

## ПРОЦЕССЫ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ И ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ КАК КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

### METAL DYNAMIC FAILURE AND DISPERSION AS CRITICAL PHENOMENA

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

*E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, S. S. Sokolov, I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev*

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

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

Целью работы являлось установление количественных характеристик продуктов диспергирования и каскада возникающих диссипативных структур, возникающих в металлах при ударно-волновом нагружении. Определены фрактальная размерность  $d_f$  и показатель Херста  $H$  – нормированный размах диссипативных структур – каскада центров разрушения, продуктов диспергирования. Проведено численное моделирование деструктивных процессов, протекающих в нагруженных образцах с использованием лагранжевой методики ТИМ 3D. Показано, что каскад центров разрушения на различных масштабно-временных уровнях является фрактальным кластером, а на пороге макроразрушения, когда возникает связность в системе центров разрушения – перколяционным. Самоподобие диссипативных структур является следствием самоорганизации в неравновесных системах; процессы динамического разрушения и диспергирования демонстрируют примеры масштабной инвариантности. Масштабная инвариантность возникающих диссипативных структур указывает на то, что неравновесная система достигла критического состояния.

The goal of the paper is specifying of quantitative dispersion products' characteristic and a cascade of appearing dissipative structures, arising in metals under shock-wave loading. Fractal dimensionality  $d_f$  and Hearst index  $H$  – normalized swing of dissipative structures – failure centers' cascade, dispersion products are determined. There is performed a numerical modeling of destructive processes, going on in loaded samples, using TIM 3D Lagrangian method. It is shown, that on different time-scale levels the failure centers' cascade is a fractal cluster, and on a macro-failure threshold, when connectivity in the failure centers' system arises – a percolation one. Self-similarity of dissipative structures is a consequence of self-organization in non-equilibrium systems; processes of dynamic failure and dispersion demonstrate examples of scale invariance. The scale invariance of arising dissipative structures testifies to the fact, that the non-equilibrium system has approached a critical state.

В настоящее время при исследовании поведения конденсированных сред в экстремальных условиях применяют высокоэнергетические импульсные установки (импульсные ускорители электронов, фемтосекундные лазеры). Мощные возможности таких установок напрямую связаны со стойкостью их элементов и узлов различной геометрии. Стойкость, например, к термомеханическому воздействию определяется динамическими деструктивными процессами, возникающими при многоволновом движении среды в элементах, узлах, что может приводить к локальной кумуляции внутренней энергии. Кумуля-

ция энергии может существенно уменьшить время сохранения функциональных свойств элементов, узлов.

Прогресс в исследовании процесса динамического разрушения конденсированных сред связан с достижениями в теории неравновесных процессов, диссипативных структур, самоорганизации [1–6], применение которых позволили установить подобие в количественных характеристиках деструктивных процессов на различных масштабно-временных уровнях.

Целью работы являлось установление количественных характеристик продуктов диспергирова-

ния и каскада возникающих диссипативных структур – каскада полос скольжения кристаллической решетки, возникающих в различных металлах при ударно-волновом нагружении для определения универсальных релаксационных процессов.

Количественные характеристики диссипативных структур определены с использованием математического пакета программ интерактивной системы анализа изображений (ИСАИ) [4].

Проведено численное моделирование деструктивных процессов, протекающих в нагруженных образцах с использованием лагранжевой методики ТИМ 3D [7].

Для создания многоволновых процессов в металлах, ударно-волновому нагружению (УВН) подвергались образцы, с нанесенными возмущениями в виде пирамидок высотой  $h \sim 0,7$  мм, общей толщиной  $\Delta \sim 1,5$  мм с 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  $\lambda$  существенно меньше линейных размеров нанесенных возмущений  $\lambda \sim \Delta_1 \sim 0,1$  мм. В теле пирамидки вследствие взаимодействия проходящей волны и отраженных волн от граней пира-

