

## К ОБОСНОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

## ON SUBSTANTIATION OF A PREDICTABILITY CRITERION FOR SOLIDS BEHAVIOR UNDER EXTREME CONDITIONS AT DIFFERENT TYPES OF HIGH-INTENSE ACTION

*Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, А. Я. Учаев*  
*E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, A. Ya. Uchaev*

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

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

В работе проанализированы результаты исследований процесса динамического разрушения твердых тел различной природы с использованием магнито-импульсного способа нагружения – микросекундный диапазон неравновесных состояний и результаты исследований процесса динамического разрушения ряда металлов в режиме импульсного объемного разогрева при воздействии импульсов релятивистских электронных пучков – нано- и субнаносекундный диапазон неравновесных состояний (диапазон долговечности  $t \sim 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-10}$  с). Показано, что в динамическом диапазоне долговечности зависимость времени разрушения от амплитуды приложенной нагрузки при различных способах импульсного нагружения твердых тел различной природы имеет степенной вид, что говорит о скейлинговой природе процесса разрушения.

The paper analyzes research results for dynamic solids' failure of different nature using a magnetic pulsed loading method – a microsecond range of non-equilibrium states and research results for dynamic failure of a number of metals in the mode of pulsed volume heat-up under the action of relativistic electron beam pulses – nano- and subnanosecond range of non-equilibrium states (longevity range  $t \sim 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-10}$  s). It has been shown, that in the dynamic longevity range the dependence of failure time on the applied load amplitude using different methods for pulsed loading of different nature solids has an exponential view, what testifies to scaling failure process nature.

В связи с расширением области применения в научных исследованиях высокоэнергетических импульсных установок (импульсные ускорители – наносекундный диапазон воздействия, термоядерные реакторы – микросекундный диапазон воздействия, импульсные ядерные реакторы – миллисекундный диапазон воздействия, фемтосекундные лазеры) требуется знание поведения конденсированных сред в экстремальных условиях, поскольку мощностные возможности таких установок напрямую связаны со стойкостью элементов и узлов, входящих в их состав.

Следовательно, является актуальным исследование кинетических релаксационных процессов, протекающих в неравновесных конденсированных средах различной геометрии, различной природы и установление временной границы сохранения функциональных свойств конструкционных мате-

риалов при различных видах высокоинтенсивного воздействия.

Согласно литературным данным существует динамический диапазон долговечности  $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$  с, квазистатическая ветвь долговечности  $t \sim 10^{-3} - 10^7$  с и так называемая переходная область  $t \sim 10^{-3} - 10^{-5}$  с. Для динамической и квазистатической ветвей долговечности существует обширный экспериментальный материал и разработаны адекватные модели разрушения. Природа долговечности в динамическом и квазистатическом диапазонах имеет разную физическую природу [1, 2].

Известно, что основные процессы, лежащие в основе реакции твердого тела на внешние воздействия в динамическом диапазоне долговечности, являются нелинейными [1, 3].

Предположим, что равновесие в системе устанавливается за время  $t_r$ . Это время определяет границу между квазистатическими и динамическими процессами. В момент времени  $t_0$  изменим параметры системы ( $V, \rho, T$ ), что приведет к обмену энергией между внешней средой и системой. Обмен может происходить медленно, за времена  $\delta t = t - t_0 \gg t_r$  (квазистатические процессы) или быстро за времена  $\delta t = t - t_0 \leq t_r$  (динамические процессы). В первом случае, при сообщении системе  $\delta E_{ext}$  система успевает придти в состояние термодинамического равновесия; по всему объему устанавливаются постоянные значения ( $\rho, T, P$ ). В квазистатических процессах значения параметров не зависят от координаты  $r$  (но сохраняется зависимость от времени, т. к. существует релаксация). Зависимости параметров  $\rho(t), T(t)$  могут быть произвольными, слабо зависящими от времени: ( $1/\rho \cdot d\rho/dt \ll 1/t_r; 1/T \cdot dT/dt \ll 1/t_r$ ). Все градиенты равны нулю:  $d\rho/dr = dT/dr = dP/dr = 0$ . Это означает, что в квазистатических процессах не возникает процессов переноса; обмен энергией происходит только с внешней средой, которая инициирует процессы в системе; обмен энергией между частями системы отсутствует. Каждый элемент  $\delta V$  фактически изолирован от остальных  $\delta V_i$ , система распадается на отдельные элементы, не взаимодействующие друг с другом.

