

УДК 620.17:539.2:539.12.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ, ВЫЗЫВАЕМОМ ИМПУЛЬСАМИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РАЗГОНЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВОМ УДАРНИКОВ

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

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, uchaev@expd.vniief.ru

В зависимости от геометрии и амплитудно-временных характеристик внешнего воздействия в образцах возможна кумуляция энергии ударной волны, что приводит к уменьшению времени сохранения функциональных свойств конструкционных материалов. Рассмотрены процессы диспергирования со свободной поверхности металла образцов без нанесенных и с предварительно нанесенными возмущениями в виде пирамидок. При определенных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия происходит диспергирование из вершин пирамидок. Определены количественные характеристики динамических деструктивных процессов при различных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия для введения в расчетные коды двух- и трехмерных программ с целью прогнозирования поведения металлов в экстремальных условиях.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, динамическое разрушение, диспергирование металлов, спектр диссипативных структур, фрактальная размерность, показатель Хёрста, универсальные признаки.

DOI 10.15372/FGV20170216

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время как в фундаментальной, так и в прикладной физике неравновесных динамических деструктивных процессов важно знать временные границы существования неравновесных состояний и амплитудно-временные границы смены механизма релаксации неравновесных систем при высокоинтенсивном внешнем воздействии. Это связано с развитием высокоинтенсивных импульсных исследовательских установок, таких как импульсные ускорители, импульсные ядерные реакторы, фемтосекундные лазеры, — воздействием излучения на конденсированные среды. Мощность таких установок напрямую зависит от стойкости элементов и узлов, входящих в их состав. Так, например, долговечность выходного окна импульсного ускорителя связана с его термомеханической стойкостью — возникновением так называемого теплового уда-

ра, который приводит к ударно-волновым явлениям. Следовательно, актуальным представляется определение количественных характеристик динамических деструктивных процессов при различных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия для введения в расчетные коды двух- и трехмерных программ с целью прогнозирования поведения металлов в экстремальных условиях.

В работах [1–4] приведены результаты исследования динамических деструктивных процессов, протекающих в металлических образцах при ударно-волновом нагружении, создаваемом короткими импульсами релятивистских электронов и разгоняемых электровзрывом ударников. На исследуемые образцы меди и алюминия толщиной $\Delta \approx 1.5$ мм предварительно были нанесены возмущения в виде пирамидок высотой $h \approx 0.7 \div 0.9$ мм с углом раствора $\alpha \approx 45, 60, 90^\circ$. В зависимости от геометрии и амплитудно-временных характеристик внешнего воздействия в образцах могла кумулироваться энергия ударной волны, что приводит к уменьшению времени сохранения функ-

циональных свойств конструкционных материалов.

Традиционный подход к рассмотрению механизмов диспергирования металлов при высокоинтенсивном внешнем воздействии — это исследование кумулятивных эффектов при ударно-волновом нагружении. В работе [5] изучался процесс кумулятивных выбросов частиц со свободной поверхности свинцового образца с нанесенными возмущениями в виде канавок после ударно-волнового нагружения. Образование кумулятивных струй происходило при длительности импульса давления не меньше, чем гидродинамическое время возмущений $t \approx l/c$, где l — линейный размер возмущений, c — скорость звука.

Отметим основные особенности процесса диспергирования со свободной поверхности металла без нанесенных возмущений, возникающие при выходе ударной волны на свободную поверхность. Отражение импульса ударно-волнового сжатия от свободной поверхности приводит к появлению отрицательного давления во внутренних сечениях нагруженных образцов, в результате чего реализуются высокоскоростные деструктивные процессы. В [6] установлено, что при малой ширине импульса давления, который может реализоваться при воздействии импульсов фемтосекундного лазера на тонкие металлические фольги (толщиной единицы — десятки микрометров) вследствие некоторой дисперсии массовой скорости, обусловленной, например, зеренной структурой металла, тонкий слой откольной фольги в продольном к плоскости откола направлении теряет устойчивость, фольга распадается. В работах [7, 8] показано, что откольные слои толщиной единицы — десятки микрометров могут образоваться при облучении тонких металлических фольг ($\Delta \approx 10^{-2}$ мм) интенсивными импульсами релятивистских электронов, причем множественные отколы могут появиться даже в процессе облучения. При увеличении плотности поглощенной энергии растут скорость откольных слоев и дисперсия массовой скорости в них, что приводит к их распаду. Степень откольного разрушения после нагружения определялась путем металлографического анализа шлифов в зоне откола. Установлено [7, 8], что в образцах вольфрама толщиной ≈ 0.5 мм характерные повреждения образуются в виде вытянутых областей, в образцах толщиной ≈ 0.03 мм — в виде микротре-

