

УДК 539.375.

© 1990 г.

Н. Ф. МОРОЗОВ, Ю. В. ПЕТРОВ

ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ИНИЦИИРОВАНИЯ РОСТА ТРЕЩИН

Обсуждается возможность отказа от трактовки динамической вязкости разрушения как параметра материала. Предлагается формально-механический подход, основу которого составляет введение некоторой элементарной пространственно-временной ячейки разрушения. Это позволяет в рамках упругохрупкой модели и условия неизменности свойств материала объяснять некоторые принципиальные эффекты поведения динамической вязкости разрушения хрупких сред, которая может рассматриваться как расчетная характеристика задачи. Обсуждаются возможные причины разброса экспериментальных данных по динамической вязкости разрушения хрупких материалов.

1. Одним из наиболее интригующих эффектов динамического разрушения хрупких материалов является зависимость динамической прочности от способа приложения внешней нагрузки. Она проявляется, как правило, в условиях высокоскоростного нагружения. При этом под прочностью можно понимать как критический коэффициент интенсивности, соответствующий разрушению в вершине трещины, так и динамическое локальное напряжение разрыва «бездефектного» континуума: и то и другое является пределом для интенсивности локального силового поля, по достижении которого наступает разрушение. Зависимость от способа приложения нагрузки проявляется как изменение критической величины при изменении продолжительности действия, амплитуды и скорости нарастания внешнего усилия. Заметим, что в соответствующей квазистатической ситуации критическая величина оказывается константой материала. Этот эффект изучался многими авторами на различных экспериментальных установках. Достаточно полно зависимость динамической вязкости разрушения от истории нагружения исследовалась в [1–4]. Так в опытах на пластинах из стеклообразного полимера Гомалит-100 было найдено [4], что с уменьшением времени до разрушения критический коэффициент интенсивности напряжений возрастает и может существенно превосходить соответствующее квазистатическое значение, которое является константой материала. Авторы [1] отмечают, что при малых временах разрушения или при высоких скоростях нагружения следует учитывать зависимость от времени свойств самого материала и сложную реологию. Пытаясь дать объяснение опытам, они трактуют зависимость критического коэффициента интенсивности от скорости нагружения как функцию материала, отвечающую за его «вязкую» реакцию. Однако попытки установить величины динамической вязкости разрушения материалов, отвечающие определенным скоростям нагружения, не приводят к однозначному результату. Эти значения оказываются зависящими от прочих условий приложения нагрузки и при этом заметно различаются между собой. Так в работе [4] методами тензометрии и фотоупругости также были проведены опыты по определению стартового значения коэффициента интенсивности в пластинах из того же материала. Результаты подтверждают наличие эффекта роста критического коэффициента с ростом скорости приложения внешней нагрузки. Однако отмечается, что полученные в [1] значения динамической вязкости разрушения являются более высокими. Обращает на себя внимание то, что в сопоставляемых работах нагружение осуществлялось различными способами. Так в [1] равномерно распределенная нагрузка прикладывалась непосредственно к берегам трещины, тогда как в [4] разрушение инициировалось при помощи набегающей на трещину двусторонней плоской волны растяжения. Учет этого обстоятельства позволяет интерпретировать существующий разброс экспериментальных результатов в рамках обобщения примененного в [5, 6] структурно-импульсного критерия разрушения.

2. Основным параметром в квазистатике является некоторый структурный размер, характеризующий элементарную ячейку разрушения. Эта характеристика не имеет однозначной физической интерпретации и может быть истолкована различным образом в зависимости от класса рассматриваемых задач. Явное введение структурного размера в модели

