

УДК 539.374

ПЕРЕХОД МЕТАЛЛОВ В СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Ю. И. Мещеряков, Н. И. Жигачева, А. К. Диваков,
И. П. Макаревич, Б. К. Барахтин*

Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург

* Центральный научно-исследовательский институт
конструкционных материалов "Прометей", 191015 Санкт-Петербург
E-mail: ym38@mail.ru

В серии экспериментов по ударному нагружению меди МЗ в условиях одноосной деформации исследованы условия перехода материала в структурно-неустойчивое состояние. Определена пороговая скорость деформации, при которой движение структурно-неустойчивой среды выходит на равновесный режим энергообмена между мезо- и макроуровнями — так называемый режим статистического равновесия Колмогорова. Вводятся понятия представительного объема и элементарного импульса энергообмена между мезо- и макроуровнями. Методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии выявлены условия визуализации полос локализованного сдвига и ротационных структур.

Ключевые слова: ударная волна, структурно-неустойчивое состояние, энергообмен между мезо- и макроуровнями, дисперсия скорости, дефект скорости.

Введение. В настоящее время в динамике механики деформируемого твердого тела не решена проблема адекватного описания макроскопического пластического течения с использованием различных элементарных носителей деформации. В частности, с помощью известных моделей динамики дислокаций невозможно адекватно описать даже затухание упругого предвестника: требуемая плотность дислокаций на два-три порядка выше плотности, получаемой с использованием этих моделей [1]. С начала 80-х гг. XX в. предложено несколько вариантов описания процесса пластического течения на мезоуровне [2]. Предполагается, что на этом масштабном уровне носителями деформации являются некоторые объемные структуры, занимающие промежуточное положение между структурами атомно-дислокационного уровня и макроуровня и обладающие трансляционным и ротационными свойствами. В механике такое определение мезоуровня не может быть положено в основу построения моделей динамической пластичности. Прежде всего, в настоящее время отсутствует строгое определение представительного объема на мезоуровне. В этом смысле механика деформируемого твердого тела отстает от механики разрушения, в которой в конце 80-х — начале 90-х гг. было дано определение представительного объема как элементарного акта разрушения с пространственно-временными масштабами, выра-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 08-02-00329, 08-02-00304).

женными в виде интеграла [3, 4]

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t ds \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(x, s) dx \leq \sigma_c, \quad (1)$$

где $\sigma(x, t)$ — пространственно-временной профиль напряжения; τ — параметр осреднения, называемый “инкубационным” (структурным) временем; d — пространственный масштаб осреднения (представительный объем элементарного акта разрушения); σ_c — квазистатическая прочность материала.

Отсутствие аналогичных пространственно-временных критериев в динамических задачах механики деформируемого твердого тела обусловлено прежде всего недостаточным объемом экспериментальных исследований. Исследования в области многомасштабной динамической пластичности пока остаются фрагментарными, что вызвано трудностью их проведения и высокой стоимостью. Вместе с тем имеется ряд экспериментальных фактов, позволяющих конкретизировать механику мезоуровня и вычислить новые динамические переменные [5–7]:

1) распределение скоростей, обусловленное пульсациями скорости (в силу условия сохранения сплошности среды наличие распределения скоростей предполагает трехмерный характер движения среды на мезоуровне);

2) дисперсию массовой скорости, количественно характеризующую среднюю амплитуду пульсаций скорости на мезоуровне;

3) дефект массовой скорости, количественно характеризующий изменение массовой скорости на макроуровне вследствие передачи энергии и импульса с макроуровня на мезоуровень;

4) однозначную аналитическую зависимость между дисперсией скорости на мезоуровне и дефектом скорости на макроуровне.

Указанные характеристики процесса динамического деформирования подробно обсуждаются ниже. Цель настоящей работы — показать, что перечисленные характеристики взаимосвязаны и определяют основные параметры ударно-волнового поведения материалов включая динамическую пластичность и прочность. Проведено экспериментальное исследование процессов структурообразования и откольного разрушения при ударном нагружении меди МЗ в диапазоне скоростей деформации $100 \div 700$ м/с, в котором реализуется переход материала в структурно-неустойчивое состояние.

1. Энергообмен на мезо- и макроуровнях. Дисперсия массовой скорости D^2 характеризует энергию пульсационного движения на мезоуровне, в то время как произведение дефекта массовой скорости Δu и плотности материала определяет количество движения, которое затрачивается на “раскачку” пульсаций скорости. Ранее установлено, что в динамически деформируемых гетерогенных средах дефект скорости и дисперсия связаны следующим соотношением [6]:

$$\Delta u = \frac{1}{2} \frac{dD^2}{du}. \quad (2)$$

Это выражение можно записать в виде

$$\Delta u = D \frac{dD/dt}{du/dt} = D \frac{\dot{D}}{\dot{u}}. \quad (3)$$

В случае если выполняется равенство

$$\frac{dD}{dt} = \frac{du}{dt}, \quad (4)$$

т. е. если скорость изменения вариации массовой скорости (корня квадратного из дисперсии) равна скорости изменения массовой скорости частиц среды, дефект скорости равен вариации скорости:

$$\Delta u = D. \quad (5)$$

В случае одноосной деформации соотношение (3) можно записать через деформацию и скорость деформации, разделив правую и левую части на скорость распространения волны C_0 :

$$\frac{\Delta u}{C_0} = \frac{D}{C_0} \frac{\dot{D}/C_0}{\dot{u}/C_0},$$

или

$$\Delta \varepsilon_{mc} = \varepsilon_D \frac{\dot{\varepsilon}_D}{\dot{\varepsilon}_{mc}}. \quad (6)$$

Здесь $\Delta \varepsilon_{mc}$ — изменение величины деформации на макроуровне вследствие энергообмена между мезо- и макроуровнями; $\varepsilon_D, \dot{\varepsilon}_D$ — локальная деформация и скорость деформации на мезоуровне соответственно; $\varepsilon_{mc}, \dot{\varepsilon}_{mc}$ — деформация и скорость деформации на макроуровне. В случае если скорость деформации на мезоуровне равна скорости деформации на макроуровне:

$$\dot{\varepsilon}_{mc} = \dot{\varepsilon}_D, \quad (7)$$

изменение деформации на макроуровне как результат энергообмена между мезо- и макроуровнями определяется величиной деформации на мезоуровне:

$$\Delta \varepsilon_{mc} = \varepsilon_D. \quad (8)$$

В экспериментах по ударному нагружению в случае одноосной деформации непосредственно измеряемыми величинами являются не скорость деформации, а скорость свободной поверхности u_{fs} , вариация скорости D (рис. 1) и дефект скорости Δu , поэтому равенство (5) можно проверить. Вместе с тем физический смысл протекающих при этом процессов следует из выражения (7), которое является условием равенства локальной и

