

Деструктивные процессы – динамическое разрушение и диспергирование металлов – как критические явления

Кошелева Е.В., Сельченкова Н.И., Соколов С.С., Трунин И.Р., Учаев А.Я.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

e-mail: otd@expd.vniief.ru

При исследовании поведения конденсированных сред в экстремальных условиях в настоящее время применяют высокоэнергетические импульсные установки (импульсные ускорители электронов, фемтосекундные лазеры). Мощностные возможности таких установок напрямую связаны со стойкостью элементов и узлов различной геометрии. Стойкость, например, к термомеханическому воздействию определяется динамическими деструктивными процессами, возникающими при многоволновом движении среды, что может приводить к локальной кумуляции внутренней энергии. Кумуляция энергии может существенно уменьшить время сохранения функциональных свойств элементов, узлов.

Динамические деструктивные процессы, протекающие в конденсированных средах, при высокоинтенсивном внешнем воздействии – сложные явления. В течение длительного времени процесс динамического разрушения рассматривался как механический процесс последовательных разрывов межатомных связей в образце под нагрузкой.

С появлением квантово-механических и термofлуктуационных моделей разрыва межатомных связей были развиты кинетические, энергетические модели прочности и т.д. [1-2]. Однако, в последнее время прогресс в исследовании явления динамического разрушения конденсированных сред (в т.ч., металлов) связан с достижениями теории неравновесных процессов, нелинейной динамики, теории мультифрактальных мер, теории диссипативных структур и самоорганизации [3-5], применение которых позволили установить подобие в количественных характеристиках динамических деструктивных процессах в ряде металлов, протекающих на различных масштабнo-временных уровнях.

Следовательно, является актуальным проведение исследований кинетических релаксационных процессов, протекающих в неравновесных конденсированных средах, различной геометрии и природы, и определение временной границы сохранения функциональных свойств конструкционных металлов, находящихся в экстремальных условиях, – установление универсальных признаков неравновесных релаксационных процессов. Определенные геометрические параметры динамически нагружаемого объекта могут приводить к многоволновому движению среды, которое вызывает кумуляцию кинетической энергии в среде, что приводит к уменьшению времени сохранения функциональных свойств объектов.

Результаты исследований, представленные в работах [5-7], указывают на универсальные признаки поведения металлов в явлении динамического разрушения при воздействии мощных импульсов проникающих излучений, которые обусловлены самоорганизацией центров разрушения и неустойчивостями в диссипативных структурах (каскадах центров разрушения), лежащих в основе сопротивления тела внешнему воздействию. Применение импульсных источников проникающих излучений наносекундного диапазона позволило расширить исследуемую область неравновесных состояний (долговечность – доли, единицы наносекунд) по сравнению с традиционными способами нагружения – взрывным и ударно-волновым, когда минимальное значение долговечности имеет значение $t \sim 10^{-8}$ с [5-7].

Целью работы являлось установление подобия процессов диспергирования различных металлов при высокоинтенсивном нагружении. Для установления количественных характеристик продуктов диспергирования и каскада возникающих диссипативных структур (шероховатости внутренней поверхности центров разрушений, каскада полос скольжения кристаллической решетки, каскада центров разрушения, шероховатости поверхности разрушения) был применен математический пакет программ интерактивной системы анализа изображений (ИСАИ) [5, 6], метод фрактальной геометрии. Проведено численное моделирование деструктивных процессов, протекающих в нагруженных образцах, с использованием лагранжевой методики ТИМ 3D [8].

Для создания многоволновых процессов в металлах, ударно-волновому нагружению (УВН) подвергались образцы, нагруженные релятивистскими электронными пучками ускорителя РИУС-5 [9], с нанесенными возмущениями в виде пирамидок высотой $h \sim 0,7$ мм, общей толщиной $\Delta \sim 1,5$ мм, углом раствора $\alpha \sim 60^\circ$.

УВН создавалось короткими импульсами релятивистских электронных пучков (РЭП) длительностью $t_u \sim 10$ нс. Толщина откольного слоя $\Delta_1 \sim 0,1$ мм определяется энергетическим спектром электронов, длина возникающей ударной волны λ существенно меньше линейных размеров нанесенных возмущений $\lambda \sim \Delta_1 \sim 0,1$ мм. В теле пирамидки вследствие взаимодействия проходящей волны и отраженной волны от граней пирамидки возникает спектр гидродинамических трансляционных и ротационных мод, что приводит к возникновению каскада диссипативных структур на различных масштабно-временных уровнях. Кумуляция энергии волн приводит к процессу диспергирования вещества из вершин пирамидок, продукты которого оседают на преграде.

На рис. 1 приведен вид разрушенной медной пирамидки (рис. 1а) и шлиф медного образца (рис. 1б), продукты диспергирования на преграде (рис. 1в), вид частиц диспергированного металла на преграде (рис. 1г) после воздействия РЭП [6].

