



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

$$dE = TdS - PdV$$

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

$$P < 0, \quad dV < 0$$

Параметры нагружения

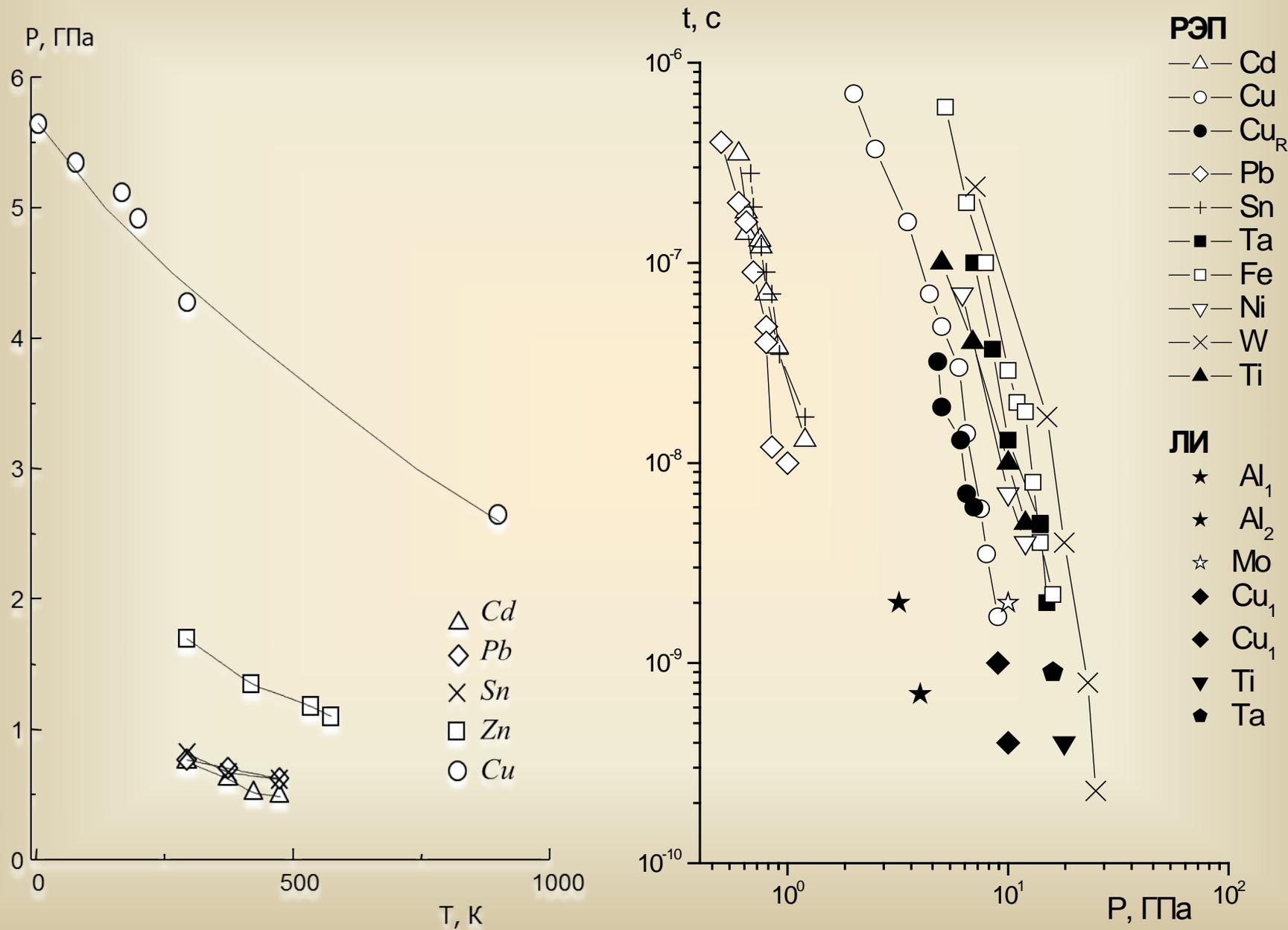
Релятивистские электронные пучки (РЭП)

- Начальная температура
($T \sim 4 \text{ К} \div 0,8 \text{ Т пл.}$)
- Плотность поглощенной энергии
 $dE/dm \sim 10 \div 10^3 \text{ Дж/г}$
- Давление $P - 1 \div 100 \text{ ГПа}$
- Скорость ввода энергии
 $dT/dt \sim 10^{12} \text{ К/с}$
($dE/dt \sim 10^{11} \text{ Дж/(г·с)}$)
- Диапазон долговечности
 $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10} \text{ с}$
- $\tau_i \sim 1 \text{ нс}$

Импульсы лазерного излучения (ЛИ)

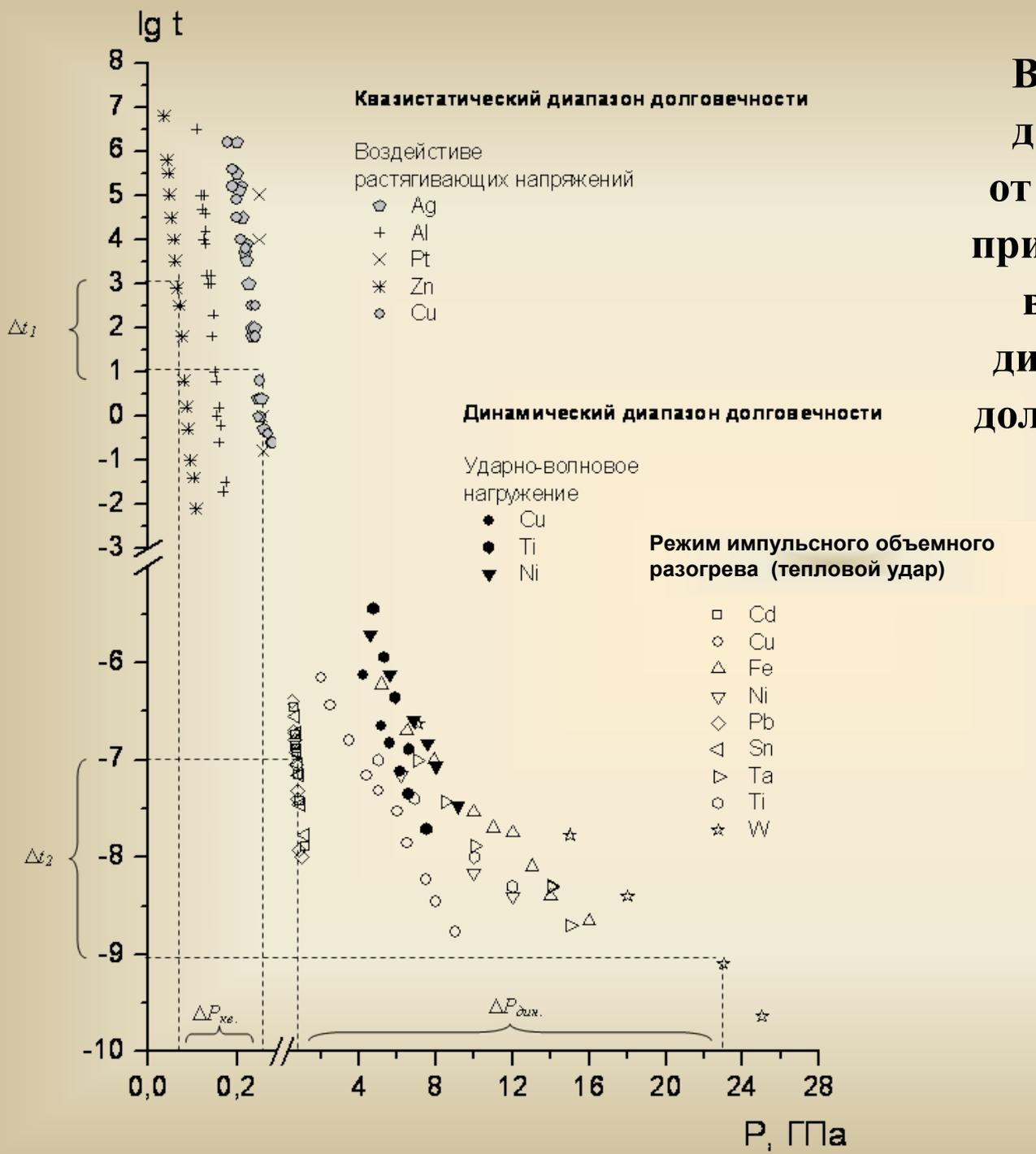
- Энергия одиночного импульса $E \sim 100 \div 1000 \text{ мДж}$
- Плотность мощности
 $\frac{dE}{dm} > 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ ($d \sim 0,1 \text{ мм}$)
- Длительность импульса
 $t_0 \sim 10^{-10} \div 10^{-12} \text{ с}$
- Диапазон долговечности
 $t \sim 10^{-9} \div 10^{-10} \text{ с}$
 $\tau_i \sim 10 \text{ пс}$
- $J \sim 10^{15} \text{ Вт/см}^2$
- $\tau_i \sim 40 \text{ фс}$

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 долговечности (t в секундах)

$$\Delta t_1 = \Delta t_2; \Delta P_{дин} > \Delta P_{кв}$$



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.

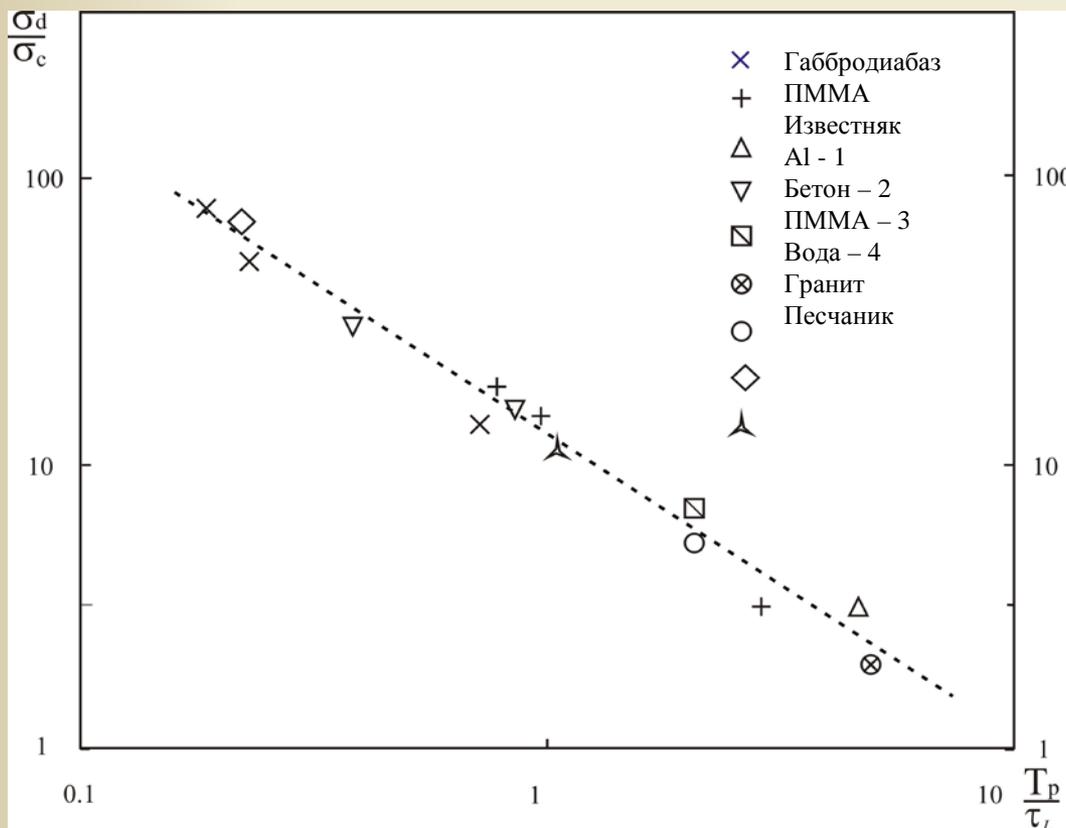
При больших степенях отклонения от состояния равновесия релаксация определяется процессами, не присущими начальным (квазистационарным), а возникающими новыми релаксационными процессами, имеющими иерархическую масштабно-временную соподчиненность. Явление динамического разрушения относится к такому типу 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

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

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

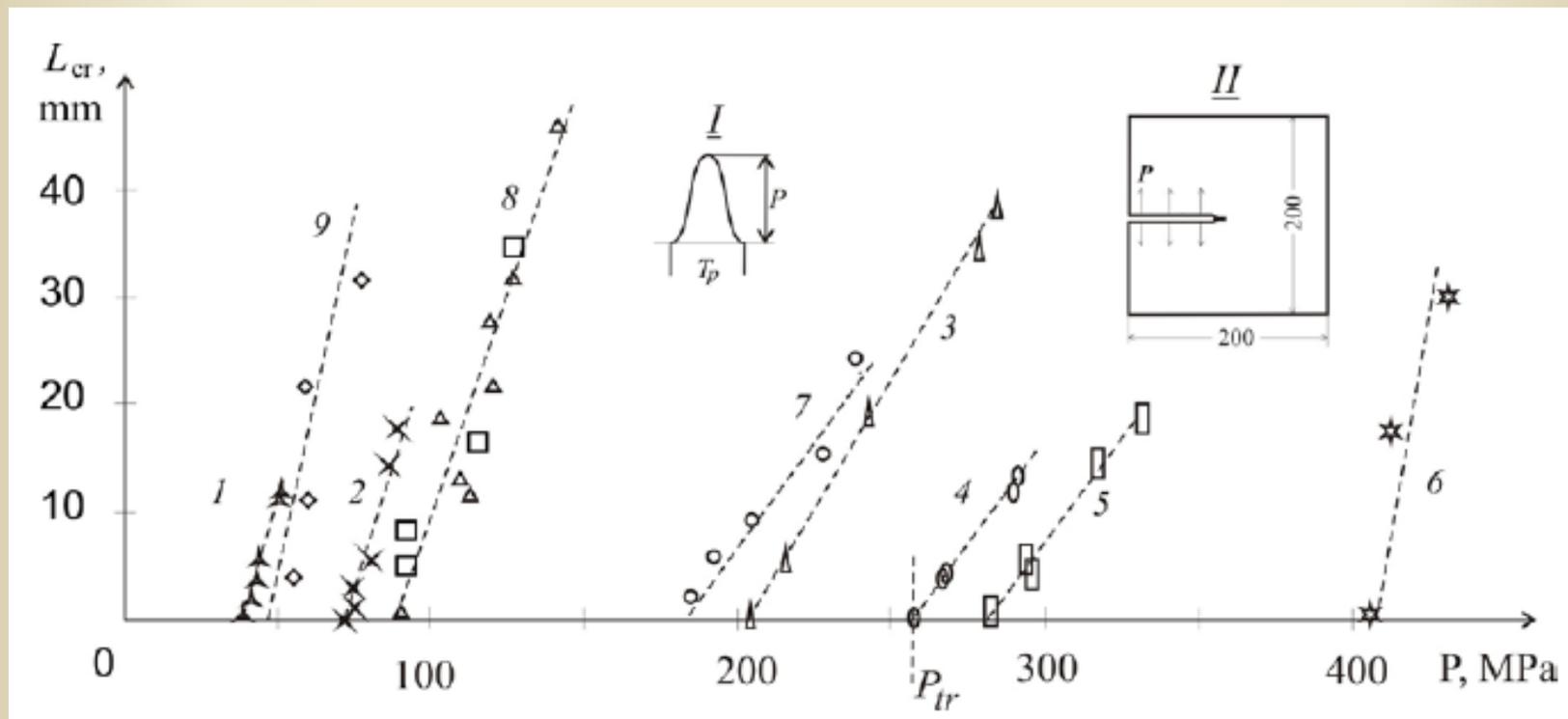
Данные по временной зависимости процесса динамического разрушения для всех исследованных материалов, представленные в координатах $\lg(\sigma_p/\sigma_c)$ и $\lg(T_p/\tau_L)$ близки к единой кривой.