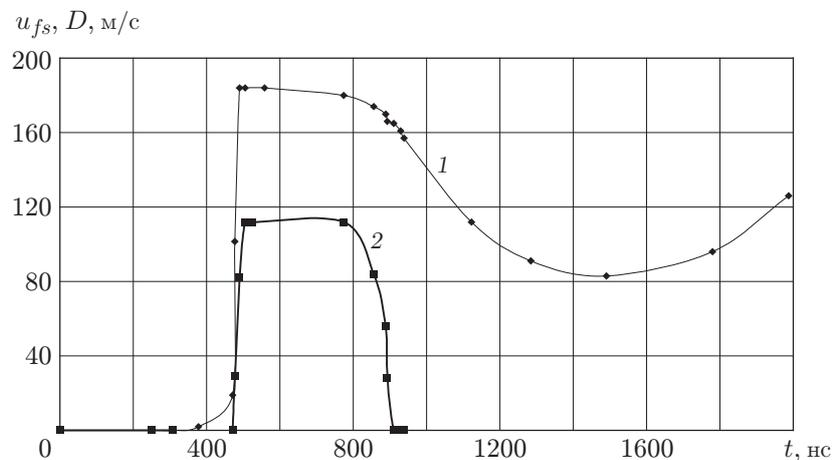


Рис. 1. Зависимости скорости свободной поверхности (1) и вариации скорости (2) от времени, полученные при ударном симметричном нагружении меди МЗ со скоростью $U_{уд} = 467$ м/с

макроскопической скоростей деформации. Выражение (8) характеризует равновесный режим энергообмена между мезо- и макроуровнями, при котором энергия и импульс, полученные средой в процессе ударного нагружения, полностью расходуются на деформацию на мезоуровне. В этом случае вся деформация на мезоуровне определяется локальными смещениями, обусловленными пульсациями массовой скорости. Такой режим подобен так называемому режиму универсального статистического равновесия Колмогорова в теории турбулентности [8], при котором взаимодействие между пульсациями скорости отсутствует и имеет место только вязкое взаимодействие со средой, где турбулентные вихри движутся. При этом пространственные и временные масштабы процессов определяются значением числа Рейнольдса, равным единице:

$$\text{Re} = \Delta u L / \nu = 1 \quad (9)$$

(Δu — изменение скорости за счет расхода энергии на турбулентное движение среды; L — масштаб вихря; ν — кинематическая вязкость).

В работе [9] показано, что турбулентность гидродинамического типа в твердом теле возможна только при достаточно высокой скорости деформации ($\dot{\epsilon} \simeq 10^6 \text{ с}^{-1}$). Для реализации турбулентного режима течения твердое тело должно перейти в структурно-неустойчивое состояние, причем такой переход сопровождается локализацией деформации и резким уменьшением вязкости. Следует отметить две особенности процесса перехода твердого тела в турбулентное состояние:

1) переход твердого тела в структурно-неустойчивое состояние имеет статистическую природу: в общем ансамбле движущихся частиц число частиц, скорость которых выше средней скорости, должно быть больше числа частиц, скорость которых ниже средней скорости;

2) инерция частиц на мезоуровне должна быть больше средней инерции частиц в ансамбле.

Сказанное выше непосредственно следует из критерия перехода в структурно-неустойчивое состояние, полученного в [6]:

$$\frac{D}{u} \frac{\dot{D}}{\dot{u}} \geq 1. \quad (10)$$

Умножая в (10) числитель и знаменатель на массу ансамбля частиц, получаем

$$\frac{D}{u} \frac{m\dot{D}}{m\dot{u}} \geq 1.$$

Здесь $m\dot{D}$, $m\dot{u}$ — сила инерции ансамбля частиц на мезо- и макроуровне соответственно; коэффициент вариации D/u имеет смысл весового коэффициента.

В неравновесной статистической механике условие (1) означает, что функция распределения частиц по скоростям должна быть несимметричной. В то же время асимметрия функции распределения частиц по скоростям означает, что кинематика ансамбля частиц на мезоуровне имеет ротационный характер. Этот вывод непосредственно следует из определения так называемого кинетического тензора напряжений, вводимого в кинетической теории как второй статистический момент функции распределения частиц по скоростям:

$$P_{ik} = m \langle c_i c_k \rangle = m \int_{-\infty}^{\infty} c_i c_k f(v) dv$$

(c_i , c_k — компоненты относительных скоростей частиц в направлениях x_i и x_k). В случае если функция распределения $f(v)$ асимметрична, разность компонент тензора напряжений не равна нулю:

$$p_{ik} - p_{ki} = \epsilon_{ikm} \tau_m \neq 0,$$

что свидетельствует о наличии в среде моментных напряжений.

Вместе с тем имеется существенное различие между турбулентностью в жидкости и стохастическими пульсациями массовой скорости в динамически деформируемом твердом теле. Это различие обусловлено физическим смыслом динамической вязкости. В жидкости вязкость учитывает диссипативный характер взаимодействия турбулентных вихрей со средой. При этом в соответствии с режимом течения Колмогорова в условиях статистического равновесия взаимодействие вихрей отсутствует и имеется только диссипативное взаимодействие вихрей со средой, в которой они движутся. В случае динамически деформируемого твердого тела процесс пластического течения имеет две стадии. На первой стадии процесс динамического деформирования осуществляется за счет пульсаций массовой скорости и вязкость как диссипативная характеристика среды в классическом ее понимании отсутствует. Вязкость появляется на второй стадии процесса, когда крупномасштабные пульсации скорости исчезают в результате перехода процесса динамического деформирования с мезоуровня на более мелкомасштабный, например атомно-дислокационный, уровень. На первой стадии процесса динамического деформирования эффективная вязкость на мезоуровне характеризует обратимый процесс энергообмена между макро- и мезоуровнями. Подставляя выражение (3) в (9), получаем

$$\text{Re} = \frac{\Delta u L}{\eta} = \frac{D}{\eta} \frac{\dot{D}}{\dot{u}} L = 1.$$

В случае равновесного режима энергообмена между макро- и мезоуровнями, когда выполняется соотношение (4), кинематическая вязкость на мезоуровне равна

$$\eta = DL,$$

т. е. определяется только зависящей от дисперсии интенсивностью пульсаций скорости на мезоскопическом уровне и пространственным масштабом пульсаций.

