

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Кошелева Е.В., Сельченкова Н.И., Учаев А.Я.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научноисследовательский институт экспериментальной физики e-mail: <u>otd@expd.vniief.ru</u>

dE = TdS - PdV

$\frac{T}{dV} = \frac{P}{dS}$

 $P < 0, \quad dV < 0$

Параметры нагружения

<u>Релятивистские</u> электронные пучки (РЭП)

- Начальная температура
- (T ~ 4 К ÷ 0,8 Т пл.)
- Плотность поглощенной энергии

dE/dm ~ 10 ÷ 10³ Дж/г

- Давление Р 1 ÷ 100 ГПа
- Скорость ввода энергии dT/dt ~ 10¹² K/c
- (dE/dt ~ 10¹¹ Дж/(г·с))
- Диапазон долговечности t ~ 10⁻⁶ ÷10⁻¹⁰ с
- т_і ~ 1 нс

Импульсы лазерного излучения (ЛИ)

- Энергия одиночного импульса E~100 ÷ 1000 мДж
- Плотность мощности

 $\frac{dE}{dm} > 10^{13}$ BT/CM² (*d* ~ 0,1 MM)

- Длительность импульса t₀ ~ 10⁻¹⁰ ÷ 10⁻¹² с
- Диапазон долговечности $t \sim 10^{-9} \div 10^{-10} c$ $\tau_i \sim 10 \ пc$
- J ~ 10¹⁵ Вт/см²
 τ_i ~ 40 фс

Температурно-временные закономерности процесса динамического разрушения при воздействии теплового удара





Временные зависимости долговечности металлов от критического давления, приводящего к разрушению, в квазистатическом и в динамическом диапазонах $\Delta t_1 = \Delta t_2; \Delta P_{\partial uh} > \Delta P_{KB}$ Данные по долговечности в квазистатическом диапазоне долговечности описывается выражением

$$t = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma}{kT},$$

где τ_0 – период колебания атома в решетке, u – энергия связи, γ - структурный фактор, σ - приложенное напряжение, k – постоянная Больцмана, T – температура материала.

При больших степенях отклонения от состояния равновесия релаксация определяется процессами, не присущими начальным (квазистационарным), а возникающими новыми релаксационными процессами, имеющими иерархическую масштабно-временную соподчиненность. Явление динамического разрушения относится к такому типу релаксационных процессов. Результаты исследования процесса динамического разрушения твердых тел неметаллической природы с использованием магнитно-импульсного способа нагружения показали, что при ударно-волновом нагружении образцов вследствие отражения волн сжатия от свободной поверхности возникают волны разрежения, которые приводят к откольному разрушению образца. Причем зависимость откольной прочности от длительности импульса нагружения имеет вид

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = A_s \left(\frac{\tau_L}{T_p}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

где σ_p – значения откольной прочности, T_p – длительность импульса нагружения, τ_L , σ_c – характеристики материала, A_s – коэффициент, $\alpha \sim \sqrt{2}$.

Данные по временной зависимости процесса динамического разрушения для всех исследованных материалов, представленные в координатах lg (σ_p/σ_c) и lg (T_p/τ_L) близки к единой кривой.



Приведенные материалы проявляют универсальные признаки в явлении динамического разрушения в микросекундном диапазоне неравновесных состояний.

Результаты исследований по ударному нагружению образцов с макродефектами в виде трещин показали, что процесс разрушения на макроуровне имеет пороговый характер, а длина проросшей трещины $L_{cr}(P)$ зависит от амплитуды и длительности нагружающего импульса.



Зависимости длины проросшей трещины от амплитуды одиночного импульса нагрузки при длительности нагружения: 1 – известняк, 4,4 с; 2 – мрамор, 3,6 с; 3 – габбродиабаз, 3,6 с; 4 – песчаник, 3,6 с; 5 – гранит, 3,6 с; 6 – полимерный композит – 3 с; ПММА: 7 – 2 с; 8 – 4 с; 9 – 8,6 с. Приведены форма импульса I и схема нагружения II

При *P* > *P*_{tr} зависимость длины проросшей трещины от амплитуды импульса давления определенной длительности имеет вид

$$L_{cr}(P) \approx \frac{d L_{cr}(P)}{dP} \bigg|_{P_{tr}} \cdot (P - P_{tr}) = k_{LP} \cdot (P - P_{tr})$$

Данные, приведенные на предыдущих слайдах, показывают на проявление универсальных признаков релаксационных динамических процессов, протекающих в явлении динамического разрушения в микросекундном диапазоне неравновесных состояний.