щин, расслаивающих образец, в образцах толщиной ≈ 0.02 мм наблюдаются множественные отколы.

Результаты фрактографических исследований свидетельствуют, что макроразрушение возникает только при достижении критических амплитудно-временных характеристик давления p и долговечности t при заданной температуре T . В [1, 2] реализован процесс динамического разрушения, подчиняющийся критериальному соотношению $p_{cr}^\alpha(t) \cdot t = \text{const}$, $\alpha \approx 3.8$, для всех исследованных металлов. Результаты численного моделирования показывают, что разрушение происходит в первой фазе разгрузки и вызвано уменьшением амплитуды волны вследствие диссипативных потерь. Волновая картина движения вещества может реализоваться в процессе облучения даже в том случае, когда время облучения больше времени акустической разгрузки образца. При «умеренных» значениях давления p , при которых происходит одиночное макроразрушение, форма и величина импульса давления определяют пространственно-временную координату макроразрушения. Как показано в работах [3, 7, 8], увеличение амплитуды давления даже за время импульса облучения приводит к формированию нескольких координат разрушения и, соответственно, к множественному отколу. Критическая плотность энергии, вызывающая множественные разрушения в образце вольфрама ($\Delta \approx 0.02$ мм), находится по формуле $E_{cr} \approx H + L_m$, где H — энтальпия, L_m — теплота фазового перехода.

Согласно данным работы [9] макроскопический отклик среды на ударно-волновое нагружение в пластической области определяется через функцию распределения мезочастиц по скоростям.

СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведены исследования динамических свойств медного образца в наносекундном диапазоне неравновесных состояний при воздействии теплового удара, вызываемого импульсами релятивистских электронных пучков, скорость ввода энергии $\frac{dE}{dt} \sim 10^{11}$ Дж/с, плотность поглощенной энергии $\frac{dE}{dm} \sim 10^4$ Дж/г.

Методом Монте-Карло были рассчитаны плотность и профиль поглощенной энергии ре-

лятивистских электронов на облучаемых сторонах образцов. При этом плотность энергии рассчитывали так, чтобы на облучаемой поверхности возникали откольные разрушения [2].

Исследования показали, что при воздействии релятивистских электронных пучков на медный образец давление в области кумуляции энергии ударной волны на расстоянии $l \approx 2/3h$, где h — высота пирамидки, составляет $p \approx 15 \div 35$ ГПа, давление в области откола $p \approx 8 \div 10$ ГПа.

Для исследования подобных эффектов на электровзрывной установке скорость лайнера подбирали таким образом, чтобы в нагруженных образцах возникали деструктивные процессы, процессы диспергирования (скорость лавсанового ударника $v \approx 3 \div 8$ км/с, толщина 110 мкм) [4].

На рис. 1 приведены схемы экспериментов. Образцы меди с нанесенными возмущениями (угол раствора 60°) подвергались воздействию импульсов релятивистских электронных пучков; образцы алюминия с нанесенными возмущениями (угол раствора 90°) нагружались на электровзрывной установке. Внешний вид нагруженных образцов при двух видах воздействия подобен [3]. Результаты исследований показали, что происходит диспергирование из вершин пирамидок при длине ударной волны, сравнимой или меньшей линейных размеров нанесенных возмущений, при этом энергия ударной волны кумулируется элементами возмущенной среды.