**Зависимость
разрушающих
пороговых нагрузок от
длительности импульса
твердых тел при разных
способах динамических
нагрузений**

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

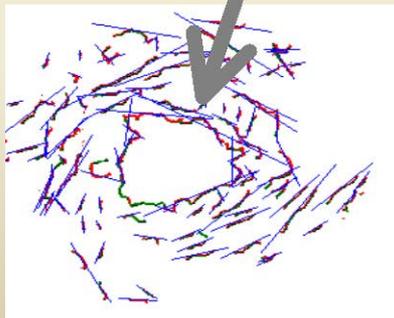
При $P > P_{tr}$ зависимость длины проросшей трещины от амплитуды импульса давления определенной длительности имеет вид

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

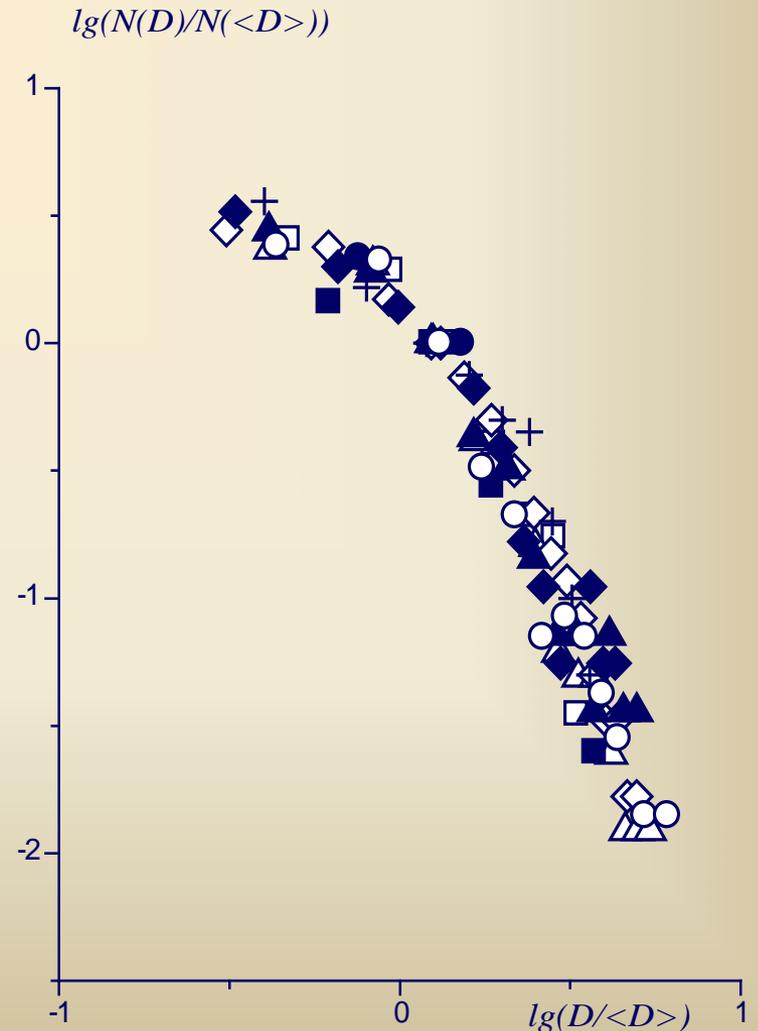
Данные, приведенные на предыдущих слайдах, показывают на проявление универсальных признаков релаксационных динамических процессов, протекающих в явлении динамического разрушения в микросекундном диапазоне неравновесных состояний.

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

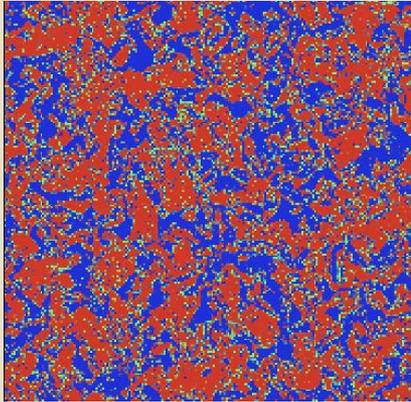
Структурирование полос скольжений кристаллической решетки вокруг центров разрушений и касательные к полосам скольжения



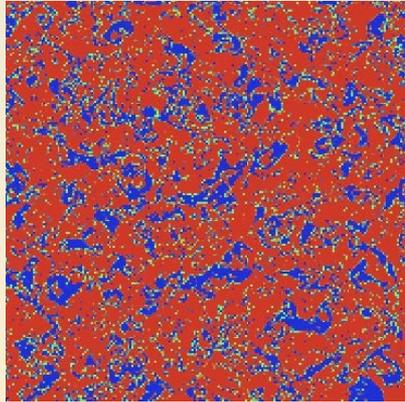
Распределение центров разрушения по размерам в Fe ($\Delta=4\cdot 10^{-4}m$) и Cu ($\Delta=10^{-3}m$) образцах



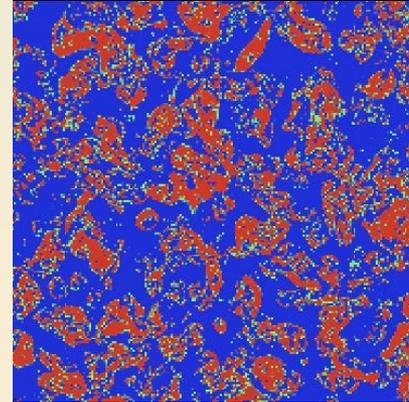
Растровые изображения картин гравитационного турбулентного перемешивания двух несжимаемых жидкостей разной плотности (три слоя на разной высоте от границы раздела жидкостей $h_1 < h_2 < h_3$)



h_1

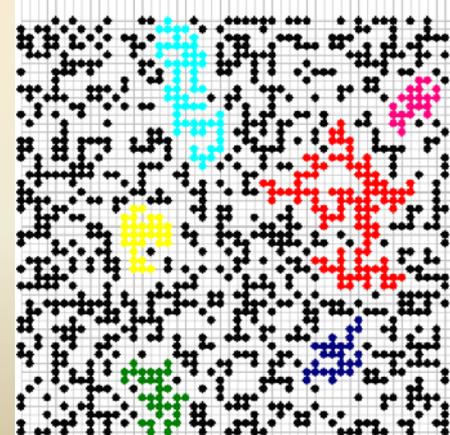
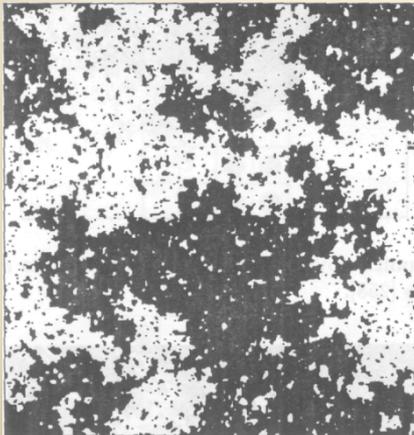


h_2

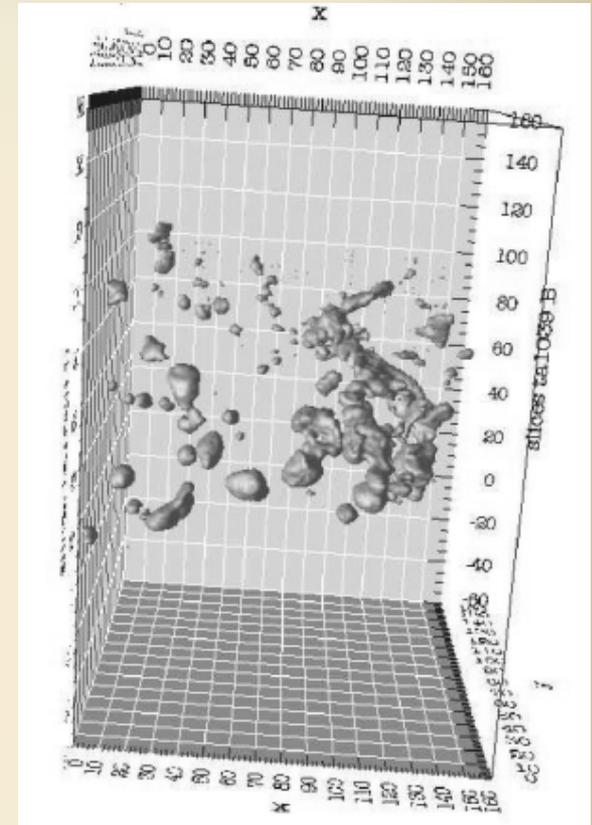
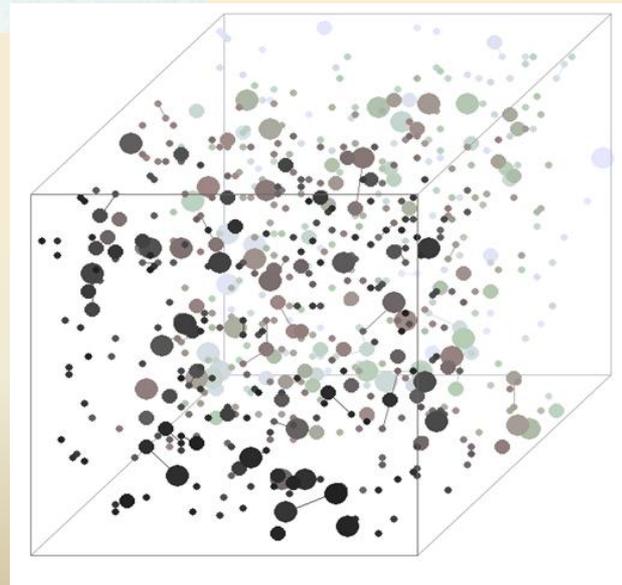
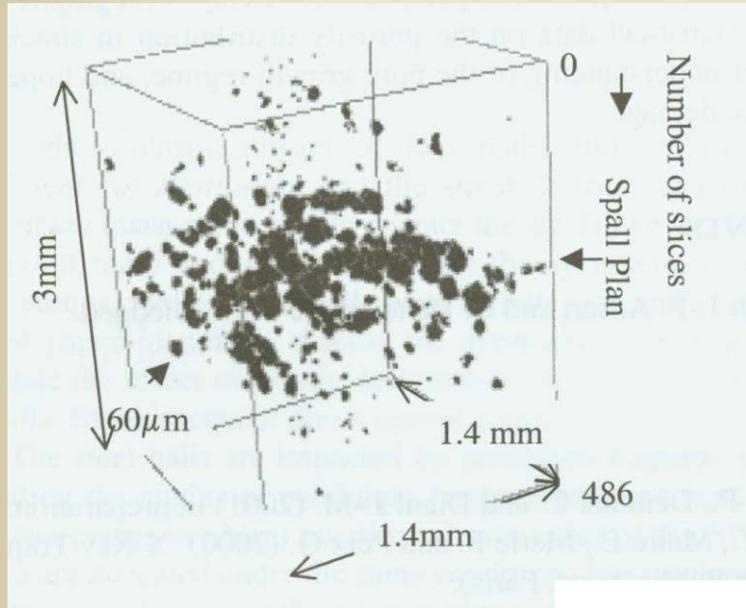


h_3

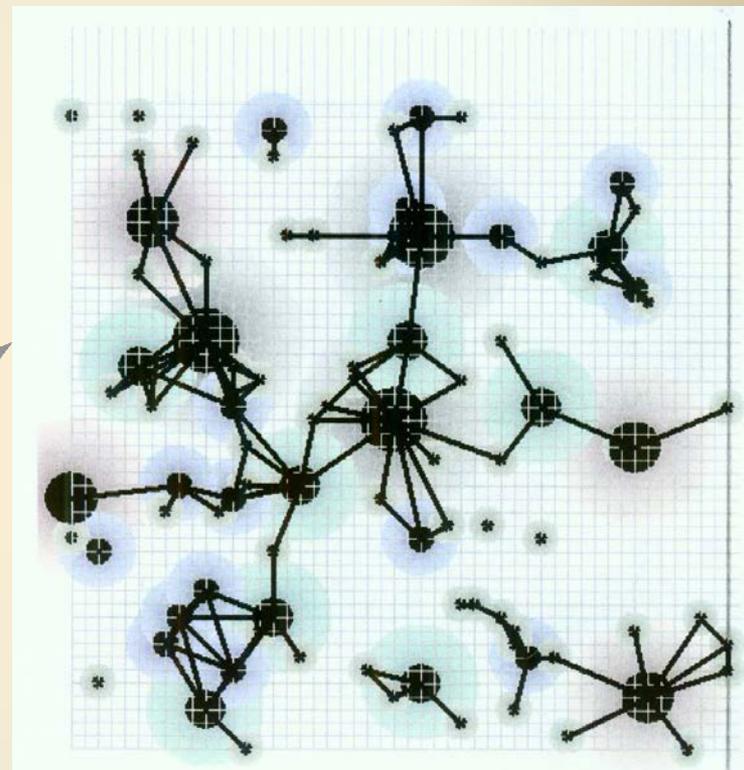
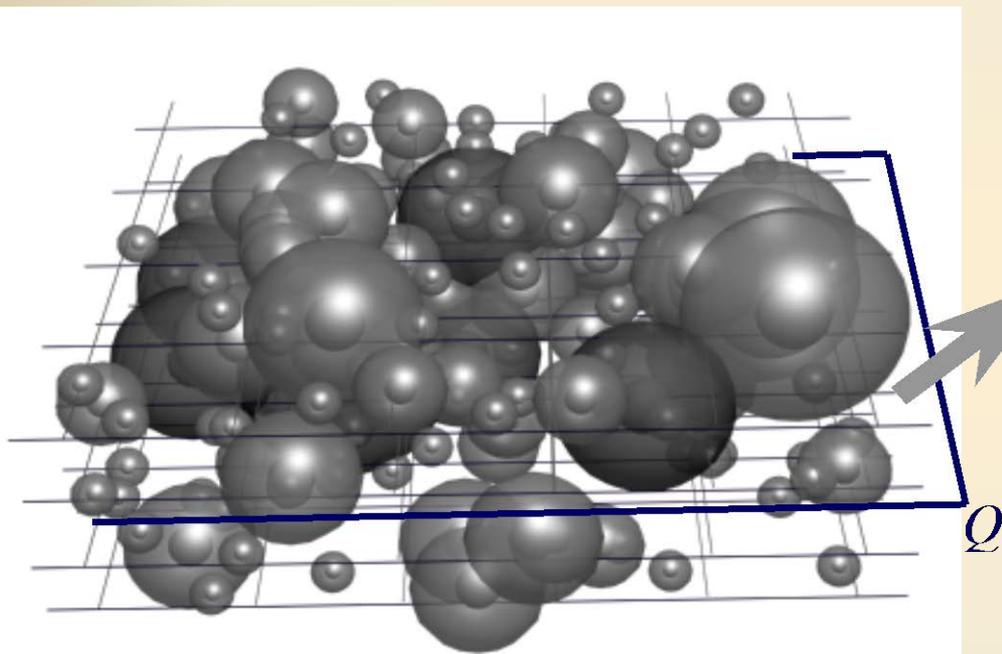
Примеры подобия возникновения бесконечных кластеров различной природы вблизи критической точки



