

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Л. В. Жабька, А. Я. Учаев, Н. И. Сельченкова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время является актуальным знание границы сохранения функциональных свойств конструкционных материалов при высокоинтенсивном импульсном воздействии. Как правило, высокоинтенсивное импульсное воздействие приводит к явлению динамического разрушения, в результате которого возникают диссипативные структуры (ДС). Ранее было показано, что сопротивление внешнему воздействию оказывают возникающие в разрушенном теле ДС, например, каскад центров разрушения, количественные характеристики которых определяют статистическую картину процесса динамического разрушения [1–3].

Исследование возникновения микроповреждений в явлении динамического разрушения под действием коротко-импульсных нагрузок большой интенсивности в настоящее время является актуальным. Для этого разрабатываются различные феноменологические модели, применимость которых ограничена условиями ударно-волновых воздействий в определенном диапазоне рассматриваемых нагрузок. Исследование поведения металлов в экстремальных условиях возможно на примере изучения процесса динамического разрушения при воздействии мощных импульсов проникающих излучений [1–4].

Проведенные ранее исследования показали [1, 2], что при больших степенях отклонения от равновесия и необратимых изменениях плотность различных дефектов кристаллической структуры может достигать критических значений, когда начинают проявляться коллективные эффекты в поведении дефектов. В работе [5] показано, что связь в ансамбле одного структурного уровня дефектов дает предпосылку для автолокализованного образования другого структурного уровня, выполняющего роль исходного структурного уровня для более высокого, т. е. возникают эффекты самоорганизации с большим радиусом корреляции. В таких средах не выполняется условие макроскопической причинности, поскольку масштабы изменения макроскопических переменных не превышают масштабы корреляций микроскопических переменных [1, 2].

В работе представлена иерархическая модель динамического разрушения, основанная на обширном экспериментальном материале, математическом формализме теории перколяции, фрактальной геометрии. В рамках модели показано, что неравновесная система эволюционирует путем перехода с одного структурного уровня на другой, концентрационный критерий выступает как один из основных параметров, характеризующих неравновесный динамический процесс.

Известно, что временные закономерности процесса динамического разрушения металлов обусловлены иерархическими свойствами ДС – каскада центров разрушения, определяющих процесс динамического разрушения металлов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с [3]. Формирование ДС возможно только при совместной реализации нескольких структурных уровней, а их фрактальная размерность является количественной характеристикой [2, 3].

Анализ современных литературных данных показывает, что в настоящее время отсутствуют физические модели, которые используют концепцию иерархии структурных уровней, методы нелинейной физики, математический аппарат теории критических явлений, теории перколяции для решения задачи описания динамического разрушения металлов, например, в режиме импульсного объемного разогрева [1–3, 5, 6].

Ранее [1–3] был установлен динамический инвариант, связывающий параметры внешнего воздействия – давления $P(t)$ с энергетическими параметрами кристаллической решетки: H – энтальпией и L_m – скрытой теплотой плавления. Динамический инвариант $I(P, t) = P(t)/\Gamma\rho(H + L_m)$ имеет близкие значения для ряда исследованных металлов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с (Γ – параметр Грюнайзена, ρ – плотность металла) [2, 3, 5, 6].

Это свидетельствует о том, что для определенного значения критического давления $P(t)$ для каждого металла при определенном значении долговечности t временные зависимости числа центров разрушения $N(P, t)$ и скорости центрообразования $J(P, t)$, определяющих кинетику процесса разрушения, имеют близкие значения.

Ранее [2, 3, 5] было получено спектральное распределение центров разрушения по размерам, которое имеет вид

$$N_i(D_i) \approx D_i^{-\alpha}, \quad (1)$$

где N_i – число центров разрушения размера D_i , α – фрактальная размерность.

Каскад центров разрушения является самоподобным кластером, когда размеры D центров разрушения образуют геометрическую прогрессию

$$D_i = qD_{i-1} = q^i L, \quad (2)$$

где L – размер области, занимаемой центрами разрушения; параметр $q < 1$.

Результаты исследований, проведенных ранее (см. работы авторов [1–5]), показали, что процесс накопления центров разрушения в различных металлах в явлении динамического разрушения (диапазон долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с), процесс накопления трещин в различных твердых телах (полимерах, металлах, кристаллах, стеклах, горных породах) под нагрузкой определяются соотношением [1–3]

$$\frac{\bar{D}}{r} = \frac{\bar{D}}{N(D)^{-1/3}} = \frac{1}{2,7}, \quad (3)$$

когда центры разрушения, трещины начинают укрупняться (т. е. когда концентрация, например, центров разрушения достигает значения $\sim 5\%$), где r – среднее расстояние между центрами разрушения, \bar{D} – средний размер центров разрушения.

