

**КОНТРОЛЬНЫЕ
ЭКЗЕМПЛЯРЫ**



**ФГУП
«РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР -
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»**

**ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.
ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

**EXTREME STATES OF SUBSTANCE.
DETONATION. SHOCK WAVES**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
XV ХАРИТОНОВСКИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ**

**INTERNATIONAL CONFERENCE
XV KHARITON'S TOPICAL SCIENTIFIC READINGS**

18 МАРТА - 22 МАРТА 2013 ГОДА
MARCH - MARCH

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ
PROCEEDINGS**

ИИФ

**САРОВ
2013**

Интех

8. Tiegang Tang, Haibo Hu. Studies on the Fracture of HR-2 Steel and Al Cylinder under Imploding, Shock Compression of Condensed Matter-2007.
9. TANG Tie-gang, Gu Yan, Li Qing-zhong. Expanding Fracture of Steel Cylinder Shell by Detonation Driving [J]. Explosion and shock waves, 2003, 23(6): 529–533.
10. TANG Tie-gang, LI Qing-zhong, SUN Xue-lin, SUN Zhan-feng, JIN Shan, GU Yan, Strain-rate Effect of Fracture of 45# Steel Cylinder Shells by Detonation Driving, [J]. Explosion and shock waves, 2006, 26(2): 129–133.
11. JIN Shan, TANG Tie-gang, SUN Xue-lin, LI Qing-zhong, Dynamic characteristic of 45# steel cylinder shell by different heat treatment conditions, [J]. Explosion and shock waves, 2006, 26(5): 423-428.
12. A. G. Ivanov. Strength Mater / [J], 1976(8):1303.
13. Studies of explosive induced cylindrical shell fracture under different detonation methods, Liu Mingtao, to be published 2013 in J. Explosive and Shock Waves (in Chinese).
14. Investigation of adiabatic shear bands in thick-walled cylinders collapsed by electro-magnetic driving forces, Z. Lovinger, SCCM-2009, pp. 739–742.
15. Simulation of multiple shear-bands in collapsing cylinder experiments, Z. Lovinger, DYMAT 2009, pp. 1601–1607.

МОДЕЛИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В. Ф. Куропатенко

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

Проблема откольного разрушения материалов является предметом многочисленных исследований в течение более 100 лет [1]. Проведено большое количество экспериментов, построено много теоретических моделей, с помощью которых авторы описывали результаты экспериментов по динамическому разрушению твердых тел и жидкостей (кавитация). Это им удавалось, так как модели, как правило, были полуэмпирическими. Такие модели содержат параметры, численные значения, которых подбираются для описания конкретных экспериментов. Таким образом экспериментальные данные при исследовании откольной прочности веществ и материалов всегда играли определяющую роль.

Анализ данных по откольному разрушению показывает, что нет единого значения прочности для отдельного вещества. Откольное разрушение – сложное физическое явление, зависящее от многих факторов, таких как исходное состояние вещества, его кристаллическая структура, начальная поврежденность (микропоры, микротрещины, размеры зерен, межзеренные промежутки, дислокации и др.) характер динамического воздействия на материал (ударные волны, импульсный разогрев излучением и их амплитудные и временные характеристики), наконец, от размеров самого образца.

Откольное разрушение – процесс сугубо внутренний, происходящий внутри вещества. Разместить там датчики нельзя, так как они неизбежно исказят зависимости всех характеристик вещества от времени. Таким образом, остается возможность экспериментального получения косвенной информации о процессе разрушения и действующих при этом напряжениях. Методы получения экспериментальной информации достаточно полно изложены в [2], [3]. К такой косвенной информации относится скорость свободной поверхности мишени, толщина или масса откола, структура поверхности откола и структура вещества в окрестности трещины. Для восстановления характера поведения вещества, закончившегося образованием трещины, необходимо привлечение математического моделирования. Применяемые математические модели

вносят определенный вклад в погрешность теоретического описания эксперимента. При этом не следует забывать, что и экспериментальные измерения делаются с погрешностью.