Если процесс обмена с внешней средой протекает быстро, то градиентами и их производными нельзя пренебречь. Градиенты ведут к возникновению потоков энергии, импульса, т. е. к процессам обмена между элементами  $\delta V$ , система перестает быть набором невзаимодействующих элементов  $\delta V$ , она становится единым целым. Элемент  $\delta V$  влияет на эволюцию остальных  $\delta V_i$ . Степень взаимодействия зависит не только от состояния  $\delta V_i(t)$ , но и от состояния  $\delta V_i(t')$ ,  $t' < t$ , так как информация от  $\delta V_i$  к  $\delta V$  распространяется с конечной скоростью. Вследствие этого система становится инерционной, появляются эффекты, отсутствовавшие в статических процессах. Реакция системы определяется возникающими степенями свободы, например, каскадом диссипативных структур, которые отсутствовали в квазистатических процессах.

На рис. 1 приведены временные зависимости долговечности  $t$  от критического давления  $P$  при некоторых режимах нагружения в квазистатическом диапазоне долговечности – воздействие рас-

тягивающих напряжений; в динамическом диапазоне долговечности – ударно-волновое нагружение и воздействие релятивистских электронных пучков [1, 2].

Данные по воздействию растягивающих напряжений взяты из [2], при ударно-волновом нагружении – [4], по воздействию релятивистских электронных пучков – [1, 3].

При изменении времени на два порядка в квазистатическом диапазоне долговечности  $\Delta t_1$  и динамическом диапазоне  $\Delta t_2$  ( $\Delta t_1 = \Delta t_2$ , см. рис. 1) изменения по давлению в динамическом диапазоне долговечности превосходят изменения по давлению в квазистатическом диапазоне долговечности от 10 до 100 раз. Причина – различие характера и механизма разрушения в двух рассматриваемых диапазонах.

При малых степенях отклонения от равновесия процессы релаксации определяются кинетическими механизмами, которые описываются аппаратом классической кинетики.

В физике разрушения в квазистатическом диапазоне долговечности, время до разрушения определяется временем образования критической флуктуации, например, энергии, приводящей к разрушению части межатомных связей.

Данные по долговечности в квазистатическом диапазоне долговечности описывается выражением

$$t = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma}{kT}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – период колебания атома в решетке,  $u$  – энергия связи,  $\gamma$  – структурный фактор,  $\sigma$  – приложенное напряжение,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура материала [2].

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 [1, 3].

К исследованию временных закономерностей процесса динамического разрушения твердых тел применен метод ударно-волнового нагружения, реализуемого с использованием магнитоимпульсного способа  $t \sim 10^{-5}$  с [5] и при воздействии импульсов релятивистских электронных пучков – режим импульсного объемного разогрева (тепловой удар) ( $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$  с) [1]. В работе рассмотрены неравновесные состояния твердых тел (диапазон долговечности  $t \sim 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-10}$  с).