Соотношение (2), связывающее дефект скорости и дисперсию, характеризует энергообмен между мезо- и макроуровнями. В то же время смещения среды, вызываемые пульсациями скорости, имеют конечные временной и пространственный масштабы. В случае динамического деформирования это означает, что на “раскачку” пульсаций скорости требуется некоторое время, которое определяется нелокальным характером процессов пластического деформирования на мезоуровне. В такой ситуации по аналогии с элементарным актом разрушения в механике разрушения [3, 4] осреднение процесса энергообмена между мезо- и макроуровнями можно провести следующим образом:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{2} \frac{\partial D^2}{\partial u} ds \leq \Delta u$$

(τ — время осреднения, которое может рассматриваться как “инкубационное” время процесса энергообмена между мезо- и макроуровнями). Полученное соотношение запишем в виде

$$\int_{t-\tau}^t \frac{1}{2} \frac{\partial D^2}{\partial u} ds \leq \Delta u \tau. \quad (11)$$

В правой части (11) величина $\Delta u \tau$ представляет собой величину среднего смещения, создаваемого пульсациями с дисперсией D^2 за время τ . В случае равновесного режима энергообмена, когда выполняется соотношение (4), критерий (11) преобразуется к виду

$$\int_{t-\tau}^t D(s) ds \leq \Delta U_{cr} \tau, \quad (12)$$

где ΔU_{cr} — критическое значение дефекта скорости, соответствующее элементарному акту смещения частиц среды. Величина $\Delta U_{cr} \tau$ — смещение, имеющее место в случае, когда выполняется соотношение (7), т. е. когда локальная скорость деформации на мезоуровне равна средней макроскопической скорости деформации. Соотношение (12) можно рассматривать в качестве определения представительного объема в динамических задачах механики двухуровневых систем.

Как отмечено выше, наличие дисперсии массовой скорости в динамически деформируемой среде означает, что на мезоуровне имеет место не только трансляционное, но и ротационное движение среды. Если носителем деформации является ротационная ячейка, то величина $\Delta U_{cr} \tau$ представляет собой среднее смещение, создаваемое в процессе ротации за время τ в равновесном режиме динамического деформирования. Как показано ниже, средний размер ротационной ячейки в меди приближенно равен 20 мкм, что соответствует среднему смещению среды $\Delta l \approx 60$ мкм при полном обороте ротационной ячейки. При скорости ударника $U_{уд} \approx 467$ м/с значение дефекта скорости достигает 282 м/с. Следовательно, для меди инкубационное время энергообмена между мезо- и макроуровнями составляет $\tau = \Delta l / \Delta U_{cr} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ с. При $U_{уд} \approx 467$ м/с длительность переднего фронта равна $5 \div 6$ нс. Это означает, что процесс энергообмена происходит за фронтом импульса сжатия.

Умножив обе части соотношения (12) на акустический импеданс деформируемой среды ρC_0 , получаем

$$\rho C_0 \int_{t-\tau}^t D(s) ds \leq \Delta \sigma \tau,$$

где $\Delta \sigma \tau = \rho C_0 \Delta u \tau$ — количество движения (импульс), передаваемое на мезоуровень в течение инкубационного времени энергообмена между мезо- и макроуровнями.

При испытании материала в условиях одноосной деформации имеется возможность измерения доли энергии и импульса, передаваемых в процессе динамического деформирования с макроуровня на мезоуровень. Современные методы диагностики высокоскоростных процессов позволяют одновременно регистрировать три динамические характеристики, получаемые с использованием временного профиля скорости свободной поверхности: среднюю массовую скорость в волне нагрузки u , дисперсию массовой скорости D^2 (как следствие скоростной неоднородности процесса динамического деформирования) и дефект массовой скорости Δu . Профиль скорости свободной поверхности определяет зависимость средней массовой скорости от времени $u(t) = u_{fs}(t)/2$, тогда как дисперсия массовой скорости является количественной характеристикой разброса мезочастиц по скоростям. Как отмечено выше, выражение (2) определяет текущее значение дефекта скорости как результат энергообмена между мезо- и макроуровнями, в том числе вдоль фронта ударной волны. Конечное значение дефекта массовой скорости равно разности между максимальным значением скорости свободной поверхности плоской мишени на плато импульса сжатия (см. рис. 1) и независимо измеренной скоростью ударника при симметричном соударении:

$$\Delta u = U_{уд} - U_{fs}^{\max}.$$

Из рис. 1 следует, что при $U_{уд} = 467$ м/с скорость свободной поверхности на плато импульса сжатия приближенно равна 185 м/с, соответственно дефект скорости $\Delta u = 282$ м/с. Количество движения, соответствующее этому дефекту скорости, расходуется на скрытое деформирование среды на мезоуровне, которое проявляется в виде пульсаций скорости и количественно характеризуется дисперсией скорости. Это означает, что зависимость средней скорости от времени не характеризует весь отклик материала на ударное нагружение.

2. Методика и результаты эксперимента. Ударное нагружение плоских образцов в виде шайб диаметром 52 мм и толщиной 5 мм выполнено на метательной легкогазовой установке калибром 37 мм. В большинстве экспериментов толщина мишени и ударника подбирались таким образом, чтобы реализовывался тыльный откол мишени. Для регистрации временных профилей скорости свободной поверхности мишени использовался модифицированный скоростной двухканальный интерферометр “Sandia” с высоким пространственным (приблизительно 50 мкм) и временным (порядка 1 нс) разрешениями [10]. Данная методика регистрации позволяет измерять также вариацию массовой скорости D (как следствие неоднородности скорости на мезоуровне) и дефект скорости Δu на плато импульса сжатия.

Для обеспечения выполнения условий однократного прохождения волны через образец в экспериментах использовались специальные ловушки импульса. Для предотвращения повторного нагружения материала отраженными от боковых поверхностей мишени волнами исследуемый образец конически запрессовывался в кольцо из того же материала [11], а с тыльной стороны мишени помещалась медная пластина толщиной 2,5 мм (рис. 2). При соответствующем соотношении толщин ударника и пластины на границе мишень — пластина реализовывались условия так называемого искусственного откола, при этом основная мишень подвергалась однократному нагружению. С целью изучения влияния ударного нагружения на динамическую пластичность и прочность материала в ряде экспериментов в качестве конически запрессовываемой вставки использовалась мишень, подвергнутая ударному нагружению в предшествующих экспериментах. При этом вновь регистрировался временной профиль скорости свободной поверхности, который, как правило, значительно отличался от профиля, получаемого при первичном нагружении.