Нейбера — Новожилова [7, 8] позволило существенно расширить возможности механики квазихрупкого разрушения, особенно в тех случаях, когда традиционные схемы энергетического баланса и соответствующая корневая асимптотика напряжений не работают [9]. По аналогии со статическим структурным размером в динамике естественно рассматривать структурные времена, вводя таким образом элементарную пространственно-временную ячейку разрушения. В простейшем случае, если имеется структурный размер d и максимальная скорость волн c , то отношение d/c будет представлять собой структурное время τ передачи взаимодействия между соседними элементами структуры [5, 6]. Однако в общем случае параметры d и τ следует рассматривать как независимые, так как τ может определяться сложными процессами в структуре материала. Будем считать, что разрушение происходит, если усредненное по структурно-временному интервалу $[0, d] \times [t-\tau, t]$ максимальное растягивающее напряжение достигает прочности континуума σ_c :

$$\max_t \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t ds \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(s, x) dx \geq \sigma_c \quad (1)$$

Здесь d и τ параметры, данные для каждого материала. Структурный размер d определяется по данным статических испытаний образцов с макротрещинами. В этом случае критерий (1) совпадает с критерием Нейбера — Новожилова, который однозначно связывает параметр d со значениями статических характеристик вязкости разрушения K_{Ic} и прочности материала σ_c , что и принято, например в [9]. Каждый (1) может быть записан в форме $\max_t J \geq J_c$, $J_c = \sigma_c \tau d$, имеющей смысл критического структурного импульса. Временем разрушения t_* естественно считать момент достижения структурным импульсом критического значения $J(t_*) = J_c$. Наиболее важным достоинством этого подхода является то, что он дает возможность избавиться от априорного введения функциональных кривых динамической прочности материалов и рассматривать, например, динамическую вязкость разрушения как расчетную характеристику задачи. Это позволяет, в частности, качественно объяснить результаты упомянутых выше экспериментов в рамках упругохрупкого подхода и условия независимости свойств материала от времени и скорости нагружения.

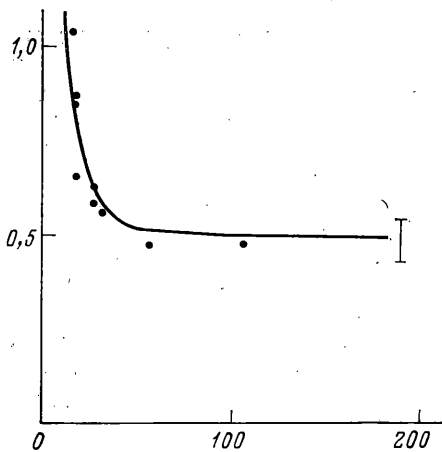
3. Рассмотрим неограниченную упругую плоскость с прямолинейной полубесконечной трещиной $x \leq 0, y = 0$, к берегам которой прикладывается трапецидальная нагрузка $\sigma_y = -V[tH(t) - (t-t_0)H(t-t_0)]$, где $H(t)$ — функция Хевисайда, t_0 — время роста нагрузки, V — скорость нагружения. Соответствующее асимптотическое выражение для максимального растягивающего напряжения на продолжении трещины известно. С учетом первых членов асимптотики

$$\begin{aligned} \sigma_y &= K_I(t) / \sqrt{2\pi x} - V[tH(t) - (t-t_0)H(t-t_0)] + o(1), \quad x \rightarrow 0 \\ K_I(t) &= V\varphi(c_1, c_2) [t^{3/2}H(t) - (t-t_0)^{3/2}H(t-t_0)] \\ \varphi(c_1, c_2) &= 8c_2\sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (3c_1\sqrt{\pi c_1}) \end{aligned} \quad (2)$$

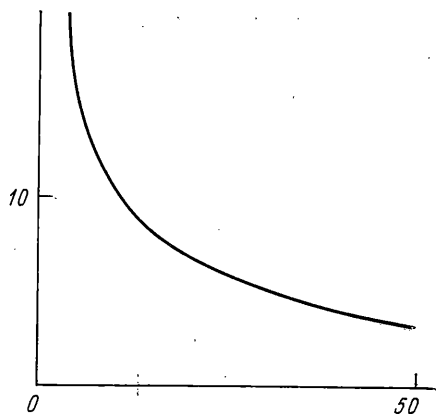
где c_1, c_2 — скорости продольной и поперечной волн. Пусть t_* — время до разрушения. Из (1) и (2), принимая $t = t_*$, будем иметь соответствующее значение для критической скорости нагружения V_* . Вычисляя затем критический коэффициент интенсивности $K_{Ic}^* = K_I(t_*)$, получим