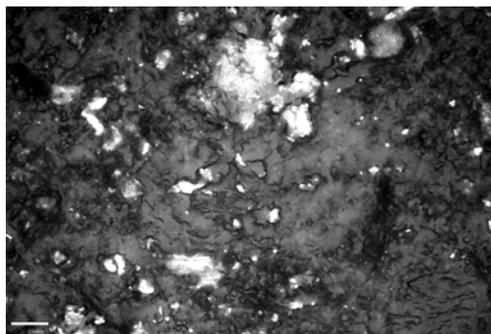
мидки возникает спектр гидродинамических трансляционных и ротационных мод, что приводит к возникновению каскада диссипативных структур на различных масштабно-временных уровнях. Кумуляция энергии волн приводит к процессу диспергирования вещества из вершин пирамидок, продукты которого оседают на преграде [5, 6].

Давление в зоне откольного разрушения  $P \sim 8$  ГПа в медном образце,  $P \sim 7$  ГПа в алюминиевом образце. Давление в вершине пирамидки после кумуляции энергии составляло значение  $P \sim 35$  ГПа и  $P \sim 30$  ГПа соответственно в медном и алюминиевом образцах.

На рис. 1 приведен вид частиц диспергированного металла на преграде (рис. 1,а), гистограмма распределения продуктов диспергирования по размерам  $D$  (рис. 1,б).

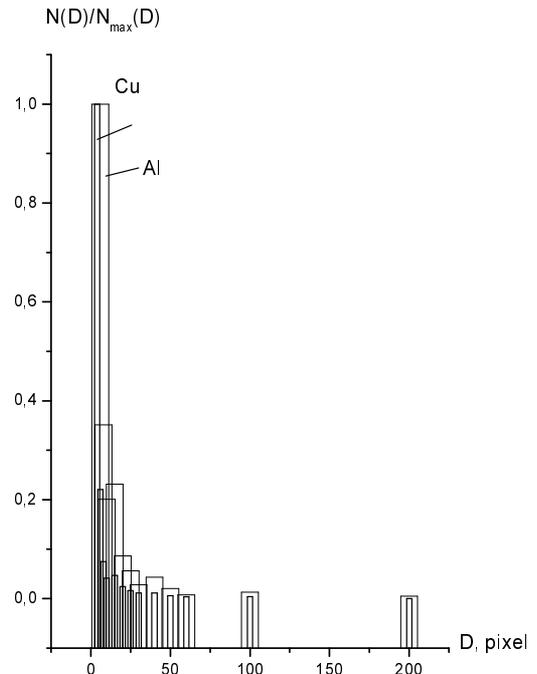
На рис. 2,а приведен вид шлифа грани медной пирамидки после нагружения и количественные характеристики гидродинамических мод в нижней и в верхней частях пирамидки – гистограмма распределения по размерам полос скольжения (рис. 2,б) [5, 6].

Используя данные гистограмм, определены фрактальная размерность  $d_f$  и показатель Херста  $H$  – нормированный размах полос скольжения от их числа.  $d_f$  верхней части пирамидки имеет значение  $d_f \sim 1,62$ , нижней –  $d_f \sim 1,69$ ; показатель Хер-



10 мкм

а



б

Рис. 1. Вид частиц диспергированного металла на преграде (а); гистограмма распределения продуктов диспергирования по размерам (Cu, Al) (б)