При традиционных способах исследования [5] эффектов кумуляции в конденсированных

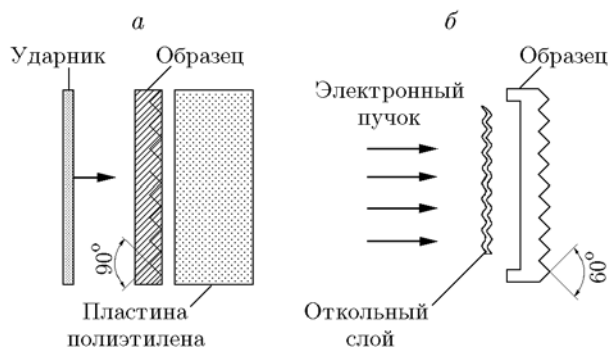


Рис. 1. Схемы экспериментов:

a — при нагружении на электровзрывной установке; *b* — при воздействии импульсов релятивистских электронов

средах, например в металлических образцах с нанесенными возмущениями в виде канавок, при ударно-волновом нагружении с помощью взрывчатых веществ кумуляция происходит из глубины нанесенных возмущений.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

С помощью разработанного математического пакета программ интерактивной системы анализа изображений [1–3] определены количественные характеристики продуктов диспергирования и гидродинамических мод, которые вызывают изменение формы нагруженных образцов.

На рис. 2, *a* показаны разрушенная медная пирамидка и шлиф образца (толщина откольного слоя ≈ 0.1 мм), на рис. 2, *б* — продукты диспергирования на преграде и вид частиц диспергированного металла на преграде после воздействия импульсами релятивистских электронных пучков.

На рис. 3 приведены количественные характеристики полос скольжения кристаллической решетки в нижней и верхней частях пирамидки: гистограмма распределения полос скольжения (рис. 3, *a*); фрактальная размерность полос скольжения d_f (рис. 3, *б*); показатель Хёрста H' — нормированный размах полос скольжения в зависимости от их числа (рис. 3, *в*).

Фрактальная размерность d_f характеризует плотность гидродинамических мод в зависимости от их линейного размера, а значения $d_f > 1$ свидетельствуют о том, что моды проявляют коррелированное (самоорганизованное) поведение.

Показатель Хёрста H' позволяет определить, носит ли процесс случайный характер или имеет предысторию (персистентный процесс). Так, значения $H' > 0.5$ характеризуют состояние, при котором гидродинамические моды течения кристаллической решетки металла имеют кооперативный характер, а их возникновению предшествуют процессы также кооперативного характера.

В многочисленных расчетно-теоретических и экспериментальных исследованиях [1–3, 7, 8, 10, 11] показано, что металлы проявляют универсальные синергетические признаки релаксации неравновесных динамических деструктивных процессов. Это обусловлено как