**Восстановленная трехмерная область разрушения в медном образце (а);
трехмерная визуализация восстановленного танталового образца (б);
объемный перколяционный кластер (модельный расчет) (в)**

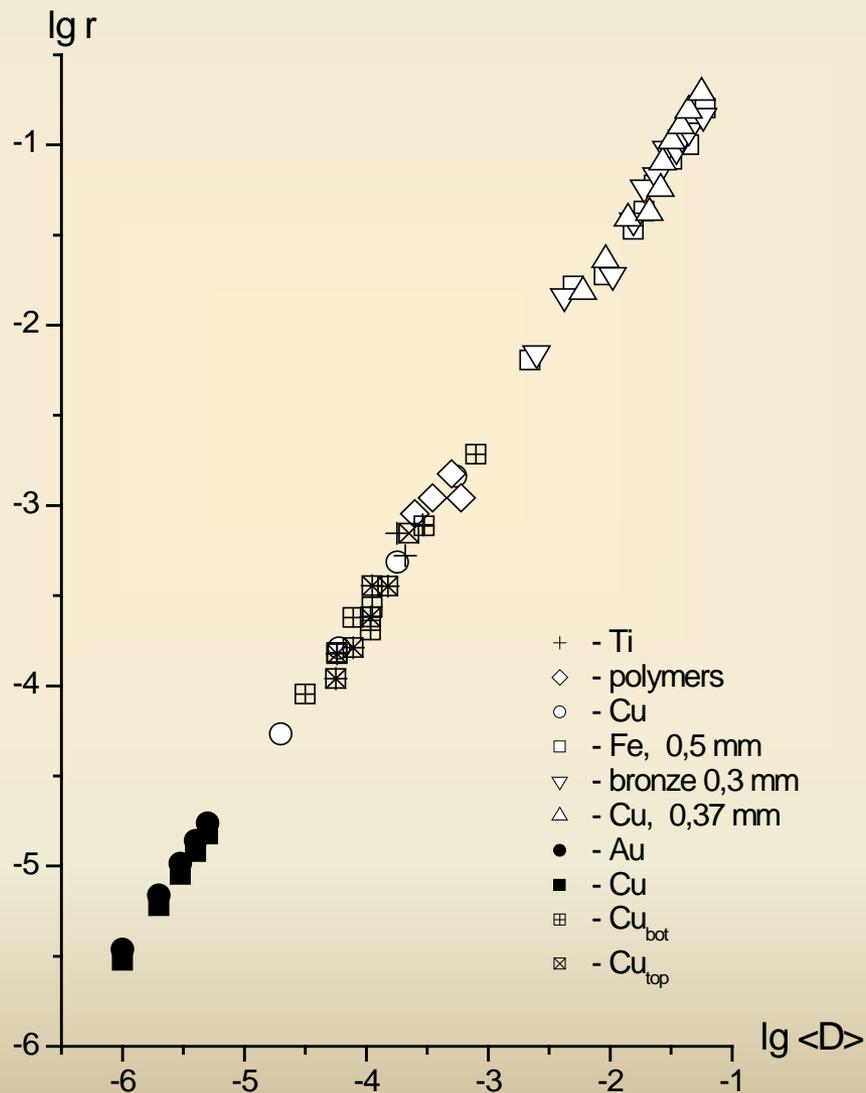


Объемный перколяционный кластер каскада центров разрушения (а); перколяционный компьютерный шлиф, который получен сечением плоскостью Q объемного (б)



Зависимость среднего расстояния $r=N^{-1/3}$ между элементами диссипативных структур от их среднего размера $\langle D \rangle$.

Размеры r и $\langle D \rangle$ даны в см.



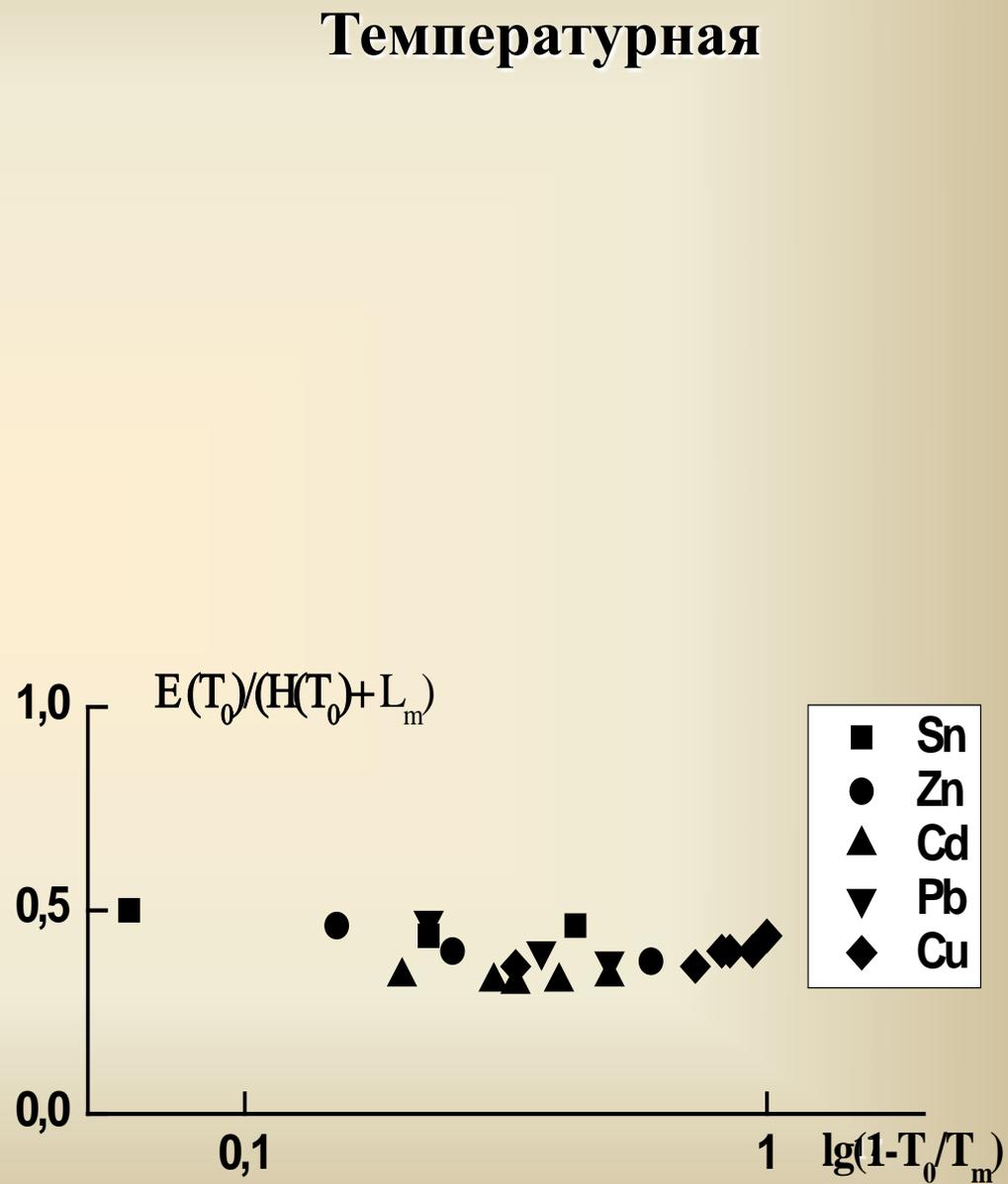
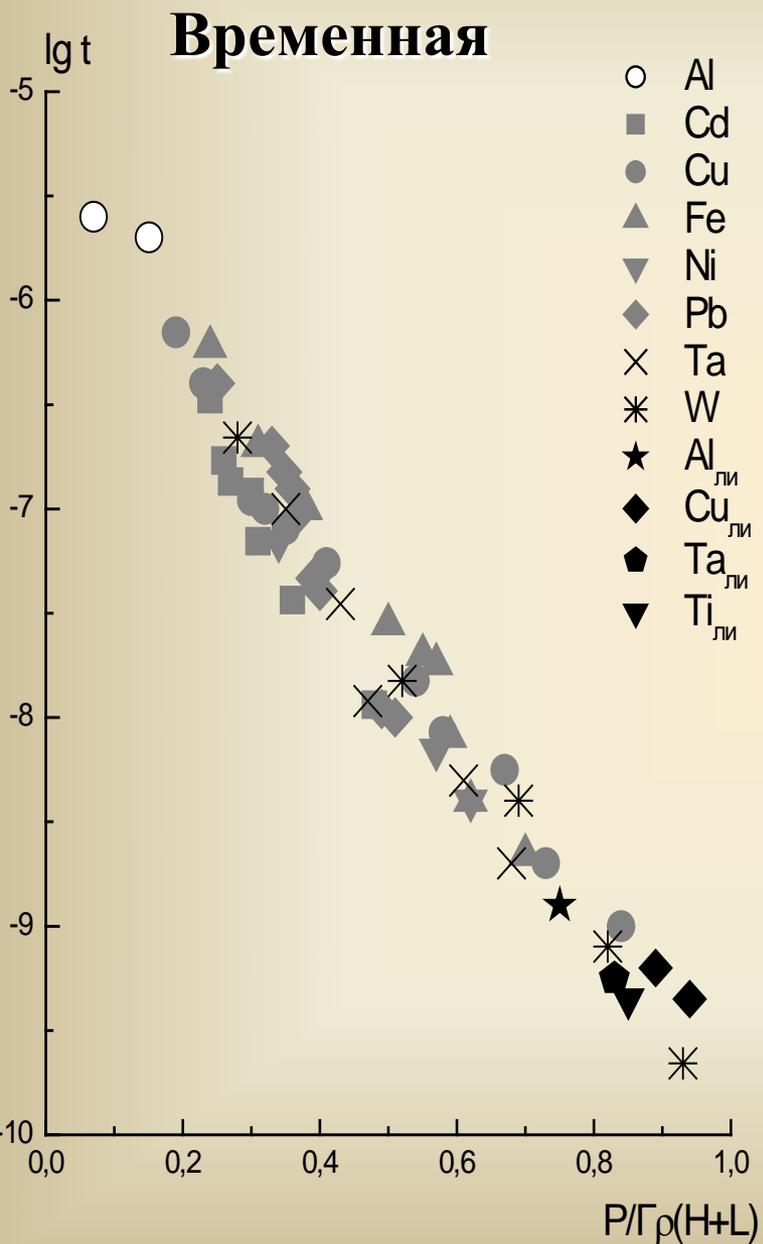
Временная зависимость критического давления и
долговечности

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

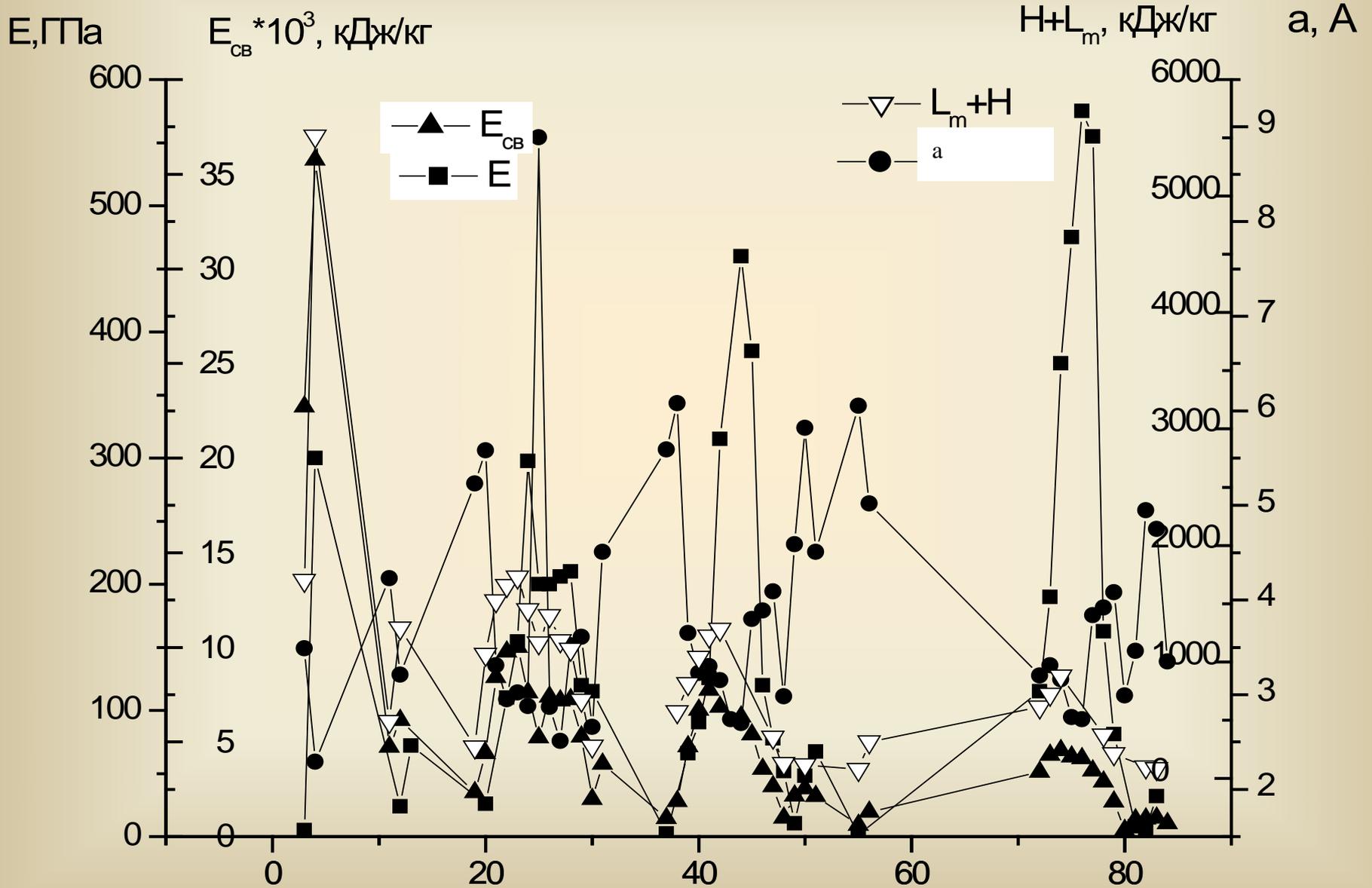
$$\left(\frac{P}{H + L} \right)^\gamma t = \text{const} \quad \left(\frac{P}{H + L} \right) = I(P)$$

