

О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ АКТИНИДОВ

ON PHYSICAL NATURE OF DYNAMIC LIGHT ACTINIDE LONGEVITY

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

Долговечность металлов, находящихся в экстремальных условиях в диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с, определена временем образования критической концентрации каскада центров разрушения, меняющей связность тела. Долговечность складывается из времени ожидания появления центров разрушения $t_{ож}$ и времени кластеризации t_k каскада центров разрушения, когда возникает связность в системе центров разрушения. Функция скорости центрообразования имеет степенной вид – обладает масштабнo-временной автомодельностью. Единый механизм процесса динамического разрушения, единый параметр порядка и одинаковая размерность пространства, в котором протекает процесс, определяют физическую природу долговечности металлов, включая легкие актиниды.

A longevity of metals, under extreme conditions within the range of non-equilibrium states $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ s, is specified by formation time for a critical concentration of a failure center cascade, changing the body's connectivity. The longevity is formed by waiting time of failure centers' origin t_w and clustering time t_c for the failure center cascade, when connectivity appears in the failure centers' system. A centers' formation rate function has an exponential view, i.e. possesses a scale-time self-similarity. An overall mechanism of the dynamic failure process, a single order parameter and a dimension of equal space, where the process is going on, specify the physical longevity nature for metals involving light actinides.

Методы нелинейной физики позволяют установить универсальные признаки эволюции неравновесных систем, обусловленные коллективными эффектами и явлениями самоорганизации в возникающих диссипативных структурах.

В настоящее время является актуальным изучение поведения легких актинидов в экстремальных условиях, в сильно неравновесных состояниях, когда величина поглощенной энергии системой сравнима с энергией, например, фазового перехода. Такие режимы могут реализоваться в высокоэнергетических промышленных и на исследовательских установках.

Например, в настоящее время рассматривается реализация торий-уран-плутоний замкнутого энергетического цикла. Следовательно, является актуальным знание поведения легких актинидов в экстремальных условиях, которые могут реализовываться в аварийных ситуациях. Рассматриваемый диапазон давлений $P \sim$ единицы – десятки ГПа.

Как правило, релаксация сильно неравновесных состояний сопровождается динамическими деструктивными процессами [1–3].

Проблемы описания явления разрушения при многообразии условий нагружения представляют одну из важнейших задач современной физики и являются актуальными в прикладных вопросах физики твердого тела, термодинамики и статистической физики, механики сплошных деформируемых сред.

При малых степенях отклонения от равновесия процессы релаксации определяются кинетическими механизмами, которые описываются аппаратом классической кинетики. Например, для газов, когда происходит «хаотизация» можно перейти к одночастичной функции распределения по скоростям. В физике разрушения в квазистатическом диапазоне долговечности, время до разрушения определяется временем образования крити-

ческой флуктуации, например, энергией, приводящей к разрушению части межатомных связей. Данные по долговечности в квазистатическом диапазоне долговечности описываются выражением [4]

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

k – постоянная Больцмана; σ – разрушаемое напряжение; T – температура; τ_0 , u , γ – параметры 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 [1].

Ранее в наших работах основное внимание уделялось формулировке топологических условий предельного перехода – последней стадии процесса, которой ставилось в соответствие понятие порога в перколяционной модели динамического разрушения. Однако, с точки зрения прогноза процесса разрушения и определения временной границы сохранения функциональных свойств важна не только конечная фаза, но и предшествующая история процесса [1–3]. Следовательно, является актуальным исследование всей последовательности событий, предшествующих пороговому состоянию и прогнозирование временной границы сохранения функциональных свойств ряда металлов, включая легкие актиниды, в экстремальных состояниях. Это является целью работы.

В результате ранее проведенных исследований [1–3] было показано, что сопротивление тела внешнему воздействию оказывает диссипативная структура, например, каскад центров разрушения. Эволюция возникающих микро- и мезоскопических дефектов в явлении динамического разрушения является определяющей в поведении твердых тел при воздействии мощных импульсов проникающих излучений в диапазоне долговечности $t \sim 10^6 - 10^{10}$ с (скорость изменения температуры $dT/dt \sim 10^6 - 10^{12}$ К/с, диапазон начальных температур $T_0 \sim 4K - 0,8T_{пл}$).

