

Кинетическая трактовка структурно-временного критерия разрушения

© П.А. Глебовский, Ю.В. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Россия
E-mail: pietr@mail.ru, yp@yp1004.spb.edu

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 19 сентября 2003 г.)

Рассматривается критерий инкубационного времени разрушения с учетом кинетической концепции прочности Журкова. С точки зрения кинетической концепции разрушение рассматривается как непрерывно развивающийся процесс, который начинается сразу после приложения к телу нагрузки, причем процесс состоит в разрыве межатомных связей и постепенном накоплении их в разрываемом материале.

Для некоторых материалов введение в критерий инкубационного времени термофлуктуационного механизма разрушения оказывает существенное влияние на положение статической ветви временной зависимости прочности.

Построены расчетные временные зависимости прочности для ряда материалов. Для анализа экспериментальных данных используется структурно-временной критерий разрушения, позволяющий построить единую кривую временной зависимости прочности для квазистатического и высокоскоростного кратковременного нагружения.

Получено аналитическое выражение для температурной зависимости инкубационного времени, а также найдено соотношение, связывающее инкубационное время разрушения с периодом тепловых колебаний атомов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 03-01-39010 и № 02-01-01035) и Министерством образования России (грант № А03-2.10-270).

В классических критериях предполагается, что в процессе динамического разрыва материала энергия и импульс, идущие на образование новых поверхностей и областей разрушения, расходуются непрерывным образом. Однако элементарный учет дискретности процесса динамического разрушения приводит к динамическому обобщению линейной механики разрушения.

В частности, в [1–4] предлагается и анализируется структурно-временной подход, основанный на учете импульсных характеристик поля напряжений и структурных особенностей материала. В этом случае предполагается введение структуры не только на пространственной, но и на временной шкале [1,2], а соответствующий „размер“ временной шкалы обозначается τ и называется инкубационным (структурным) временем разрушения.

Предполагается, что разрушение происходит, если силовой импульс, действующий в течение времени τ , достигает критического значения $J(t) \leq J_c$. Тогда в терминах континуальной механики имеем

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_c \tau, \quad (1)$$

где σ_c — предел прочности „бездефектного“ материала. „Бездефектными“ условно считаются материалы, которые не содержат специально созданных дефектов и концентраторов типа трещин и острых вырезов.

Для разрушения элемента недостаточно только достижения σ_c , критическое напряжение должно действовать в течение некоторого времени. Поэтому τ трактуется

как минимальное время, необходимое для разрушения материала при действии критического напряжения, равного σ_c . В [3–5] показано, что в случае „бездефектных“ материалов хорошее соответствие с экспериментами по высокоскоростному разрушению (отколу) достигается при $\tau = d/c$, где c — максимальная скорость упругих волн, а $d = \frac{2}{\pi} \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_c^2}$ — линейный размер, характеризующий элементарную ячейку разрушения на данном масштабном уровне, K_{Ic} — трещиностойкость материала. В настоящее время d не имеет однозначной физической интерпретации. Вопросы, связанные с интерпретацией d , обсуждались в [6,7].

В [4] показано, что τ может рассматриваться как минимальное время, введенное в [8]. В соответствии с данным подходом σ_c , τ образуют систему определяющих параметров, описывающих прочностные свойства „бездефектного“ материала. Структурное время разрушения τ отвечает за динамические особенности хрупкого разрушения и для каждого материала должно быть найдено из экспериментов. Что касается σ_c , то этот параметр нуждается в более точной физической интерпретации. Такая интерпретация может быть дана на основе подхода, разработанного Журковым с сотрудниками. Рассмотрению этого вопроса и посвящена данная работа.

Изучение физических основ прочности твердых тел привело к установлению общей закономерности изменения прочности в зависимости от температуры и времени. Было показано [9], что между временем до разрыва испытываемого образца под нагрузкой t_* , разры-

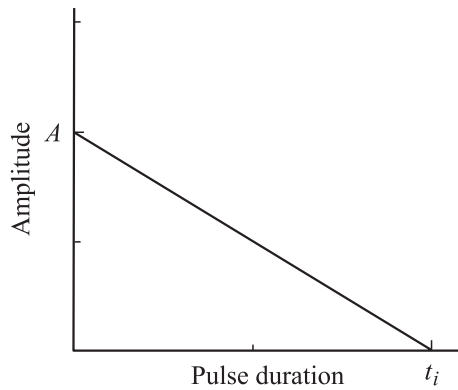


Рис. 1. Профиль импульса растягивающих напряжений.