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:

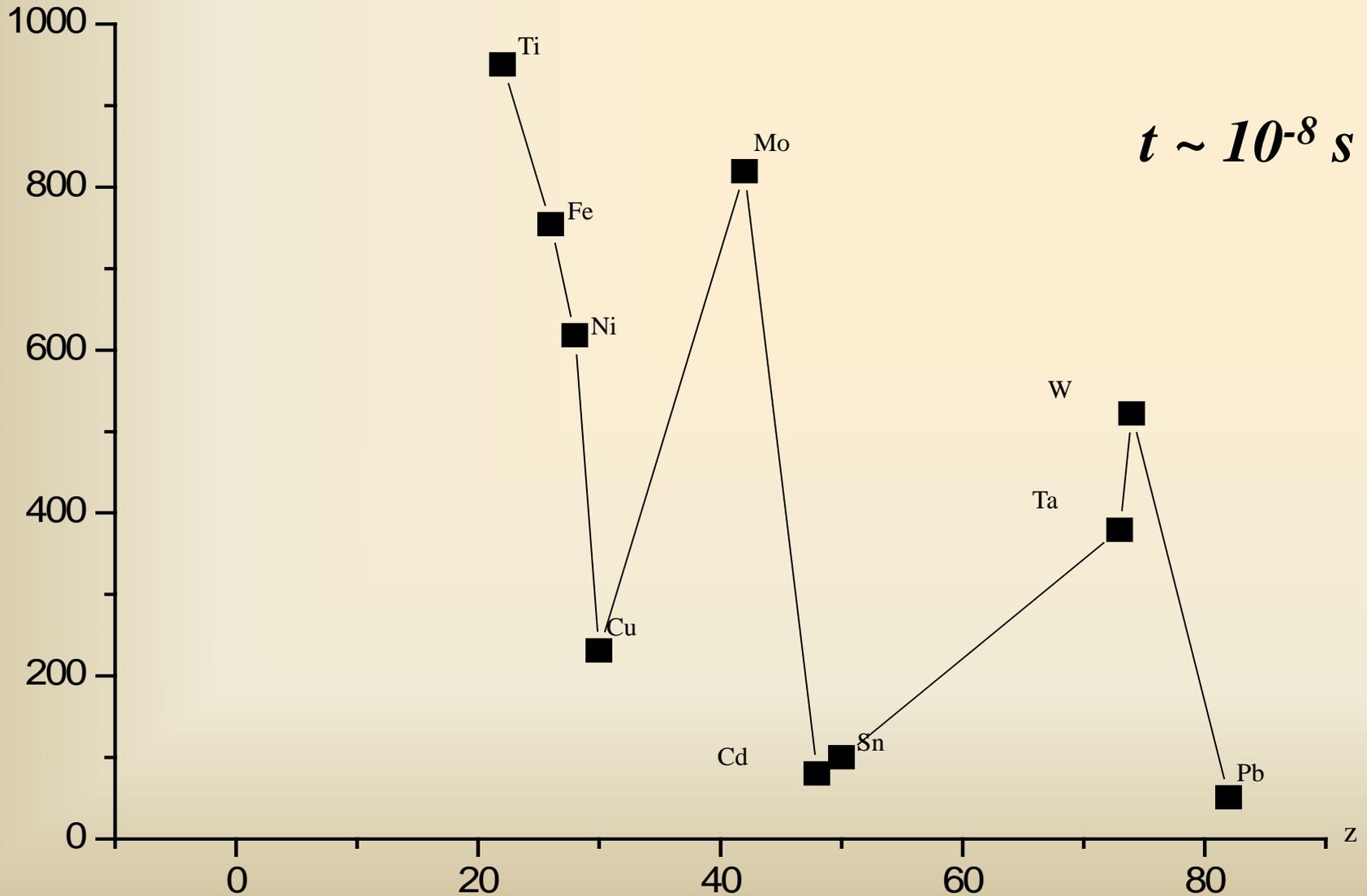


Зависимость физических параметров от порядкового номера металла Z

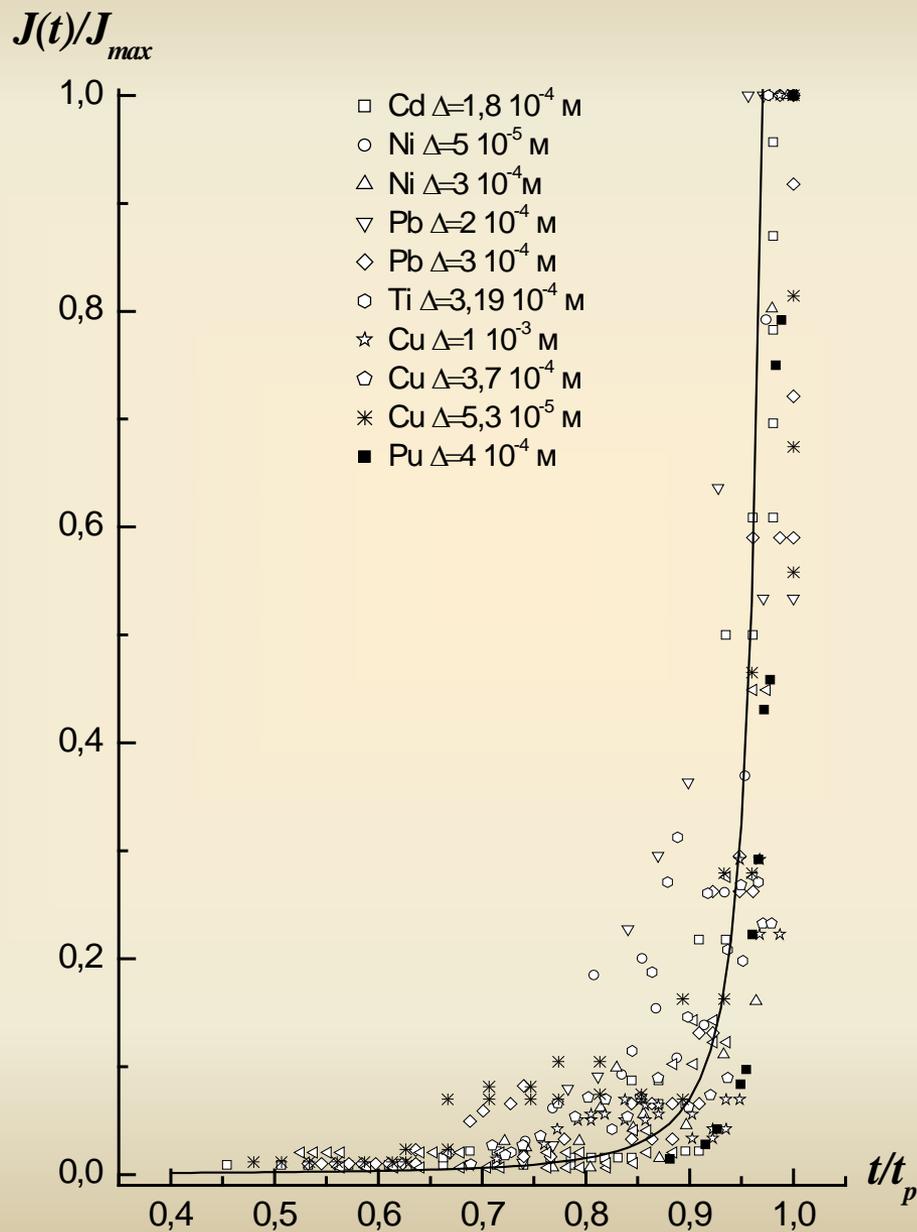


Зависимость критического давления, приводящего к разрушению ряда металлов, от порядкового номера при долговечности $t \sim 10^{-8} s$

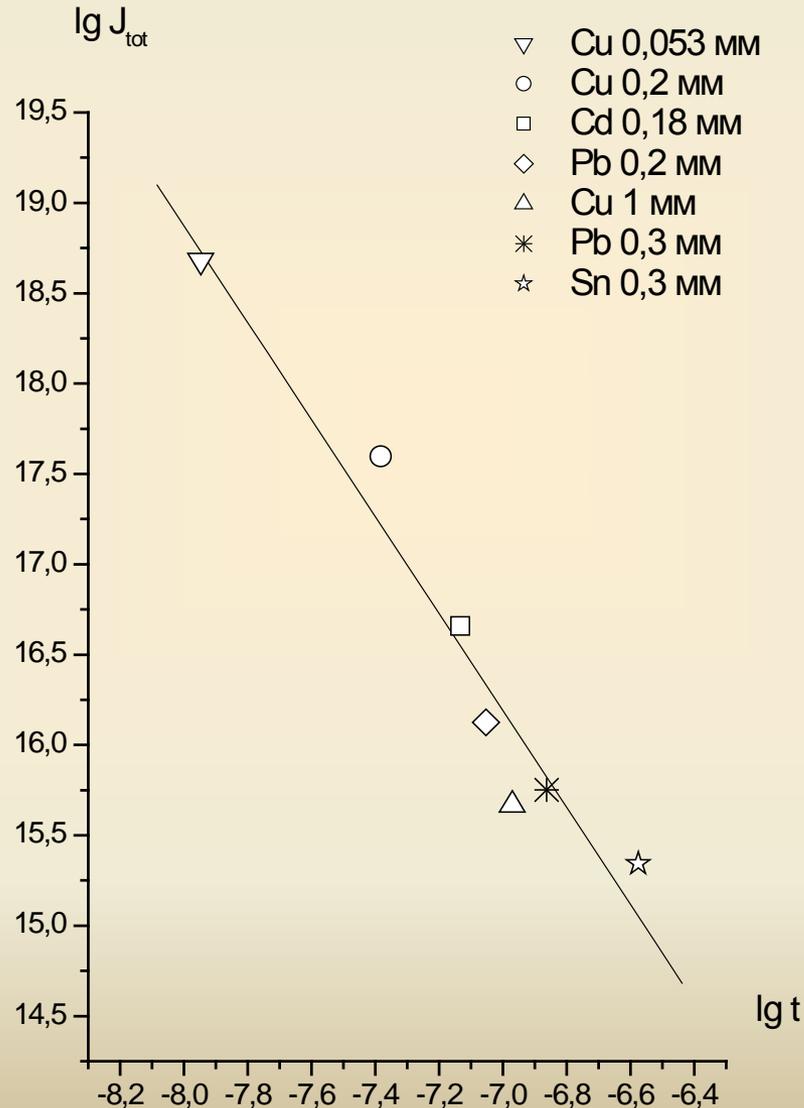
$E_{кр}$, Дж/г



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



Зависимость максимальной скорости центрообразования от времени разрушения (долговечности) для ряда исследованных металлов



$$J(t) \sim t^{-2,5}$$

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

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

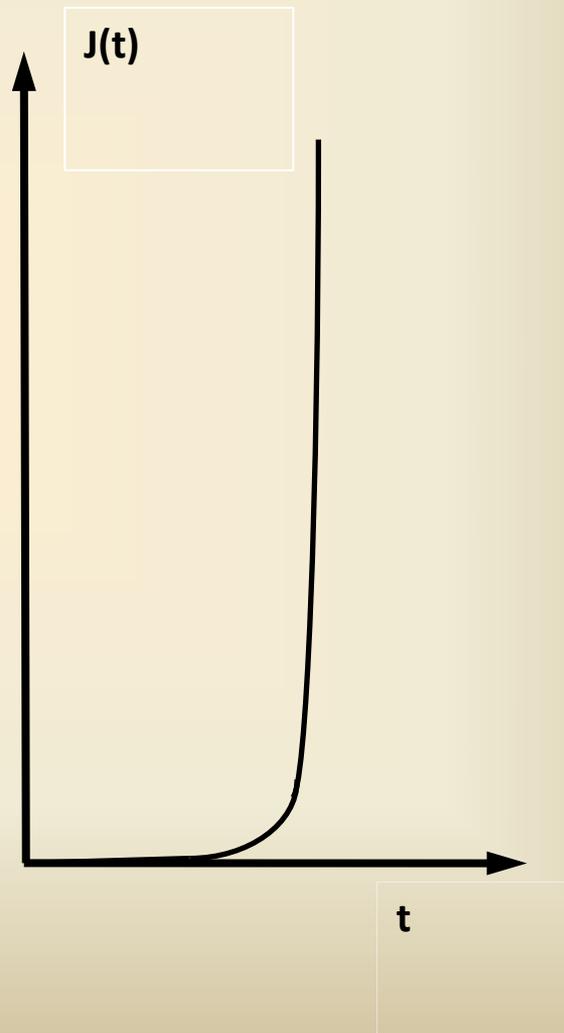
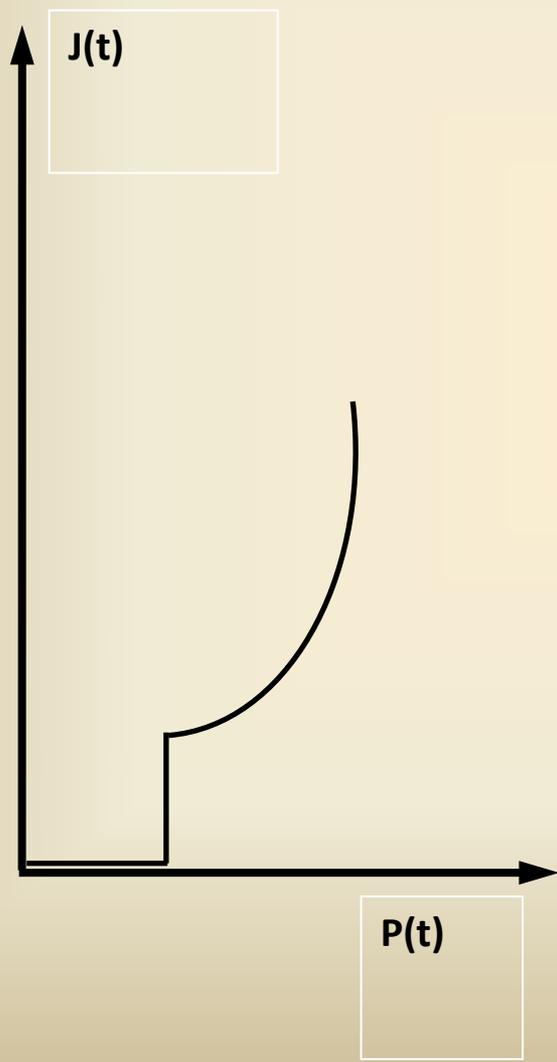
$$J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{-2,2}$$