На рис. 1 приведены результаты обработки шлифов образцов из меди, бронзы, железа после воздействия РЭП (центры разрушения – микроуровень разрушения) [3, 5] и образцов из меди под влиянием растягивающих напряжений (шероховатость поверхности разрушения – наноуровень разрушения) [4]. Данные, приведенные на рис. 1, показывают выполнение концентрационного критерия для ДС на различных структурных уровнях.

Каскад центров разрушения на пороге макро-разрушения, когда происходит топологический фазовый переход – возникновение связности в системе центров разрушения, является перколяционным кластером. Универсальное поведение металлов в явлении динамического разрушения определяет возможность применения аппарата теории критических явлений [7, 8] к количественному описанию процесса и позволяет прогнозировать поведение неисследованных материалов в широких температурно-временных диапазонах [2, 3, 6] (диапазон долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с; диапазон начальных температур $T_0 \sim 4K \div 0,8T_{пл}$).

На основе экспериментального материала [5] найден алгебраический вид функции центрообразования $J(P, t)$, который определяет временную границу сохранения функциональных свойств конструкционных материалов в процессе динамического разрушения металлов.

Данные фрактографических исследований шлифов ряда металлов показывают, что функции скорости центрообразования имеют подобный вид [2, 3, 5]. Это позволяет построить график функции скорости центрообразования $J(t)$ в координатах t/t_p , J/J_p (t_p – долговечность, t – текущее время, J_p – максимальное значение скорости центрообразования) для различных металлов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с.

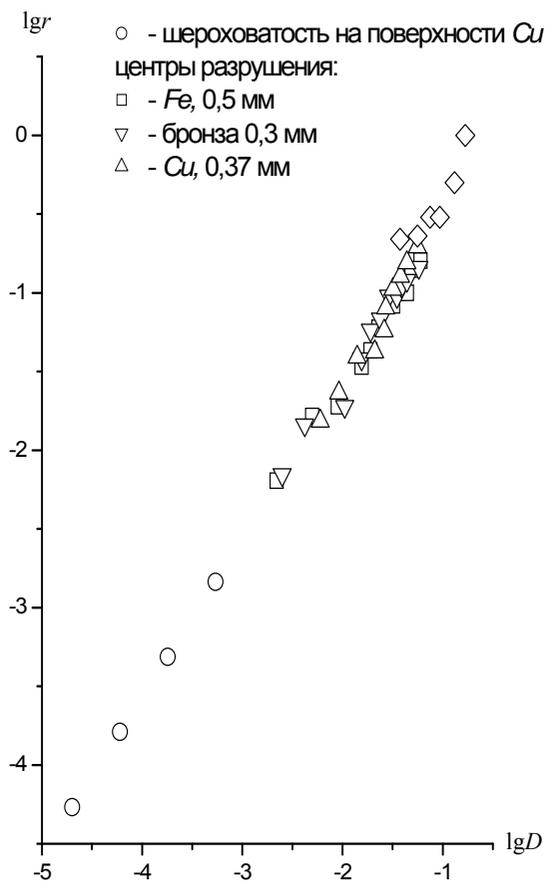


Рис. 1. Концентрационный критерий ($[r]$, $[D]$ – в мм)

Приведенные на рис. 2 данные аппроксимировались для получения алгебраического вида функции скорости центрообразования $J(t)$ для различных металлов. На начальной стадии разрушения, когда плотность центров разрушения мала, и они не взаимодействуют, кинетику $J(t)$ можно представить ослабленной экспонентой [9]. Вид функции $J(t)$ подобен виду функций, описывающих режимы с обострением, либо поведение системы вблизи критической точки [9].

$$J(t) \approx A \exp(t/B)^\lambda (1-t)^\beta, \quad (4)$$

где λ , η – степенные показатели; A , B – константы.

Экспоненциальный множитель с $\lambda < 1$ (см. выражение 4) описывает начальную стадию процесса центрообразования, когда плотность центров разрушения мала, их взаимодействием можно пренебречь. Степенной множитель описывает заключительную стадию процесса центрообразования, когда возникает взаимодействие между центрами разрушения, и их каскад растет как самоподобный объект. В этом случае возникает зависимость среднего расстояния между центрами разрушения от их размера D (см. рис. 1) [2, 3, 5].