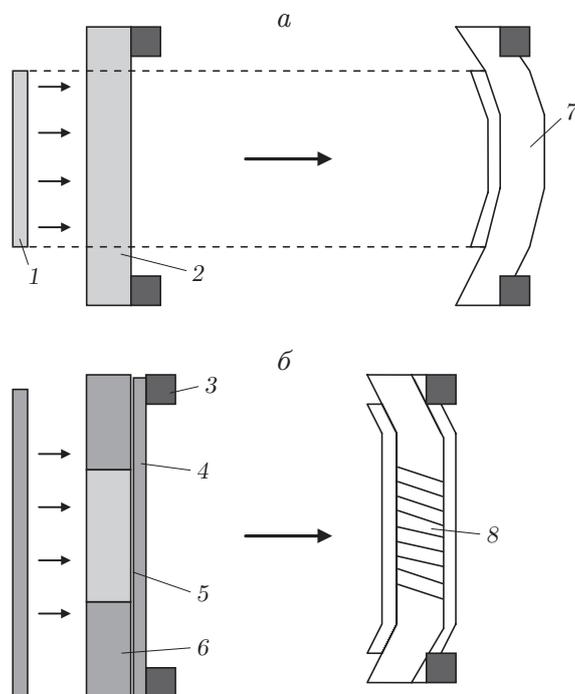


Рис. 2. Схемы ударного нагружения образцов:

а — трехмерное деформирование с прогибом мишени, *б* — деформирование при одномерной деформации в центре образца; 1 — ударник, 2 — мишень, 3 — опора, 4 — экран, 5 — образец, 6 — армирующий диск, 7 — зона трехмерной деформации, 8 — зона одномерной деформации

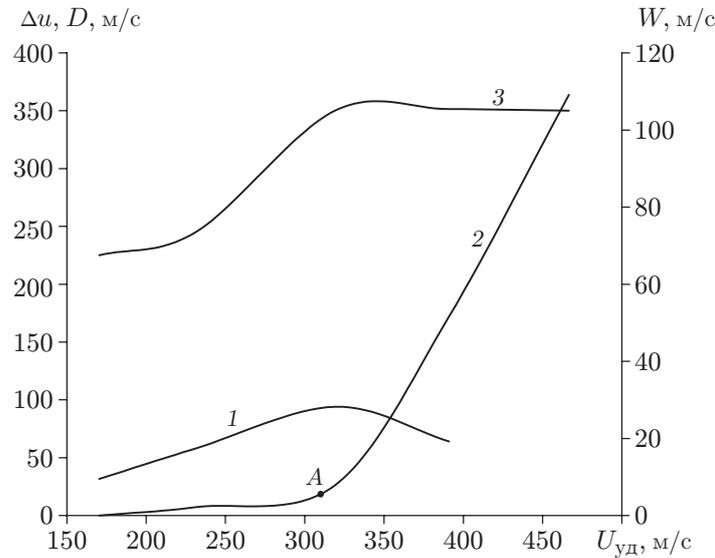


Рис. 3. Зависимости вариации скорости D (1), дефекта скорости Δu (2) и откольной прочности W (3) от скорости ударника

После ударного нагружения все образцы разрезались по одной из плоскостей вдоль направления распространения волны и исследовались методами оптической, растровой, а при необходимости и просвечивающей электронной микроскопии.

На рис. 3 приведены зависимости вариации скорости, дефекта скорости, откольной прочности (разности между максимальным значением скорости свободной поверхности на плато импульса сжатия и первым минимумом скорости на заднем фронте импульса) от скорости ударника. Видно, что максимум откольной прочности соответствует скорости ударника в точке пересечения кривых зависимостей $\Delta u(U_{уд})$ и $D(U_{уд})$. В случае меди МЗ на кривой зависимости откольной прочности от скорости ударника имеется два характерных участка. При $U_{уд} \lesssim 170$ м/с откольная прочность $W \approx 70$ м/с, а при $U_{уд} > 350$ м/с откольная прочность возрастает до значения $W \approx 100$ м/с. Увеличение откольной прочности произошло после перехода материала в структурно-неустойчивое состояние, которое возникает в момент выполнения критерия (10). Этот критерий выполняется при скорости ударника, соответствующей излому на кривой зависимости дефекта скорости от скорости ударника (точка A на рис. 3, соответствующая скорости ударника $U_{уд} \approx 310$ м/с).

При повторном ударном нагружении образца из меди МЗ, предварительно нагруженного в результате однократного прохождения волны, наблюдается, во-первых, значительное увеличение упругого предела Гюгонио и, во-вторых, увеличение вязкости материала по сравнению с вязкостью исходного образца. На рис. 4 представлены временные профили скорости свободной поверхности, полученные при ударном нагружении со скоростью $U_{уд} \approx 170$ м/с двух образцов из меди МЗ. Образец материала в исходном состоянии нагружался при $U_{уд} \approx 398$ м/с, после чего из него изготавливалась вставка диаметром 25 мм и запрессовывалась в медное кольцо толщиной 25 мм. При повторном нагружении при $U_{уд} = 170,6$ м/с упругий предел Гюгонио увеличивается в семь раз, а длительность переднего фронта импульса сжатия — в три раза по сравнению с образцом материала в исходном состоянии, нагруженным при той же скорости. Такое увеличение обусловлено изменением дефектной структуры материала при первичном ударном нагружении. Вместе с тем значение откольной прочности практически не меняется ($W = 73,5$ м/с). Это объясняется тем, что повторное нагружение осуществлялось в области допороговых скоростей

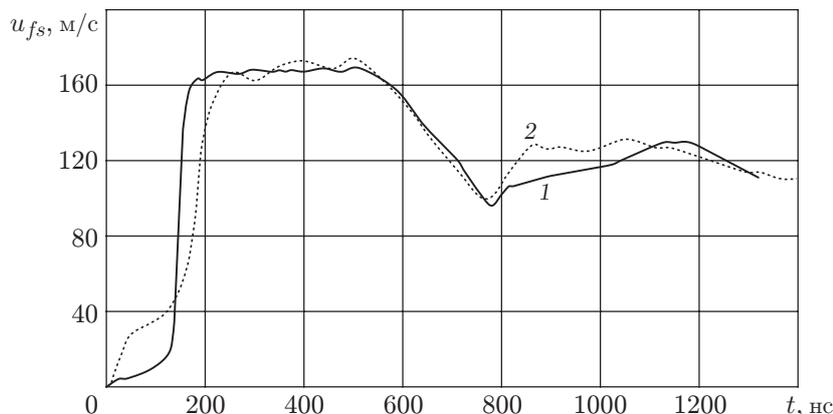


Рис. 4. Зависимость скорости свободной поверхности от времени, полученная при ударном нагружении со скоростью $U_{уд} \approx 170$ м/с двух образцов из меди МЗ:

1 — нагружение материала в исходном состоянии; 2 — нагружение материала, предварительно подвергнутого ударному нагружению при $U_{уд} = 398$ м/с

деформации, в которой выполняется условие $(D/u)\dot{D}/\dot{u} \leq 1$, означающее, что материал не перешел в структурно-неустойчивое состояние. Таким образом, несмотря на значительное увеличение динамического предела текучести материала и вязкости, вызванное первичным нагружением, откольная прочность возрастает только в том случае, если материал успевает перейти в структурно-неустойчивое состояние.