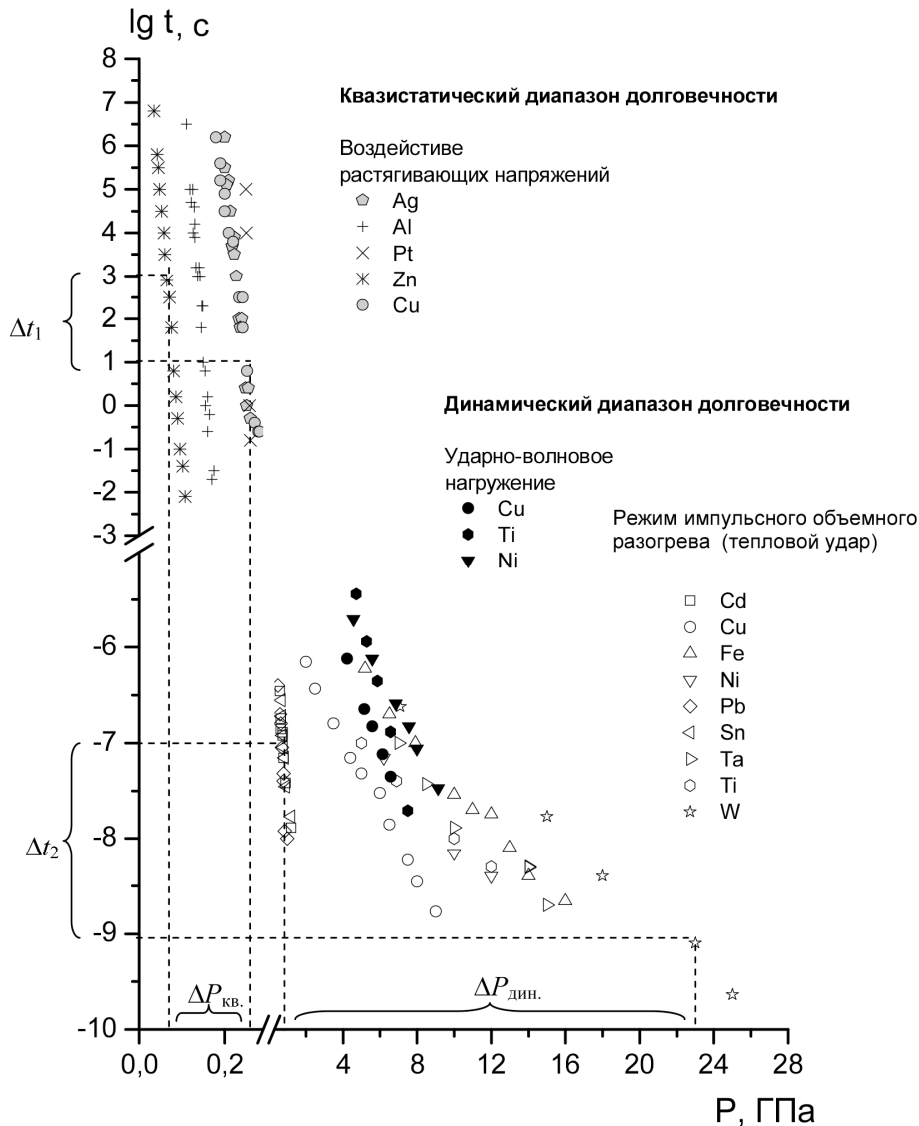


Рис. 1. Временные зависимости долговечности металлов от критического давления, приводящего к разрушению, в квазистатическом и в динамическом диапазонах долговечности ( $t$  в секундах)  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ;  $\Delta P_{\text{дин}} > \Delta P_{\text{кв}}$  [1–4]

Результаты исследования процесса динамического разрушения твердых тел неметаллической природы с использованием магнито-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 [5, 6]

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = A_s \left( \frac{\tau_L}{T_p} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где  $\sigma_p$  – значения откольной прочности,  $T_p$  – длительность импульса нагружения,  $\tau_L$ ,  $\sigma_c$  – характе-

ристики материала,  $A_s$  – коэффициент,  $\alpha \sim \sqrt{2}$ . Методика определения  $\tau_L$  (время накопления энергии – время до начала процесса разрушения) по разрушению материала импульсным воздействием пороговой амплитуды приведена в [5].

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 (см. рис. 2) [5].

Таким образом, результаты исследований, приведенные на рис. 2 показывают, что приведенные материалы проявляют универсальные признаки в явлении динамического разрушения в микросекундном диапазоне неравновесных состояний [5].