where A, B – const

Основные выражения модели NAG и иерархической релаксационной модели

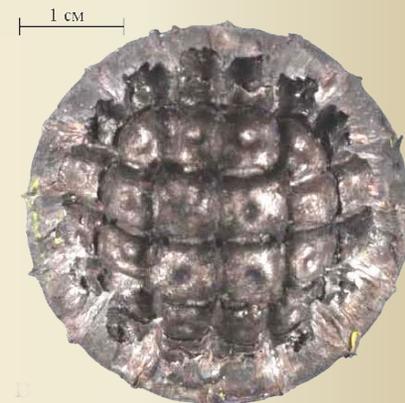
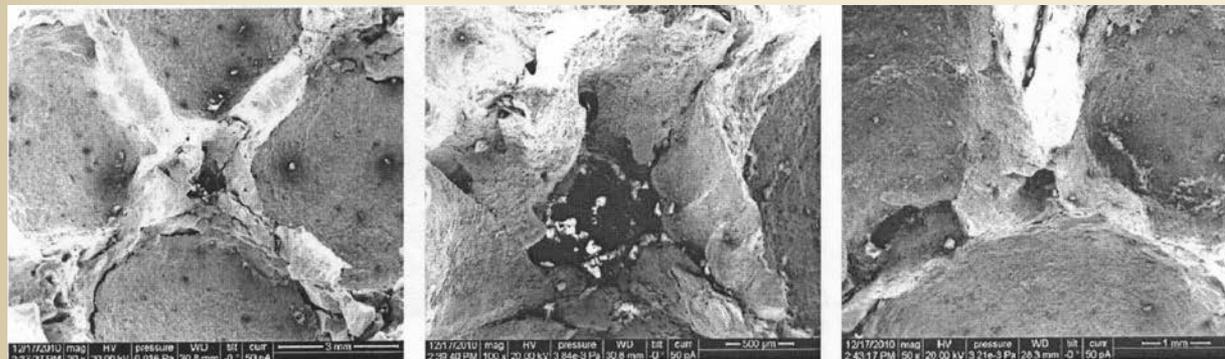
| Параметр | Модель NAG | Иерархическая релаксационная модель |
|--|--|--|
| Распределение центров разрушения по размерам | $N(R) = N_0 \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right)$ | $N(D) = \frac{N(\bar{D})}{\bar{D}^{-\alpha}} D^{-\alpha}, \quad \alpha \sim 1,6$ |
| Скорость центрообразования | $\dot{N} = \dot{N}_0 \exp\left(\frac{P_S - P_H}{P_I}\right) \cdot \mathcal{G}(P_S - P_H),$ <p>P_S, P_H, P_I – параметры, \mathcal{G} - функция Хевисайда</p> | $J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{-2,2}$ |
| Скорость центров разрушения | $\frac{dR}{dt} = A \cdot R$ | $\frac{dD}{dt} \sim C_R, \quad C_R - \text{скорость Релея}$ |

Скорость центрообразования в модели NAG (а) и релаксационной иерархической модели (б) разрушения конструкционных материалов

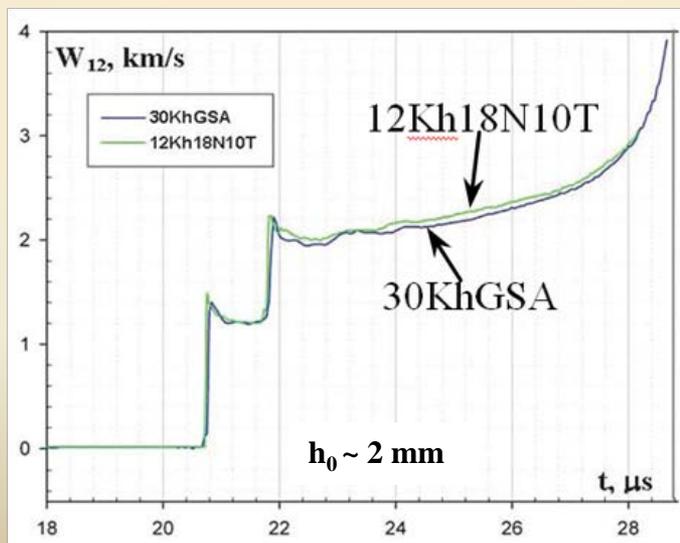


Стальной образец ($\Delta = 2\text{ мм}$) после квазисферического обжатия
а – электронный микроскоп; б – оптический микроскоп

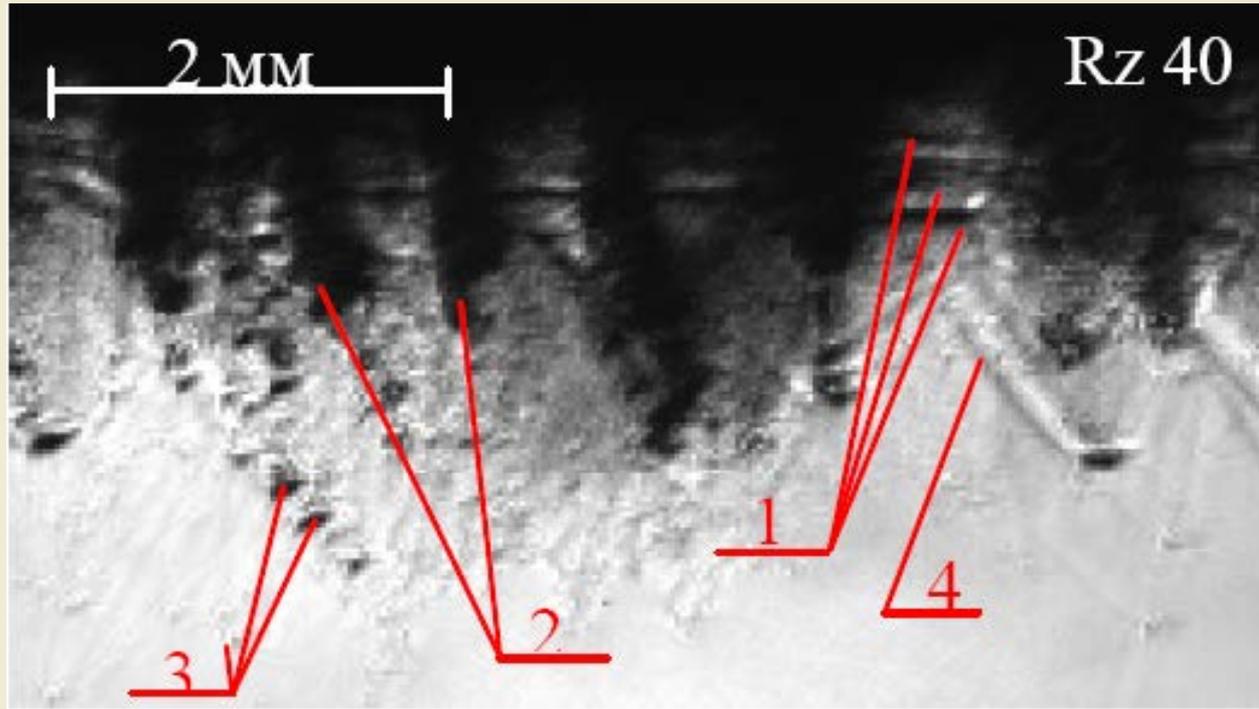
Вид внутренней границы оболочки после нагружения. 12X18H10T $\Delta_{06} \sim 2\text{ мм}$



Скорость внутренней границы оболочек из сталей 12X18H10T и 30ХГСА



**Выброс частиц со свободной поверхности свинцового образца
(шероховатость Rz40) после выхода УВ на свободной поверхности –
в момент времени 3,8 мкс**



- 1 – отколы;
- 2 – микроструи;
- 3 – частицы;
- 4 – УВ в воздухе

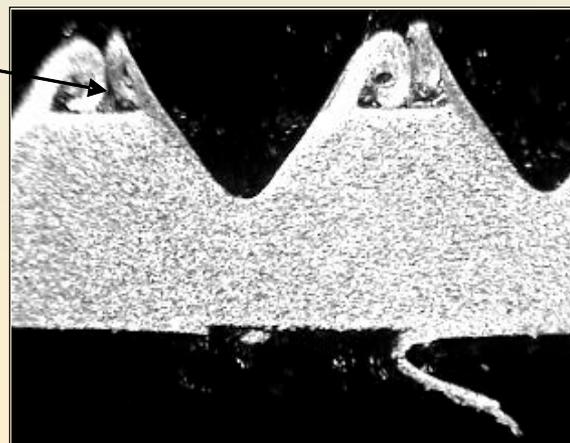
Вид разрушенных пирамидок (а); шлиф медного образца после воздействия РЭП (б); продукты диспергирования на преграде (в); вид диспергированных частиц металла на подложке (г); грань медной пирамидки (x200) (д)