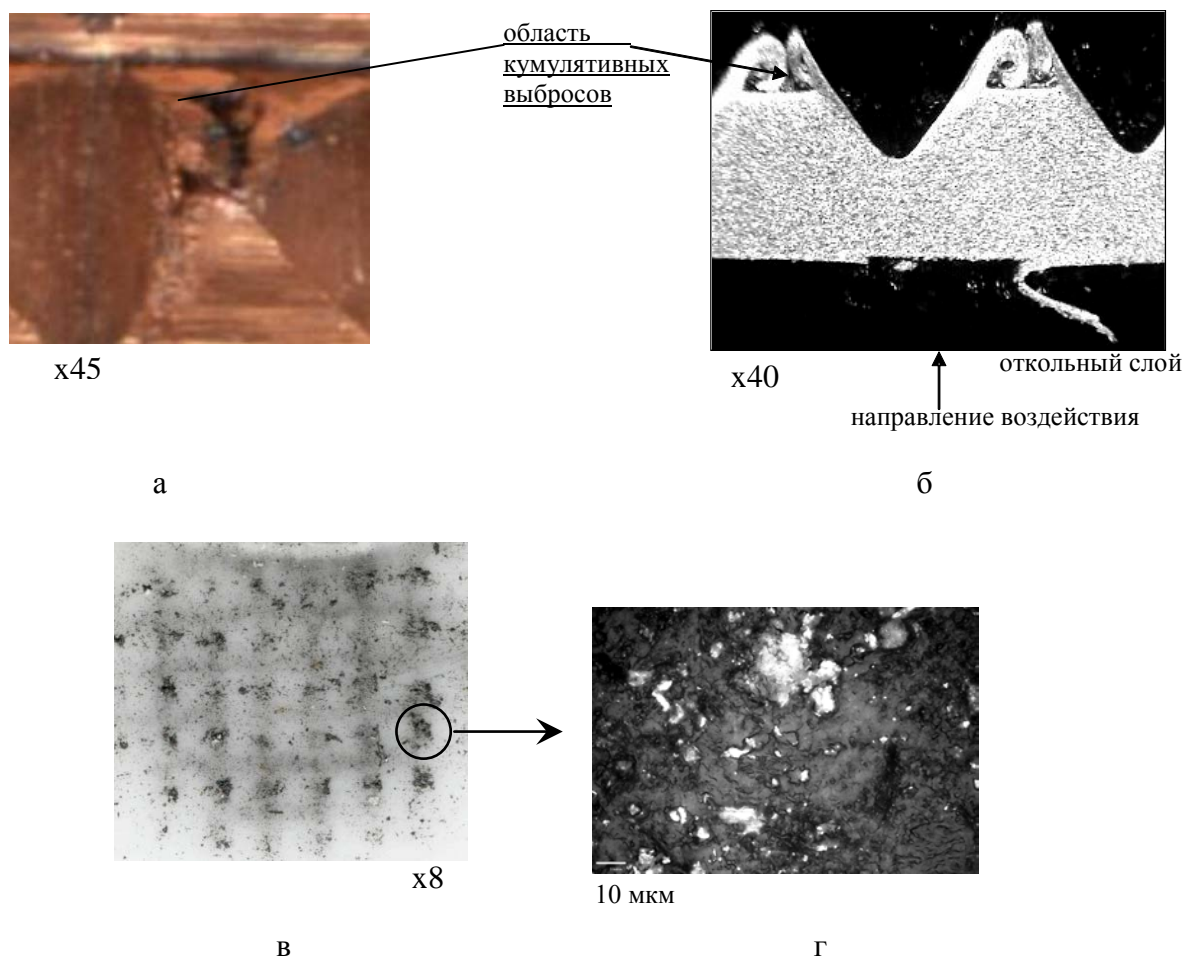
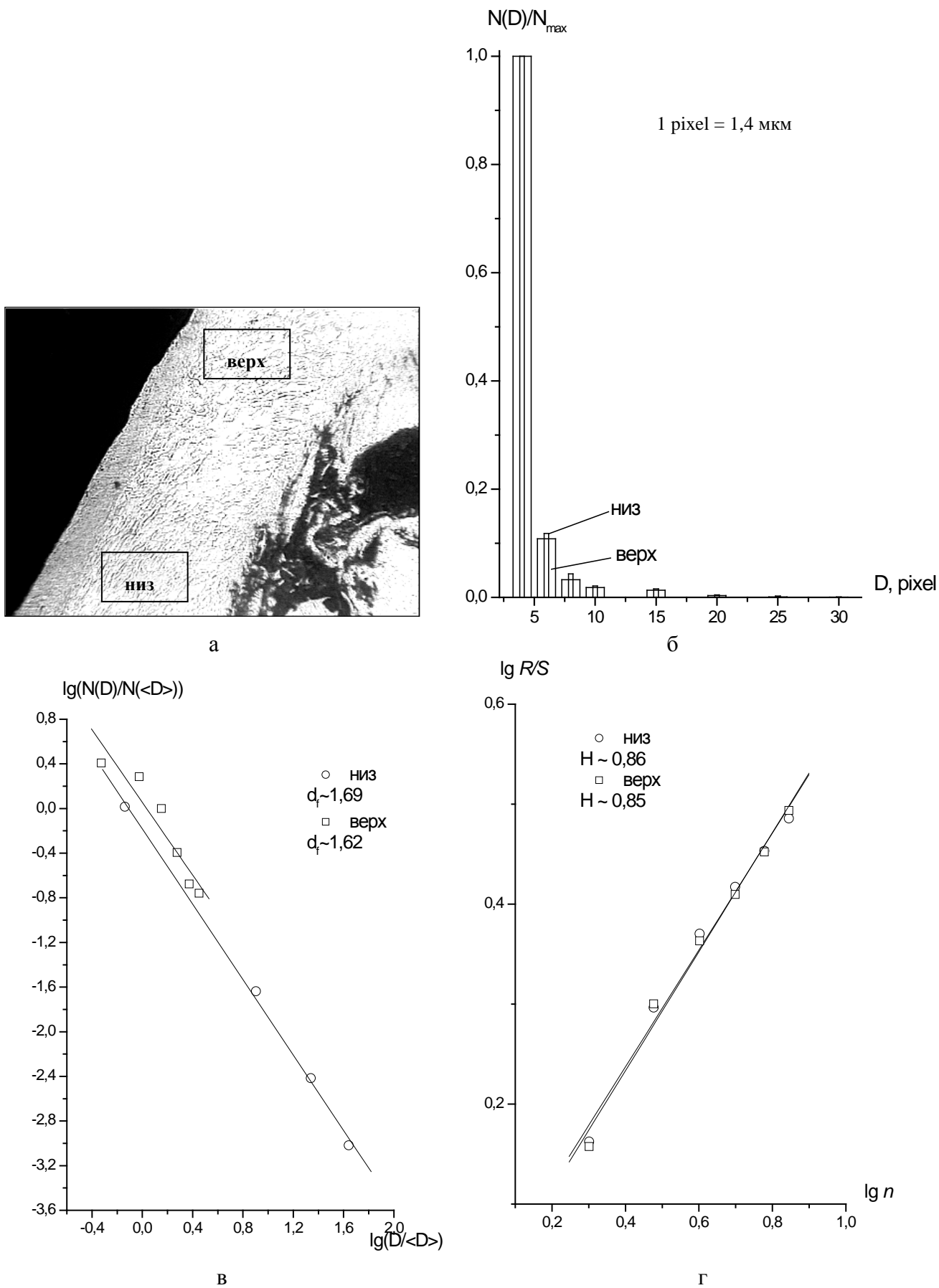


Рис. 1. Вид разрушенной медной пирамидки (а); шлиф медного образца после воздействия РЭП (б); продукты диспергирования на преграде (в); вид частиц диспергированного металла на преграде (г) [6]

С помощью разработанного математического пакета программ ИСАИ [5-7] определены количественные характеристики продуктов диспергирования и гидродинамических мод, которые приводят к деформации нагруженных образцов.

На рис. 2а приведен вид шлифа грани медной пирамидки после нагружения и количественные характеристики гидродинамических мод в нижней и в верхней частях пирамидки: гистограмма распределения полос скольжения по размерам (рис. 2б); фрактальная размерность полос скольжения d_f (рис. 2в); показатель Херста H – нормированный размах полос скольжения от их числа (рис. 2г) [6].



а – грань медной пирамидки (x200); б – гистограмма распределения полос скольжения; в – фрактальная размерность полос скольжения; г – нормированный размах полос скольжения от их числа

Рис. 2. Внешний вид грани медной пирамидки и математическая обработка верхней и нижней частей медной пирамидки

Согласно теории подобия [10], если количественные характеристики физических процессов, выраженные в безразмерных переменных равны, то это говорит о физическом подобии поведения систем.

