

05;12

## О неустойчивости поведения динамической вязкости разрушения

© В.И. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения,  
198103 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: smirnov@VS13866.spb.edu

(Поступило в Редакцию 21 декабря 2005 г. В окончательной редакции 5 апреля 2006 г.)

Показано, что динамическая вязкость разрушения материалов существенно зависит от истории нагружения, что обуславливает неустойчивость ее поведения при ударно-волновых нагрузках. Установлено, что минимальное значение динамической вязкости разрушения может составлять 50% от соответствующего статического значения. В инженерной практике эту величину можно рассматривать как исходный критический параметр, который следует принимать во внимание при отборе материалов, работающих в условиях импульсного нагружения.

PACS: 62.20.Fc

Одна из основных проблем тестирования динамических прочностных свойств материалов с трещинами связана с зависимостью динамической прочности от истории и способа приложения нагрузки. Здесь под прочностью обычно понимают критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, пороговой (минимальной) амплитуды нагрузки, а также времени до разрушения. Зависимость от способа приложения нагрузки проявляется как изменение предельных величин при изменении продолжительности действия, амплитуды, скорости нарастания внешнего усилия и других факторов.

Эти и другие эффекты импульсной прочности материалов подтверждаются многочисленными экспериментальными исследованиями [1–5], однако до сих пор имеют объяснения с точки зрения используемых в инженерной практике феноменологических моделей, что и стимулирует дальнейшие исследования в этом направлении.

В настоящей работе анализ разрушения проводится с помощью критерия инкубационного времени [1]

$$\int_{t-\tau}^t K_I(s) ds \leq K_{Ic} \tau, \quad (1)$$

где  $K_I(t)$  — коэффициент интенсивности напряжений, зависящий от времени,  $K_{Ic}$  — статическая вязкость разрушения материала,  $\tau$  — инкубационное время разрушения. Инкубационное время рассматривается как физическая константа материала, характеризующая продолжительность подготовки среды к разрушению или фазовому переходу.

Применение критерия (1) дает возможность исследовать поведение пороговых (предельных) характеристик разрушения, таких как пороговая амплитуда нагрузки  $P_*$ , время до разрушения  $t_*$ , динамическая вязкость разрушения  $K_{Id}$  и их комбинация.

Эксперименты показывают, что динамическая вязкость разрушения  $K_{Id}$  сильно зависит от истории нагру-

жения (временная форма приложенного импульса, его амплитуда и длительность) и механических констант материала (статическая вязкость разрушения, инкубационное время). Многообразие указанных факторов обуславливает большой диапазон возможных значений величин  $K_{Id}$ , которые могут быть зафиксированы как на стадии возрастания коэффициента интенсивности напряжений, так и на стадии его убывания. В этом смысле можно говорить о „неустойчивости“ или „двойственности“ поведения динамической вязкости разрушения [6,7].

Проанализируем особенности поведения  $K_{Id}$  в зависимости от времени до разрушения. Пусть  $t$  — произвольное время до разрушения при фиксированной длительности нагрузки  $t_0$ . Временная форма импульса — прямоугольная

$$p(t) = P [H(t) - H(t - t_0)],$$

где  $P$  — амплитуда импульса нагрузки,  $H(t)$  — функция Хевисайда. Выражение для коэффициента интенсивности напряжений имеет следующий вид [8]:

$$K_I(t) = P \varphi(c_1, c_2) [\sqrt{t} H(t) - \sqrt{t - t_0} H(t - t_0)], \quad (2)$$

где

$$\varphi(c_1, c_2) = \frac{4c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2}}{c_1 \sqrt{\pi c_1}}$$

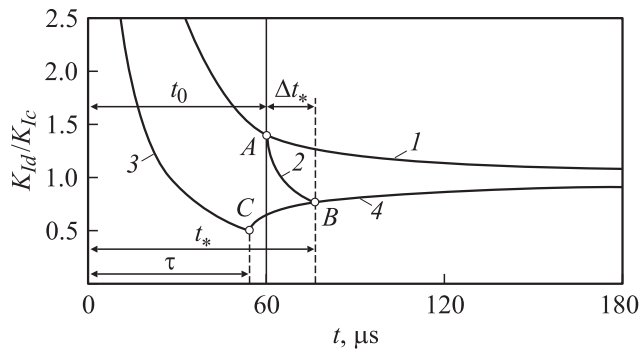
— функция скоростей продольных ( $c_1$ ) и сдвиговых ( $c_2$ ) волн.