x45

а

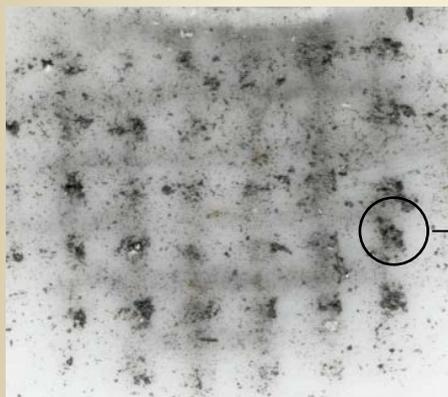
Область
кумулятивных
выбросов



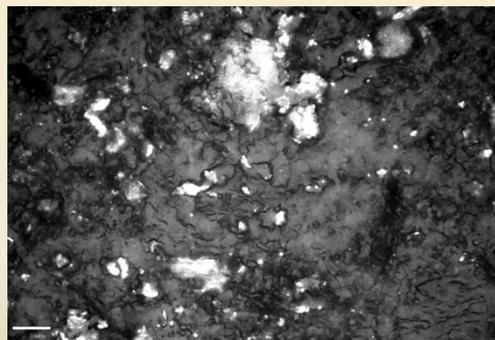
x40

↑
откольный слой
направление воздействия

б

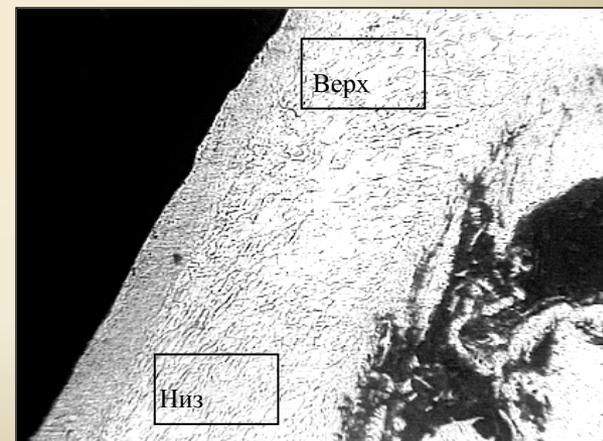


в



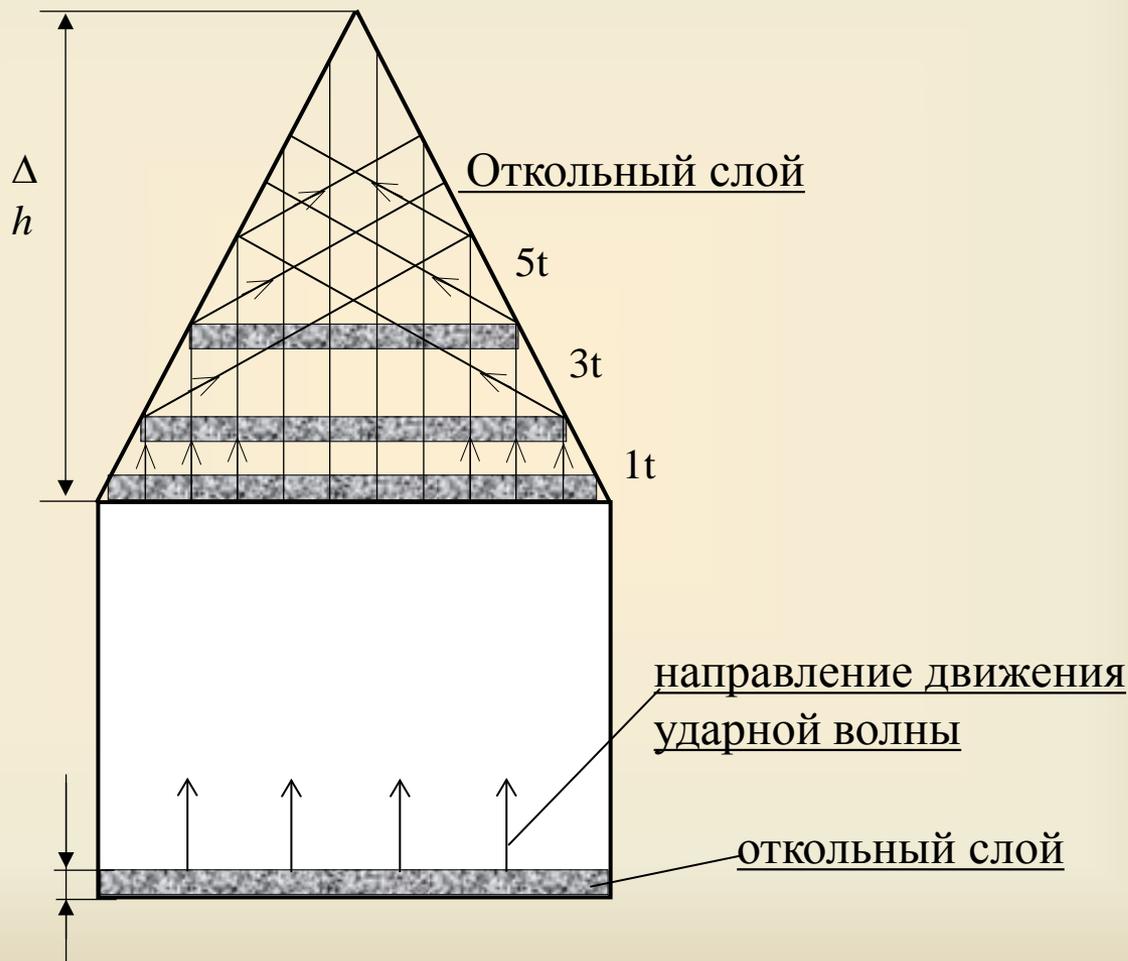
10 μm

г

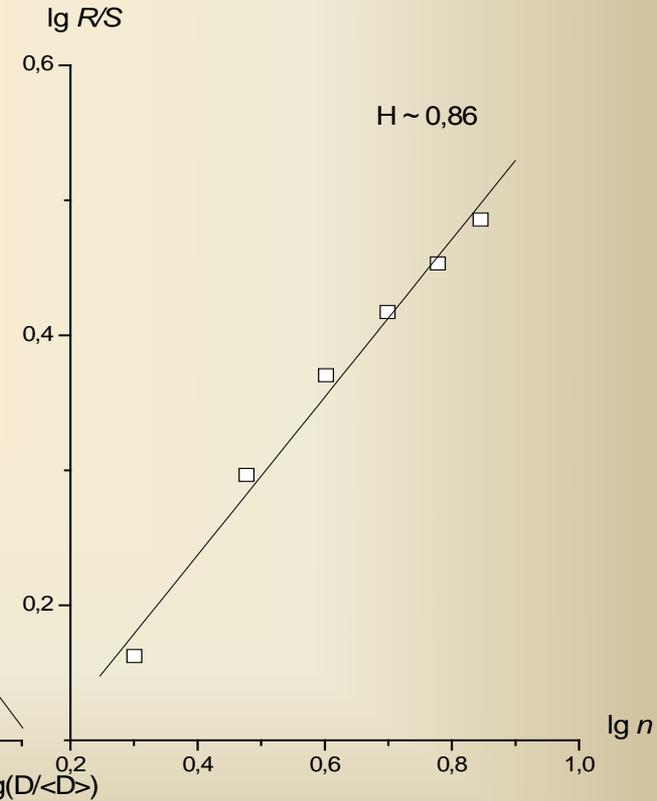
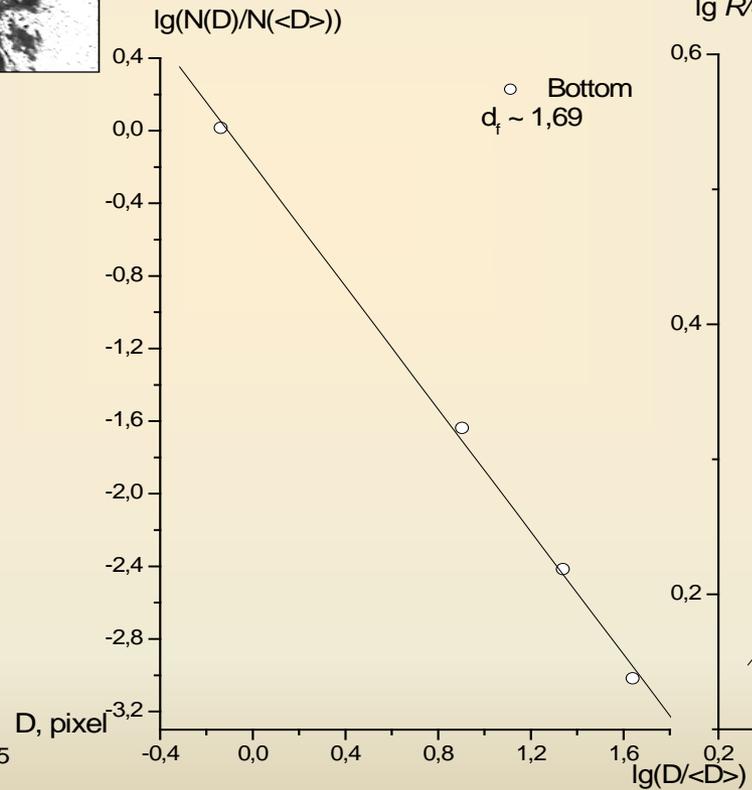
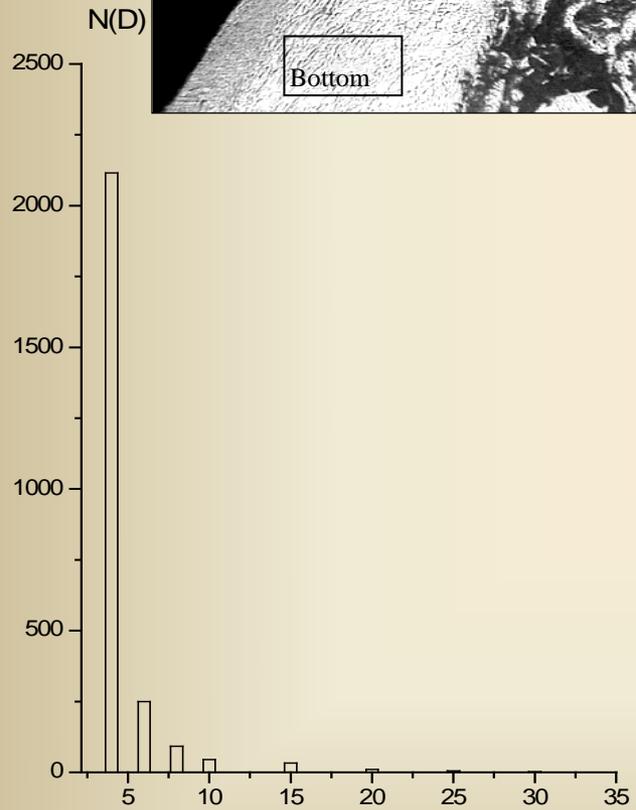
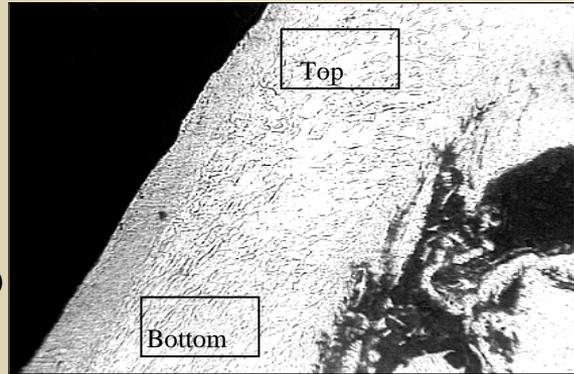


д

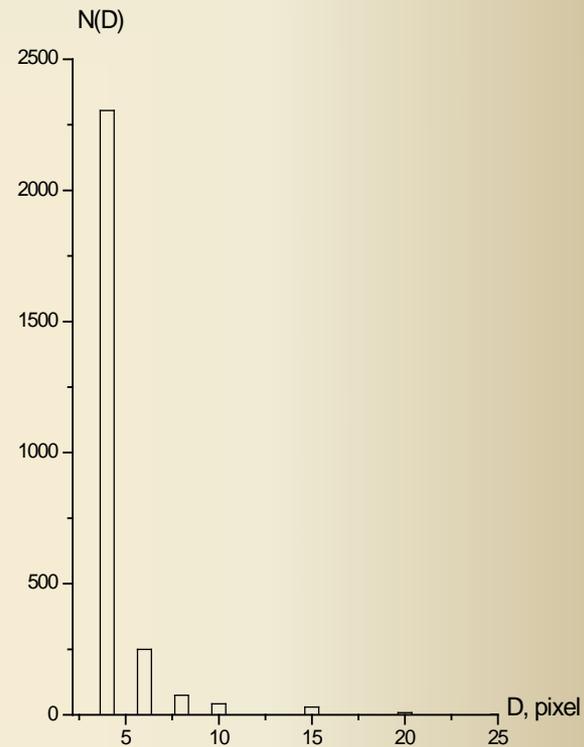
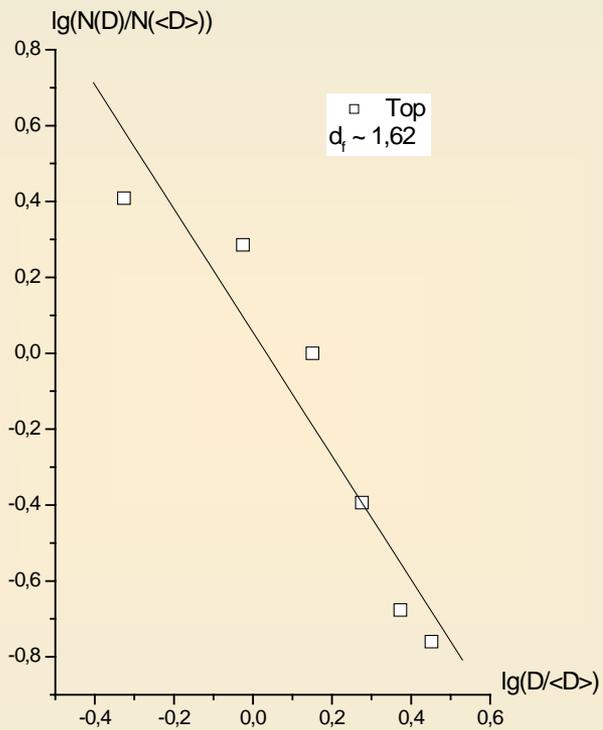
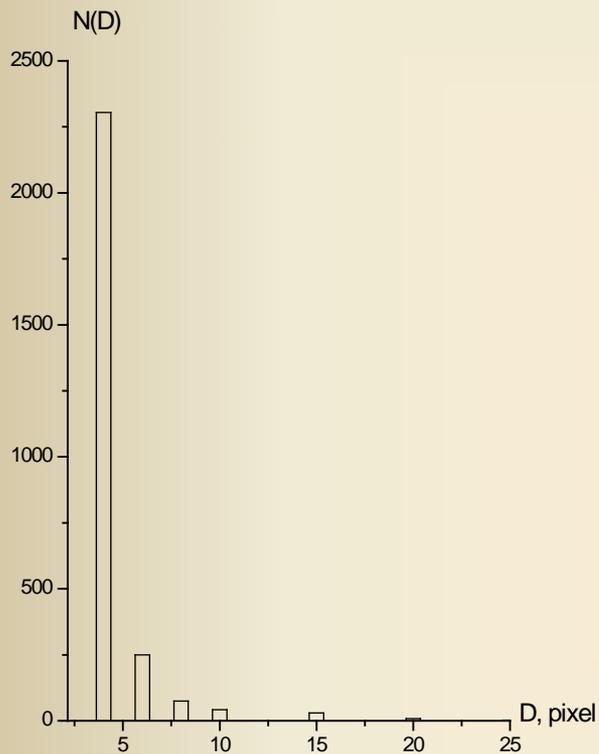
Схема движения ударных волн в объеме пирамидки



Внешний вид грани медной пирамидки и математическая обработка нижней части медной пирамидки



Математическая обработка верхней части медной пирамидки



Энергетические параметры металлов

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

1) Геометрическое подобие.

$$x' = cx, y' = cy, z' = cz,$$

где c – множитель геометрического подобия.

2) Подобие полей.

$\varphi(x, y, z)$ (поле температуры, концентрации, потенциала).

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

3) Подобие процессов

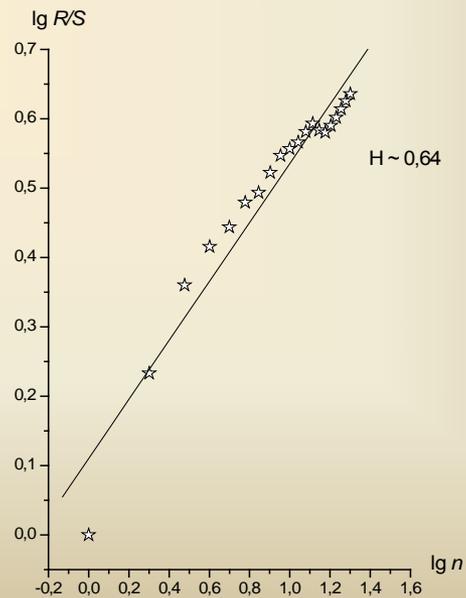
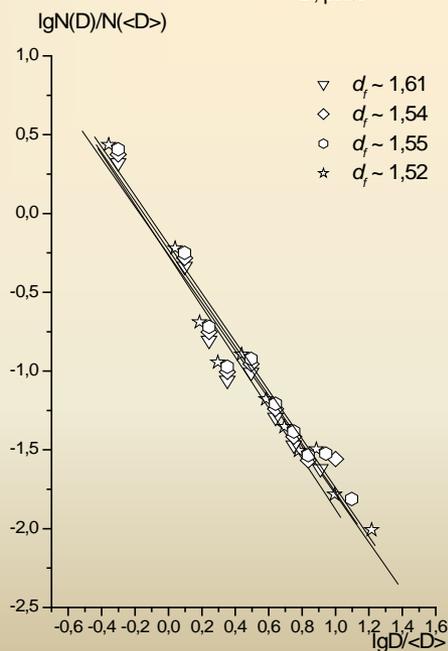
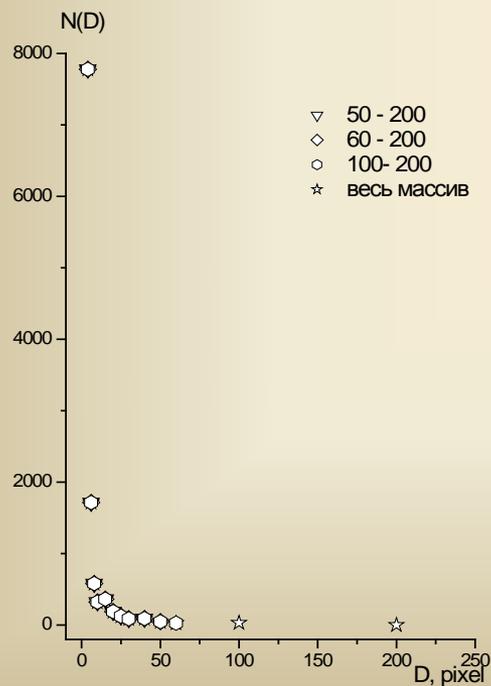
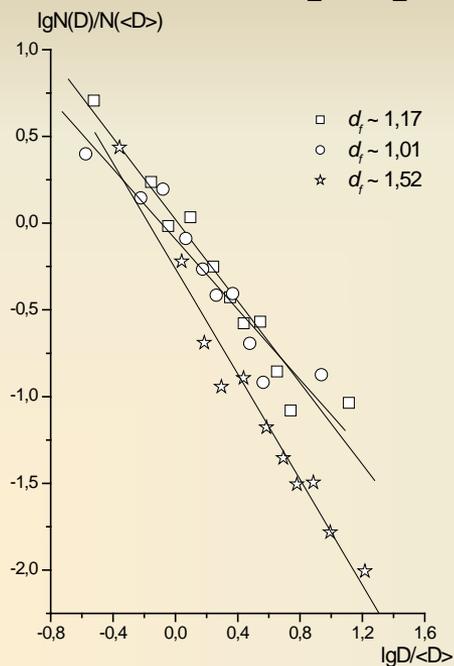
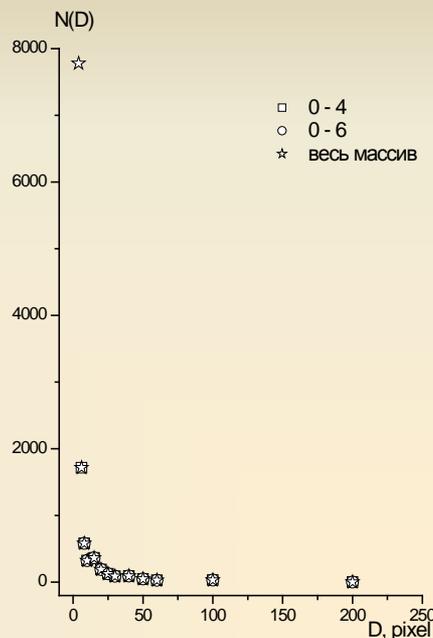
$$\tau' = c_\tau \cdot \tau$$