Т.е., любые количественные соотношения, полученные для конкретного явления, могут быть распространены на другие подобные явления, если их представить в относительной (безразмерной) форме.

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

$$\varphi'(x', y', z') = c_\varphi \varphi(x, y, z), \quad (1)$$

где c_φ - множитель подобия.

От понятия подобия полей можно перейти к понятию подобия процессов, если в сходные моменты времени выполняется условие

$$\varphi'(x', y', z', t') = c_\varphi \varphi(x, y, z, t); x' = cx, y' = cy, z' = cz, t' = ct, \quad (2)$$

c – коэффициенты подобия.

Из теории подобия [10] следует, что для одинаковых значений координат элементов среды, геометрии, толщины откольного слоя в образцах из разных металлов поля скоростей волн подобны. Подобие процессов, протекающих в реальных системах, рассмотрено на примере процесса диспергирования частиц из вершин пирамидок образцов Al и Cu (угол раствора 60°), для которых фрактальные размерности d_f и показатель Херста H , имеют близкие значения (см. рис. 3). Следовательно, для близких значений приведенных переменных, количественные характеристики трансляционных и ротационных мод движения элементов среды будут иметь близкие значения (см. рис. 2, 3).

Результаты математической обработки каскадов диссипативных структур, возникающих после УВН, позволили установить ряд динамических диссипативных процессов, ранее отсутствующих.

Универсальное поведение неравновесных систем – разрушаемого тела – определяется возникновением обратных связей между элементами диссипативных структур, которые характеризуются фрактальной размерностью и показателем Херста [6].

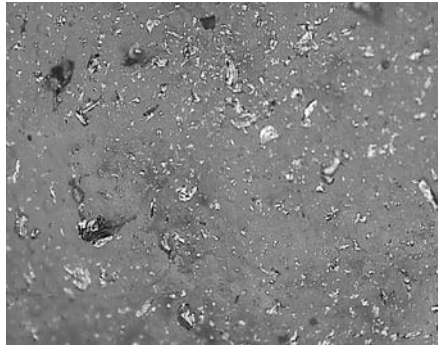
Самоподобие элементов диссипативных структур возникает как следствие самоорганизации в неравновесных системах, что применительно к процессу динамического разрушения, означает самоорганизацию разрушаемой системы [5, 6].

В результате неравновесных процессов, демонстрирующих примеры масштабной инвариантности, находятся процессы динамического разрушения и диспергирования, что и определяет рассмотрение количественных характеристик каскадов диссипативных структур в терминах математического аппарата самоподобия.

Эффекты самоорганизации возникают в неинтегрируемых системах. Самоорганизация возникает в таких системах, в которых свойства целого и частей не совпадают. Масштабная инвариантность возникающих диссипативных структур указывает на то, что неравновесная система достигла критического состояния.

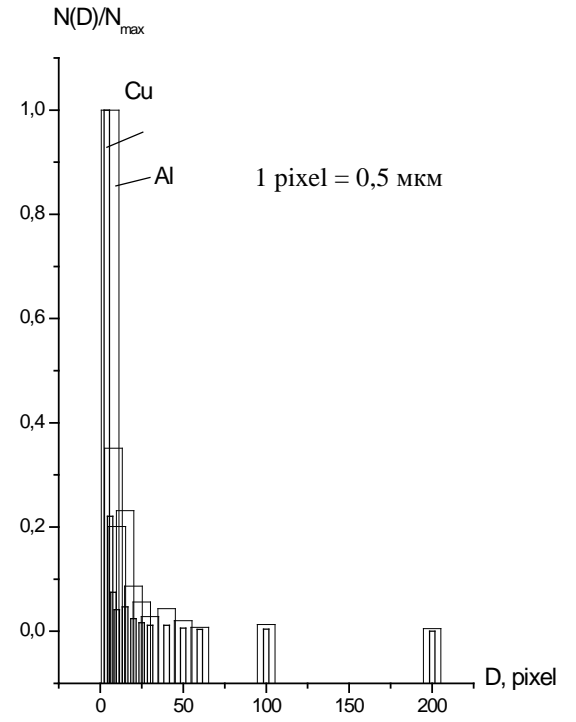
Из вышеизложенного следует, что явление динамического разрушения и диспергирования являются аналогами процессов, протекающих в критических точках, что и определяет применение определенного математического аппарата для описания указанных явлений.

Фундаментальные свойства процесса динамического разрушения и диспергирования металлов вытекают из неравновесного, диссипативного характера явления, которому присущи масштабная инвариантность возникающих пространственно-временных диссипативных структур [5, 6].

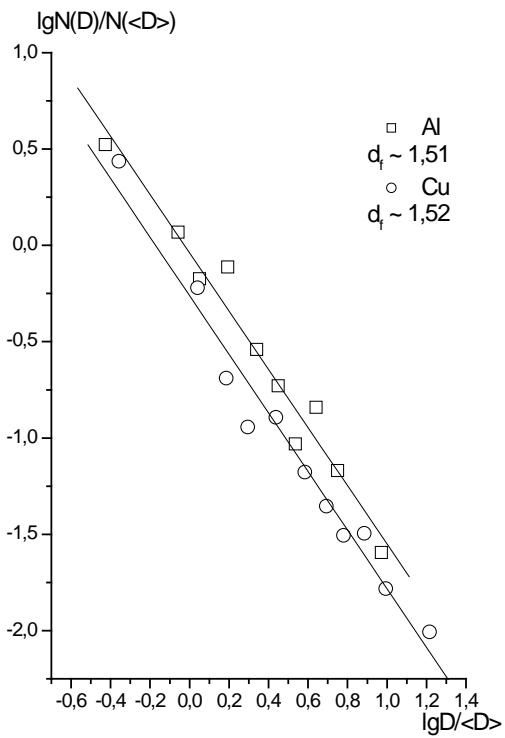


x 75

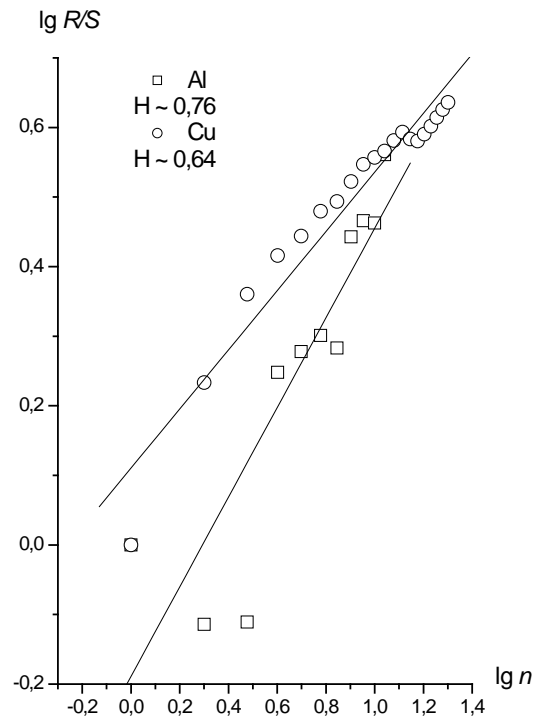
а



б



в



г

а – вид частиц диспергированного металла Al на преграде; б – гистограмма распределения частиц по размерам; в – фрактальная размерность диспергированных частиц; г – нормированный размах от числа диспергированных частиц