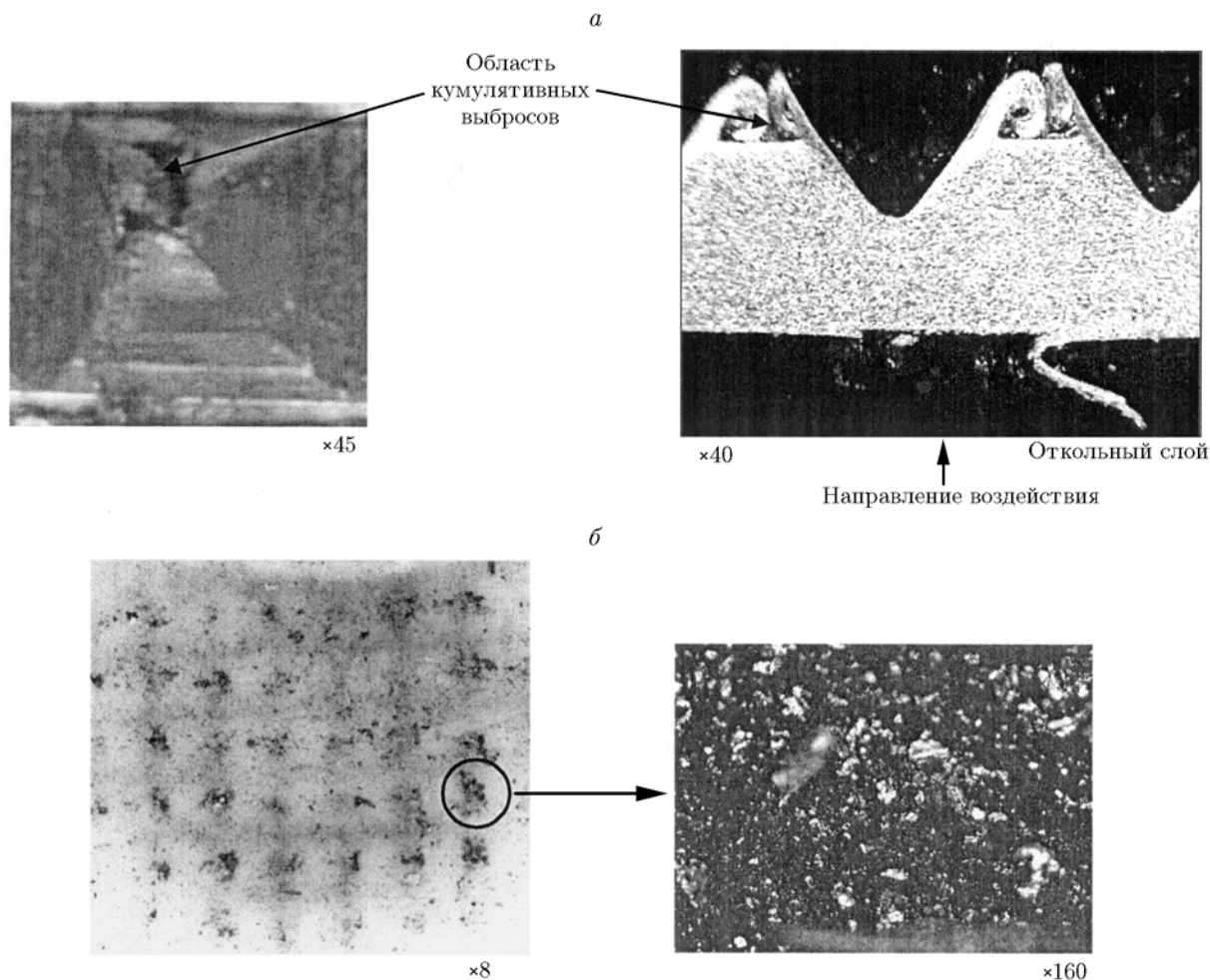


Рис. 2. Вид разрушенных пирамидок и шлиф медного образца после воздействия релятивистскими электронными пучками (а); продукты диспергирования на преграде (б)

фрактальной природой диссипативных структур, возникающих в результате высокоинтенсивного воздействия на металлы (конденсированные среды), их перколяционными свойствами, так и переходами неравновесной системы с одного масштабно-временного уровня на другой (рис. 4). Такой переход осуществляется при достижении определенной концентрации диссипативных структур при выполнении условия $r \approx 3D$, где r — расстояние между диссипативными структурами размером D . Это позволяет оценить энергообмен между различными масштабно-временными уровнями [2, 10, 11].

Характер диссипативных структур и их количественные характеристики подобны при динамическом разрушении (в откольных явлениях металлов) и диспергировании [2, 10, 11].

Ударно-волновое движение среды (металлического образца) при воздействии импульсов

электронных пучков инициируется путем откольного разрушения, реализуемого в режиме импульсного объемного разрушения.

Ранее было показано, что при граничном значении энергии $E_{cr}(t)$, при котором происходит макроразрушение (диапазон долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с), отношение $I(t) = \frac{E_{cr}(t)}{H' + L_m}$ для всех металлов при одном и том же значении долговечности имеет близкие значения, т. е. является инвариантом по отношению к порядковому номеру. Соотношение $I(t)$ представляет собой временную обобщенную переменную, составленную из табличных значений энергетических параметров и амплитудно-временных характеристик внешнего воздействия. Поведение металлов при динамическом разрушении на раз-