В нелинейных диссипативных средах, какими являются металлы в процессе динамического разрушения, происходит уменьшение числа степеней свободы. Это означает, что в системе происходит самоорганизация структурных элементов, характеризующаяся крупномасштабными корреляциями. Параметр порядка характеризует

переход от некоррелированного состояния вещества к коррелированному. Плотность центров разрушения $f(t)$, зависящая от времени, на пороге разрушения, когда меняется связность разрушаемого тела, является параметром порядка. Существенное увеличение плотности центров разрушения $f(t)$ происходит на заключительной стадии процесса разрушения на временах $t \sim 0,9 \cdot t_p$, где t_p – время разрушения [1].

На рис. 1, 2 приведены временные и температурные закономерности процесса динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева [1–3].

В работах [1–3] показано, что из свойства автомодельности накопления поврежденности следует связь между амплитудой критического давления P и долговечности материала, которая определяется как

$$P(t)^\gamma t = const,$$

где $\gamma \approx 3,8$.

Именно это условие определяет возможность моделирования процесса динамического разрушения в лабораторных условиях при масштабировании времени реального процесса [1–3].

Ранее было показано [1–3], что $I = \frac{P(t)}{H + L_m}$ (H – энтальпия, L_m – теплота плавления) для всех исследованных металлов имеет близкое значение, т. е., является инвариантом поведения независимо от расположения металла в периодической системе.

На рис. 3 приведены данные по температурным и временным закономерностям процесса динамического разрушения металла в универсальных координатах [1–3].

Результаты исследований, приведенные в работах [1, 3, 5, 6], показали, что процесс накопления центров разрушения в различных металлах в явлении динамического разрушения ($t \sim 10^6 - 10^{10}$ с), процесс накопления трещин в различных твердых телах (полимерах, металлах, кристаллах, стеклах, горных породах) под нагрузкой подчиняются соотношению $\frac{\langle D \rangle}{r} = \frac{\langle D \rangle}{N^{-1/3}} = \frac{1}{2,7}$, где r – среднее расстояние между центрами разрушения, N – плотность диссипативных структур, $\langle D \rangle$ – средний размер диссипативных структур.

На рис. 4 приведена зависимость среднего расстояния $r = N^{-1/3}$ между элементами диссипативных структур от их среднего размера $\langle D \rangle$

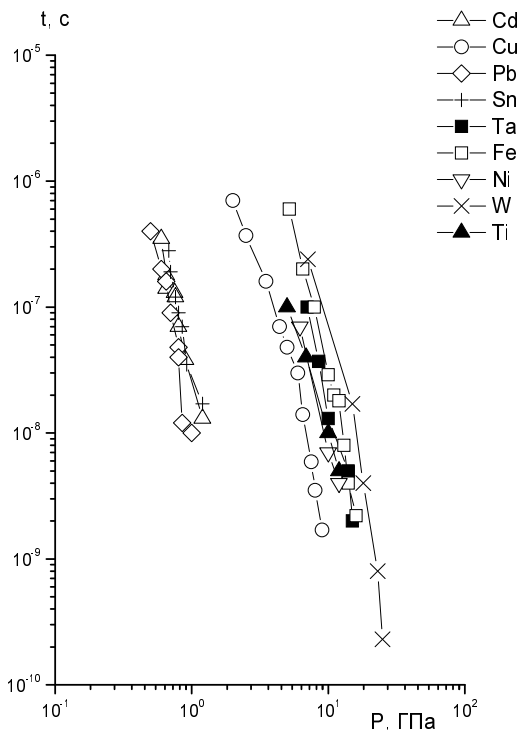


Рис. 1. Временные закономерности процесса динамического разрушения некоторых металлов. Кривые на рисунке – границы, выше которых находится область разрушения [t] в секундах