Найдем соответствующие  $t$  критическую (разрушающую) амплитуду нагружения  $P(t)$  и критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Id}$  (далее везде  $t$  — произвольное время до разрушения).

Из критерия (1) следует

$$\max_t I(t) = K_{Ic} \tau, \quad I(t) = \int_{t-\tau}^t K_I(s) ds, \quad (3)$$

где  $K_I(t)$  определяется в соответствии с выражением (2).



Изменение критического коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от времени до разрушения.

Из условия (3) находим разрушающую нагрузку  $P$ . Имеем

$$I(t) = \frac{2}{3} P \varphi(c_1, c_2) I_0(t) = K_{Ic} \tau,$$

где

$$I_0(t) = \left[ t^{3/2} H(t) - (t - \tau)^{3/2} H(t - \tau) - (t - t_0)^{3/2} H(t - t_0) + (t - \tau - t_0)^{3/2} H(t - \tau - t_0) \right],$$

тогда

$$P = \frac{3}{2} \frac{K_{Ic} \tau}{\varphi(c_1, c_2) I_0(t)}. \quad (4)$$

Подставив в (2) предельную амплитуду (4), находим динамическую вязкость разрушения материала

$$K_{Id} = \frac{3}{2} \frac{K_{Ic} \tau}{I_0(t)} \left[ \sqrt{t} H(t) - \sqrt{t - t_0} H(t - t_0) \right].$$

Особо выделим случай  $t_0 = 0$ , т.е. нагружение импульсом в виде  $\delta$ -функции Дирака, тогда

$$I_0(t) = \left[ \sqrt{t} H(t) - \sqrt{t - \tau} H(t - \tau) \right]$$

и

$$K_{Id}(t) = \frac{K_{Ic} \tau}{2\sqrt{t} \left[ \sqrt{t} H(t) - \sqrt{t - \tau} H(t - \tau) \right]}. \quad (5)$$

Для примера на рисунке приведена зависимость динамической вязкости разрушения песчаника от времени до разрушения при длительности действия нагрузки  $t_0 = 60 \mu s$ . Здесь можно выделить четыре характерные ветви.

Ветвь 1 (назовем ее условно „запороговой“) представляет собой точки, соответствующие временам до разрушения  $t$  меньшим, чем пороговое  $t_*$ , т.е. разрушение на этой ветви происходит при амплитудах нагружения  $P$  выше пороговых  $P_*$ , причем на стадии возрастания коэффициента интенсивности напряжений. Таким образом, разрушение на ветви 1 происходит при следующих условиях:  $t < t_*$ ,  $P > P_*$ ,  $K_I(t)$  возрастает. Точка А соответствует случаю, когда время до разрушения совпадает с длительностью нагружения ( $t = t_0$ ).

Ветвь 2 („переходная“) — отличие от предыдущей состоит в том, что разрушение здесь происходит на стадии убывания коэффициента интенсивности напряжений, т.е. при условиях  $t \leq t_*$ ,  $P \geq P_*$ ,  $K_I(t)$  убывает. Точка В соответствует случаю, когда время до разрушения совпадает с пороговым ( $t = t_*$ ).

Ветви 3 и 4 одновременно описываются уравнением (5). По физическому смыслу это уравнение следует разделить на два, каждой из которых отвечает определенной ветви. Так, 3 — это переходная ветвь динамической вязкости разрушения при  $t_0 = 0$ , которая описывается выражением

$$K_{Id}(t) = \frac{K_{Ic} \tau}{2t}, \quad t \leq \tau.$$

Точка С соответствует случаю нагружения материала пороговым импульсом (с амплитудой  $P_*$ ), имеющим временной профиль  $\delta$ -функции Дирака. Время до разрушения при этом совпадает с инкубационным ( $t = \tau$ ), а динамическая вязкость разрушения минимальна и равна половине соответствующего статического значения  $K_{Id} = K_{Ic}/2$ .