Рис. 3. Внешний вид области подложки из полиэтилена и результаты математической обработки диспергированных частиц (Cu, Al)

Многоволновое движение в среде создается путем откольного разрушения облучаемой плоской поверхности образца, при одинаковых значениях долговечности и геометрии образца. Используя установленный ранее динамический инвариант $I(P, t) = P(t)/\Gamma\rho(H_y + L_{\text{тл}})$ [5, 6], справедливый для всех исследованных металлов, который связывает значение критического давления $P(t)$, приводящего к разрушению, с энергетическими параметрами кристаллической решетки: энтальпией H_y и теплотой плавления $L_{\text{тл}}$ в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$ с (Γ – параметр Грюнайзена, ρ – плотность металла) можно оценить коэффициент кумуляции энергии в вершине пирамидки и энергию диспергирования для различных металлов.

При изучении процесса динамического разрушения является логичным соотнести энергоемкость процесса диспергирования с теплотой сублимации $H_{\text{субл}}$. Для граничного значения энергии $E_{\text{кр}}(t)$, приводящего к разрушению, отношение $\frac{E_{\text{эд}}(t)}{H_y + L_{\text{тл}}}$ одинаково для всех исследованных металлов. Для значения долговечности $t \sim 2 \cdot 10^{-8}$ с отношение $\frac{E_{\text{эд}}(2 \cdot 10^{-8})}{H_y + L_{\text{тл}}} \approx 0,55$ [5, 6]. При одинаковой геометрии образцов и толщине откольного слоя коэффициент кумуляции энергии ударной волны будет одинаков для образцов из различных металлов без учета диссипативных потерь ударной волны, которые определяются свойствами среды.

В таблице 1 приведены табличные данные $\frac{H_y + L_{\text{тл}}}{I_{\text{нóáè}}}$, отношения $\frac{E_{\text{эд}}}{I_{\text{ý}} + L_{\text{тл}}}$, $\frac{E_{\text{эд}}}{I_{\text{нóáè}}}$, критическая плотность поглощенной энергии $E_{\text{кр}}$, приводящая к разрушению, ряда металлов для значения долговечности $t \sim 10^{-8}$ с [5, 6].

Отношение $\frac{E_{\text{эд}}}{I_{\text{нóáè}}}$ при $t = 10^{-8}$ с и отношение $\frac{H_y + L_{\text{тл}}}{I_{\text{нóáè}}}$ для приведенных в таблице 1 металлов имеют близкие значения, что свидетельствует о термодинамическом подобии поведения металлов при плавлении и сублимации.

Энергетические характеристики деструктивных процессов в конструкционных материалах и сплавах, применяемых в высокоэнергетических импульсных установках и энергетические характеристики чистых металлов (см. таблицу 1) имеют близкие значения при одинаковых значениях долговечности [12].

Таблица 1 – Энергетические параметры металлов и параметры нагружения

Элемент	ат. №	$\frac{H_{\dot{\gamma}} + L_{\dot{\gamma}\ddot{\gamma}}}{\dot{\gamma}_{\text{нóáë}}}$, [11]	$E_{\text{кр}}$, Дж/г при $t \sim 10^{-8}$ с [5, 11]	$\frac{E_{\text{éð}}}{\dot{\gamma}_{\text{нóáë}} + L_{\dot{\gamma}\ddot{\gamma}}}$ при $t \sim 10^{-8}$ с [5, 11]	$\frac{E_{\text{éð}}}{\dot{\gamma}_{\text{нóáë}}}$ при $t \sim 10^{-8}$ с	Тип решетки
Al	13	0,151	–	–	–	ГЦК
Ti	22	0,16	950	0,537	0,086	ГЦК
Fe	26	0,18	754	0,585	0,105	ОЦК
Co	27	0,16	–	–	–	ГЦК
Ni	28	0,15	618	0,533	0,080	ГЦК
Cu	29	0,144	394	0,575	0,083	ГЦК
Zn	30	0,157	–	–	–	ГЦК
Mo	42	0,18	819	0,537	0,097	ОЦК
Cd	48	0,18	80	0,494	0,089	алмазная
Sn	50	0,12	100	0,525	0,063	алмазная
Ta	73	0,186	379	0,495	0,092	ОЦК
W	74	0,165	522	0,570	0,094	ОЦК
Pb	82	0,116	51	0,510	0,059	ГЦК
U^{238}	92	0,12	94,38	0,56	0,07	сложная

Универсальное поведение металлов в экстремальных условиях определяется не свойствами межатомных взаимодействий и симметрией кристаллической решетки, а кинетикой возникающих диссипативных структур на различных масштабно-временных уровнях, количественные характеристики которых имеют близкие значения для всех металлов.

Проведено численное моделирование нагруженных медных мишеней с нанесенными возмущениями в виде пирамидок ($\alpha \sim 60^\circ$) от момента нагружения до макроразрушения с использованием лагранжевой методики ТИМ 3D [8]. Моделируемые параметры нагружения близки к натурным.

На рис. 4 приведено распределение плотности в объеме пирамидки. Расчет 3D с использованием модели откольного разрушения на момент времени $t \sim 3 \cdot 10^{-6}$ с.

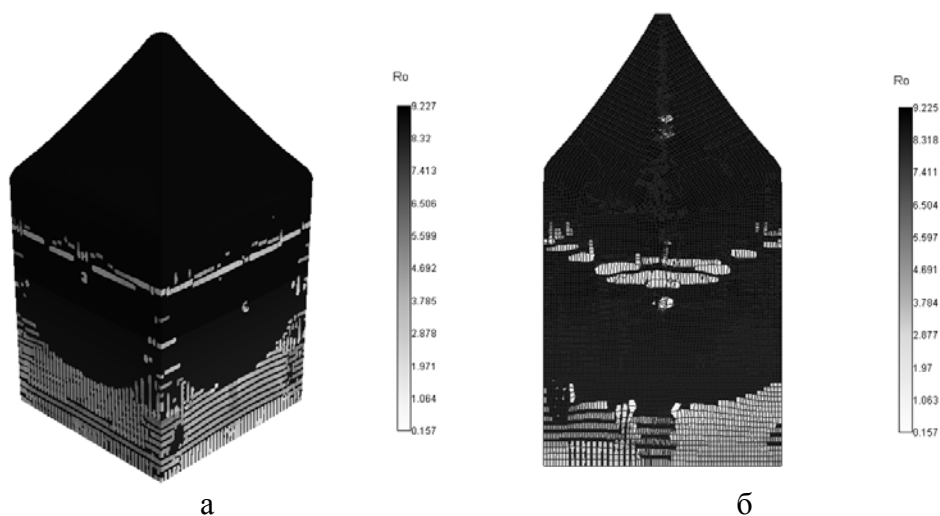


Рис. 4. Распределение плотности в объеме пирамидки (а); в осевом сечении – (б). Расчет 3D с использованием откольного разрушения. Время $3 \cdot 10^{-6}$ с.