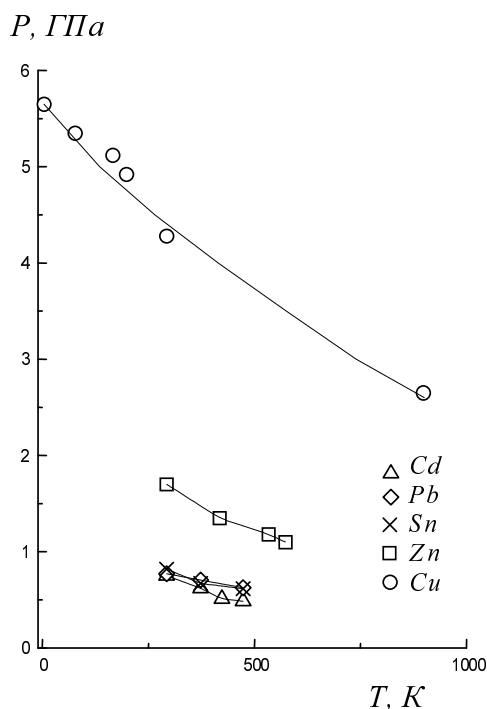
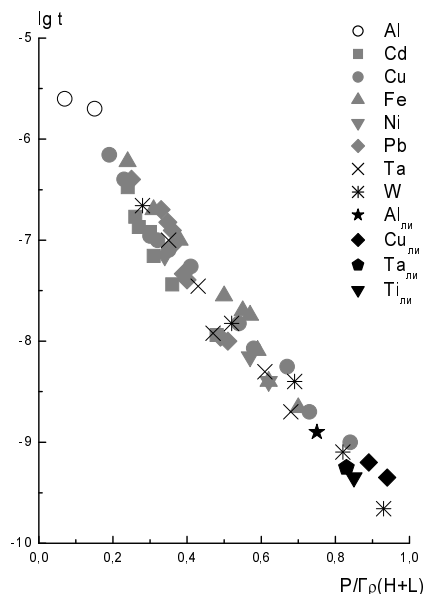
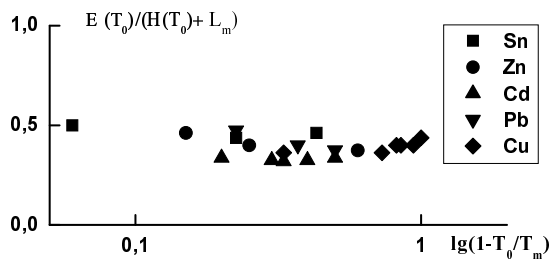


Рис. 2. Температурные (изохроны, $t \sim 8 \cdot 10^{-8}$ с) закономерности процесса динамического разрушения для металлов (воздействие релятивистских электронных пучков). Кривые на рисунке – границы, выше которых находится область разрушения



а



б

Рис. 3. Зависимости процесса динамического разрушения: а – временная; б – температурная

для: каскада центров разрушения (воздействие РЭП), Cu ($\Delta = 0,37$ мм), бронза ($\Delta = 0,3$ мм), Fe ($\Delta = 0,5$ мм) – мезоуровень II [1]; микротрещины: полимеры – мезоуровень I [5]; каскада полос

скольжения (УВН воздействие) Ti [3]; шероховатости на поверхности (мезоуровень I) Cu; шероховатости на поверхности (наноуровень): Au, Cu [6];

полос скольжения в грани Cu пирамидки (в верхней и нижней частях) [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 $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ с, где t_p – время разрушения, τ – нормированное время разрушения, J – нормированная скорость центрообразования [1] (см. рис. 5).

Данные, приведенные на рис. 5 показывают, что долговечность складывается из стадии ожидания появления центров разрушения $t_{\text{ож}}$ (стадия 1)

и времени t_k кластеризации (стадия 2) каскада центров разрушения, когда возникает связность в системе центров разрушения, и возникает перколяционный кластер [1].

В работах [1] было показано, что $t_{\text{ож}} \gg t_k$. 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) [1].

