

01;05

Прогнозирование динамической трещиностойкости конструкционных материалов на примере разрушения авиационного сплава при ударном воздействии

© Ю.В. Петров, Е.В. Ситникова

Санкт-Петербургский государственный университет,
 Научно-исследовательский институт математики и механики,
 198504 Санкт-Петербург, Россия
 e-mail: yp@YP1004.spb.edu

(Поступило в Редакцию 5 мая 2003 г.)

На примере разрушения авиационного алюминиевого сплава 2024-T3 рассмотрен новый подход к исследованию динамических прочностных свойств конструкционных материалов, основанный на понятии инкубационного времени разрушения. Эксперименты по динамическому разрушению данных сплавов описаны в работе [1], где для анализа экспериментальных данных был применен классический критерий разрушения, основанный на принципе максимума критического коэффициента интенсивности [2]. Там же проводилось измерение скоростных зависимостей предельного значения коэффициента интенсивности (динамической вязкости разрушения K_{I_d}), которые считались функциональными характеристиками материала. Предложен альтернативный анализ тех же экспериментальных данных с использованием структурно-временного подхода [3], согласно которому динамическая вязкость разрушения K_{I_d} оказывается расчетной характеристикой задачи, так что для определения предельных нагрузок уже не предполагается априорного знания ее скоростных зависимостей. Определено инкубационное время разрушения авиационного алюминиевого сплава. Дано объяснение наблюдаемой в опытах нестабильности в поведении скоростных зависимостей динамической вязкости разрушения конструкционных материалов. Произведен расчет динамической вязкости разрушения данного сплава, соответствующей импульсным пороговым нагрузкам.

Известно, что квазихрупкое разрушение твердых тел происходит в результате развития трещин, инициирование и рост которых определяются напряженным состоянием тела и его структурой. В линейной механике разрушения предполагается, что уровень напряжений в окрестности трещины зависит лишь от одного коэффициента — коэффициента интенсивности напряжений K_I . Для определения предельных нагрузок при статическом нагружении в образцах с трещинами используется критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения), который считается константой материала. В статических задачах для областей с симметрично нагруженными трещинами критерий разрушения, согласно [2], имеет следующий вид:

$$K_I \leq K_{Ic}, \quad (1)$$

где K_I — коэффициент интенсивности напряжений, K_{Ic} — статическая вязкость разрушения.

В соответствии с данным критерием трещина начинает распространяться тогда, когда коэффициент интенсивности напряжений K_I достигает некоторого критического значения K_{Ic} , которое должно быть определено экспериментально для каждого материала. Данный подход хорошо согласуется с результатами статических опытов по разрушению и в настоящее время является общепризнанным инструментом инженерной практики.

В условиях динамического нагружения ситуация меняется. Прочностные свойства материалов и конструкций различаются при статическом и динамическом воздействии.

В условиях динамического нагружения знания одного лишь критического коэффициента интенсивности недостаточно для изучения процессов разрушения в образцах с трещинами. Как показывает ряд экспериментальных исследований динамического разрушения, критический коэффициент интенсивности уже не является константой материала, а проявляет весьма сложное поведение в различных условиях нагружения и традиционный подход уже неприменим. Возникает необходимость в поиске иных критериев.

Изучению поведения динамической вязкости посвящена работа [1], в которой проводились эксперименты по динамическому разрушению с образцами из авиационного алюминиевого сплава 2024-T3. Были реализованы различные схемы, в которых образцы фиксированных размеров различной толщины с узким пропилом, содержащим в вершине заранее выращенную усталостную трещину, подвергались ударному воздействию при различных скоростях нагружения.