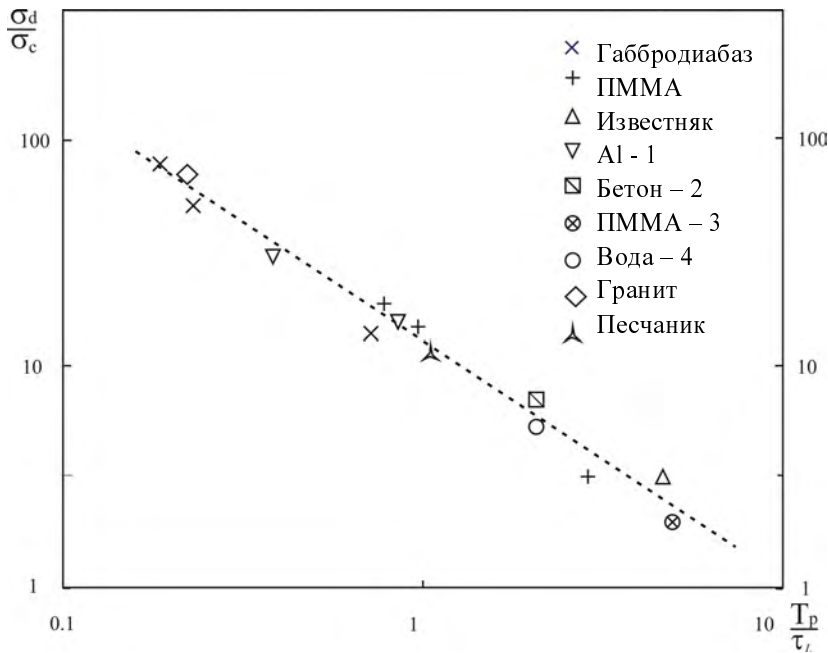


Рис. 2. Зависимость разрушающих пороговых нагрузок от длительности импульса твердых тел при разных способах динамических нагружений [5]

Данные, приведенные на рис. 2, 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 (так называемый режим импульсного объемного разогрева, тепловой удар) [1, 3].

Применение к исследованию процесса динамического разрушения металлов режима импульсного объемного разогрева позволило существенно расширить исследуемую область неравновесных состояний по сравнению со взрывным и ударно-волновым нагружениями. Так, при взрывном нагружении минимальная долговечность составляет значение  $t \sim 10^{-8}$  с. В режиме импульсного объемного разогрева минимальное значение долговечности имеет значение  $t \sim 3 \cdot 10^{-10}$  с [1, 3].

Как правило, релаксация сильнонеравновесных состояний сопровождается динамическими деструктивными процессами.

Проведенные ранее исследования [1, 3] показали, что динамические деструктивные процессы в конденсированных средах на различных масштабно-временных уровнях носят кооперативный характер. Это обусловлено фрактальной природой ансамблей диссипативных структур, возникающих в результате высокоинтенсивного воздействия на конденсированную среду, их перколяционными

свойствами, переходами неравновесной системы с одного масштабно-временного уровня на другой, подчиняющихся концентрационному критерию, и также тем, что вероятность состояний системы не пропорциональна фактору Больцмана.

В работах [1, 3] показано энергетическое подобие процесса плавления и динамического разрушения, согласно которому энергетическое состояние локальных областей металла близ центров разрушения подобно состоянию кристаллической фазы при температуре плавления.

Данные по временным закономерностям процесса динамического разрушения (см. рис. 3), приведенные в универсальных координатах близки к единой кривой. Отношение  $P/\Gamma\rho(H+L_m)$  является инвариантом по отношению к порядковому номеру  $z$  в периодической системе [1].

Данные, приведенные на рис. 3 описываются соотношением,  $\left[ \frac{E_{кр}(t)}{H+L_m} \right]^\gamma \cdot t = const$ ,  $E_{кр}(t) \approx P/\Gamma\rho$ ,

$\gamma \sim 3,8$  для всех исследованных материалов [1].

Данные, представленные в работе [1], показывают, что функции скорости центрообразования  $J(t)$  ряда исследованных металлов имеют подобный вид. Это дает право на построение функции  $J(t)$  в координатах  $\tau = t/t_p$ ,  $J = J(t)/J_{max}(t_p)$  для различных металлов в широких диапазонах долговечности  $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$  с, где  $t_p$  – время разрушения,  $\tau$  – нормированное время разрушения,

$J$  – нормированная скорость центрообразования,  $J_{\max}(t_p)$  – максимальная скорость центрообразования на время разрушения (см. рис. 4) [1].