В природных явлениях в социальной сфере имеется широкий круг явлений, которые описываются степенными закономерностями. Например, распределение числа городов $N(S_i)$ от числа населения S_i имеет вид

$$N(S_i) \sim S_i^{-\alpha} \quad (3)$$

- закон Ципфа [14], частота столкновений $f(D)$ метеоритов с Землей, как функция их диаметров

$$f(D) \sim D_i^{-\alpha}, \quad (4)$$

где α - показатель распределения.

Такой же степенной зависимостью описывается распределение землетрясений во времени по амплитуде [14] – так называемый закон Гутенберга-Рихтера. Закон Гутенберга-Рихтера масштабно – инвариантный статистический закон, который показывает, как количество землетрясений какого-то одного масштаба соотносится с количеством землетрясений другого масштаба.

Степенные законы показывают, что величина N может быть представлена в виде степени другой величины E , что в двойных логарифмических координатах дает график зависимости в виде прямой $N(E) \sim \text{const } E^{-\alpha}$, $N(E)$ – число сейсмических процессов в единицу времени с энергией E . Это эмпирический закон, который вытекает непосредственно из наблюдений. Закон Гутенберга-Рихтера – это свойство не разлома, а земной коры в целом [15].

Существует несколько видов распределения вероятностей величин, характеризующие различные физические процессы. Наиболее распространенные – это экспоненциальное распределение $P(x) \sim a^{-x/\bar{a}_0}$ – (1), нормальное (Гауссово)

распределение $P(x) \sim \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\}$ – (2), степенное распределение $P(x) \sim x^{-\alpha}$ – (3),

где x_0 , α - параметры распределения, m – математическое ожидание, σ - дисперсия (см. рис. 5).

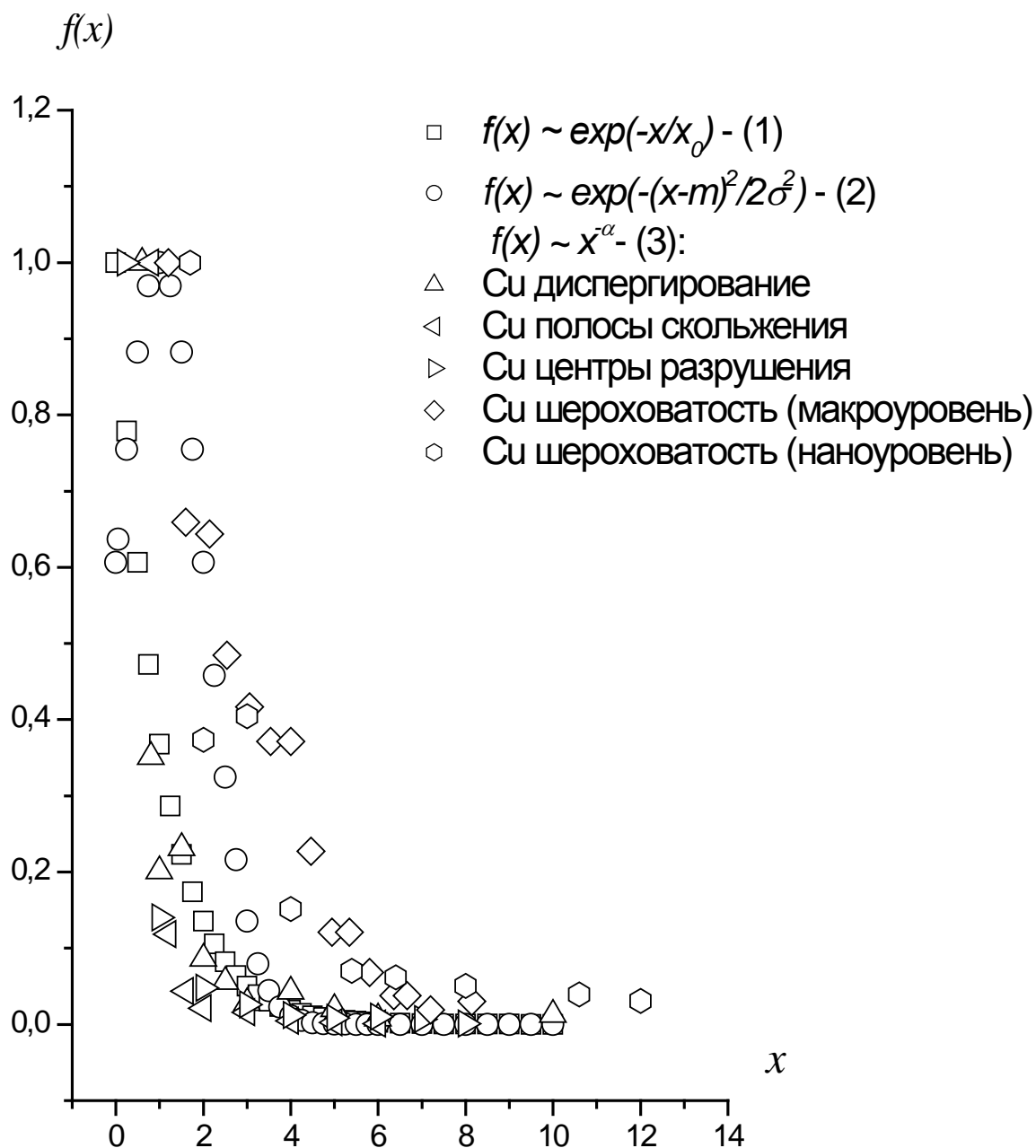


Рис. 5. Распределение вероятностей величин, характеризующие различные физические процессы

Экспоненциальное распределение описывает, например, распределение молекул газа по энергиям. Нормальному распределению подчиняются величины, получающиеся при сложении большого числа независимых случайных слагаемых.

Примером степенного распределения на рис. 5 является распределение каскадов центров разрушения в различных металлах, полос скольжения кристаллической решетки, распределение продуктов диспергирования, шероховатости внутренней поверхности центров разрушения (нано уровень), шероховатость поверхности разрушения (макро уровень) – диссипативных структур, возникающих в процессе динамического разрушения металлов при УВН.