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

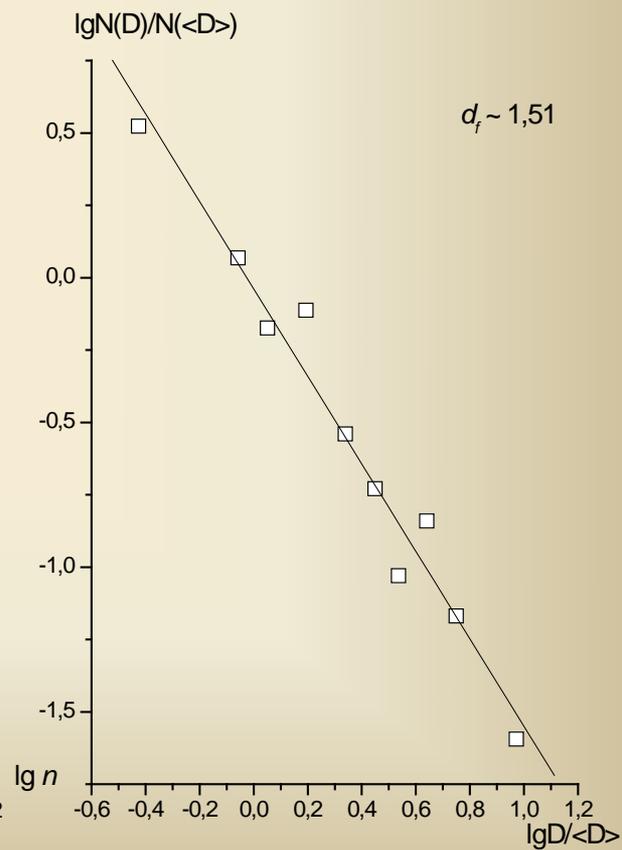
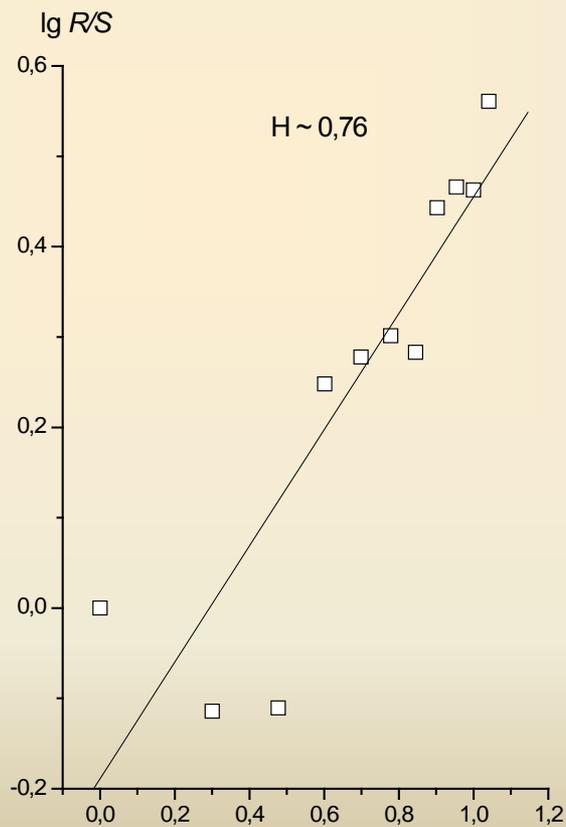
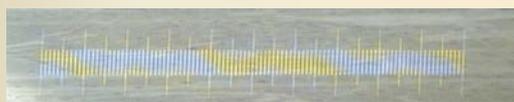
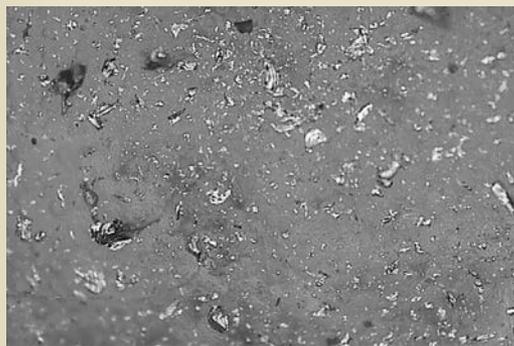
для x', y', z', τ' и x, y, z, τ связаны соотношением

$$x' = cx, y' = cy, z' = cz, \tau' = c_\tau \cdot \tau$$

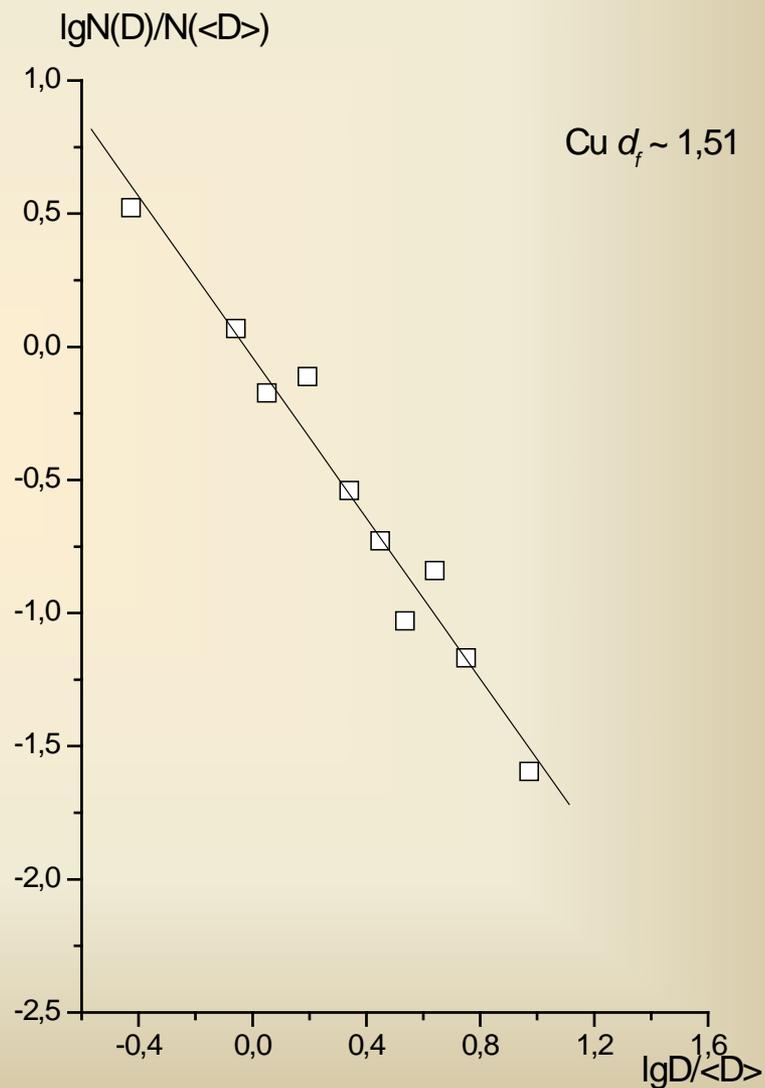
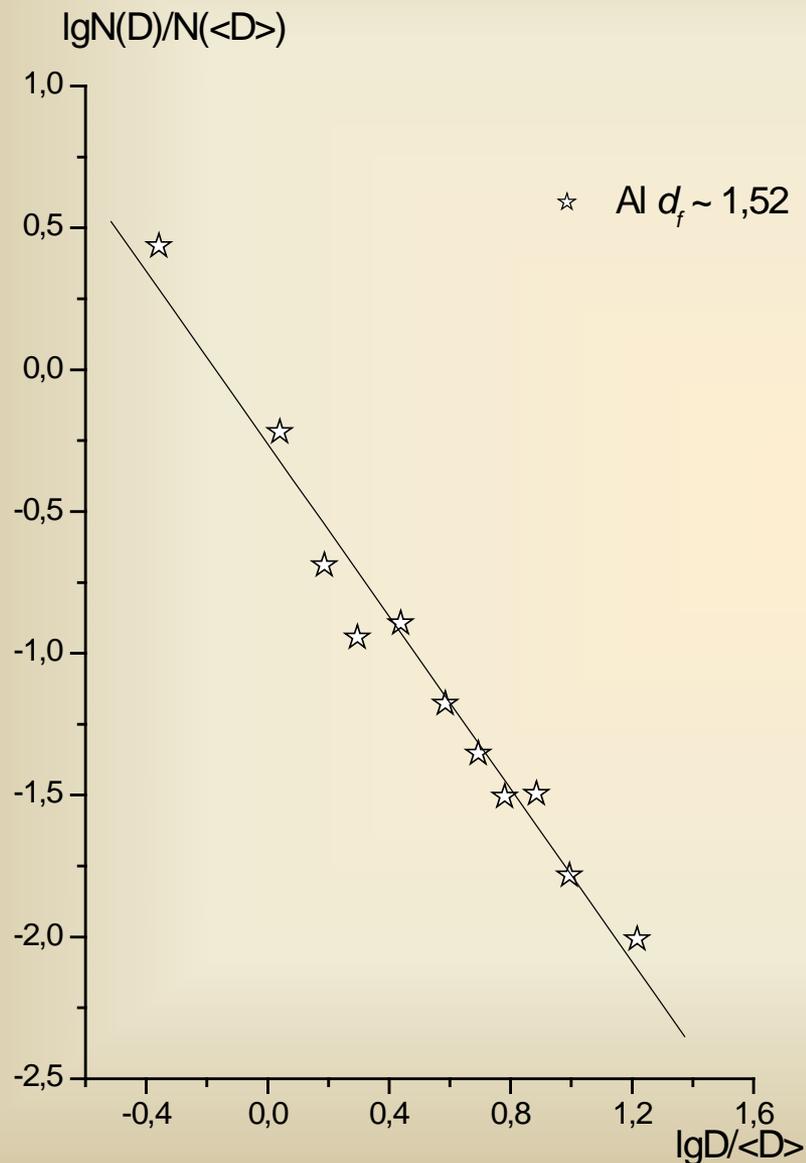
Внешний вид диспергированных частиц из пирамидки (Cu, угол раствора $\alpha \sim 60^\circ$) и результаты математической обработки диспергированных частиц



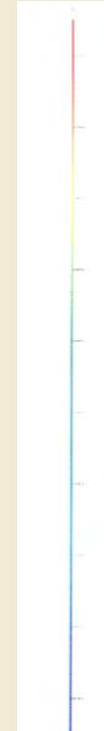
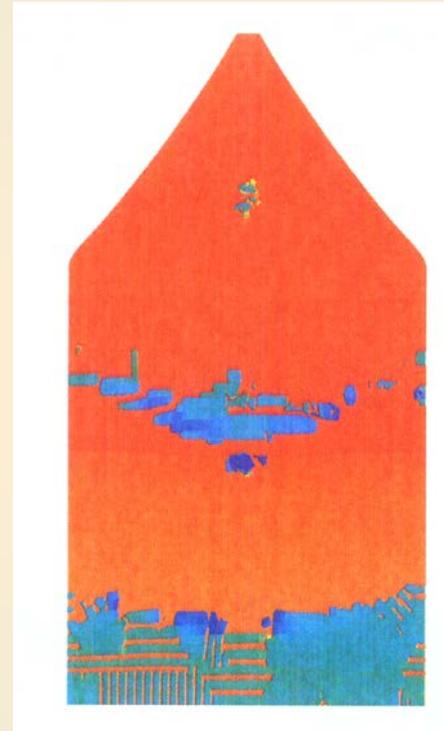
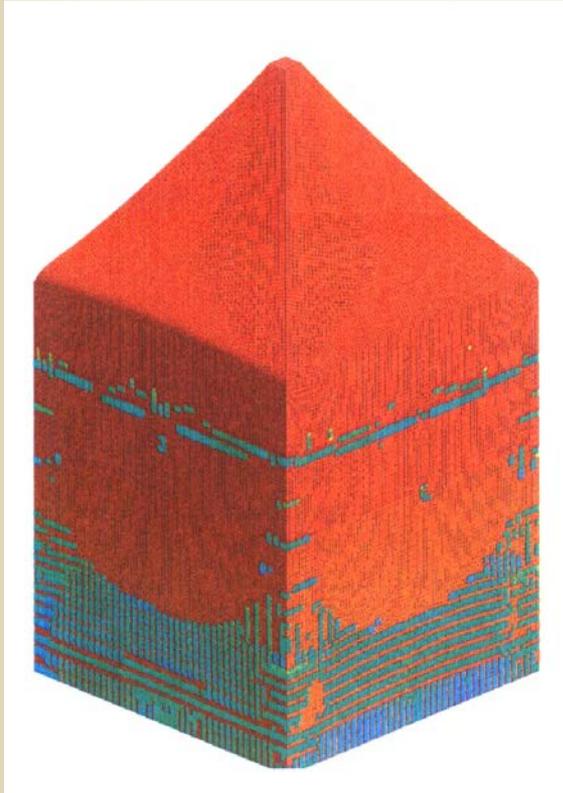
Внешний вид области подложки из полиэтилена и результаты математической обработки диспергированных частиц



Результаты математической обработки (d_f) диспергированных частиц из пирамидки (Al и Cu, угол раствора $\alpha \sim 60^\circ$)