Использованный в [1] критерий разрушения имел тот же вид, что и в статике, но критическое значение коэффициента интенсивности традиционно рассматривалось как материальная функция локальной скорости нагружения. При этом время разрушения определяется из условия

$$K_I(t, P(t), a) \leq K_{I_d}(K'_I(t)). \quad (2)$$

Здесь $P(t)$ — обобщенная динамическая нагрузка, a — начальная длина трещины. Правая часть в (2) представ-

ляет собой динамическую вязкость разрушения, которая в рассматриваемой схеме является функцией материала, зависящей от локальной скорости нагружения $K_I'(t) = dK_I/dt$. Однако данный подход неудобен для использования в конкретных приложениях, поскольку сложно заранее предсказать скорость нагружения. Также он оказывается неэффективным в силу неустойчивости поведения динамической вязкости разрушения, которая может зависеть как от всей истории, так и от способа приложения нагрузки [4,5]. Так, в экспериментах [1] разрушение происходило на стадии возрастания коэффициента интенсивности и под скоростью нагружения понимался наклон линейной части кривой нагружения. Однако если рассматривать пороговые импульсы нагружения (т.е., например, разрушающие импульсы заданной длительности и минимальной амплитуды), то разрушение может произойти и после того, как коэффициент интенсивности достигнет своего максимума. В этом случае мы можем получить убывание динамической вязкости при уменьшении длительности разрушающего импульса [4], а не ее возрастание, как это наблюдается в экспериментах [1]. Таким образом, динамическая вязкость разрушения, присутствующая в предельном условии (2), не есть параметр материала и возникает необходимость в альтернативном способе тестирования динамических прочностных свойств материалов.

Покажем, что для анализа приведенных в [1] экспериментальных данных может быть применен существенно более удобный и эффективный структурно-временной критерий [3], который для образцов с симметрично нагруженными трещинами принимает вид

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

где $K_I(t)$ — текущее значение коэффициента интенсивности напряжений; τ — инкубационное время разрушения, имеющее физический смысл характерного времени релаксации при микроразрушении материала.

Выражение для коэффициента интенсивности напряжений соответствующего эксперимента [1], определяется из решения следующей начально-краевой задачи: неограниченная упругая плоскость, содержащая полубесконечную трещину $\Gamma_{\pm} = \{(x, y) : y = \pm 0, x \leq 0\}$, подвергается ударному воздействию. Напряженное состояние в окрестности вершины трещины определяется из решения уравнения динамической теории упругости для изотропной среды

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{U} + \mu \Delta \mathbf{U}, \quad (4)$$

справедливого во всех внутренних точках данной плоскости, с граничными условиями

$$\sigma_{xy}|_{\Gamma_{\pm}} = 0, \quad \sigma_y|_{\Gamma_{\pm}} = -p(t), \quad (5)$$

начальным условием

$$\mathbf{U}|_{t \leq 0} = 0 \quad (6)$$

и энергетическим условием, обеспечивающим однозначность решения данной задачи,

$$\forall t > 0: \mathbf{U} = \text{const} + O(r^\beta), \quad r \rightarrow 0, \quad \beta > 0. \quad (7)$$

Здесь λ и μ — параметры Ламе; $\mathbf{U} = \mathbf{U}(t, x_1, x_2)$ — вектор перемещения. Данная начально-краевая задача соответствует условиям эксперимента работы [1]. Связь компонент тензора напряжений с вектором перемещений, согласно закону Гука, определяется соотношениями

$$\sigma_{ij} = \lambda \text{div } \mathbf{U} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (8)$$

Максимальное разрывающее напряжение на продолжении трещины характеризуется асимптотикой

$$\sigma_y = \frac{K_I(t)}{\sqrt{2\pi r}} + O(1), \quad r \rightarrow 0. \quad (9)$$

Пусть на берегах трещины действует линейно нарастающая ударная нагрузка

$$p(t) = PU(t), \quad U(t) = tH(t), \quad (10)$$

где $H(t)$ — функция Хевисайда, P — скорость нагружения.