Разница между нормальным и степенным распределением носит принципиальный характер. Если статистика системы описывается нормальным распределением, то 99,7 % событий отклонятся от среднего значения не более чем на 3σ (так называемое правило трех сигм), а вне диапазона 5σ находятся всего лишь 10^{-6} событий. Поэтому можно пренебречь редкими событиями вне интервала 3σ .

При степенном распределении плотность вероятности на “хвостах” распределения существенно больше, чем при нормальном распределении и редкими событиями пренебречь нельзя, например, частота f столкновений метеоритов с Землей, как функция их диаметра D подчиняется степенному распределению $f(D) \sim D^{-\alpha}$. При увеличении диаметра метеорита с 1 метра до 100 метров частота столкновения с Землей уменьшается с одного события в год до 10^{-4} событий в год [10].

Рассмотрим, как ведут плотности вероятностей величин, изменяющихся по экспоненциальному $P(x) \sim a^{-x/\bar{a}_0}$ – (1), нормальному $P(x) \sim \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\}$ – (2), и степенному $P(x) \sim x^{-\alpha}$ – (3) законам, с различными представлениями данных по осям.

На рис. 5-7 приведен типичный вид плотности вероятности величин, изменяющихся по экспоненциальному, нормальному и степенному законам с различными представлениями данных по осям. На рис. 5 график 1 позволяет сравнить скорость уменьшения плотности вероятности для “хвостов” распределений. На рис. 6 графики в полулогарифмическом масштабе по оси ординат, нормальное (1) и экспоненциальное (2) распределение соответственно представляются в виде параболы и прямой.

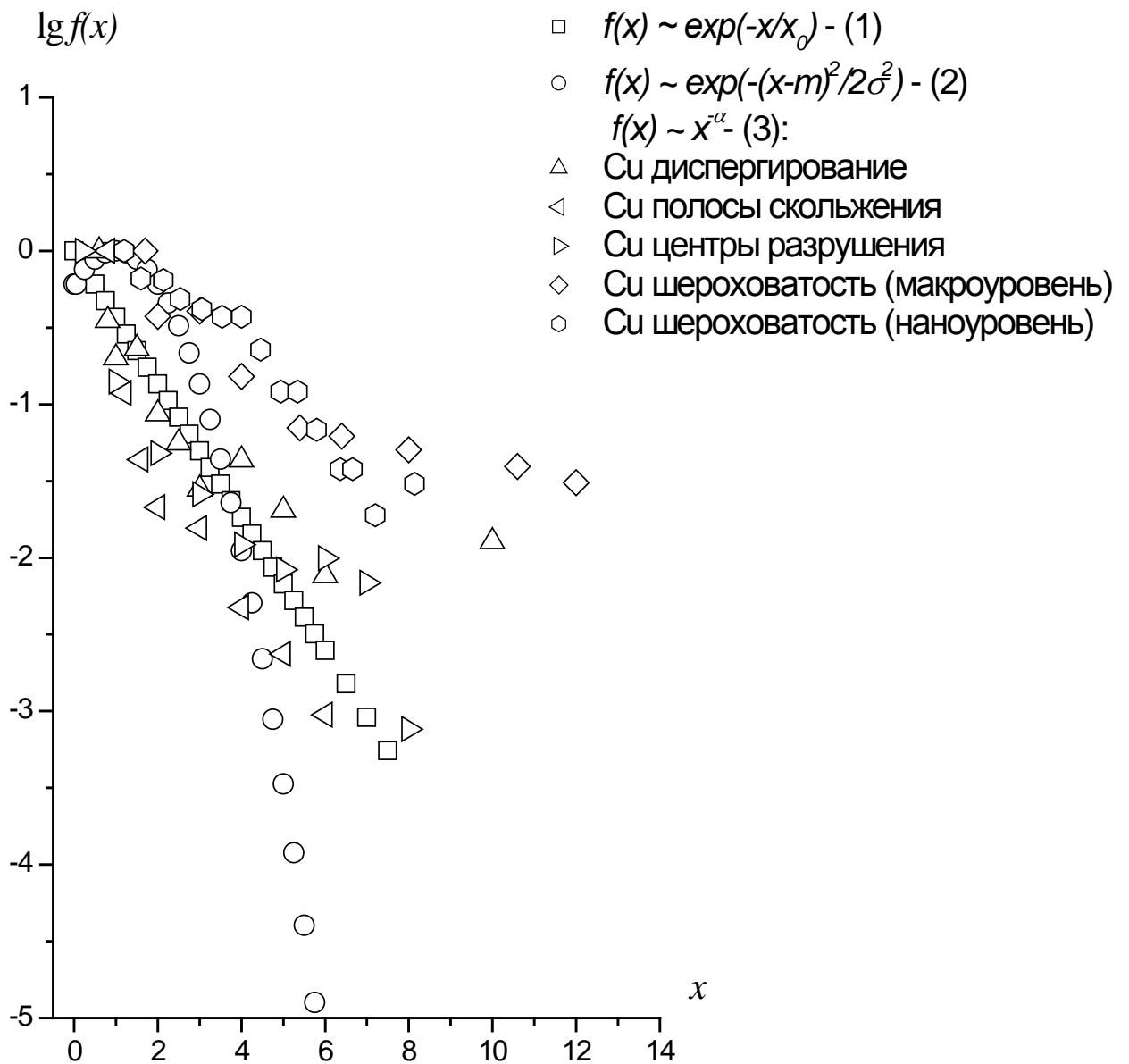


Рис. 6. Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в полулогарифмическом масштабе

На рис. 7 (двойной логарифмический масштаб) степенной закон распределения (3) имеет вид прямой, что говорит о масштабно-инвариантном поведении каскадов диссипативных структур.