вающим напряжением σ и абсолютной температурой T имеется однозначная связь, которая хорошо передается формулой

$$t_* = t_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT], \quad (2)$$

где U_0 , t_0 , γ — постоянные коэффициенты, определяющие прочностные свойства твердого тела: величина U_0 тесно связана с энергией разрыва межатомной связи и характеризует энергию активации процесса разрушения; $t_0 = 10^{-13}$ s совпадает с фундаментальной характеристикой твердого тела — периодом тепловых колебаний атомов; γ — коэффициент, пропорциональный перенапряжению на межатомных связях (по сравнению со средним напряжением в образце).

Согласно кинетической концепции [9–11], разрушение рассматривается как непрерывно развивающийся во времени процесс, который начинается сразу же после приложения к телу нагрузки. Процесс состоит в разрыве межатомных связей и постепенном накоплении их в разрываемом материале. В [9] показано, что фактор времени является фундаментальной характеристикой прочности. Игнорируя время, затрачиваемое на разрушение, нельзя правильно понять основу явления прочности. Формула (2) показывает, что разрыв есть активационный процесс, скорость которого определяется частотой или средним временем ожидания тепловых флуктуаций, и чтобы разорвать связи, ответственные за прочность материала, необходимо преодолеть энергетический барьер U_0 , величина которого зависит от природы этих связей. Из (2) следует, что имеется определенный механизм, при помощи которого начальный барьер U_0 снижается под действием растягивающих усилий на величину $\gamma\sigma$.

Обратимся теперь к анализу разрушения „бездефектных“ материалов. В работе [12] с помощью критерия инкубационного времени (1) решена одномерная задача об отколе упругого стержня под нагрузкой в виде импульса треугольного профиля (рис. 1).

Будем рассматривать отражение импульса сжимающего напряжения треугольного профиля от свободного конца полубесконечного стержня. Ось Ox направлена

вдоль стержня, который располагается при $x > 0$. Падающий импульс записываем в виде $\sigma_- = -A(1 - t/t_i - x/ct_i)[H(ct + x) - H(ct + x - ct_i)]$. Здесь A — амплитуда импульса, t_i — его длительность, $H(t)$ — функция Хевисайда, c — максимальная скорость волн. Участок нарастания отсутствует. Отраженный от свободного конца указанного стержня импульс имеет вид $\sigma_+ = A(1 - t/t_i + x/ct_i)[H(ct - x) - H(ct - x - ct_i)]$. Суммарное напряжение выражаем как $\sigma = \sigma_- + \sigma_+$.

Максимум растягивающего напряжения впервые возникает в точке $x = ct_i/2$. Минимальную при заданной длительности t_i разрушающую амплитуду A_* находим из условия $\max I = \sigma_c$, $I = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt'$.

Таким образом, получены уравнения, описывающие временную зависимость прочности на всем диапазоне длительностей нагружения с учетом инкубационного времени разрушения,

$$A_* = \begin{cases} \frac{\sigma_c}{1 - \frac{\tau}{2t_i}}, & t_i \geq \tau; \\ \frac{2\sigma_c\tau}{t_i}, & t_i \leq \tau. \end{cases} \quad (3)$$

При этом время до разрушения t_* рассчитывается по формуле:

$$t_* = \tau + \frac{t_i}{2},$$

где τ — структурное время разрушения, σ_c — статическая прочность, t_i — длительность импульса, A_* — пороговая амплитуда.

Теперь на основе сделанного в [9] предположения о том, что обычная мера прочности — величина разрывного напряжения (статическая прочность σ_c) — неоднозначна и не имеет определенного физического смысла, преобразуем уравнения (3) с учетом формулы Журкова (2) и на их основе построим кривую временной зависимости прочности (рис. 2). Считаем, что разрыв материала под действием внешних сил представляет собой не чисто механическое явление. Принципиальную роль при разрыве играют тепловые флуктуации, а растягивающее напряжение лишь помогает флуктуационному процессу, понижая энергетический барьер и делая тем самым процесс разрыва более вероятным. Далее преобразуем формулу (2) следующим образом:

$$\sigma = (U_0 - kT \ln(t_*/t_0))/\gamma. \quad (4)$$

Тогда преобразованные уравнения (3) с учетом (4) будут иметь следующий вид:

$$A_* = \begin{cases} \frac{(U_0 - kT \ln(t_*/t_0))/\gamma}{1 - \frac{\tau}{2t_i}}, & t_i \geq \tau; \\ \frac{2(U_0 - kT \ln(t_*/t_0))\tau}{t_i\gamma}, & t_i \leq \tau. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве экспериментально определяемых параметров выбирались t_0 , U_0 , γ , значения которых приведены