Широкий диапазон изменения условий и неопределенностей откольного разрушения приводит к большому разбросу значений так называемой динамической прочности вещества. По данным из [3] динамическая прочность σ_k меди изменяется в промежутке $0,68 \leq \sigma_k \leq 15$ ГПа. Столь большой разброс σ_k объясняется тем, что в каждом конкретном эксперименте один из перечисленных выше факторов является ведущим. Необходимость прогнозировать процессы разрушения и их последствия является причиной появления новых моделей откольного разрушения.

Единая модель разрушения не построена. Все модели разрушения можно разделить на два типа: модели макроуровня – энергетические модели и модели микроуровня – кинетические модели. В энергетических моделях рассматривается только сплошная среда. Разрушение вещества происходит, когда удельная внутренняя энергия из-за дилатации и дисторсии достигает некоторого значения E_k .

$$E_k = E_0 - \int_{V_0}^V P(V, E) dV - \int_0^t V \bar{S}_i \frac{\partial \bar{U}}{\partial x_i} dt.$$

Зависимости от времени $P(t)$, $V(t)$, $E(t)$, $\bar{S}_i(t)$, $\frac{\partial \bar{U}}{\partial x_i}$ описываются законами сохранения, определяющими уравнениями и уравнением состояния. Типичные энергетические модели разрушения изложены в [4], [5].

В кинетических моделях для моделирования разрушения вводится зависящая от времени функция поврежденности [6]–[9]. Как правило, это безразмерная величина, изменяющаяся в диапазоне от нуля до единицы. Скорость ее измерения в разных моделях зависит от разных величин (давление, температура, удельный объем и др.) и определяется уравнением, содержащим несколько характеристик конкретного вещества. Простейшим из кинетических уравнений [7] является уравнение

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_0 - \alpha P}{kT}\right),$$

где E_0 – энергия активации, α – подгоночный параметр, $\tau_0 \sim 10^{-13} - 10^{-19}$ с. Поврежденность растет в области отрицательных давлений, которая возникает при взаимодействии встречных волн разрежения независимо от характера предшествующей нагрузки.

В переменных P, V область отрицательных давлений схематически изображена на рисунке 1. Она имеет три границы: 1. Линия $P(V, T) = 0$. 2. Линия $T(P, V) = 0$ – нулевая изотерма. 3. Спинодаль, определяемая уравнением $a^2 = -\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = 0$.

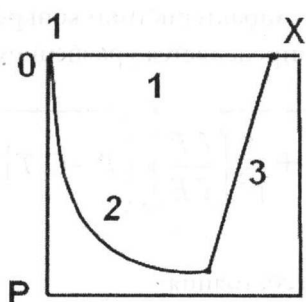


Рисунок 1.

Спинодаль является границей устойчивых состояний вещества. На спинодали скорость роста поврежденности обращается в бесконечность. Совершенно аналогично метастабильным состояниям вещества при фазовых переходах во всей области $P < 0$ скорость $\frac{d\omega}{dt}$ зависит от расстояния до спинодали. Вещество в области $P < 0$ находится в метастабильном состоянии. Рано или поздно оно разрушится, так как даже при $P = const$ поврежденность растет из-за тепловых колебаний атомов.

В [10], [11] показано, что процесс роста поврежденности подобен процессу фазовых переходов. Однако, это подобие чисто внешнее. Дело в том, что в случае фазового перехода обе фазы имеют объемную и массовую концентрации. В случае же откольного разрушения дефекты (микро- и макропоры и трещины) имеют только объемную концентрацию. Массовая же концентрация дефектов равна нулю. Поэтому при применении методов моделирования фазовых переходов к описанию разрушения возникает необходимость в существенных изменениях.