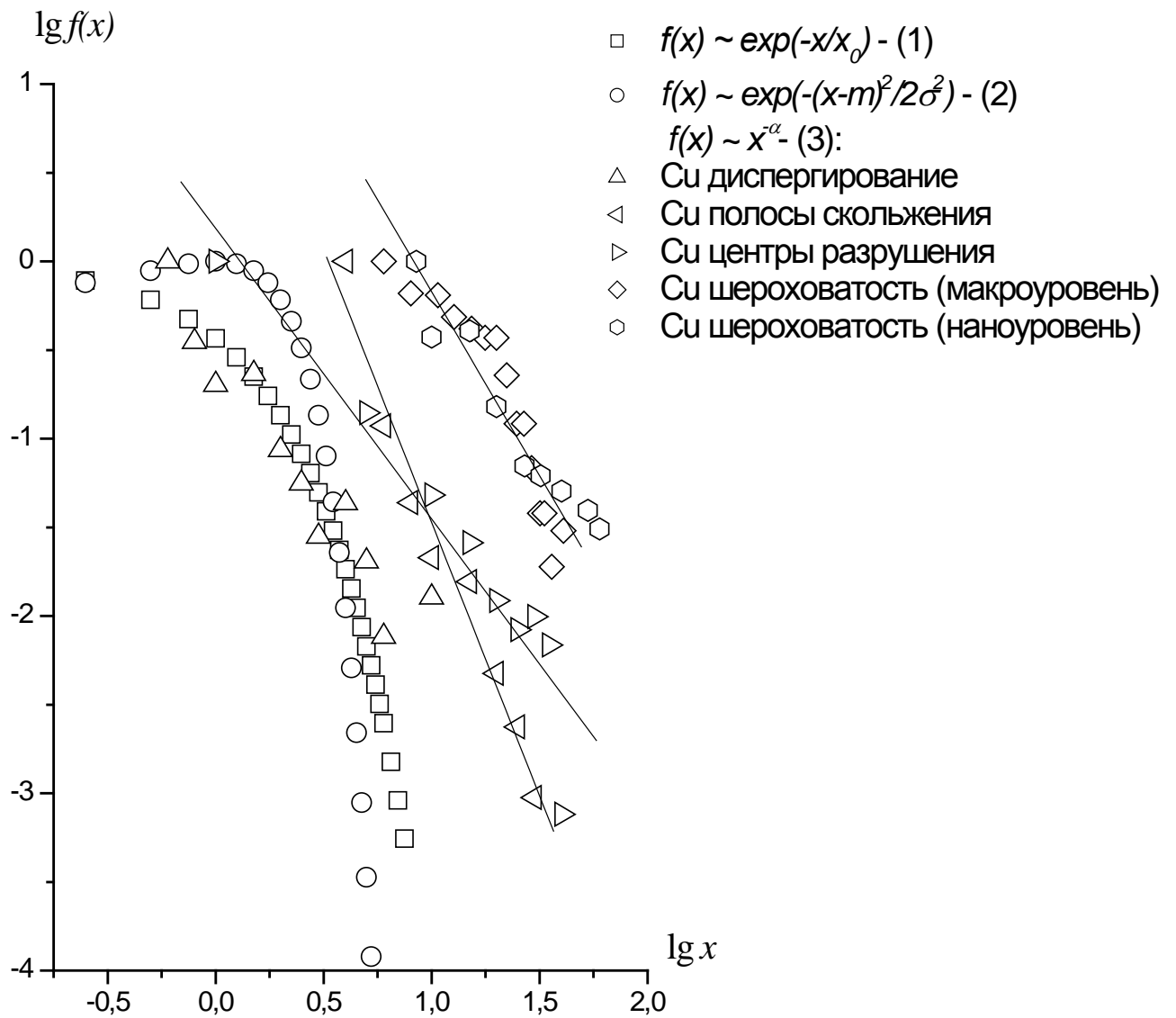


Рис. 7. Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в двойном логарифмическом масштабе

Для построения графика нормального распределения математическое ожидание m и дисперсия σ выбирались равными единице, $x \in [0 \div 10]$; для экспоненциального распределения $x \in [0 \div 10]$; $x_0 = 1$.

Нормальное или экспоненциальное распределения имеют «хвосты», спадающие гораздо быстрее, чем любое степенное распределение. Статистика величин, описываемых степенным распределением, отличается от нормального тем, что редкие события на «хвостах» распределения происходят достаточно часто, чтобы ими можно было пренебречь. Природа степенных законов распределения определяется взаимосвязью релаксационных процессов на различных масштабных-временных уровнях. Вероятность события $P(x)$ от величины x имеет вид $P(x) \sim x^{-\alpha}$ на графике в координатах $\lg x$, $\lg P(x)$ будет лежать на одной прямой для всех значений x .

Несмотря на математическую эквивалентность закона Ципфа и закона Гутенберга-Рихтера, между ними имеется важное различие. Если в случае населения городов мы имеем дело с одновременно существующими объектами, делящими некий общий ресурс, то в случае с землетрясениями мы имеем дело с последовательно происходящими событиями, посредством которых диссипирует избыток запасенной в системе энергии. Во втором случае целостность системы является предпосылкой возникновения степенной зависимости (статистически), а следствием самоорганизации системы в критическое состояние, когда наличие взаимодействия между элементами системы распространяется на всю систему.

Было показано [5, 6], что каскад центров разрушений является фрактальным кластером в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$ с для всех исследованных металлов. Т.е., зависимость числа центров разрушения $N(D)$ размером D описывается степенной функцией.

Ранее было показано [5, 6], что временные закономерности процесса динамического разрушения, представленные в координатах $\lg t$, $\lg P$, для каждого металла близки к единой прямой. Данные по долговечности, приведенные в координатах $\lg t$, $\lg I(t)$, где $I(t)$ – динамический инвариант $I(t) = \frac{E(t)}{\bar{\Delta}\rho(H_y + L_{пл})}$ близки к единой кривой ($E(t)$ – давление, приводящее к разрушению, Γ – параметр Грюнайзена, ρ – плотность материала, H_3 – энтальпия и $L_{пл}$ – теплота плавления).

Данные, приведенные на рис. 8 можно представить в виде выражения

$$t(P) \sim \text{const } P^{-\gamma}, \quad \gamma \sim 3,8 \quad [5, 6]. \quad (5)$$

Временные закономерности процесса динамического разрушения, представленные в таких координатах, подобны закону Гутенберга-Рихтера, т.е., чем меньше энергетика диссипативного процесса, тем дольше протекает процесс. Разница заключается лишь в том, что закон Гутенберга-Рихтера свидетельствует о том, что чем меньше энергетика сейсмического процесса, тем чаще этот процесс возникает

$$N(E) \sim \text{const } E^{-\alpha}, \quad (6)$$

α – показатель; E – энергия сейсмического процесса.

Самоорганизация возникает в неравновесных нелинейных диссипативных системах, эволюция таких систем не может быть описана методами классической физики [14, 15]. Так в качестве одного из основных примеров природного явления, демонстрирующего самоорганизацию в критическом состоянии, является сейсмичность [14, 15]. Это определено тем, что сейсмичность во всех районах Земли всегда подчиняется эмпирически

установленному закону Гуттенберга-Рихтера, который в «энергетической» форме может быть представлен как $N(E) \sim E^{-\alpha}$ (1), где N – число землетрясений с энергией E .

Степенные распределения являются статистическим выражением масштабной инвариантности, которая указывает на то, что в результате самоорганизации система достигла критического состояния.

На рис. 8 приведены временные закономерности процесса динамического разрушения ряда конструкционных материалов в координатах $\lg t$, $\lg I$, где I – динамический инвариант; $I = P_{кр}(t)/\Gamma\rho(H_э + L_{ли})$ при воздействии РЭП и лазерного излучения (ЛИ) [6].

Т.о., процессы динамического разрушения и диспергирования являются критическими явлениями, когда происходит самоорганизация возникающих диссипативных структур в масштабе разрушаемого тела и описывается в рамках теории самоорганизованной критичности.