Значения параметров для расчета кривой временной зависимости прочности

| Материал | $U_0, \text{kJ/mol}$ | $\gamma, 10^{-28} \text{m}^3$ | t_0, s | $\tau, \mu\text{s}$ [6] |
|-----------|----------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Al [13] | 195 | 14.7 | 10^{-13} | 0.75 |
| ПММА [14] | 150 | 13.2 | 10^{-13} | 0.65 |

в таблице. Все расчеты проводились при постоянной температуре 300 К. На рис. 2 для сравнения также показаны кривые (штриховые линии), построенные без учета поправки Журкова. Экспериментальные данные для сравнения взяты из [15], где проводилось экспериментальное исследование хрупкого разрушения твердых тел в волне растягивающих напряжений с помощью техники плоского соударения пластины-ударника с пластиной-мишенью.

Важно отметить, что и раньше предпринимались попытки анализа кинетической концепции прочности. Например, в работе [16] разобрана кинетика разрушения на основе критерия Бейли. Однако такой подход не дает возможности обобщить кинетическую концепцию на случай высокоскоростных импульсных условий испытаний. В случае использования критерия инкубационного времени с поправкой (4) удается описать весь диапазон длительностей нагружения (как квазистатические, так и динамические испытания). Также из анализа рис. 2 следует, что замена σ_c в соответствии с формулой (4) оказывает существенное влияние на положение статической ветви временной зависимости прочности. Наблюдается лучшее совпадение экспериментальных результатов с расчетными данными в случае учета кинетической концепции прочности. Однако учет формулы (2) не оказывает практически никакого влияния на динамическую ветвь, положение которой в основном определяется значением инкубационного времени разрушения.

Покажем, что в предельном случае инкубационное время можно выразить через t_0 , как этого требует выполнение условия соответствия: параметры структурно-временного критерия должны выбираться таким образом, чтобы в предельном случае получались результаты кинетической концепции прочности. Поэтому, проведем анализ структурно-временной концепции прочности с учетом кинетической концепции на переходной области кривой временной зависимости прочности, т.е. при длительностях импульса нагружения $t_i \geq \tau$, причем $t_i \sim \tau$, когда влияние инкубационного времени существенно.

Для этого используем те выражения (3), которые относятся ко времени до разрушения t_* . С учетом (2) для инкубационного (структурного) времени получается следующая зависимость:

$$\tau = t_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT] - \frac{t_i}{2},$$

где t_0 совпадает с фундаментальной характеристикой твердого тела — периодом тепловых колебаний атомов, а σ определяется уравнениями (5) или выбирается как

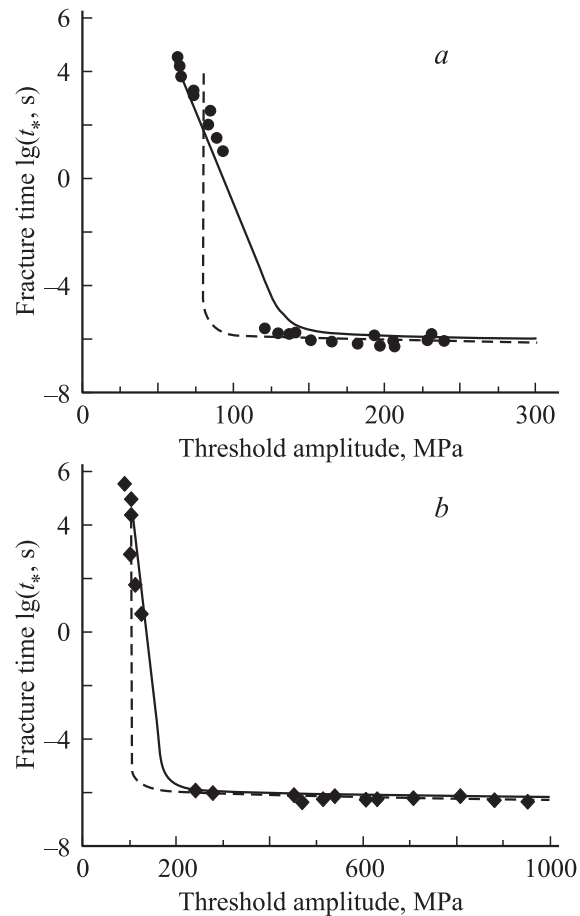


Рис. 2. Временные зависимости прочности для ПММА (а) и алюминия (б) с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая линия) формулы Журкова. Точки — экспериментальные данные [16].