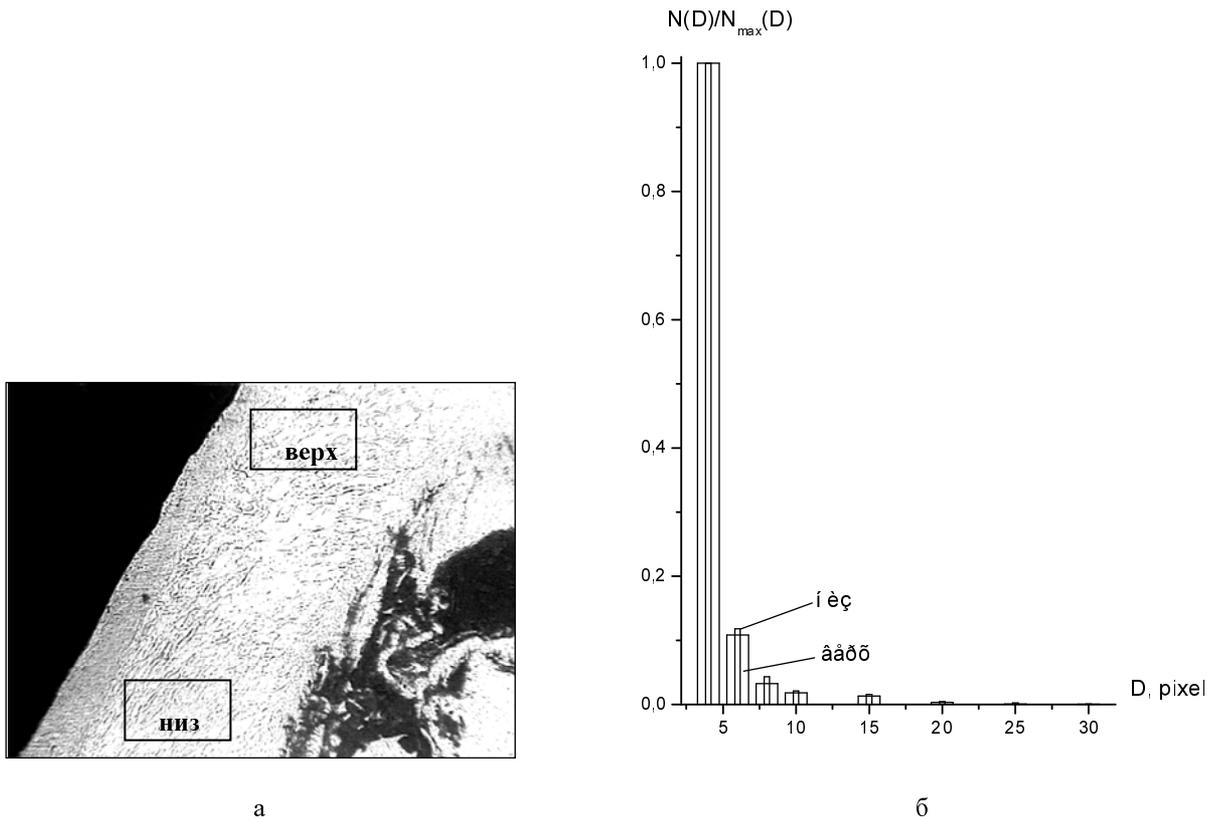


Рис. 2. Внешний вид грани медной пирамидки (x200) (а); и гистограмма распределения полос скольжения верхней и нижней частей медной пирамидки (б) [5, 6]

ста  $H \sim 0,85$  – верх,  $H \sim 0,86$  – низ; фрактальная размерность продуктов диспергирования  $d_f \sim 1,51$  для Al,  $d_f \sim 1,52$  для Cu.

Согласно теории подобия [8] 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 для Al и Cu (угол раствора  $60^\circ$ ), для которых фрактальные размерности  $d_f$  имеют близкие значения.

Результаты математической обработки каскадов диссипативных структур, полосы скольжения в грани пирамидки, диспергирование частиц из вершины пирамидки, возникающих после УВН, позволили установить ряд динамических диссипативных процессов, ранее отсутствующих.

Универсальное поведение рассмотренных неравновесных систем определяется возникновением положительных обратных связей между элементами диссипативных структур, характеризующихся фрактальной размерностью и показателем Херста [5]. Самоподобие диссипативных структур является следствием самоорганизации в неравновесных системах [4, 5]; процессы динамического разру-

шения и диспергирования демонстрируют примеры масштабной инвариантности.