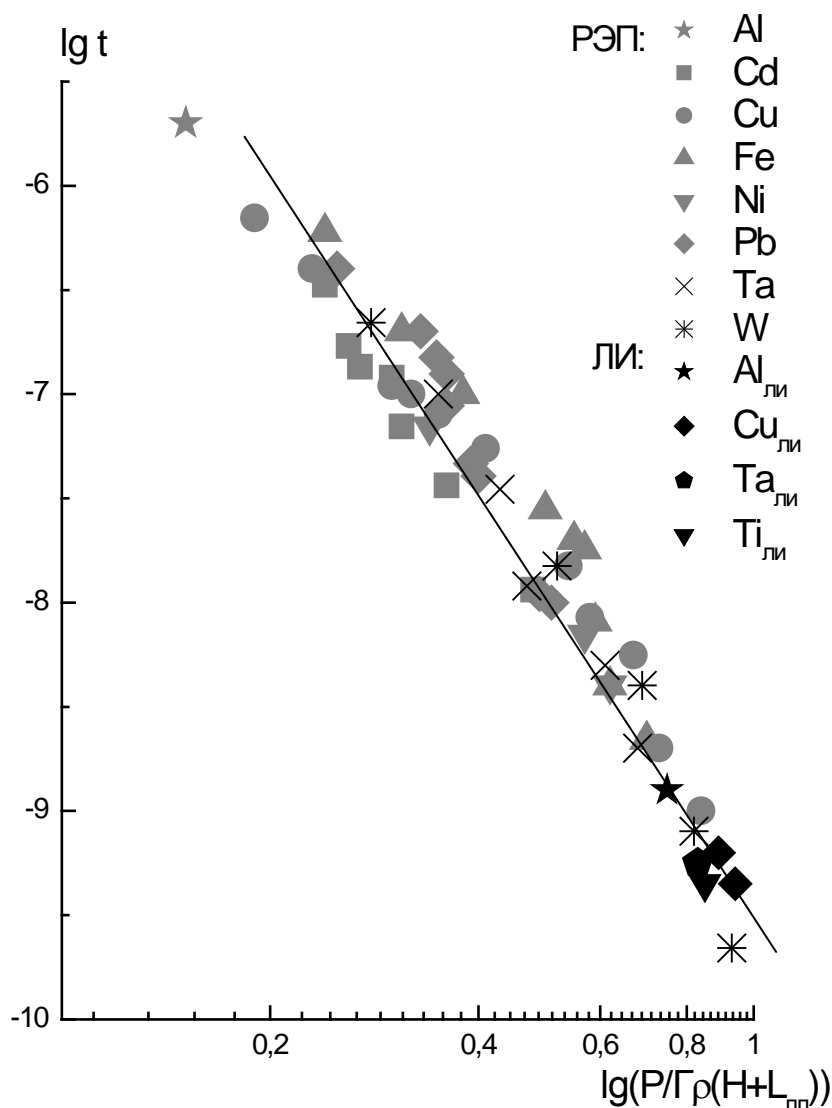


Рис. 8. Временные закономерности процесса динамического разрушения ряда конструкционных материалов [6]

Применение методов нелинейной физики и теории фракталов к определению количественных характеристик диссипативных структур позволило установить подобие процессов диспергирования металлов, вытекающее из сугубо неравновесного диссипативного характера процесса – его масштабной инвариантности. Реализация будущего состояния неравновесной диссипативной системы через последовательность бифуркаций делает эволюцию системы необратимой.

Автомодельное поведение элементов среды, подвергнутой высокоинтенсивному внешнему воздействию, позволяет определить безразмерные соотношения для ряда исследованных металлов, в которые входят энергетические и временные параметры внешнего нагружения, количественные характеристики диссипативных структур и табличные параметры конденсированной среды, что позволит прогнозировать поведение неисследованных конденсированных сред в экстремальных условиях.

В результате проведенных экспериментально-теоретических исследований получены новые кинетические переменные процесса диспергирования металлов при амплитудах ударно-волнового нагружения $P \sim$ единицы-десятки ГПа.

Выше изложенное имеет важное значение для верификации имеющихся динамических уравнений состояния и создания новых (адекватных), позволяющих описывать поведение металлов в экстремальных условиях с использованием существующих расчетных кодов. Приведенные результаты исследований необходимо учитывать при разработке высокоинтенсивной импульсной техники.

Список литературы:

1. Журков С.Н., Петров В.А.. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел // ДАН. – 1978. – Т. 239, № 6. – С. 1316.
2. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел // Докл. АН СССР. – 1988. – Т.300. – С. 1090-1094.
3. Пригожин И., Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Эдиториал УРСС, 2003. – 280 с.
4. Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, выпуск 6. – С. – 1000-1009.
5. Илькаев Р.И., Пунин В.Т., Учаев А.Я., Новиков С.А., Кошелева Е.В., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И., Юкина Н.А. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН. – 2003. – Т. 393, № 3. – С. 326-331.

6. Кошелева Е.В., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Учаев А.Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.
7. Учаев А.Я., Новиков С.А., Цукерман В.А., Бонюшкин Е.К., Завада Н.И. и др. Особенности откольного разрушения вольфрама в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 310, №3. – С. 611-614.
8. Соколов С.С., Панов А.И., Воропинов А.А., Новиков И.Г. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. матем. моделирование физ. Процессов. – 2005. – Вып. 3. – С. 37–52.
9. Кошелева Е.В., Мохова В.В., Подурец А.М., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Тилькунов А.В., Ткаченко М.И., Трунин И.Р., Учаев А.Я. Исследование диспергирования металлов при ударно-волновом нагружении, вызываемом импульсами релятивистских электронов и разгоняемых электровзрывом ударников // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 133-139.
10. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Изд. 2-е, доп. и переработан. Учеб. Пособие для вузов. – Москва: Высшая школа, 1973. – 296 с.
11. Эмсли Дж. Элементы: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1993. – 256 с.
12. Кошелева Е.В., Сельченкова Н.И., С.С. Соколов, И.Р. Трунин, Учаев А.Я. О подобии динамических деструктивных процессов в металлах различной геометрии при различных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия. Забабахинские научные чтения: сборник тезисов докладов XIII Международной конференции 20-24 марта 2017. – Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. – С.223-224.
13. Учаев А.Я., Завада Н.И., Ильяев Р.И., Кошелева Е.В., Новиков С.А., Платонова Л.А., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Юкина Н.А. Инварианты в явлении динамического разрушения металлов. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, выпуск 3. – 2002. – С. 304-313.
14. Бак П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности. М.: УРСС: Книжный дом «Либроком», 2014. – 276 с.
15. Стаховский И.Р. Масштабная инвариантность коровой сейсмичности и прогностические признаки землетрясений // УФН, 2017, т. 187, № 5. – С. 505-524.