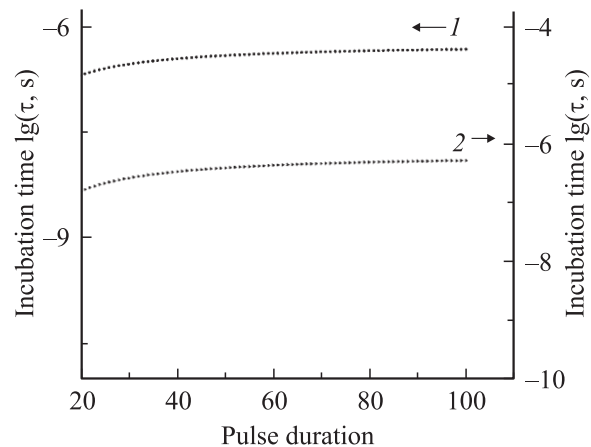


Рис. 3. Зависимость инкубационного времени при постоянной температуре от относительной длительности прогового импульса с учетом формулы Журкова для алюминия (1) и ПММА (2).

напряжение, соответствующее заданной длительности импульса на кривой временной зависимости прочности. Проведем следующую замену: $t_i = n \cdot \tau$. Тогда выражение

для инкубационного времени примет вид

$$\tau = t_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT]/(1 + n/2). \quad (6)$$

Зависимость инкубационного времени от величины длительности импульса приведена на рис. 3. Видно, что τ остается постоянным почти для всего диапазона длин рассматриваемых импульсов нагружения. Этот факт указывает на то, что инкубационное время не зависит от параметров нагружения и его можно рассматривать как константу материала.

Из (6) следует, что τ можно выразить через t_0 — константу, по величине равную периоду тепловых колебаний атомов. Это выражение можно записать в виде $\tau \cong \lambda t_0$, где $\lambda = \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT]/(1 + n/2)$. Важно, что полученное выражение позволяет провести анализ температурной зависимости инкубационного времени.

Выводы

1) В области медленных нагружений использование структурно-временного критерия (1), в котором статическая прочность вычисляется по формуле Журкова (2), позволяет построить более точные единые диаграммы временной зависимости прочности (по сравнению с диаграммами, рассчитанными без учета (2)).

2) Учет термофлуктуационного характера разрушения в сочетании с использованием теории инкубационного времени приводит к более точному определению разрушающих нагрузок при динамических условиях испытаний.

3) Найдена связь между инкубационным временем и периодом тепловых колебаний.

4) Учет кинетической природы процесса разрушения позволяет получить зависимость инкубационного времени от температуры, что важно для дальнейшего анализа разрушения материалов.

Список литературы

- [1] Ю.В. Петров. Препринт Ин-та проблем машиноведения РАН № 139. СПб (1996). 51 с.
- [2] Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб (1997). 132 с.
- [3] Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Уткин. ДАН СССР **313**, 2, 276 (1990).
- [4] Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. ДАН **324**, 5, 964 (1992).
- [5] Y.V. Petrov, N.F. Morozov. ASME J. Appl. Mechanics **61**, 710 (1994).
- [6] N.F. Morozov, Y.V. Petrov. Dynamics of fracture. Springer (2000). 98 p.
- [7] Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко. ДАН СССР **240**, 4, 829 (1978).
- [8] J.F. Kalthoff, D.A. Shockey. J. Appl. Phys. **48**/3, 986 (1977).
- [9] С.Н. Журков, С.А. Аббасов. Высокомолекуляр. соединения **3**, 3, 450 (1961).
- [10] С.Н. Журков, В.И. Бетехтин, А.Н. Бахитбаев. ФТТ **11**, 3, 690 (1969).

- [11] С.Н. Журков. Изв. АН СССР. Неорган. материалы **3**, 10, 1767 (1967).
- [12] Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Уткин. ДАН **40**, 4, 1233 (1991).
- [13] А.М. Молодец, А.Н. Дремин. Физика горения и взрыва **5**, 154 (1983).
- [14] Б. Цой, Э.М. Карташов, В.В. Шевелев. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. Химия, М. (1999). 496 с.
- [15] Э.Н. Беллендир. Автореф. канд. дис. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Л. (1990).
- [16] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М. (1974). 560 с.