На рис. 3 приведено распределение центров разрушения для Cu, Fe на различной глубине от поверхности разрушения, представленное в координатах  $\lg(N(D)/N(\langle D \rangle))$ ,  $\lg(D/\langle D \rangle)$ , где  $D$  – размер центров разрушения;  $\langle D \rangle$  – средний размер центров разрушения;  $N(D)$  – число центров разрушения  $N$  размером  $D$ ;  $N(\langle D \rangle)$  – число центров разрушения  $N$  размером  $\langle D \rangle$ .

Таким образом, важным свойством образующегося каскада центров разрушения, определяющего кинетику процесса, является его геометрическое самоподобие, описываемое выражением  $N(D) \sim D^{d_f}$ , где  $d_f$  – фрактальная размерность.

Внешний вид визуализированной трехмерной области разрушения в медном образце представлен на рис. 4, а, где можно различить центры разрушения и скопления центров разрушения.

На рис. 4 приведены восстановленная трехмерная область разрушения в меди и смоделированный объемный перколяционный кластер – изображения подобны [5].

Макроразрушение возникает при достижении определенной концентрации центров разрушения

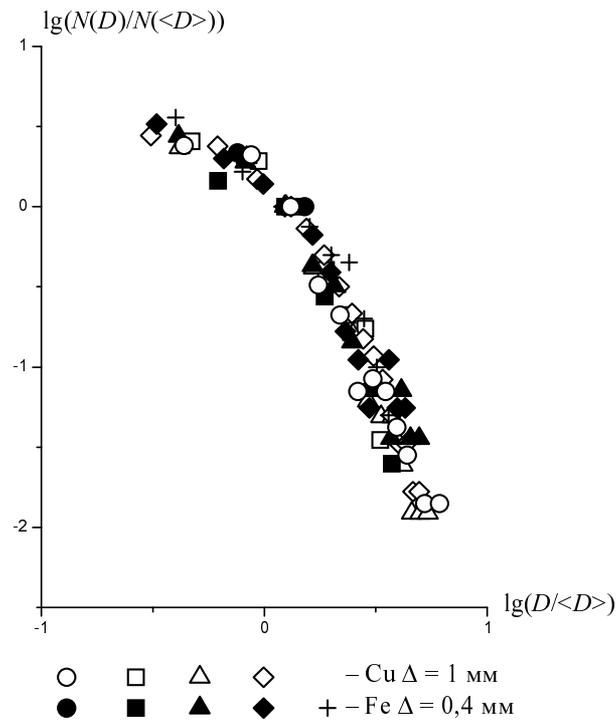
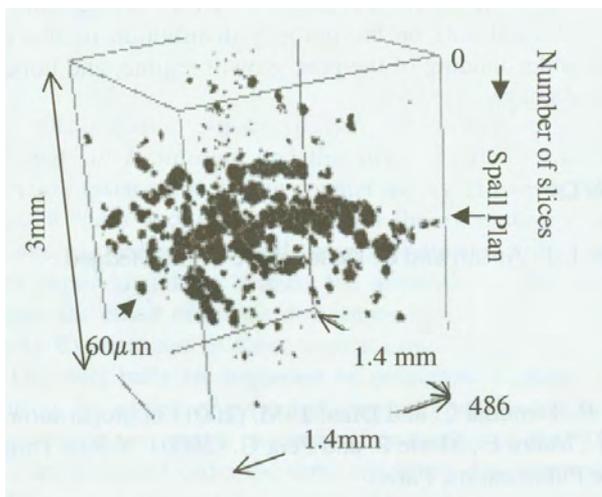
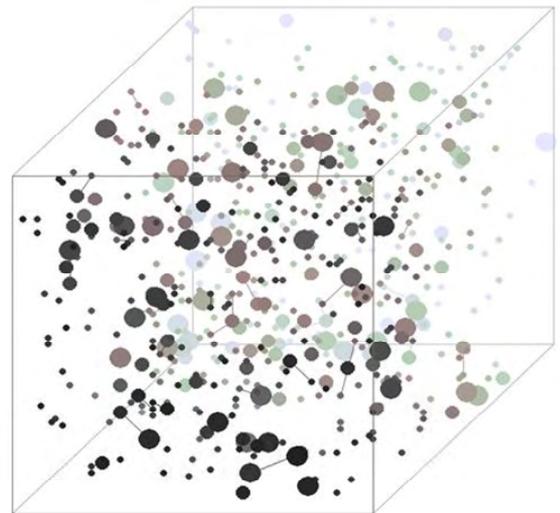