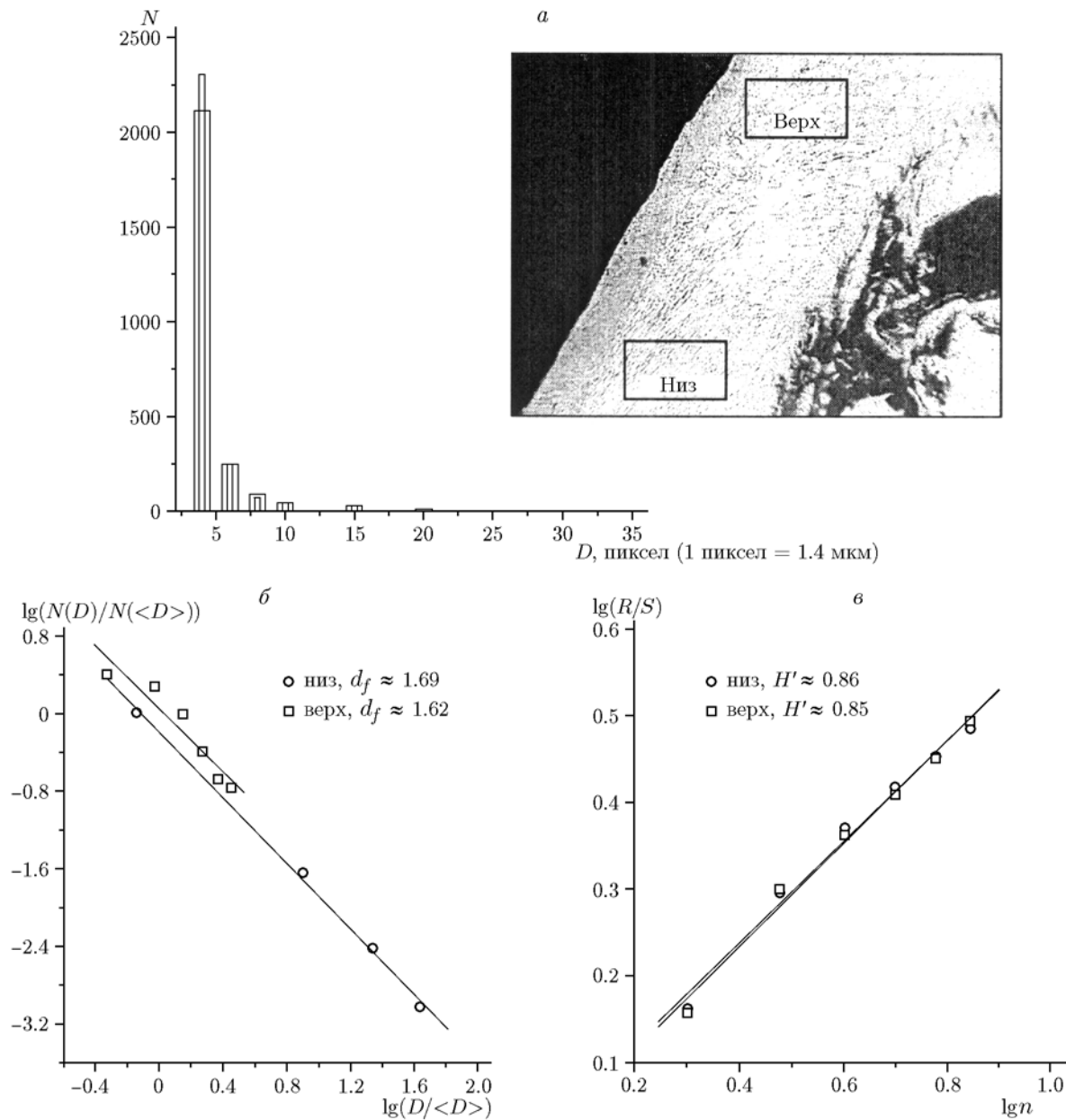


Рис. 3. Внешний вид грани медной пирамидки ($\times 200$) и гистограмма распределения полос скольжения в нижней и верхней частях пирамидки (а); фрактальная размерность полос скольжения (б); зависимость нормированного размаха полос скольжения от их числа (в)

личных масштабно-временных уровнях носит кооперативный характер, металлы проявляют синергетические признаки поведения. Это обусловлено фрактальной природой ансамбля диссипативных структур, возникающих в результате высокоинтенсивного воздействия на конденсированные среды, их перколяционными свойствами, переходами неравновесной системы с одного масштабно-временного уров-