3. Микроструктурные исследования. Исследования структур образцов, нагружаемых по схемам, представленным на рис. 2, показали, что они существенно различаются. В первом случае (см. рис. 2, *a*) у образца наблюдается значительный прогиб, вызванный ударом, в результате чего деформация имеет трехмерный характер. Во втором случае, когда исследуемый образец запрессован в шайбу из того же материала (см. рис. 2, *б*), его деформация остается одномерной на протяжении всего процесса динамического деформирования. Как известно, трехмерный характер деформирования значительно облегчает зарождение дефектов упаковки и двойниковой структуры [12] при ударном нагружении. Рост пластической деформации за счет неограниченного расщепления дислокаций (движения частичных дислокаций) с образованием “стопок” обнаружен и детально исследован в работе [13]. Установлено, что структурные образования в виде системы расщепленных дислокаций представляют собой объемные образования с ПГУ-структурой. Объемная “стопка” дефектов упаковки в меди МЗ показана на рис. 5. В образцах, испытанных по схеме, представленной на рис. 2, *a*, обнаружены объемные структурные образования, равномерно распределенные по всему образцу (рис. 6). В одном зерне размером $150 \div 300$ мкм зарождается $500 \div 1000$ подобных объемных образований. Фотография структуры зерна в меди МЗ с равномерно распределенными образованиями второй фазы, полученная с использованием растрового электронного микроскопа, представлена на рис. 7. На рис. 8 приведена зависимость среднего размера объемных структур ПГУ-фазы от расстояния до нагружаемой поверхности образца, а на рис. 9 — фотографии микрошлифов, полученные с помощью оптического микроскопа. Из рис. 8 следует, что с увеличением расстояния от нагружаемой поверхности плотность структурных образований растет. После того как пластический фронт принимает стационарную форму, рост плотности структурных образований замедляется. Это свидетельствует о том, что в зарождении данных структур важную роль играет длительность переднего фронта импульса сжатия. Таким образом, в экспериментах по ударному нагружению меди МЗ выявлены условия, при которых в

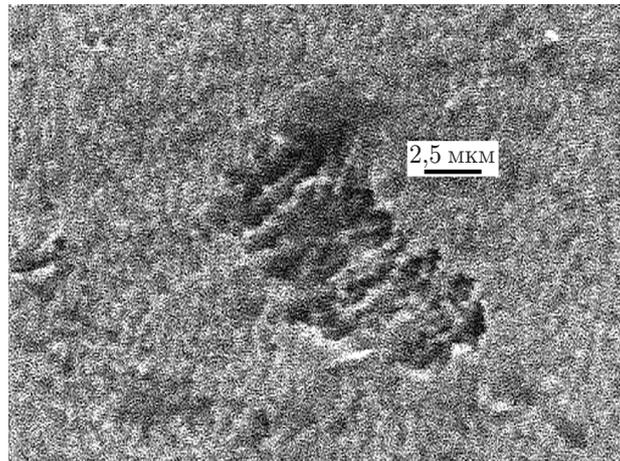


Рис. 5. Объемная “стопка” дефектов упаковки в меди МЗ

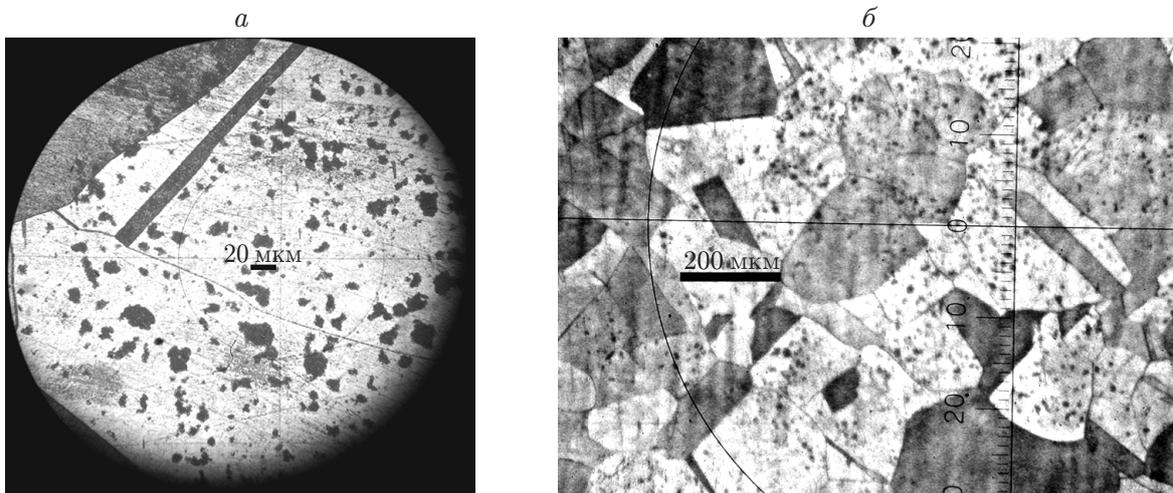


Рис. 6. Структура меди МЗ с включениями ПГУ-фазы:
a — хаотическая структура ПГУ-фазы (темные пятна) внутри одного зерна меди МЗ;
б — структура ПГУ-фазы в поперечном разрезе мишени

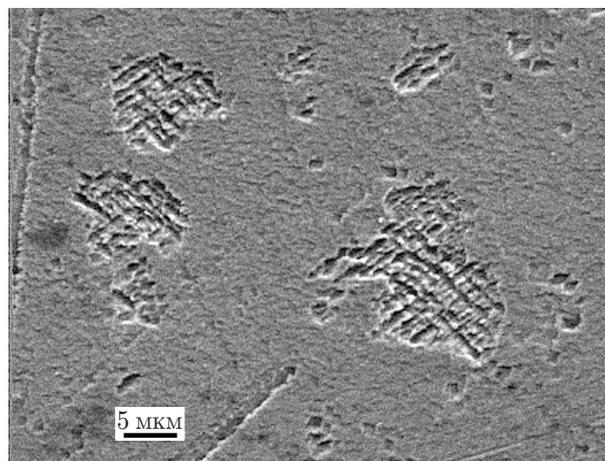


Рис. 7. Объемные образования из “стопок” дефектов упаковки, распределенные в зерне меди МЗ