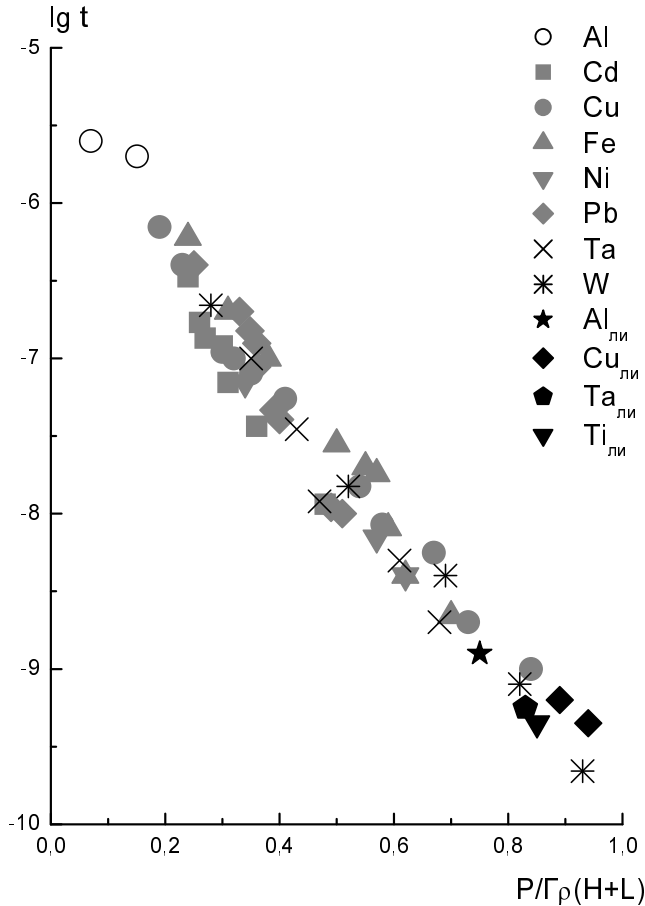


Рис. 3. Временная зависимость процесса динамического разрушения [1]

Данные, приведенные на рис. 4 показывают, что долговечность складывается из стадии ожидания появления центров разрушения  $t_{\text{ож}}$  (стадия 1) и времени  $t_{\text{к}}$  кластеризации (стадия 2) каскада центров разрушения, когда возникает связность в системе центров разрушения, и возникает перколяционный кластер [1].

В работе [1] было показано, что  $t_{\text{ож}} \gg t_{\text{к}}$ . В силу этого соотношения определение времени  $t_{\text{ож}}$  дает оценку временной границы сохранения функциональных свойств металлов, находящихся в экстремальных условиях. Учитывая это соотношение, можно предположить, что на стадии ожидания кластера центров разрушения применим формализм теории вероятностей (процессы возникновения центров разрушения независимы).

Данные, приведенные на рис. 4, показывают близкое поведение функций  $J(t)$  для различных металлов в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$  с.

Данные, приведенные на рис. 4, аппроксимируются функцией вида

$$J_n(t) \sim A \exp\left(\frac{t}{t_p} \cdot B\right)^{0,2} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_p}\right)^{-2,2}, \quad (3)$$

где  $A, B$  – const.

Первый множитель описывает скорость центрообразования на первой стадии, когда плотность центров разрушения мала и они не взаимодействуют – ослабленная экспонента. Второй множитель описывает скорость центрообразования в интервале  $t \sim 0,9 t_p$  до  $t_p$  – режим с обострением.

Вид функции  $J(t)$  подобен виду функций, описывающих режимы с обострением, либо поведение систем вблизи критической точки.

Таким образом, согласно (4), эффекты самоорганизации каскада центров разрушения носят пороговый характер.

Согласно выражениям (1, 2, 3) и данным, приведенным на рис. 1–4, соотношения временных зависимостей прочности в квазистатическом и динамическом диапазонах долговечности принципиально отличаются. В квазистатическом диапазоне долговечности зависимость времени разрушения от амплитуды приложенной нагрузки имеет экспоненциальный вид (см. выражение (1)), а в динамическом диапазоне долговечности степенной вид (см. выражение (2, 3)), что говорит о внутренней скейлинговой (масштабно-инвариантной) природе процесса.

Особенность процесса динамического разрушения в микросекундной области определяется тем, что процесс разрушения имеет пороговый характер, амплитуда пороговых импульсов зависит от длительности импульса, приводящего к разрушению и имеет место задержка начала разрушения [5]. В нано- и субнаносекундной области долговечности процесс разрушения также имеет пороговый характер, и критическое значение амплитуды давления, приводящей к разрушению, зависит от длительности [1].