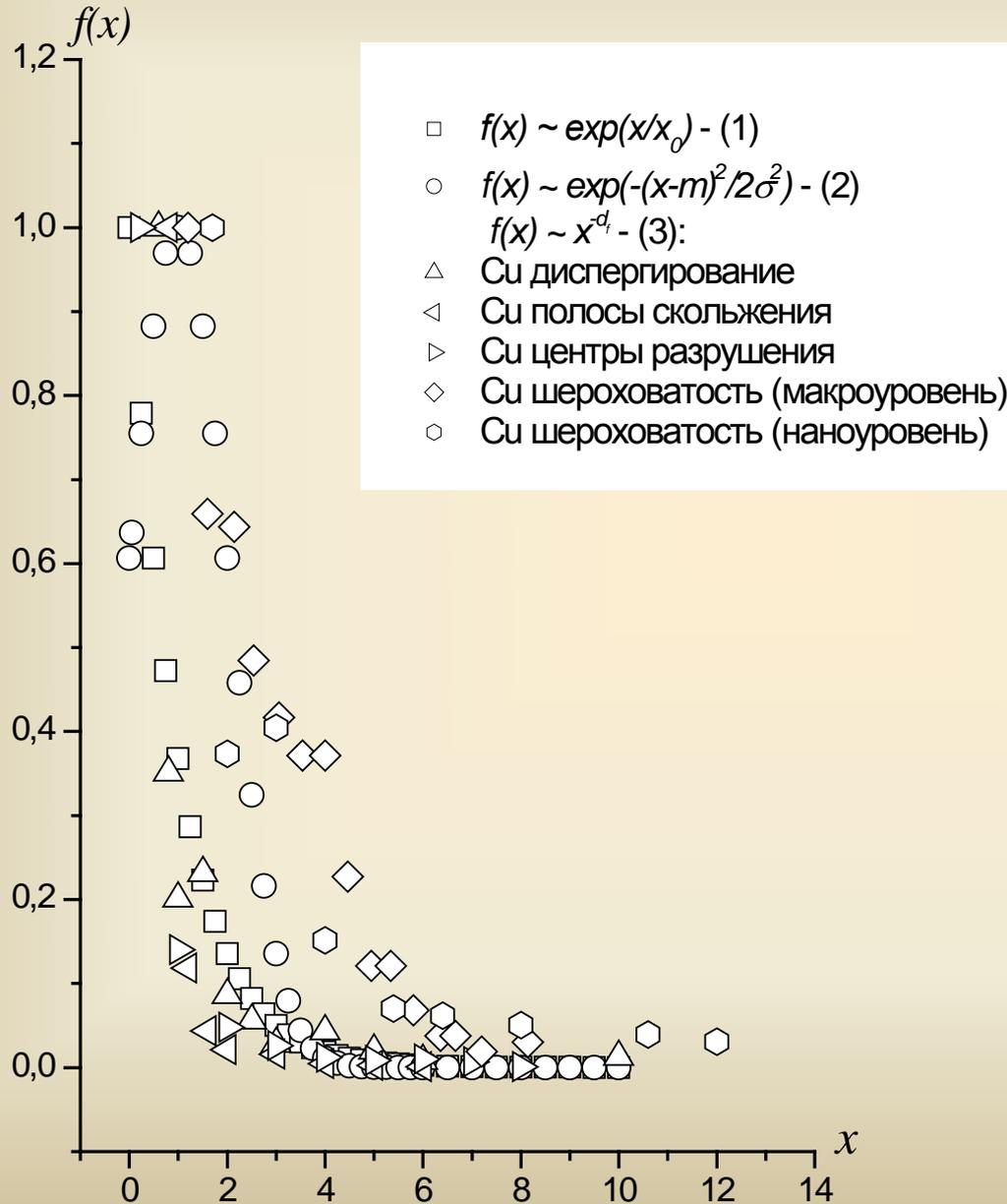


**Распределение плотности (а); в осевом сечении – (б).
Расчет 3D с использованием откольного разрушения.
Время 3 мкс**

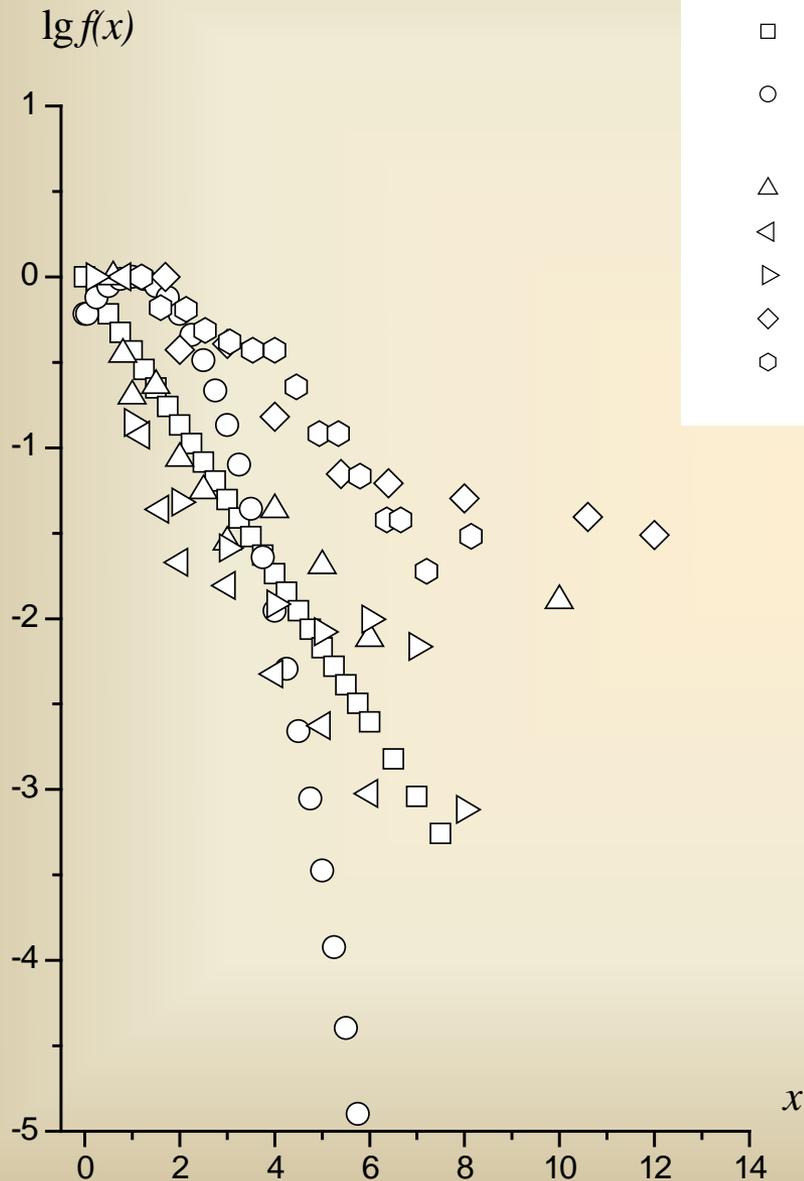


Синий цвет – практически нулевая плотность,
зеленый цвет – пористая среда.

Распределение вероятностей величин, характеризующие различные физические процессы

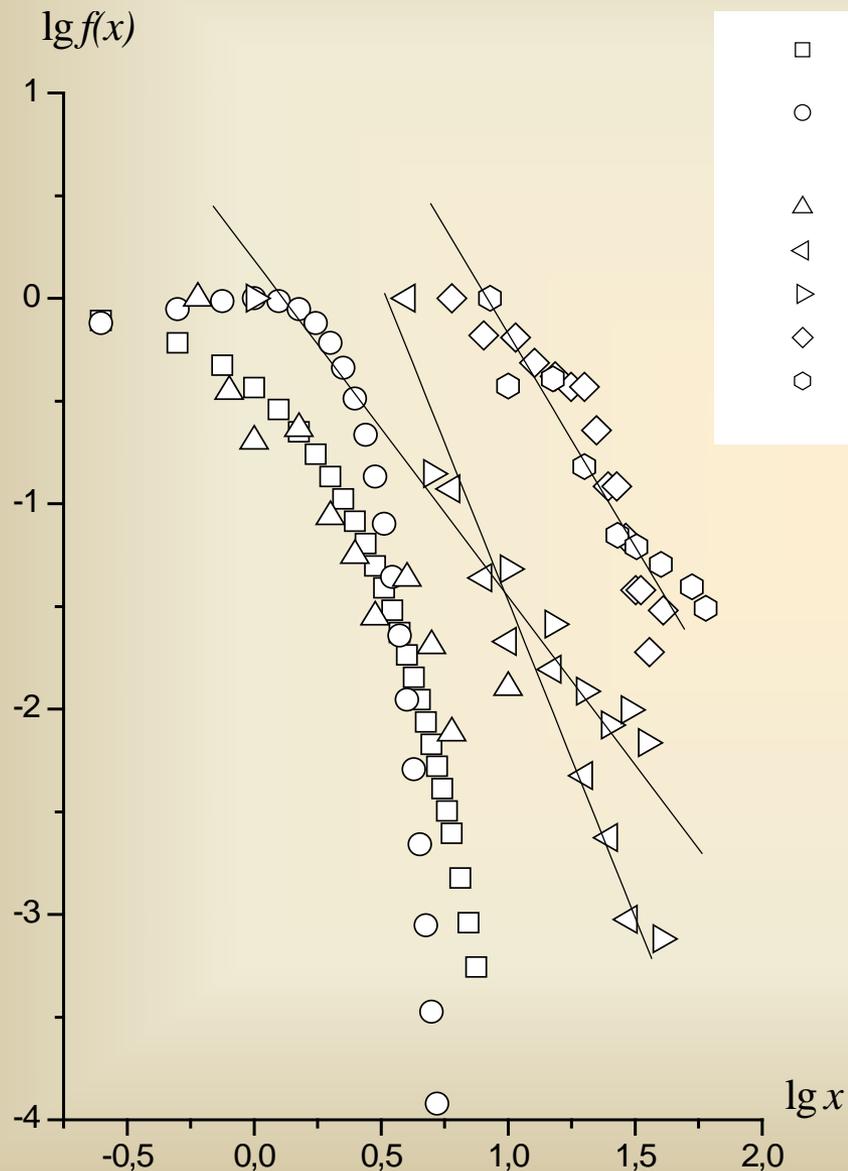


Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в полулогарифмическом масштабе



- $f(x) \sim \exp(x/x_0) - (1)$
- $f(x) \sim \exp(-(x-m)^2/2\sigma^2) - (2)$
- $f(x) \sim x^{-d} - (3):$
- △ Си диспергирование
- ◁ Си полосы скольжения
- ▷ Си центры разрушения
- ◇ Си шероховатость (макроуровень)
- ◊ Си шероховатость (наноуровень)

Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в двойном логарифмическом масштабе



- \square $f(x) \sim \exp(-x/x_0) - (1)$
- \circ $f(x) \sim \exp(-(x-m)^2/2\sigma^2) - (2)$
- $f(x) \sim x^{-d_i} - (3):$
- \triangle Si диспергирование
- \triangleleft Si полосы скольжения
- \triangleright Si центры разрушения
- \diamond Si шероховатость (макроуровень)
- \hexagon Si шероховатость (наноуровень)

Для построения графика нормального распределения среднее значение 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 масштабнo-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 .

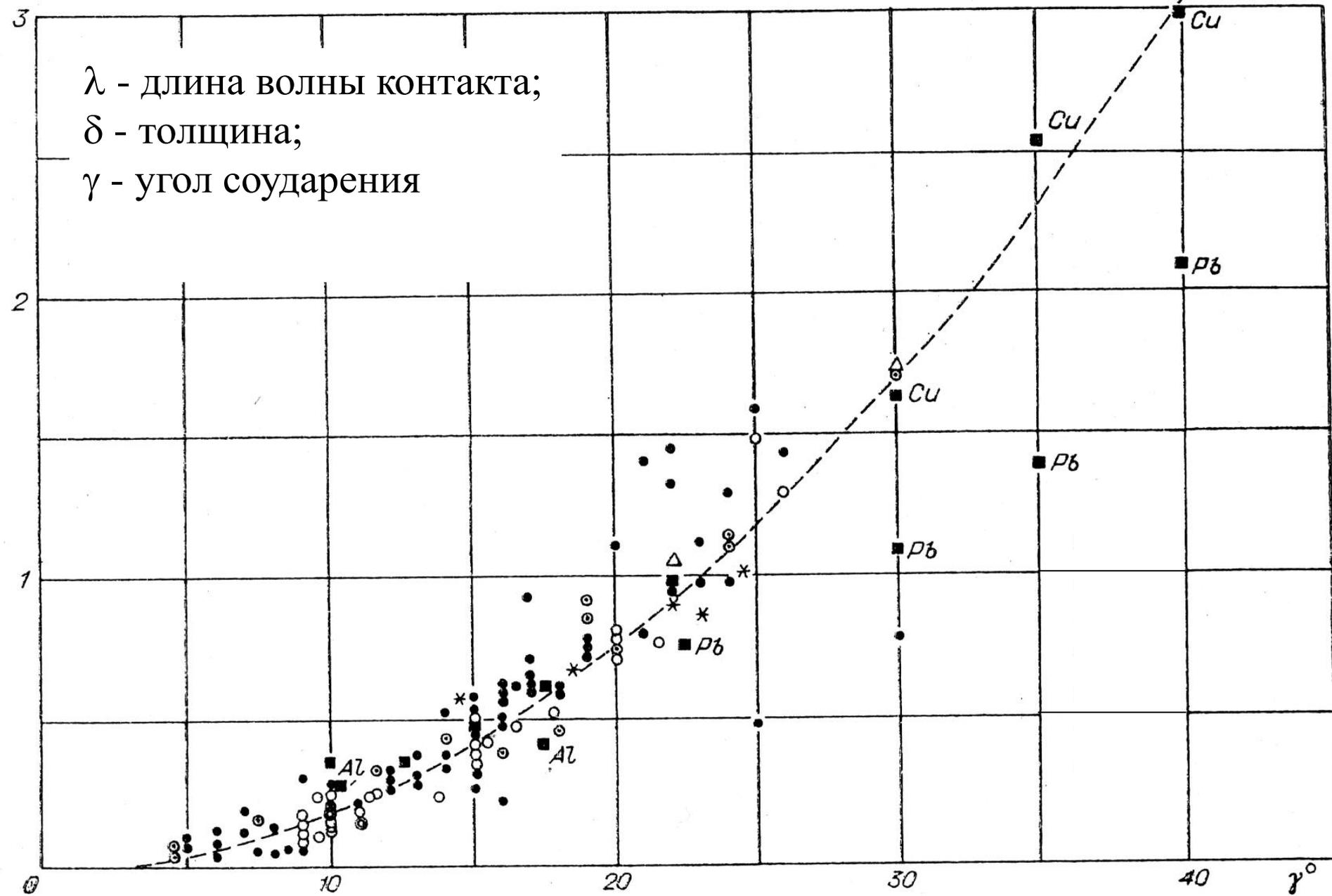
λ/δ_1

Данные по сварке взрывом металлов

λ - длина волны контакта;

δ - толщина;

γ - угол соударения



Получены новые кинетические переменные процесса диспергирования металлов при амплитудах ударно-волнового нагружения $P \sim$ единицы-десятки ГПа, что является важным для верификации существующих расчетных кодов.

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.

Результаты проведенных исследований полезны при создании (разработки) новых уравнений состояний для описания поведения металлов в экстремальных условиях.

Приведенные результаты исследований необходимо учитывать при разработке высокоинтенсивной импульсной техники.

1. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Новиков С.А., Учаев А.Я. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998.
2. 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.
3. Илькаев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН, 2002, том 384, № 3. - С. 328-333.
4. 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, том 393, № 3. - С. 326-331.
5. Учаев А.Я., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Кошелева Е.В., Косачев В.В. Физическая природа долговечности легких актинидов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, № 3. – С. 208-212.
6. Учаев А.Я., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Кошелева Е.В., Косачев В.В. О связи термодинамических и динамических свойств легких актинидов // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, № 3. – С. 203-207.
7. A. Ya. Uchaev, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva. Physical Longevity Nature of Light Actinides in Dynamic Failure Phenomenon // Physics of Atomic Nuclei, 2015. Vol. 78. No. 12, pp. 1353-1356.
8. 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.