Рис. 3. Распределение центров разрушения  $N(D)$  для Cu, Fe на различной глубине от поверхности разрушения [5]



а



б

Рис. 4. Восстановленная трехмерная область разрушения в медном образце (а); смоделированный объемный перколяционный кластер (б) [5]

различного размера. В предразрушающем состоянии центры разрушения, согласно концентрационному критерию, удалены друг от друга на определенное расстояние  $r \sim N^{-1/3}$ . Т. о., предразрывное состояние достигается в результате взаимодействия полей центров разрушения при их определенной (критической) концентрации. Под полями взаимодействия центров разрушения подразуме-

ваются зоны неустойчивостей и пластического течения кристаллической решетки, возникающие близ образующихся и растущих центров разрушения. Также имеется полное формальное совпадение между концентрационным критерием разрушения  $N(D)^{-1/3}/D = \text{const}$  ( $\text{const} \sim 2,7$ ) и выражением для критического перколяционного радиуса  $R_c$  в модели, например, случайных узлов

$N^{-1/3}/R_c = \text{const}$ ;  $N$  – концентрация узлов,  $R_c$  – радиус, описанный вокруг узла «сферы влияния», при котором образуется бесконечный кластер [5].

Из выше изложенного следует, что критерии множественного (многоочагового) разрушения могут быть сформулированы на языке теории перколяции.

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.

Используя установленный ранее динамический инвариант  $I(P, t) = P(t)/\Gamma\rho(H + L_{\text{пл}})$  [4, 5], справедливый для всех исследованных металлов, который связывает значение критического давления  $P(t)$ , приводящего к разрушению, с энергетическими параметрами кристаллической решетки: энтальпией  $H$  и теплотой плавления  $L_{\text{пл}}$  в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$  с ( $\Gamma$  – параметр Грюнайзена,  $\rho$  – плотность металла) можно оценить коэффициент кумуляции энергии в вершине пирамидки и энергию диспергирования для различных металлов.

При изучении процесса диспергирования является логичным соотнести энергоёмкость процесса диспергирования с теплотой сублимации  $H_{\text{субл}}$ . Для граничного значения энергии  $E_{\text{кр}}(t)$ , приводящего к разрушению, отношение  $\frac{E_{\text{кр}}(t)}{H + L_{\text{пл}}}$  одинаково для всех исследованных металлов. Для значения долговечности  $t \sim 10^{-8}$  с отношение  $\frac{E_{\text{кр}}(t)}{H + L_{\text{пл}}} \approx 0,55$ . При одинаковой геометрии образцов и толщине откольного слоя коэффициент кумуляции энергии ударной волны будет иметь близкие значения для образцов из различных металлов.

В таблице 1 приведены табличные данные  $H + L_{\text{пл}}$ , отношение  $\frac{H + L_{\text{пл}}}{H_{\text{субл}}}$ ,  $\frac{E_{\text{кр}}}{H_{\text{субл}}}$ , критическая плотность поглощенной энергии  $E_{\text{кр}}$ , приводящая

к разрушению, ряда металлов для значения долговечности  $t \sim 10^{-8}$  с.

Отношение  $\frac{E_{\text{кр}}}{H_{\text{субл}}}$  при  $t \sim 10^{-8}$  с и отношение

$\frac{H + L_{\text{пл}}}{H_{\text{субл}}}$  для приведенных в табл. 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. табл. 1) имеют близкие значения при одинаковых значениях долговечности.