Рассмотрим нано- и субнаносекундную области неравновесных состояний ряда металлов при воздействии импульсов релятивистских электронных пучков.



0

 $lg(D/\langle D \rangle)$

Структурирование полос скольжений кристаллической решетки вокруг центров разрушений и касательные к полосам скольжения Распределение центров разрушения по размерам в Fe (Д=4·10⁻⁴м) и Cu (Д=10⁻³м) образцах

 $lg(N(D)/N(\langle D \rangle))$

Зависимость среднего расстояния $r = N^{-\frac{1}{3}}$ между элементами диссипативных структур от их среднего размера \overline{D} _{lg r} Размеры r и \overline{D} даны в см.



12

Временная зависимость критического давления и

долговечности

$$P^{\gamma}(t) \cdot t_r = const, \qquad (2)$$

$$\left(\frac{P}{H+L}\right)^{\gamma} t = const$$
 $\left(\frac{P}{H+L}\right) = I(P)$

где $\gamma = 3,8$ для всех исследованных материалов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с; t_r - время разрушения

Зависимости процесса динамического разрушения металлов при воздействии РЭП, ЛИ:



Скорость центров образования в координатах t/t_p , $J(t)/J_{max}$



15

Временная зависимость плотности центров разрушения и скорости центрообразования, выраженные через динамический инвариант

$$N(t) = N_{tot} \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{B}\right)^{0,4} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{B}\right)^{-1,2}$$
$$J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{-2,2}$$
(3)

where A, B - const

Равенство количественных характеристик, представленных в относительных величинах, являются подобными при переходе к абсолютным величинам.

Существует понятие геометрического подобия, подобия полей $\varphi(x, y, z)$ (поле температуры, концентрации, потенциала среды), когда их величины связаны соотношением

$$\varphi'(x', y', z') = c_{\varphi} \varphi(x, y, z),$$

где *с*_{*o*} - множитель подобия.

От понятия подобия полей можно перейти к понятию подобия процессов, если в сходные моменты времени выполняется условие $\varphi'(x', y', z', t') = c_{\varphi} \varphi(x, y, z, t); x' = cx, y' = cy, z' = cz, t' = ct,$ c - коэффициенты подобия.

Выражения (1-3) и данные, приведенные на слайдах 8, 14, 15, обладают признаками основных положений теории подобия.

Распределение вероятностей величин, характеризующие различные физические процессы

X

14



Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в полулогарифмическом масштабе

х



- $\Box \quad f(x) \sim \exp(x/x_0) (1)$
- $f(x) \sim \exp(-(x-m)^2/2\sigma^2) (2)$ $f(x) \sim x^{-d_r} - (3)$:
- △ Си диспергирование
- ⊲ Си полосы скольжения
- Cu центры разрушения
- ♦ Си шероховатость (макроуровень)
- Си шероховатость (наноуровень)

Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в двойном логарифмическом масштабе



- $\Box \quad f(x) \sim \exp(-x/x_0) (1)$
- $f(x) \sim \exp(-(x-m)^2/2\sigma^2) (2)$ $f(x) \sim x^{-d_r} - (3)$:
- △ Си диспергирование
- Си полосы скольжения
- Cu центры разрушения
- Си шероховатость (макроуровень)
- Си шероховатость (наноуровень)

Зависимость времени разрушения от амплитуды приложенной нагрузки при двух способах импульсного нагружения твердых тел различной природы имеет степенной вид. Это говорит о скейлинговой природе процесса разрушения в микросекундном - субнаносекундном диапазонах неравновесных состояний.

Вышеизложенное определяет возможность прогнозирования неисследованных твердых тел в микро-, нано- и субнаносекундном диапазонах неравновесных состояний.