ня на другой, контролируемые концентрационными критериями. Переменная $I(t)$ в рассмотренных масштабно-временных диапазонах определяется не только свойствами среды, но и амплитудно-временными параметрами нагружения. В таких условиях табличные параметры и параметры нагружения становятся функционалами процессов переноса между масштабно-временными уровнями неравновес-

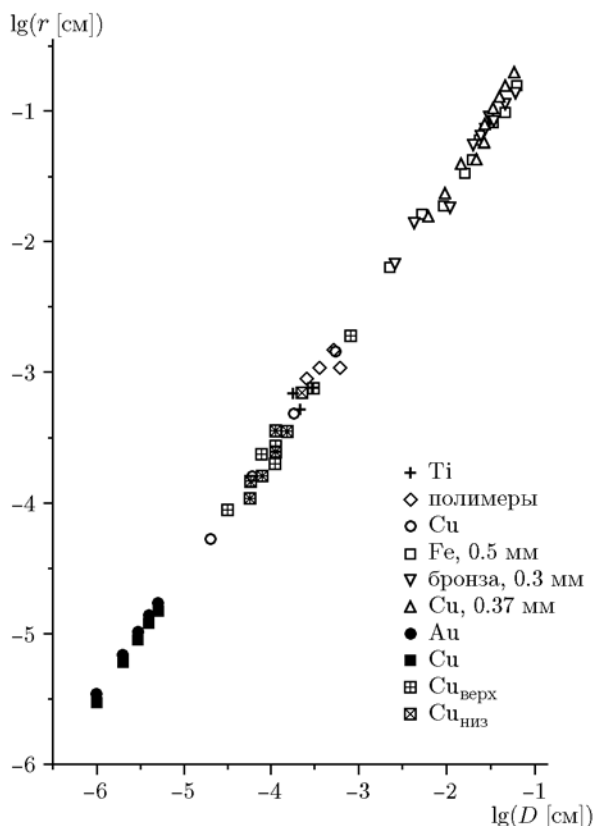


Рис. 4. Зависимость среднего расстояния между элементами диссипативных структур от их размера:

наноуровень — шероховатость на поверхности: Au, Cu [13]; мезоуровень I — каскад полос скольжения после ударно-волнового воздействия: Ti [2], полосы скольжения вблизи граней верхней и нижней частей пирамидок (результаты данной работы); мезоуровень II — каскад центров разрушения после воздействия релятивистскими электронными пучками: Cu ($\Delta = 0.37$ мм), бронза ($\Delta = 0.3$ мм); Fe ($\Delta = 0.5$ мм) [2]; макроуровень — микротрещины: полимеры; шероховатость на поверхности Cu [14, 15]

ной системы энергий, импульсами, т. е. становятся функционалами процесса релаксации.

Диспергирование из вершин пирамидок можно рассматривать как процесс делокализованного динамического разрушения. При одинаковых значениях переменной $I(t)$ для медного и алюминиевого образцов спектральное распределение продуктов диспергирования, фрактальная размерность и показатель Хёрста имеют близкие значения. Вышеизложенное указывает на универсальные признаки процесса диспергирования в различных металлах при ударно-волновом нагружении, вызываемом импуль-

сами релятивистских электронов и разгоняемых электровзрывом ударников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований процесса динамического разрушения металлов [1–3, 7, 8, 10–12] в условиях, когда сопротивление внешнему воздействию оказывают возникающие диссипативные структуры на различных масштабно-временных уровнях, установлено, что кинетика и количественные характеристики процесса динамического разрушения металлов зависят от приведенных параметров, одинаковых для всех металлов при одном и том же значении долговечности, составленных из энергетических параметров металлов и амплитудно-временных характеристик внешнего воздействия [1, 2, 10–12]. Это указывает на универсальные признаки кинетики динамического разрушения металлов в диапазоне долговечности $t \approx 10^{-6} \div (3 \div 5) \cdot 10^{-10}$ с при скорости ввода энергии $\frac{dE}{dt} \sim 10^{11}$ Дж/с, плотности поглощенной энергии $\frac{dE}{dm} \sim 10^4$ Дж/г и определяет возможность прогнозирования поведения неисследованных металлов в экстремальных условиях.