Таблица 1

Энергетические параметры металлов и параметры нагружения

Элемент	ат. №	$\frac{H + L_{\text{пл}}}{H_{\text{субл}}}$ , [9, 10]	$E_{\text{кр}}$ , Дж/г при $t \sim 10^{-8}$ с [6, 9, 10]	$\frac{E_{\text{кр}}}{H + L_{\text{пл}}}$ при $t \sim 10^{-8}$ с [6, 9, 10]	$\frac{E_{\text{кр}}}{H_{\text{субл}}}$ при $t \sim 10^{-8}$ с
Al	13	0,151	707	0,58	0,088
Ti	22	0,16	950	0,537	0,086
Fe	26	0,18	754	0,585	0,105
Ni	28	0,15	618	0,533	0,080
Cu	29	0,144	394	0,575	0,083
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

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 [7]. Моделируемые параметры нагружения близки к натурным.

На рис. 5 приведено распределение плотности в объеме пирамидки. Расчет 3D с использованием модели откольного разрушения на момент времени  $t \sim 3 \cdot 10^{-6}$  с. Синий цвет – практически нулевая плотность, зеленый цвет – пористая среда, красный – сплошная среда.

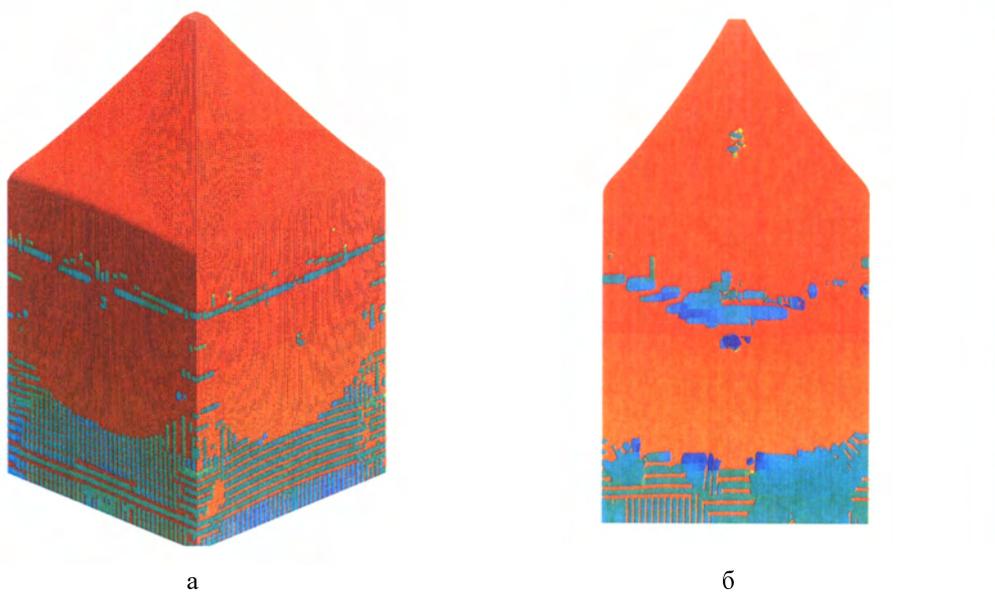


Рис. 5. Распределение плотности (а); в осевом сечении – (б). Расчет 3D с использованием откольного разрушения. Время 3 мкс

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, 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. Результаты проведенных исследований полезны при разработке но-

вых уравнений состояний для описания поведения металлов в экстремальных условиях.

Приведенные результаты исследований необходимо учитывать при разработке высокоинтенсивной импульсной техники.

### Список литературы

1. Пригожин И., Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Эдиториал УРСС, 2003. С. 280.
2. Фидлин А. Я. Об учете фрактальных свойств поверхностей раскола при анализе крупного разрушения горных пород // ДАН. 1992. Т. 326, № 2. С. 251–254.
3. 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.
4. 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.
5. Кошелева Е. В., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих из-

лучений: монография. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 211.

6. Кошелева Е. В., Мохова В. В., Подурец А. М., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Тилькунов А. В., Ткаченко М. И., Трунин И. Р., Учев 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.

7. 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.

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

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

10. Эмсли Дж. Элементы: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1993. С. 256.