает всеми формальными свойствами инкубационного времени из [1, 2] и при исследовании инициирования роста макротрещин можно принимать

$$\tau = t_{inc} \quad (5)$$

Критерий (1) и соотношение (5) позволяют эффективно рассчитывать критические значения параметров внешней нагрузки.

Для стали 4340 имеем [2, 6] $c_1 = 6$ мм/мкс; $v = 0,3$; $K_{Ic} = 47$ МПа; $\sigma_c = 1490$ МПа; $t_{inc} = 7$ мкс. При $T = 18$ мкс из (3), (5) получаем значение для критической амплитуды $P_1 = 155$ МПа, что согласуется с экспериментом [6], в котором было получено аналогичное значение критической амплитуды нагрузки, вызывающей «скачок» трещины на расстояние $d = 2K_{Ic}^2 / (\pi\sigma_c^2) \approx 0,6$ мм.

3. Предположим теперь, что к берегам трещины прикладывается бесконечная трапецеидальная нагрузка вида

$$\sigma_y = P/t_0 [tH(t) - (t - t_0)H(t - t_0)], \quad \sigma_{xy} = 0 \quad (6)$$

где t_0 — заданное время возрастания приложенного напряжения до максимального значения P . Соответствующая асимптотика максимального нормального напряжения на продолжении трещины определяется выражением (2), в котором

$$f(t) = 2 [t^2 H(t) - (t - t_0)^2 H(t - t_0)] / (3t_0) \quad (7)$$

Пусть t_* — время до разрушения, а t_0 — фиксировано. Используя (1), (2) и (7), можно определить соответствующую t_* разрушающую амплитуду P_* . Под-

считывая затем значение критического коэффициента интенсивности напряжений $K_{Iq} = K_I(t_*) = P_* \Phi(c_1, c_2) f(t_*)$, получим

$$\frac{K_{Iq}}{K_{IC}} = \frac{5}{2} \frac{\bar{t}_*^{3/2} - (\bar{t}_* - \bar{t}_0)^{3/2}}{\bar{t}_*^{5/2} - (\bar{t}_* - 1)^{5/2} - (\bar{t}_* - \bar{t}_0)^{5/2} + (\bar{t}_* - \bar{t}_0 - 1)^{5/2}} \quad (8)$$

где $\bar{t}_* = t_*/\tau$, $\bar{t}_0 = t_0/\tau$, а значения степенных функций при отрицательных значениях их аргументов считаются равными нулю. При относительно больших временах разрушения критический коэффициент интенсивности стремится к соответствующему квазистатическому значению, причем $K_{Iq} = K_{IC} + \lambda\tau/t_*$, $t_*/\tau \rightarrow \infty$.

Соответствующие рассматриваемым условиям эксперименты были проделаны в [7] на образцах, изготовленных из материала Гомалит-100. Оценка структурного времени для данного материала может быть проведена на основе сравнения теоретической формулы (8) с экспериментальными данными. Расчетная кривая (при $t_0 = 25$ мкс, $K_{IC} = 0,48$ МПа·м^{1/2}, $\tau = 9$ мкс) и соответствующие экспериментальные точки в логарифмических координатах показаны на фиг. 2. В [7] предложена эмпирическая формула

$$K_{Iq} = K_{IC} + c/t_*^2 \quad (9)$$

позволяющая аналитически описывать экспериментальные данные. Как следует из приведенных результатов (фиг. 2), соотношение (9) может рассматриваться как приближенная степенная аппроксимация точной формулы (8). При этом

$$c = \alpha\tau^2 K_{IC}, \quad \alpha \approx 2,5 \quad (10)$$

Формула (8) показывает, что связь между критическим коэффициентом интенсивности и временем разрушения зависит от времени роста нагрузки t_0 . В случае ограниченных и полуограниченных областей эта связь будет зависеть также от геометрических параметров задачи. Так, например, если L — длина трещины и $K_I(t) = PG(t, L)$, то в силу (1) получим

$$K_{Iq}/K_{IC} = \tau G(t_*, L) / \int_{t_*-\tau}^{t_*} G(s, L) ds \quad (11)$$

Заметим, что время роста нагрузки в (6), (7) и (8) может быть устремлено к нулю. Тогда получится соотношение

$$K_{Iq}/K_{IC} = \frac{3}{2} \bar{t}_*^{1/2} / (\bar{t}_*^{3/2} - (\bar{t}_* - 1)^{3/2}) \quad (12)$$

которое формально соответствует мгновенному приложению постоянной нагрузки. Таким образом, качественный вид связи между K_{Iq} и t_* сохраняется даже в условиях «бесконечной» скорости нагружения.

В отличие от рассмотренных ранее пороговых импульсов здесь нагрузка на берегах трещины держится вплоть до момента разрушения. Это обеспечивает монотонный рост коэффициента интенсивности напряжений в течение всего структурно-временного интервала τ и, следовательно, выполнение неравенства $K_{Iq} > K_{IC}$, что и наблюдается в экспериментах [7—9].

Проведенный с учетом структурно-временных характеристик процесса анализ показывает, что динамические эффекты зависят от геометрии, способа и истории нагружения, а их интерпретация не может быть сведена лишь к скоростной зависимости динамической вязкости разрушения. Это может служить одним из объяснений большого разброса и противоречивости экспериментальных данных по динамической вязкости разрушения хрупких материалов [8, 9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalthoff J. F., and Shockey D. A.* Instability of Cracks Under Impulse Loads // *Journal of Applied Physics*, 1977. Vol. 48. P. 986—993.
2. *Shockey D. A., Erlich D. C., Kalthoff J. F., and Homma H.* Short-Pulse Fracture Mechanics // *Engineering Fracture Mechanics*. 1986. Vol. 23. P. 311—319.
3. *Морозов Н. Ф., Петров Ю. В.* Динамическая вязкость разрушения в задачах инициирования роста трещин // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1990. № 6. С. 108—111.
4. *Петров Ю. В.* О «квантовой» природе динамического разрушения хрупких сред // *ДАН СССР*. 1991. Т. 321. № 1. С. 66—68.
5. *Морозов Н. Ф.* Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.
6. *Homma H., Shockey D. A., Murayama Y.* Response of Cracks in Structural Materials to Short Pulse Loads // *J. Mech. Phys. Solids*. 1983. Vol. 31, № 3. P. 261—279.
7. *Ravi-Chandar K., and Knauss W. G.* An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: 1. Crack Initiation and Arrest // *International Journal of Fracture*. 1984. Vol. 25. P. 247—262.
8. *Knauss W. G.* Fundamental Problems in Dynamic Fracture. In: *Advances in Fracture Research. Proceedings of the ICF-6* (S. R. Vallury et al. eds.), Vol. 1. 1984. Pergamon Press. Oxford — New York. P. 625—652.
9. *Kalthoff J. F.* Fracture Behavior Under High Rates of Loading // *Engineering Fracture Mechanics*. 1986. Vol. 23. P. 289—298.

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
11.III.1993