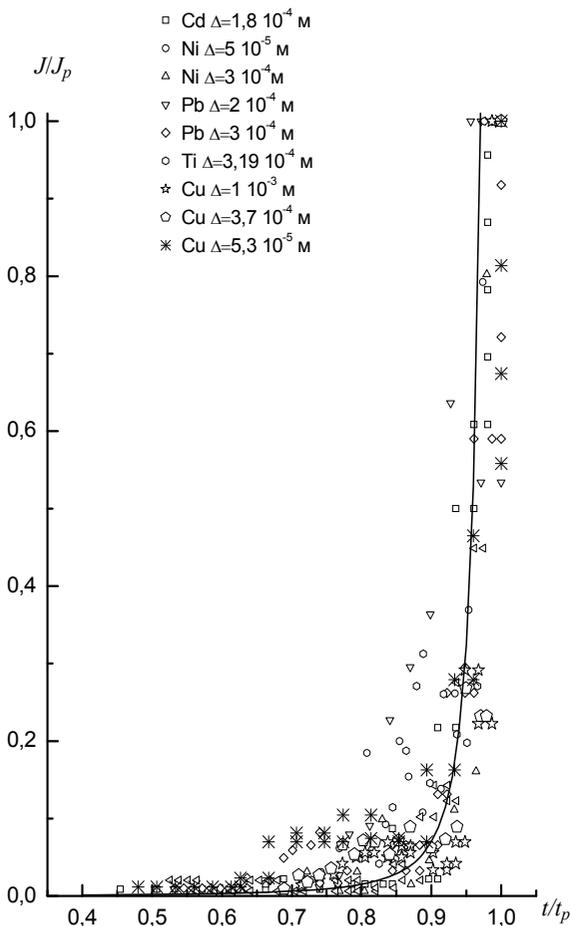


Рис. 2. Скорость центрообразования в координатах t/t_p , J/J_p [2]

В результате аппроксимаций получено соотношение для скорости центрообразования

$$J_H(t) = 0,0003 \exp\left(\frac{t_H}{100}\right)^{0,2} (1-t_H)^{-2,2}, \quad (5)$$

где $J_H(t) = J(t)/J_{\max}$, $t_H = t/t_p$.

Для введения иерархической модели динамического разрушения металлов в многомерные математические коды получены следующие соотношения, выраженные через динамический инвариант I .

Временную зависимость числа центров разрушения можно представить в виде:

$$N(P, t) = B_1 \exp\left(\frac{t/t_p}{B_2}\right)^{0,4} (1-t/t_p)^{-1,2}, \quad (6)$$

где t_p – время разрушения; B_1 , B_2 – коэффициенты ($B_1 < 1$, $B_2 > 1$).

Для введения в математические коды функции скорости центрообразования $J(P, t)$, зависящей от времени, необходимо найти соотношения для $t_p(P)$, $J_{tot}(P)$, $J(P, t)$.

Выражение для $J(P, t)$ представлено в виде

$$J(P, t) = J_{tot}(t_p) \exp(t/t_p)^{0,2} (1-t/t_p)^{-2,2}, \quad (7)$$

где $J_{tot}(P, t)$ можно представить выражением:

$$\lg J_{tot}(P, t) = a_0 + a_1 I(t_p) + a_2 I^2(t_p), \quad (8)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты; инвариант I имеет вид $I(t_p) = P(t)/\Gamma p(H + L_m)$ [2, 3, 5, 6].

Время разрушения t_p , выраженное через инвариант $I(t_p)$, имеет вид

$$\lg t_p = b_0 + b_1 I(t_p) + b_2 I^2(t_p) + b_3 I^3(t_p) + b_4 I^4(t_p), \quad (9)$$

где b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 – коэффициенты.

С учетом выражений (7) и (8) получаем

$$J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{tI(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{tI(t_p)}{A}\right)^{-2,2}, \quad (10)$$

где A – const.

Нормированная на масштабе времени разрушения скорость центрообразования имеет вид

$$J(t) = C_1 \exp\left(\frac{t/t_p}{C_2}\right)^{0,2} (1-t/t_p)^{-2,2}, \quad (11)$$

где C_1 , C_2 – const; $C_1 < 1$, $C_2 > 1$.

С помощью полученных выражений по расчетной методике ТИМ2D были описаны опыты:

1. Клиновые образцы двух типов из железа нагружались нормальной (а) и скользящей (б) детонацией слоев ВВ различной мощности и толщины (ударно-волновое нагружение) [10].

2. Образцы из меди подвергались воздействию импульсов релятивистских электронных пучков [5].

Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными (время разрушения экспериментальное и время разрушения расчетное – совпадают).