Данные, приведенные на рис. 5, показывают близкое поведение функций $J(t)$ для различных металлов в диапазоне долговечности

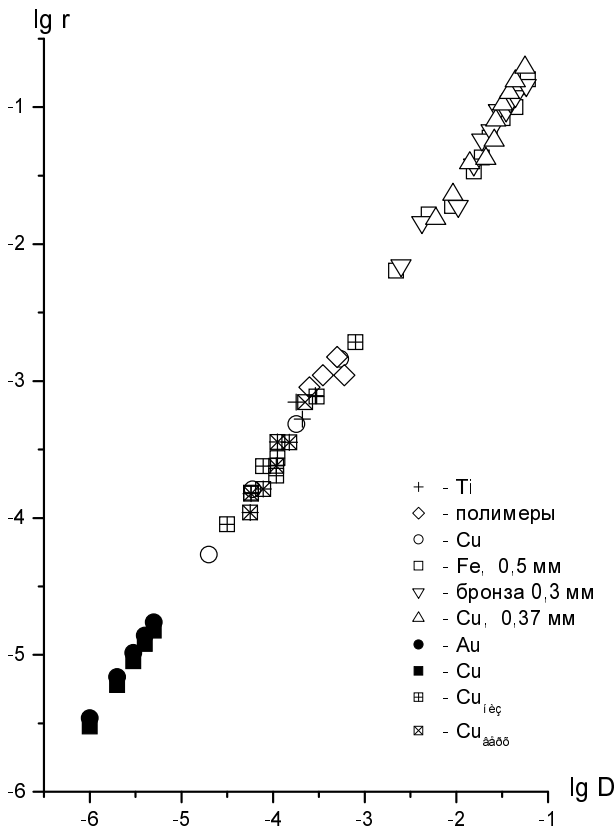


Рис. 4. Зависимость среднего расстояния $r = N^{-1/3}$ между элементами диссипативных структур от их среднего размера $\langle D \rangle$. Размеры r и $\langle D \rangle$ приведены в см. Процесс кластеризации можно изучать как в зависимости от числа элементарных событий, так и от времени. При этом необходимы знания о кинетике процесса кластеризации

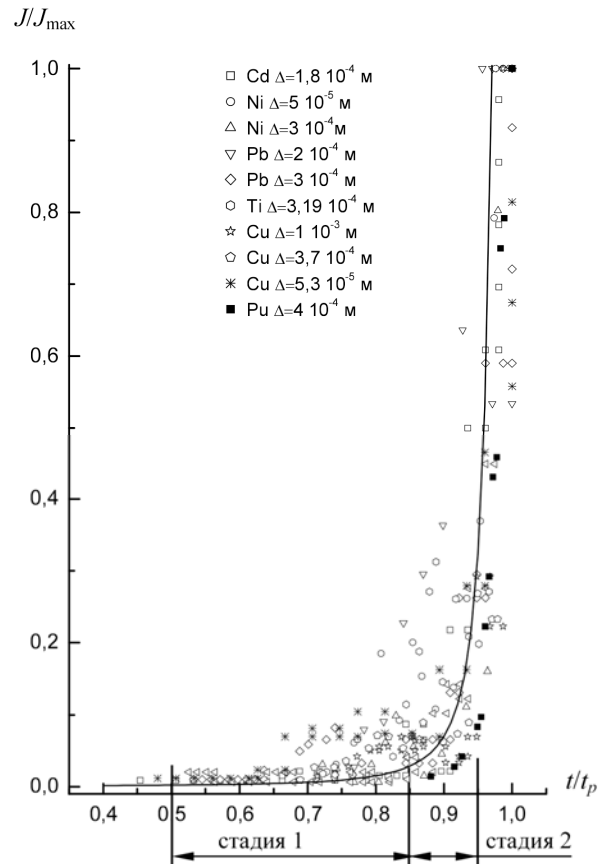


Рис. 5. Скорость центрообразования ряда металлов разной толщины (Δ) в координатах t/t_p , $J(t)/J_{\max}(t_p)$, маркеры – экспериментальные данные [1]

$t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ с. Вид функции $J(t)$ подобен виду функций, описывающих режимы с обострением, либо поведение систем вблизи критической точки.

Согласно теории подобия [7], 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. 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), когда их величины связаны соотношением

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

где c_φ – множитель подобия.

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

Приведенные выше результаты исследований обладают признаками основных положений теории подобия, что дает возможность прогнозировать поведение неисследованных металлов в экстремальных условиях.

В современной литературе показано, что многие процессы релаксации в сложных (неравновесных) системах подчиняются растянутому экспоненциальному закону – закону Кольрауша при малой концентрации элементов, определяющих кинетику процесса [1]:

$$U(t) = p \cdot \exp\left[-(t/\tau)^q\right],$$

где $U(t)$ – релаксационная функция или корреляционная (временная) функция; $p, \tau - const > 0$, $q = const$; $q < 1$.