$$\begin{aligned} \frac{K_{Ic}^*}{K_{Ic}} &= \frac{5}{2} \frac{t_*^{\check{3}/2} - (t_*^{\check{}} - t_0^{\check{}})^{3/2}}{t_*^{\check{3}/2} - (t_*^{\check{}} - 1)^{3/2} - (t_*^{\check{}} - t_0^{\check{}})^{3/2} + (t_*^{\check{}} - t_0^{\check{}} - 1)^{3/2}} \times \\ &\times \left\{ 1 + \frac{\tau V_*}{2\sigma_c} [t_*^{\check{2}} - (t_*^{\check{}} - 1)^2 - (t_*^{\check{}} - t_0^{\check{}})^2 + (t_*^{\check{}} - t_0^{\check{}} - 1)^2] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь K_{Ic} — критический коэффициент интенсивности в статике: $K_{Ic} = \sqrt{\pi/2} \sigma_c \sqrt{d}$; $t_*^{\check{}} = t_*/\tau$, $t_0^{\check{}} = t_0/\tau$. Здесь и далее значения степенных функ-



Фиг. 1



Фиг. 2

ций при отрицательных значениях их аргументов полагаются равными нулю. Формула (3) демонстрирует эффект роста критического коэффициента интенсивности с уменьшением времени до разрушения, т. е. с увеличением скорости приложения нагрузки, что и наблюдается в опытах [1]. Структурное время для данного материала может быть получено из условия соответствия расчетной кривой с экспериментом. Это дает $\tau=8$ мксек; соответствующая ($t_0=25$ мксек, $K_{Ic}=0,48$ МПа $\sqrt{М}$, $\sigma_c=60$ МПа, $c_1=2150$ м/сек, $c_2=1230$ м/сек) теоретическая кривая и экспериментальные значения показаны на фиг. 1. По оси абсцисс t_* (мксек), по оси ординат — K_{Ic}^* (МПа $\sqrt{М}$). Таким образом, связь между критическим коэффициентом интенсивности и временем до разрушения (скоростью нагружения) в хрупких средах не является функцией материала. В рамках применяемого подхода она рассматривается как расчетная характеристика задачи и может быть достаточно просто определена, если имеется структурный динамический параметр разрушения τ и история интенсивности напряжений.

Покажем, что динамическая вязкость разрушения может зависеть не только от скорости приложения нагрузки. В условиях предыдущей задачи предположим, что инициирование разрушения осуществляется при помощи набегавшей на трещину двусторонней плоской волны напряжения: $\sigma_y|_{t<t_0} = V/2 [(t+y/c)H(t+y/c) - (t-t_0+y/c)H(t-t_0+y/c) + (t-y/c) \times H(t-y/c) - (t-t_0-y/c)H(t-t_0-y/c)]$. Пусть берега трещины при этом остаются свободными от нагрузки. Тогда асимптотика максимального растягивающего напряжения на продолжении трещины будет иметь вид

$$\sigma_y = K_I(t) / \sqrt{2\pi x} + o(1), \quad x \rightarrow 0 \quad (4)$$

где коэффициент интенсивности определяется тем же, что и в (2), выражением. По сравнению с предыдущим случаем здесь у вершины трещины действуют большие по величине напряжения, что происходит из-за наличия проходящей волны. Заметим, что текущий коэффициент интенсивности в обоих ситуациях одинаков, а разница в способе нагружения проявляется во втором члене асимптотического представления решения. Применяя к (4) структурно-временной критерий (1), для $K_{Ic}^0 = K_I(t_*)$ будем иметь

$$\frac{K_{Ic}^0}{K_{Ic}} = \frac{5}{2} \frac{t_*^{\check{v}/2} - (t_*^{\check{v}} - t_0^{\check{v}})^{1/2}}{t_*^{\check{v}/2} - (t_*^{\check{v}} - 1)^{1/2} - (t_*^{\check{v}} - t_0^{\check{v}})^{1/2} = (t_*^{\check{v}} - t_0^{\check{v}} - 1)^{1/2}} \quad (5)$$