Ветвь 4 представляет собой совокупность точек, отвечающих пороговым временам до разрушения  $t_*$ , т.е. временам до разрушения при пороговых амплитудах нагрузки  $P_*$ . Эта ветвь описывается уравнением

$$K_{Id}(t_*) = \frac{K_{Ic} \tau}{2[t_* - \sqrt{t_*(t_* - \tau)}]}, \quad t_* \geq \tau.$$

Таким образом, все возможные значения динамической вязкости разрушения  $K_{Id}$  лежат в пределах, ограниченных кривыми 1–4. При этом величина  $K_{Id}$  может изменяться в очень большом диапазоне: от минимального значения, равного  $K_{Ic}/2$ , до бесконечности (при  $t_* = 0$ ). Этим объясняется большой разброс экспериментально определенных значений  $K_{Id}$ , полученных разными исследователями.

Отсюда становится очевидным, что в динамике невозможно указать какое-либо конкретное значение динамической вязкости разрушения для данного материала, которое можно было бы занести в справочник, а потом пользоваться при практических расчетах. В этом состоит принципиальное отличие от статического нагружения, при котором трещиностойкость материала однозначно определяется критическим значением коэффициента интенсивности напряжений. В динамике главную роль играет история нагружения. В качестве „точки отсчета“ в инженерной практике можно рассматривать точку С (см. рисунок), т.е. ориентироваться на наиболее неблагоприятный случай, когда величина динамической вязкости разрушения достигает минимума, равного  $K_{Ic}/2$ . Такая ситуация может иметь место при очень высоких скоростях нагружения с крутым фронтом нарастания нагрузки.

Величина  $\Delta t_*$ , показанная на рисунке, характеризует время задержки разрушения, т.е. период времени от

момента достижения коэффициентом интенсивности напряжения максимального значения до момента разрушения. Этот эффект подтверждается экспериментально [9]: после снятия (окончания действия) нагрузки трещина стартует не сразу, а спустя некоторое время  $\Delta t_*$ , т.е.  $t_* = t_0 + \Delta t_*$ , где  $\Delta t_*$  для прямоугольного импульса нагружения

$$\Delta t_* = \frac{1}{3} \left( \tau - 2t_0 + 2\sqrt{\tau^2 - t_0\tau + t_0^2} \right).$$

Величина задержки разрушения  $\Delta t_*$  зависит от инкубационного времени: чем оно меньше, тем меньше задержка разрушения. В пределе, при  $\tau = 0$ , задержка будет отсутствовать. Для реальных материалов  $\tau \neq 0$ , поэтому при пороговом нагружении всегда будет иметь место задержка разрушения.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что „неустойчивое“ поведение критического коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от времени является принципиальной особенностью динамического разрушения и обусловлено дискретным характером процесса разрушения во времени и пространстве. Следствием такого поведения является большой разброс экспериментально измеренных значений динамической вязкости разрушения. Отсюда также следует практический вывод о том, что в динамике разрушения некорректно использовать для оценки трещиностойкости материалов фиксированное значение критического коэффициента интенсивности напряжений, как это имеет место в статике. В инженерных расчетах на динамическую прочность следует ориентироваться на минимальный уровень динамической вязкости разрушения, который может составлять порядка 1/2 от соответствующего статического значения.

## Список литературы

- [1] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 132 с.
- [2] Dally J.W., Barker D.B. // *Exp. Mech.* 1988. N 3. P. 298–303.
- [3] Dally J.W., Shukla A. // *Mech. Res. Com.* 1979. Vol. 6. N 4. P. 239–244.
- [4] Knauss W.G. // *Advances in Fracture Research. Proc. of the ICF-6.* Vol. 1. Oxford–New York: Pergamon Press, 1984. P. 625–652.
- [5] Ravi-Chandar K., Knauss W.G. // *Int. J. Fract.* 1984. Vol. 25. P. 247–262.
- [6] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Семенов Б.Н. // *Изв. вузов. Техн. науки*, 2001. Спецвыпуск. С. 1–3.
- [7] Петров Ю.В., Ситникова Е.В. // *ЖТФ*. 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 58–61.
- [8] Черепанов Г.П. // *Механика сплошной среды и родственные проблемы анализа*. М.: Наука, 1972. С7 615–622.
- [9] Березкин А.Н., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Уткин А.А. // *Докл. РАН*. 2000. Т. 375. № 3. С. 328–330.