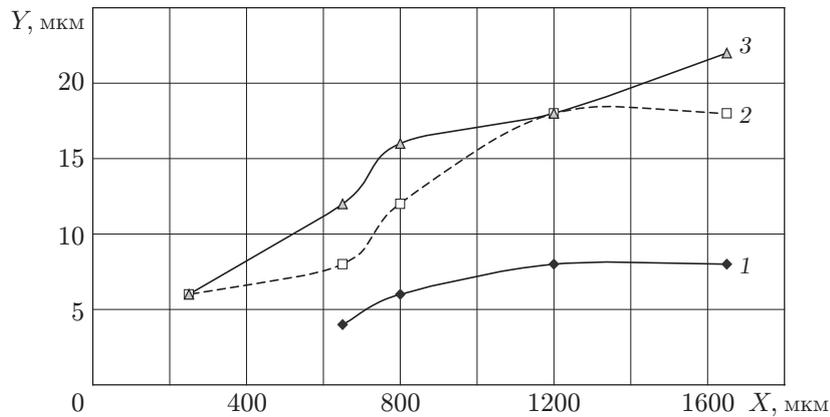


Рис. 8. Зависимость среднего размера объемных образований ПГУ-фазы от расстояния до нагружаемой поверхности при различных значениях скорости ударника:

1 — $U_{уд} = 400$ м/с; 2 — $U_{уд} = 460$ м/с; 3 — $U_{уд} = 500$ м/с

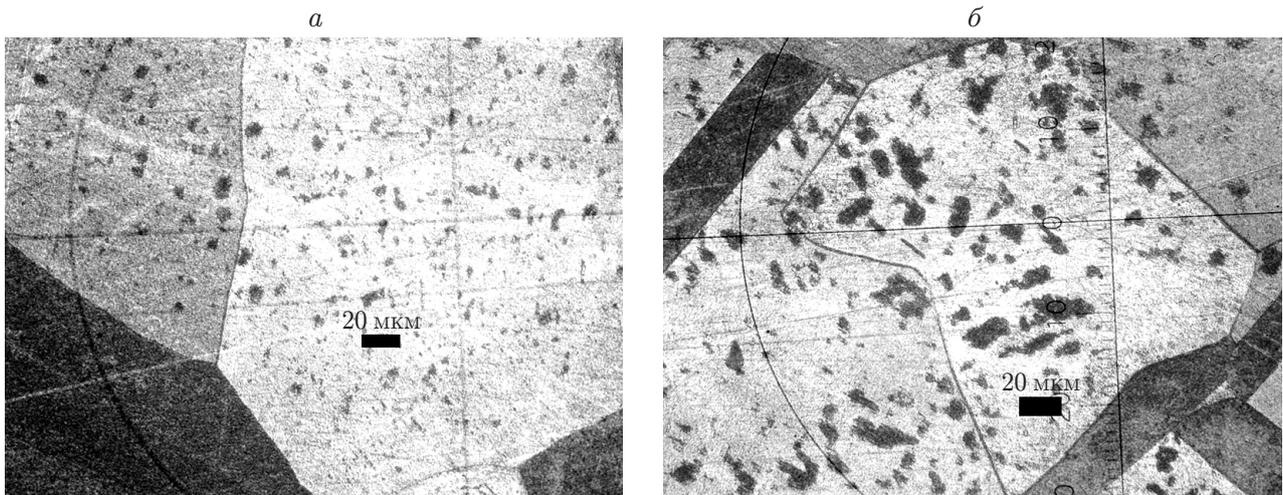


Рис. 9. Фотографии микрошлифов после ударного нагружения меди МЗ на различных расстояниях от нагружаемой поверхности мишени ($U_{уд} = 460$ м/с):

а — $X = 400$ мкм, б — $X = 1400$ мкм

исходной матрице с ГЦК-структурой формируются объемные образования второй фазы с ПГУ-структурой, т. е. образуется композитный материал. Сравнение зависимостей на рис. 3, 8 позволяет сделать вывод, что увеличение плотности двойниковых структур с ростом скорости нагружения коррелирует с увеличением откольной прочности.

При изменении условий нагружения (мишень нагружается не с помощью метательной установки, а с использованием “взрывной сборки”) картина структуризации резко меняется [14]. Главным отличием полученной в результате такого нагружения сетчатой двойниковой структуры от стандартной картины двойникового является то, что двойники не занимают всю площадь зерна, а сосредоточены в областях размером $10 \div 25$ мкм. На рис. 10 видно, что вихревые структуры плотно заполняют все поле зерна (размер зазоров между ними не превышает $1 \div 2$ мкм). В этом случае режим “статистического универсального равновесия Колмогорова” не реализуется, так как вихревые структуры взаимодействуют как между собой, так и с границами зерна. При этом реализация вихревой структуры за-

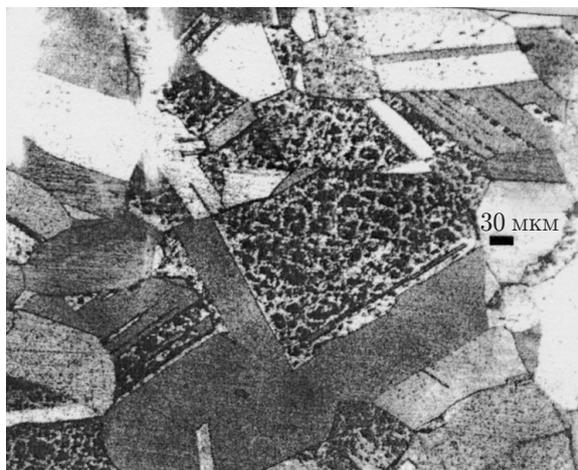


Рис. 10

Рис. 10. Общий вид поперечного шлифа мишени с бездефектными и структурированными зернами после ударных испытаний по методике контактного нагружения с помощью “взрывной сборки”

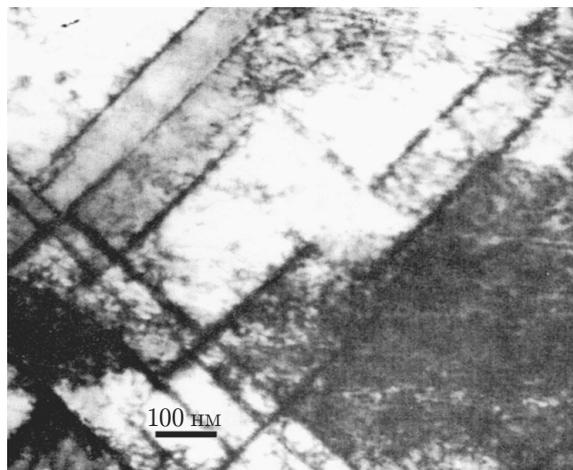


Рис. 11

Рис. 11. Микродвойниковая сетчатая структура в просвечивающем электронном микроскопе

висит от ориентации зерна относительно направления распространения волны в образце: на рис. 10 видно, что в соседних зернах вихревые структуры отсутствуют.