В данной работе показано, что при ударно-волновом нагружении возникает спектр диссипативных структур, подобный спектру диссипативных структур при динамическом разрушении. При определенных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия происходит диспергирование из вершин пирамидок (кумуляция энергии ударной волны самой средой при определенной геометрии). В работе установлено также, что процессу диспергирования предшествуют процессы структурирования течений кристаллической решетки; полосы скольжения являются фрактальным кластером; показатель Хёрста полос скольжения $H' > 0.5$ свидетельствует о коррелированном поведении полос скольжения; элементы диссипативных структур, образующиеся на различных масштабно-временных уровнях в процессе диспергирования металлов, подчиняются концентрированному критерию.

В работе показано, что процесс диспергирования и динамического разрушения при длине ударной волны меньше, чем геометрические размеры нанесенных возмущений, может происходить не из углублений возмущений, а из их вершин. Процессу диспергирования пред-

шествуют гидродинамические течения металла. Этот факт необходимо учитывать при разработке высокоинтенсивной импульсной техники.

Вышеизложенное обосновывает возможность установления универсальных, скейлинговых соотношений процесса диспергирования металлов при высокоинтенсивном внешнем воздействии.

ЛИТЕРАТУРА

- 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 // Докл. АН. — 2002. — Т. 384, № 3. — С. 328–333.
- 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 // Докл. АН. — 2003. — Т. 393, № 3. — С. 326–331.
- Кошелева Е. В., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
- Мохова В. В., Егоров Л. Е., Говорунов И. Н. и др. Лабораторный рентгенодифракционный комплекс для исследования структурных изменений в материалах при ударном нагружении // ПТЭ. — 2010. — № 6. — С. 94–99.
- Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В. и др. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов теньевым способом // ЖЭТФ. — 2009. — Т. 136, вып. 3. — С. 615–620.
- Иногамов Н. А., Жаховский В. В., Ашитков С. И. и др. О нанотокле после воздействия ультракороткого лазерного импульса // ЖЭТФ. — 2008. — Т. 134, вып. 1(7). — С. 5–28.
- Учаев А. Я., Новиков С. А., Цукерман В. А., Багрянов Б. В., Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Трунин И. Р., Юкина Н. А. Особенности откольного разрушения вольфрама в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310, № 3. — С. 611–614.
- Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Учаев А. Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998.
- Мещеряков Ю. И., Жигачева Н. И., Диваков А. К., Макаревич И. П., Барахтин Б. К. Диссипативные структуры в ударно-деформируемой меди // Физ. мезомеханика. — 2007. — Т. 10, № 5. — С. 63–70.
- Илькаев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Сельченкова Н. И., Платонова Л. А., Кошелева Е. В., Конкин А. С. Физическая природа долговечности металлов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг. — 2010. — Т. 1, № 2. — С. 99–103.
- Илькаев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Сельченкова Н. И., Платонова Л. А., Кошелева Е. В., Веселова Е. А., Жабька Л. В. К обоснованию возможности построения расчетной модели процесса динамического разрушения металлов // Ядерная физика и инжиниринг. — 2010. — Т. 1, № 6. — С. 556–559.
- Uchaev A. Ya., Punin V. T., Selchenkova N. I., Kosheleva E. V. Physical longevity nature of light actinides in dynamic failure phenomenon // Phys. Atom. Nuclei. — 2015. — V. 78, N 12. — P. 1353–1356.
- Килиан Х. Г., Веттегрень В. И., Светлов В. Н. Иерархия ансамблей дефектов на поверхности нагруженной меди // ФТТ. — 2001. — Т. 43, вып. 11. — С. 2107–2111.
- Журков С. Н., Левин Б. Я., Савицкий А. В. Высокопрочные полимерные волокна // Докл. АН СССР. — 1969. — Т. 186, № 1. — С. 132.
- 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.

*Поступила в редакцию 19/II 2016 г.,
в окончательном варианте — 6/IV 2016 г.*