Можно рассматривать неповрежденное вещество и повреждения как два компонента двухкомпонентной среды. Из теории многокомпонентных сред [12] следует уравнение для объемной концентрации пор

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = -\frac{\alpha_1\alpha_2\Phi_{12}}{(C_1 + C_2)(\rho_1C_1 + \rho_2C_2)}, \quad (1)$$

где

$$\Phi_{12} = \frac{b_{12}}{\tau_{12}^p}(P_2 - P_1) - \frac{C_{12}}{\tau_{12}^T}(\alpha_1\rho_1C_{V1} + \alpha_2\rho_2C_{V2})(T_2 - T_1). \quad (2)$$

В порах поврежденной среды $P_1 = 0$, $\rho_1 = 0$, $C_1 = 0$, $T_1 = 0$. В результате уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\alpha(1-\alpha)}{C^2} \left(\frac{b_p P}{\tau^p \rho} - \frac{b_T}{\tau^T} (1-\alpha) \tilde{N}_v T \right). \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что на линии $P(V, T) = 0$ при $P = const > 0$ объемная концентрация пор растет, что противоречит опыту. Таким образом, и теория многокомпонентных сред не может без изменений описать рост поврежденности.

Будем считать, что зависимость $\omega(t)$ похожа на зависимость $\alpha(t)$ и примем для $\omega(t)$ уравнение

$$\frac{d \ln \omega}{dt} \approx -\frac{AP}{\tau_0 C^2} \left(\frac{V}{V_{0k}} \right)^2 \left(\frac{V}{V_{0k}} - 1 \right)^{2\alpha}, \quad (4)$$

где P – давление, V – удельный объем, V_{0k} – удельный объем вещества без дефектов при $P = 0$, $T = 0$, A и τ_0 – постоянные величины – характеристики конкретного вещества.

Изотермическая скорость звука определяется уравнением

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_E + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_\rho \left(P - C_V T \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_\rho \right)}, \quad (5)$$

где $P(\rho, E)$ и $E(\rho, T)$ – это уравнения состояния.

Перейдем в (4) к безразмерным величинам

$$x = \frac{V}{V_{0k}}, \quad \Pi = \frac{PV_{0k}}{C_{0k}^2}, \quad Z = \frac{C}{C_{0k}}. \quad (6)$$

В безразмерных переменных уравнение для поврежденности принимает вид

$$\frac{d \ln \omega}{dt} = - \frac{A \Pi (x-1)^{2\alpha} x^2}{\tau_0 Z^2}. \quad (7)$$

Проинтегрируем (7)

$$\ln \omega - \ln \omega_0 = - \int_0^t \frac{A \Pi x^2 (x-1)^{2\alpha}}{\tau_0 Z^2} dt, \quad (8)$$

где ω_0 – начальная поврежденность на линии $P(V, T) = 0$, τ_0 – величина, близкая, к периоду колебаний атомов в кристаллической решетке. Разрушение наступает, когда в момент t_a (долговечность) ω принимает значение, равное единице. Поскольку при определении долговечности $\Pi = const$, $x = const$, $Z = const$, то из (8) следует

$$t_a = \frac{\tau_0 (\ln \omega_0) Z^2}{A \Pi x^2 (x-1)^{2\alpha}}. \quad (9)$$

Обозначим $\tau_0 \ln \omega_0 / A = B$. Это постоянная величина. Из (9) видно, что $t_a \rightarrow \infty$ при $\Pi \rightarrow 0$ и $t_a \rightarrow 0$ при $\Pi \neq 0$ и $Z \rightarrow 0$. Как правило, в динамических экспериментах долговечность t_a определяется с помощью численных методов.

Результат применения данной модели продемонстрируем на примере меди. Все экспериментальные данные по отколам при импульсном тепловом нагреве взяты из [13], экспериментальные данные, полученные при ударном воздействии, взяты из [14]. Параметры в уравнении (9)

$$\alpha = 3,567, \quad B = -3,667 \cdot 10^{-16} \text{ с.}$$

На рисунке 2 приведены экспериментальные данные из [13], сплошная линия получена по формуле (9). На рисунке 3 приведены экспериментальные данные из [14], сплошная линия получена по формуле (9). Для перехода от безразмерных величин к размерным использовались параметры меди $\rho_{0k} = 9,05 \text{ г/см}^3$, $C_{0k} = 4,2 \text{ км/с}$. Темные точки – образец не раскололся, светлые точки – образец раскололся.