Данные, приведенные на рис. 6, показывают, что время сохранения функциональных свойств образцов металлов в экстремальных состояниях определено временем образования критической плотности каскада центров разрушения, меняющей связность тела [1].

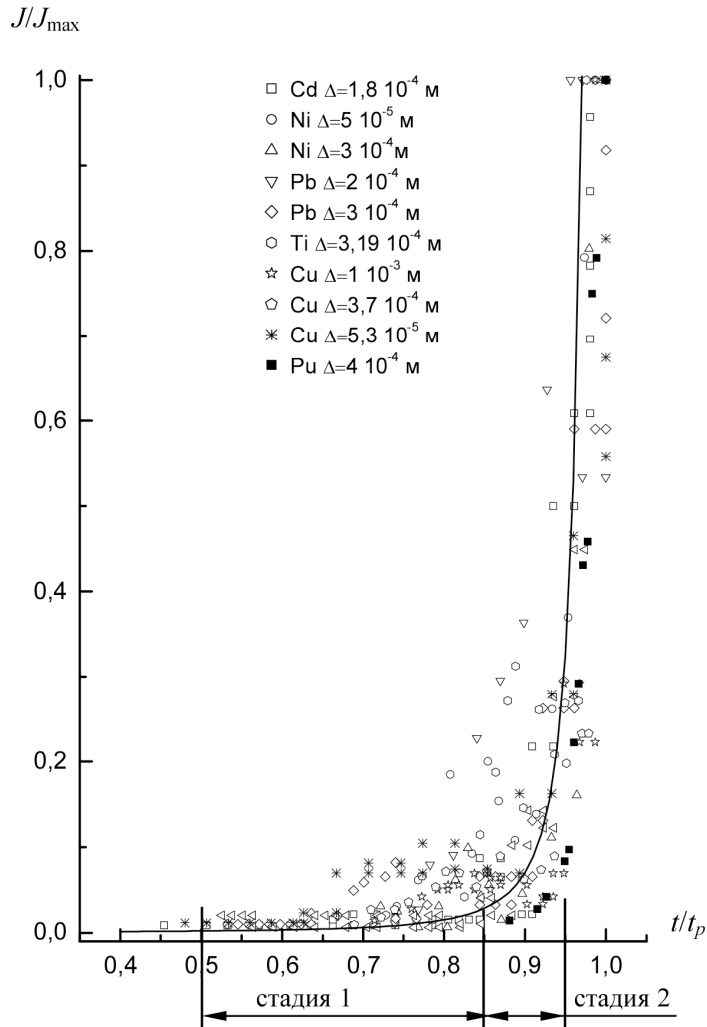


Рис. 4. Скорость центрообразования ряда металлов разной толщины ( $\Delta$ ) в координатах  $t/t_p$ ,  $J(t)/J_{\max}(t_p)$ , маркеры – экспериментальные данные [1]

Согласно теории подобия [7], если количественные характеристики физических процессов, выраженные в безразмерных переменных равны, то это говорит о физическом подобии поведении систем.

Т. е., любые количественные соотношения, полученные для конкретного явления, могут быть распространены на другие подобные явления, если их представить в относительной (безразмерной) форме. 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  $c_\varphi$  – 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 (2, 3) и данные, приведенные на рис. 2–4, обладают признаками основных положений теории подобия [7].

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

### Список литературы

1. 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. С. 211.
2. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – Москва: Наука, 1974. С. 560.
3. Ильяев 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.
4. Новиков С. А. Прочность при квазистатическом и ударно-волновом нагружении // ФГВ, 1985. № 6. С. 77–85.
5. Krivosheev S. I., Korovkin N. V., Slashtenko, V. K., Magazinov, S. G. Destruction of brittle materials by microsecond pressure pulses at their formation by magnetic pulse method // Int. Journal of Mechanics. 2015. Vol. 9. P. 293–299.
6. Кошелева Е. В., Кривошеев С. И., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Обоснование возможности прогнозирования поведения твердых тел в экстремальных условиях при различных видах высокоинтенсивного воздействия // Ядерная физика и инжиниринг, 2016. Т. 7, № 4. С. 347–354.
7. Гухман А. А. Введение в теорию подобия: Учеб. Пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перер. М.: Высшая школа, 1973. С. 296.