Как следует из приведенных формул, динамическая вязкость разрушения при нагружении волной оказывается ниже, чем при соответствующем приложении нагрузки непосредственно к берегам трещины. Значения разницы $Q = (K_{Ic}^* - K_{Ic}^0) / K_{Ic}^0 \times 100\%$ в зависимости от t_* (мксек) для приведенных выше констант материала показаны на фиг. 2. Как пока-

зывает расчет, на больших временах различие в способах нагружения почти не сказывается на значениях критического коэффициента интенсивности. При увеличении скорости нагружения разрушение происходит быстрее, но становится заметной зависимость динамической вязкости разрушения от способа приложения нагрузки. Очевидно, физической причиной, вызывающей это явление, является дополнительный вклад в механизм разрушения энергии проходящей волны, которая тем сильнее, чем меньше время до разрушения. Это приводит к снижению величины критического коэффициента интенсивности напряжений, требуемого для создания условий разрыва материала. Указанное обстоятельство может служить одной из причин, вызывающих известный разброс в результатах экспериментального определения динамической вязкости разрушения. Так в опытах [4], в которых нагружение осуществлялось при помощи высокоинтенсивных волн, были получены более низкие, чем в [1] значения критического коэффициента интенсивности, что вызвало дискуссию относительно точности применявшихся экспериментальных методик.

4. Примененный подход можно рассматривать как формально-механический способ определения критических параметров разрушения. Он в принципе не требует априорного знания функциональных кривых динамической вязкости разрушения материалов. Для определения пороговых характеристик разрушения достаточно располагать известными квазистатическими параметрами прочности и специальным динамическим параметром разрушения, который должен быть определен из опытов. Сравнение с известными экспериментами по иницированию роста трещин показывает, что динамический параметр разрушения τ не может быть выражен через квазистатическую структурную характеристику d . Повидимому, величина τ определяется сложными процессами, протекающими в специальной зоне у вершины трещины, где имеет место множественное микроразрушение, сопровождающееся локальной релаксацией. Проведенный анализ приводит к выводу, что главной мерой этих процессов является некоторый параметр размерности времени, который и управляет динамическим макроразрушением материала. Для его определения и выявления его реального физического содержания необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ravi-Chandar K., Knauss W. G. An experimental investigation into dynamic fracture: 1. Crack initiation and arrest // Intern. J. Fracture. 1984. V. 25. № 4. P. 247–262.
2. Knauss W. G. Fundamental problems in dynamic fracture // Advances in fracture research. Proc. 6th ICF. Pergamon Press. 1984. V. 1. P. 625–652.
3. Dally J. W., Shukla A. Dynamic crack behavior at initiation // Mech. Res. Com. 1979. V. 6. № 4. P. 239–244.
4. Dally J. W., Barker D. B. Dynamic measurements of initiation toughness at high loading rates // Exper. Mech. 1988. V. 28. № 3. P. 298–303.
5. Morosov N. F., Petrov Ju. V., Utkin A. A. New explanation of some effects of brittle fracture by impact loading // Advances in fracture research: Proc. 7th ICF. Oxford: Pergamon Press. 1989. V. 6. P. 3703–3711.
6. Петров Ю. В., Уткин А. А. О зависимости динамической прочности от скорости нагружения // Физ.-хим. механика материалов. 1989. № 2. С. 38–42.
7. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 204 с.
8. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // ПММ. 1969. Т. 33. Вып. 2. С. 212–222.
9. Морозов Н. Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984. 255 с.

Ленинград

Поступила в редакцию
25.VI.1990