Аппроксимируя данные, приведенные на рис. 5, получим вид функции $J(t)$ на первой стадии, когда плотность центров разрушения мала и

они не взаимодействуют, кинетику $J(t)$ можно представить ослабленной экспонентой.

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

где $A, B - const$.

Таким образом, согласно (2), эффекты самоорганизации каскада центров разрушения носят пороговый характер.

Единый механизм процесса динамического разрушения металлов – потеря связности системы (образца) путем кластеризации каскада центров разрушения – единый параметр порядка и одинаковая размерность пространства, в котором протекает процесс, доказывает возможность прогнозирования поведения металлов в экстремальных условиях.

На рис. 6 приведены спрогнозированные временные закономерности легких актинидов с учетом справочных данных [1, 8, 9].

Данные, приведенные на рис. 6, получены впервые для Th, U. Кривые на рис. 6 определяют границу, выше которой находится область разрушения, ниже – область стойкости.

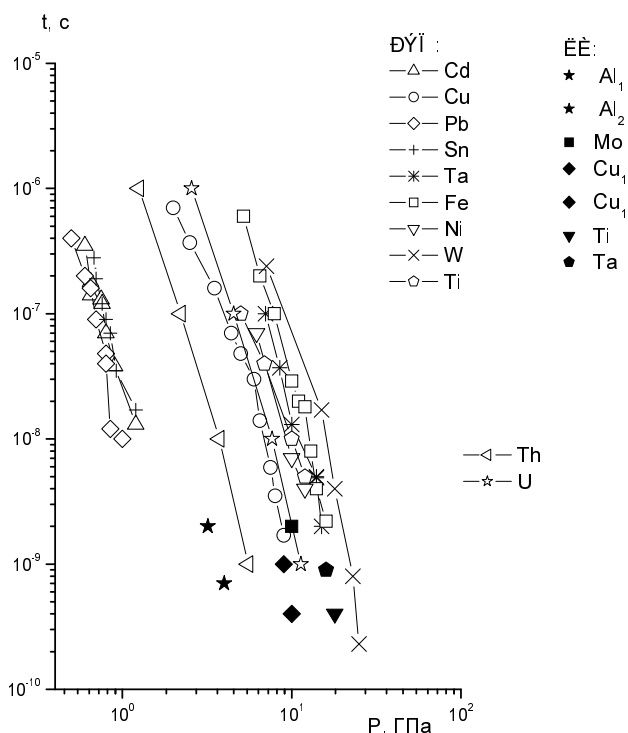


Рис. 6. Временные закономерности процесса динамического разрушения ряда металлов в результате воздействия РЭП и лазерного излучения (ЛИ) и спрогнозированные временные закономерности легких актинидов Th и U

В результате проведенных исследований показано, что физическая природа долговечности металлов, включая легкие актиниды, в экстремальных условиях определена временем образования критической концентрации каскадов центров разрушения, являющихся перколяционным кластером.

Таким образом, результаты исследований, приведенные ранее, показывают, что возможно прогнозирование поведения неисследованных металлов, включая легкие актиниды, в экстремальных условиях.

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. Ильяев 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. Т. 384, № 3. С. 328–333.

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. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. И. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. С. 560.

5. Килиан Х. Г., Веттегрень В. И., Светлов В. Н. Ансамбли дефектов на поверхности нагруженных металлов как результат их обратимой агрегации // ФТТ, 2000. Т. 42, вып. 11. С. 2024–2028.

6. Журков С. Н., Левин Б. Я., Савицкий А. В. Высокопрочные полимерные волокна // ДАН СССР, 1969. Т. 186, № 1. С. 132.

7. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Изд. 2-е, доп. и переработан. Учеб. Пособие для вузов. – Москва: Высшая школа, 1973. С. 296.

8. Лариков Л. Н., Юрченко Ю. Ф. Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов: Справочник. Киев Наукова думка, 1985. С. 439.

9. Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание. В 4-х т. / 3-е изд., перераб. и расш. Т. IV. Кн. 2. М.: Наука, 1982. С. 560.