Сетка двойников, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, представлена на рис. 11. Видно, что среднее расстояние между двойниками равно $100 \div 200$ нм.

4. Обсуждение результатов. Особенностью поведения металлов при ударно-волновом нагружении является кратковременный переход в структурно-неустойчивое “конвективное” состояние [15–18]. Согласно данным работы [18] продолжительность существования этого состояния в меди и алюминии составляет $0,3 \div 0,5$ мс. В случае одноосного ударного нагружения среда испытывает высокое гидродинамическое давление и сдвиг. Подобная ситуация имеет место в камере Бриджмена. Гидродинамическое давление обуславливает переход материала в “конвективное” состояние, в то время как за счет касательного напряжения осуществляется движение среды в направлении действия нагрузки.

Наблюдаемые в образцах объемные структурные образования в виде системы дефектов упаковки и микродвойников являются визуализацией вихревого течения среды в структурно-неустойчивом состоянии, находящейся под действием высокого давления и сдвига. Если течение является стоковым, т. е. удовлетворяет условию (9), то движение вихрей происходит независимо друг от друга. Картина вихревых структур, полученных в результате микродвойникования (см. рис. 6–9), свидетельствует о равновесном характере энергообмена между мезо- и макроуровнями. Иные структурные образования возникают в отсутствие динамического равновесия. В этом случае структурные образования плотно заполняют весь объем зерна, причем вихревые структуры визуализируются только в зернах, благоприятно ориентированных относительно направления распространения волны (см. рис. 10).

Следует отметить, что основным признаком перехода материала в конвективное состояние является наличие дефекта массовой скорости, регистрируемое в реальном масштабе времени с помощью интерферометрической методики. Что касается сетчатых структур,

показанных на рис. 6–10, то они могут и не реализоваться, если напряженное состояние в зерне не обеспечивает наличия соответствующих сдвиговых компонент напряжения в момент прохождения ударной волны. Такая ситуация имеет место при нагружении образцов по схеме, представленной на рис. 2, б. После ударного нагружения зернистая структура остается практически такой же, как в исходном образце, отсутствуют как микродвойники, так и полосы локализованного сдвига, обычно наблюдаемые при нагружении по схеме, представленной на рис. 2, а, несмотря на то что дефект массовой скорости на плато импульса сжатия фиксируется так же, как и в образцах, нагружаемых по схеме, представленной на рис. 2, а.

Данные интерферометрии свидетельствуют о том, что медь МЗ переходит в структурно-неустойчивое состояние при скорости ударника $U_{уд} = 310$ м/с, когда выполняется условие (10) для скоростей изменения дисперсии и средней массовой скорости. Вместе с тем равновесный режим энергообмена между мезо- и макроуровнями реализуется только при $U_{уд} \approx 350$ м/с, когда выполняются условия (4)–(8). Иными словами, для реализации оптимального режима энергообмена недостаточно, чтобы материал перешел в структурно-неустойчивое состояние. Необходимо, чтобы процесс динамического деформирования вышел на равновесный режим, при котором энергия внешнего воздействия расходуется только на пластическое деформирование среды на мезоуровне (без разрушения). На рис. 12 представлены стадии формирования ротационной ячейки в откольной зоне. Видно, что центральная часть ротационной ячейки полностью разрушена и материал фрагмен-

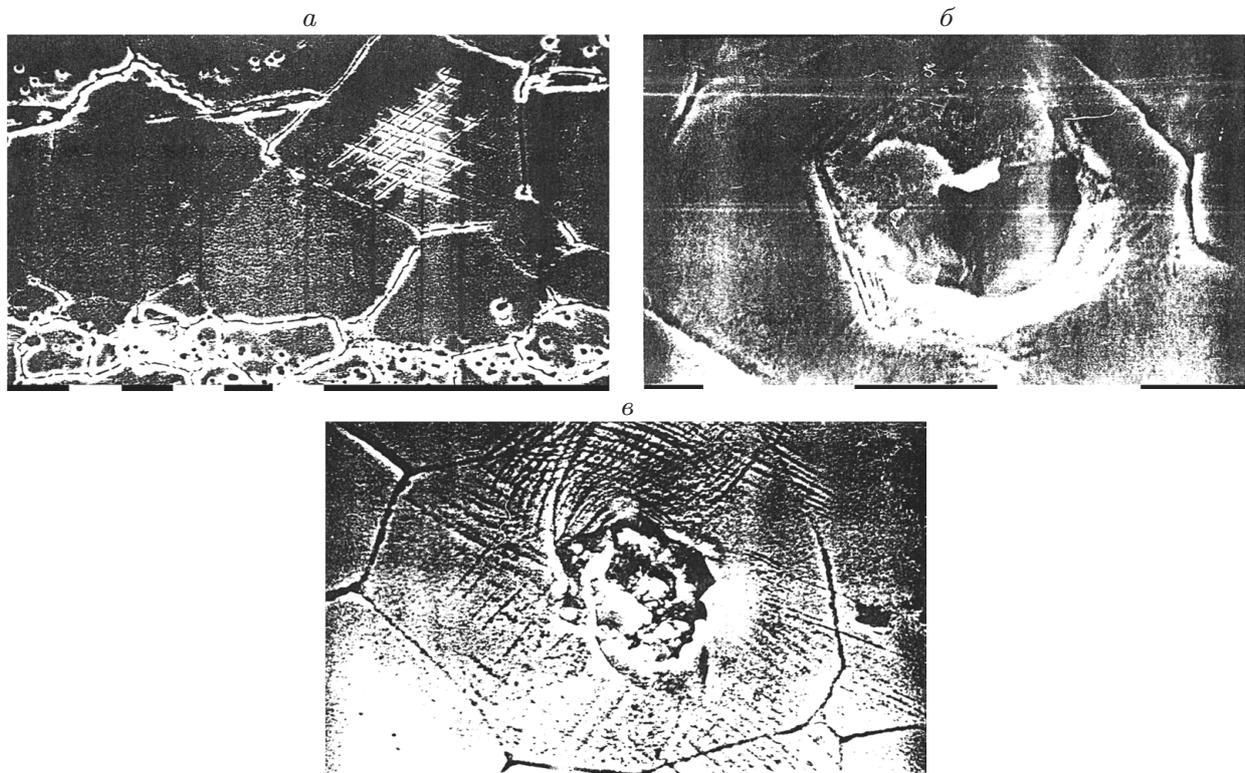


Рис. 12. Стадии зарождения ротационной ячейки в откольной зоне:

а — начальная стадия, на которой зарождается сеть полос локализованного сдвига, ориентированных вдоль кристаллографических плоскостей скольжения; *б* — промежуточная стадия, на которой левая граница ячейки представляет собой кристаллографические плоскости, а по правой границе ячейки происходит разрушение некристаллографического типа; *в* — конечная стадия, на которой произошла фрагментация материала внутри ротационной ячейки с некристаллографической границей

тирован. Это свидетельствует о том, что энергия внешнего нагружения расходовалась не только на пластическое деформирование, но и на разрушение материала.