В предложенной иерархической модели разрушения установлена временная зависимость критического давления, приводящего к разрушению, что позволило выразить в определенной математической форме ряд кинетических процессов, определяющих протекание процесса динамического разрушения металлов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с.

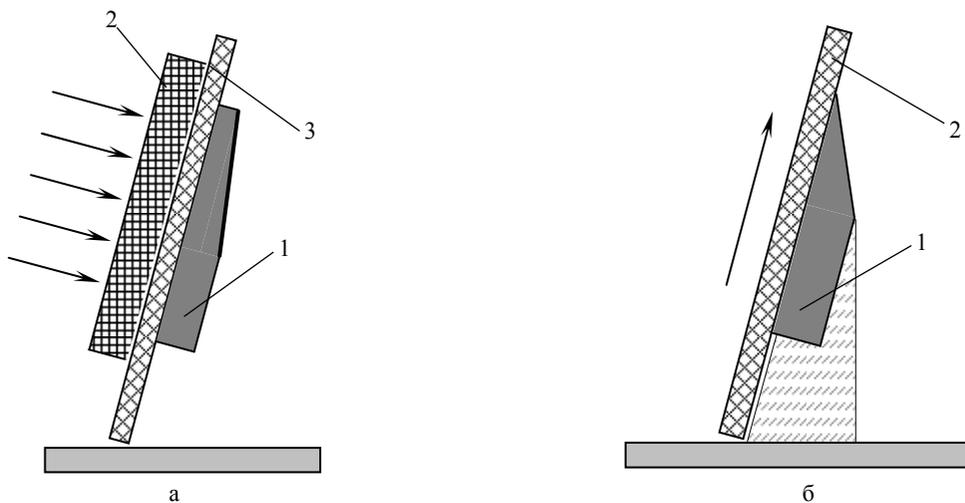


Рис. 3. Схемы экспериментов: 1 – образец, 2 – слой ВВ, 3 – крышка-экран

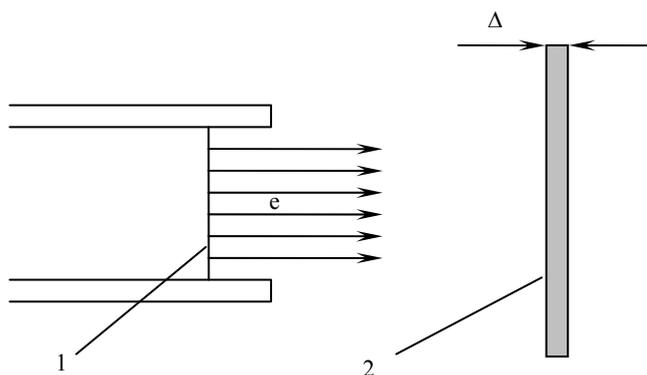


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – выходное окно ускорителя, 2 – образец

Найденное соотношение для скорости центрообразования позволяет включить кинетику процесса динамического разрушения в многомерные математические коды, выполняемые на ЭВМ, иерархической модели динамического разрушения, которая позволяет адекватно описывать поведение металлов в экстремальных условиях.

Литература

1. Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Платонова Л. А. и др. Обзор результатов исследования природы процесса динамического разрушения. Высокие плотности энергии: Сборник научных трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. С. 368–383.
2. Илькаев Р. И., Учаев А. Я., Новиков С. А., Завада Н. И. и др. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН. 2002. Т. 384, № 3. С. 328–333.
3. Илькаев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Новиков С. А. и др. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН. 2003. Т. 393, № 3.

4. Килиан Х. Г., Веттегрень В. И., Светлов В. Н. Иерархия ансамблей дефектов на поверхности нагруженной меди // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 11. С. 2107–2111.

5. Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Учаев А. Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Научное издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998. С. 275.

6. Учаев А. Я., Завада Н. И., Илькаев Р. И., Кошелева Е. В. и др. Инварианты в явлении динамического разрушения металлов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. Вып. 3. С. 304–313.

7. Паташинский А. З., Покровский В. Л. Флуктуационная теория фазовых переходов: 2-е изд., перераб. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. С. 382.

8. Фишер М. Е. Природа критического состояния: Пер. с англ. М. Ш. Гитермана. М.: «МИР», 1986. С. 168.

9. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления. М., 1973. С. 402.

10. Козлов Е. А. Характеристики откольной прочности сплава U – 1,5 % Мо при взрывном нагружении различной интенсивности // Деформация и разрушение материалов. 2009, № 10. С. 10–18.