Решая задачу (4)–(7) методом факторизации Винера–Хопфа, можно получить выражение для коэффициента интенсивности в следующем виде:

$$K_I(t) = P\varphi(c_1, c_2)Q(t), \quad (11)$$

где

$$Q(t) = \int_0^t U(s)f_0(t-s)ds, \quad f_0(t) = \frac{1}{2}t^{-\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

$\varphi(c_1, c_2)$ — функция скорости продольных и поперечных волн c_1, c_2

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

В нашем случае для импульса вида (10) выражение для функции $Q(t)$ примет вид

$$Q(t) = \frac{2}{3}t^{\frac{3}{2}}H(t). \quad (13)$$

Пусть t_* — время до разрушения. Поставляя соотношения (11) и (13) в критерий (3), находим соответствующую скорость нагружения, которую дает данное время t_*

$$P_* = \frac{15}{4} \frac{K_{Ic}\tau}{\varphi(c_1, c_2)(t_*^{\frac{5}{2}} - (t_* - \tau)^{\frac{5}{2}})}. \quad (14)$$

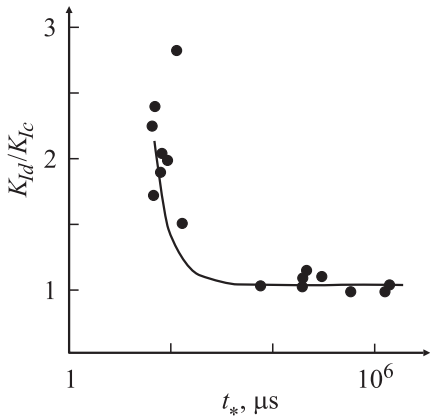


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости разрушения от времени до разрушения t_* : расчет по структурно-временному критерию (сплошная кривая) и экспериментальные данные работы [1] (значки).

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{Id}(t)$ есть значение коэффициента интенсивности в момент разрушения. Согласно (11), оно будет иметь вид

$$K_{Id} = K_I(t_*) = P_* \varphi(c_1, c_2) Q(t_*)$$

или

$$K_{Id} = \frac{5}{2} \frac{t_*^{\frac{3}{2}} K_{Ic} \tau}{t_*^{\frac{5}{2}} - (t_* - \tau)^{\frac{5}{2}}}. \quad (15)$$

Полученный результат используем для анализа экспериментальных данных работы [1]. Инкубационное время разрушения τ оценим, сравнивая данные, полученные по формуле (15), с экспериментальными данными. Результат, полученный с помощью структурно-временного критерия для сплава 2024-T3 (толщина образца $h = 2.54 \text{ mm}$, $K_{Ic} \approx 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), показан на рис. 1. Значение инкубационного времени τ , соответствующего данной кривой, оказывается равным $40 \mu\text{s}$.

В рассмотренной нами задаче, так же как и в опытах, описанных в [1], разрушение происходит также на стадии возрастания коэффициента интенсивности. Однако, как уже было сказано, можно реализовать схему нагружения, когда динамическая вязкость будет достигаться на стадии убывания коэффициента интенсивности [4]. Такая ситуация возникнет, если мы будем рассматривать импульсы заданной длительности и интересоваться минимальной разрушающей амплитудой.

Для изучения поведения динамической вязкости разрушения при пороговых нагрузках рассмотрим импульсы вида $p(t) = PU(t)$, где

$$U(t) = \sin^2\left(\frac{\pi}{T}t\right) [H(t) - H(t - T)], \quad (16)$$

различной продолжительности T .

Воспользовавшись решением задачи (4)–(7), получаем выражение для коэффициента интенсивности напряжений в виде (11), (12), где $U(t)$ определяется формулой (16). Для того чтобы найти выражение для пороговой амплитуды, подставляем (11) в критерий (3). Получаем аналитическую зависимость

$$P_* = \frac{\tau K_{Ic}}{\varphi(c_1, c_2) \max_t \int_{t-\tau}^t Q(s) ds}, \quad (17)$$

где P_* — минимальная разрушающая (пороговая) амплитуда импульса.

Время разрушения t_* — это время, при котором достигается

$$\max_t \int_{t-\tau}^t Q(s) ds.$$

Выражение для динамической вязкости разрушения $K_{Id} = K_I(t_*)$ принимает вид

$$P_{Id} = \frac{\tau K_{Ic} Q(t_*)}{\max_t \int_{t-\tau}^t Q(s) ds}. \quad (18)$$

Беря импульсы различной длительности T , находим для каждого случая время разрушения t_* и значение динамической вязкости разрушения.