Из результатов структурных исследований следует, что при определенных характеристиках импульса нагрузки во всем объеме мишени происходит зарождение объемных структур второй фазы, а материал в целом превращается в композит, состоящий из матрицы и объемных структурных образований (см. рис. 6–9). Увеличение динамического предела текучести и вязкости при повторном нагружении образца обусловлено тем, что при первичном нагружении материал, превращаясь в композит, существенно упрочняется. Вместе с тем, как показали испытания, такое превращение не оказывает влияния на откольную прочность материала, определяемую только динамической прочностью исходного материала, который в данном случае играет роль матрицы композита.

Заключение. Испытания меди МЗ в условиях одноосной деформации показали, что при определенных соотношениях между скоростью изменения дисперсии массовой скорости на мезоскопическом масштабном уровне ($0,1 \div 1,0$ мкм) и средней массовой скоростью на макроуровне материал временно переходит в структурно-неустойчивое состояние, при котором пластическое течение имеет ротационный характер (средний размер вихря составляет $10 \div 25$ мкм). В случае если скорость деформации на мезоуровне становится равной скорости деформации на макроуровне, пластическое течение переходит в равновесный режим энергообмена между мезо- и макроуровнями, при котором ротационные структуры взаимодействуют только со средой через эффективную вязкость.

Основным признаком перехода материала в структурно-неустойчивое состояние является увеличение дефекта массовой скорости, определяемого как разность между скоростью свободной поверхности на плато импульса сжатия и независимо измеренной скоростью ударника при симметричном соударении. Возникновение ротационных структур обусловлено зарождением объемных “стопок” дефектов упаковки и микродвойниковых сетчатых образований, реализующихся при трехмерном динамическом деформировании и благоприятном соотношении между гидродинамическим давлением и сдвигом.

При переходе материала в равновесный режим энергообмена между мезо- и макроуровнями происходит увеличение откольной прочности.

Авторы выражают благодарность С. В. Разорену за проведение ряда экспериментов по ударному нагружению образцов с использованием взрывных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson J. N., Jones O. E., Michaels T. E. Dislocation dynamics and single-crystal constitutive relation: shock-wave propagation and precursor decay // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, N 6. P. 2230–2239.
2. Панин В. Е. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, П. В. Макаров и др. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1995.
3. Морозов Н. Ф., Новожилов В. В. Некоторые проблемы структурной механики разрушения // Физ.-хим. механика материалов. 1988. Т. 24, № 1. С. 21–26.
4. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В., Уткин А. А. О структурно-временном подходе при анализе динамического разрушения хрупких горных пород // Зап. Ленингр. горн. ин-та. 1991. Вып. 125. С. 76–86.
5. Trott W. V., Knudson M. D., Chhabildas L. C., Asay J. R. Measurements of spatially resolved variations in shock-compressed heterogeneous materials using line-imaging velocity interferometer // Proc. of the conf. “Shock compression of condensed matter — 1999”, Snowbird (Utah, USA), June 27 — July 2, 1999 / Ed. by M. D. Furnish, L. C. Chhabildas, R. S. Nixon. Melville; N. Y.: AIP Press, 2000. P. 993–996.

6. **Mescheryakov Yu. I.** Meso-macro energy exchange in shock deformed and fractured solids // High-pressure shock compression of solids VI / Ed. by Y. Y. Horie, L. Davison, N. N. Thadhani. N. Y.: Springer-Verlag, 2002. P. 169–213.
7. **Furnish V. D., Vogler T. J., Alexander C. S., et al.** Statistics of the Hugoniot elastic limit from line VISAR // Proc. of the conf. “Shock compression of condensed matter — 2007”, Waikoloa (Hawaii, USA), June 24–29, 2007 / Ed. by M. Elert, M. D. Furnish, R. Chau, N. C. Holmes, J. Nguyen. Melville; N. Y.: AIP Press, 2008. P. 521–524.
8. **Хинце И. О.** Турбулентность. М.: Физматгиз, 1963.
9. **Ханнанов Ш. Х.** Структурная турбулентность в аморфных и кристаллических телах // Дисциплины и ротационная деформация твердых тел / Под ред. А. Е. Романова. Л.: Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе, 1990. С. 215–224.
10. **Mescheryakov Yu. I., Divakov A. K.** Kinetics of mesostructure and strain-rate dependence of materials // Dymat J. 1994. V. 1, N 4. P. 271–287.
11. **Hartman W. F.** Determination of unloading behavior of uniaxially strained 6061-T6 aluminium from residual strain measurements // J. Appl. Phys. 1964. V. 35, N 7. P. 2090–2096.
12. **Murr L. E., Esquvel E. V.** Observations of common microstructural issues associated with dynamic deformation phenomena: Twins, microbands, grain size effects, shear bands and dynamic recrystallization // J. Mater. Sci. 2004. V. 39. P. 1153–1168.
13. **Zaretsky E.** Dislocation multiplication behind the shock front // J. Appl. Phys. 1995. V. 78, N 6. P. 3740–3747.
14. **Antoun T.** Spall fracture / T. Antoun, L. Seaman, D. R. Curran, G. I. Kanel, S. V. Rasorenov, A. V. Utkin. N. Y.: Springer-Verlag, 2003.
15. **Канель Г. И., Дремин А. Н., Молодец А. М.** Изменение прочностных свойств металлов в ударной волне // Физика металлов и металловедение. 1978. Т. 46, № 1. С. 200–203.
16. **Лихачев В. А.** Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / В. А. Лихачев, В. Е. Панин, Е. Э. Засимчук и др. Киев: Наук. думка, 1989.
17. **Олемской А. И., Наумов И. И., Панин В. Е.** О природе конвективного состояния кристаллов в условиях “сверхвысокое давление плюс сдвиг” // Изв. вузов. Физика. 1986. № 6. С. 34–40.
18. **Skokov V. I., Ignatova O. N., Malyshev A. N., et al.** Temporal softening and its effect upon strength // Proc. of the conf. “Shock compression of condensed matter — 2007”, Waikoloa (Hawaii, USA), June 24–29, 2007 / Ed. by M. Elert, M. D. Furnish, R. Chau, N. C. Holmes, J. Nguyen. Melville; N. Y.: AIP Press, 2008. P. 597–600.

Поступила в редакцию 14/VII 2009 г.