Сравнение поведения динамической вязкости разрушения, наблюдаемого в опытах [1], с поведением ее при пороговых нагрузках для данного сплава демонстрирует рис. 2. При воздействии пороговых нагрузок динамическая вязкость разрушения убывает при стремлении длительности разрушающего импульса T к нулю, в то время как в опытах [1] она неограниченно возрастает.

На рис. 3 приведен график коэффициента интенсивности напряжений для порогового импульса длительности

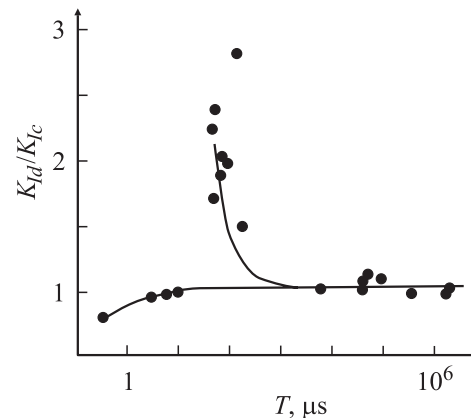


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости разрушения сплава 2024-T3 от длительности разрушающего импульса T : сравнение ее поведения при постоянных скоростях нагружения (верхняя кривая) и при импульсных пороговых нагрузках (нижняя кривая).

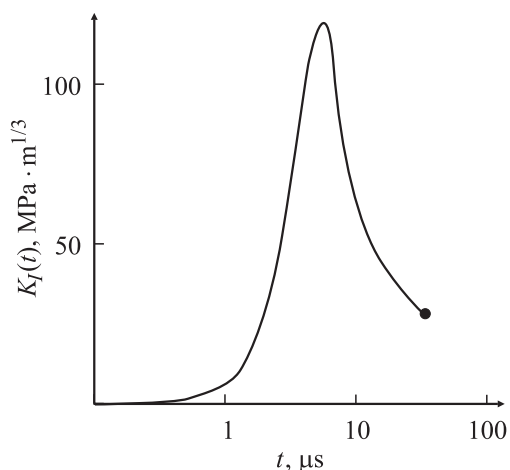


Рис. 3. Зависимость от времени текущего коэффициента интенсивности напряжений для порогового импульса длительности $T = 8 \mu\text{s}$. Точка — момент разрушения.

$T = 8 \mu\text{s}$. Здесь виден эффект „запаздывания разрушения“ — разрушение происходит на стадии убывания коэффициента интенсивности, после того, как он достиг своего максимального значения. Аналогичный эффект предполагался в работе [4] и получен в экспериментах [5].

Таким образом, структурно-временной критерий является эффективным средством для исследования задач, связанных с динамическим разрушением. Он дает возможность прогнозировать поведение динамической вязкости разрушения при различных условиях нагружения. В соответствии с предложенным подходом критическое значение динамического коэффициента интенсивности является расчетной характеристикой. Его зависимость от скорости нагружения и неустойчивое поведение объясняется влиянием истории нагрузки и условиями экспериментов.

Более того, для описания прочностных свойств материала при динамическом нагружении априорное знание скоростной зависимости динамической вязкости разрушения не требуется. Для оценки предельных нагрузок достаточно знать константы K_{Ic} и τ , которые и образуют систему параметров, определяющих прочностные свойства материала.

Список литературы

- [1] Owen D.M., Zhuang S.Z., Rosakis A.J. et al. // Intern. J. Fracture 90. 1998. P. 153–174.
- [2] Irwin G. // J. Apl. Mech. 1957. Vol. 24. N 3. P. 361–364.
- [3] Петров Ю.В. „Квантовая“ макромеханика разрушения твердых тел. СПб., 1996. С. 9–12.
- [4] Shockey D.A., Erlich D.C., Kalthoff J.F. et al. // Engineering Fracture Mechanics. 1986. Vol. 23. P. 311–319.
- [5] Березкин А.Н., Кривошеев С.И., Петров Ю.В. и др. // Докл. РАН. 2000. Т. 375. № 3. С. 328–330.