

УДК 374.539

ЛОКАЛИЗОВАННАЯ СТРУКТУРНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. И. Мещеряков, А. К. Диваков, Н. И. Жигачева, Г. В. Коновалов

Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург, Россия

E-mails: ym38@mail.ru, divakov1953@yandex.ru, nat51.07@mail.ru, goldenten@yandex.ru

Проведены ударные испытания четырех хрупких материалов: габродиабаза, чугуна двух модификаций, плавленого кварца и бериллия. Путем локального зондирования свободной поверхности с помощью интерферометра найдена ее скорость, что позволило определить критерий начальной стадии хрупкого разрушения всех испытанных материалов — появление на переднем фронте импульса сжатия горизонтальных ступенек, свидетельствующих о наличии локальных очагов разрушения материала. Установлено, что хрупкий материал оказывает сопротивление ударному сжатию, до тех пор пока в нем имеется обратимый обмен импульсом и энергией процессов, происходящих на мезо- и макроуровнях.

Ключевые слова: ударные испытания, локализованное хрупкое разрушение, откольная прочность.

DOI: 10.15372/PMTF20190120

Введение. Результаты экспериментов [1–3], численного моделирования [4–7] и аналитических исследований [8–10] показывают, что высокоскоростное деформирование и разрушение происходят в условиях многомасштабной скоростной неоднородности. При этом ударный фронт представляет собой суперпозицию двух мод движения: среднее движение плоского фронта и быстрофлуктуирующее движение отдельных участков относительно осредненного движения фронта. В случае волновых процессов первая мода движения соответствует макроскопическому отклику материала на ударное воздействие, в то время как вторая мода характеризует микроскопические движения среды. Для того чтобы учесть многомасштабность движения, необходимо совершенствовать методы экспериментального исследования процессов динамического деформирования и разрушения материалов, а также разрабатывать принципиально новые теоретические подходы.

Цель данной работы — показать, что при динамическом деформировании и пластических, и хрупких материалов процессы разрушения имеют многомасштабный характер, при этом важную роль играет обмен количеством движения и энергией между различными масштабными уровнями.

1. Кинетика энергообмена на макро- и мезоуровнях. На рис. 1 представлена картина движения волнового фронта, распространяющегося в гетерогенной среде. Специфика динамического деформирования заключается в том, что в случае ударного нагружения имеет место не распределение смещений деформируемой среды, как при квазистатическом нагружении, а распределение частиц среды по скоростям. Такое распределение

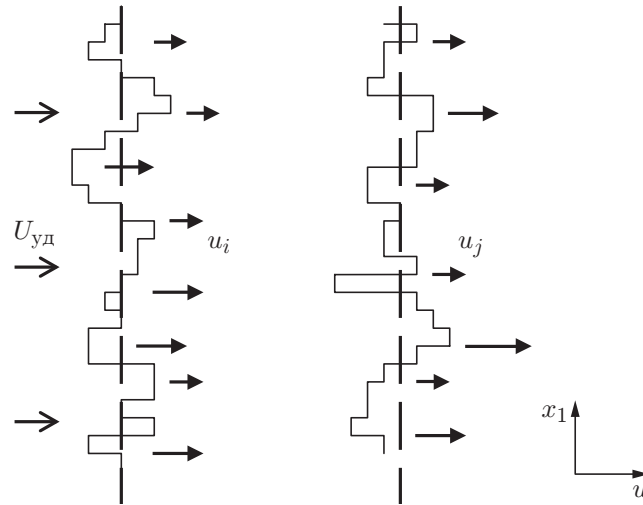


Рис. 1. Положения волнового фронта, распространяющегося в гетерогенной среде, в различные моменты времени:

штриховые линии — среднее положение фронта волны в однородной среде, сплошные — случайные положения отдельных участков фронта

может быть описано статистическими моментами функции распределения по скоростям: нулевой момент — плотность среды, первый — математическое ожидание, или средняя массовая скорость частиц, второй момент — дисперсия массовой скорости:

$$\rho(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(r, v, t) dv, \quad u(x, t) = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{\infty} v f(x, v, t) dv, \quad D^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (v - \bar{u})^2 f(x, v, t) dv.$$

Современные экспериментальные методы диагностики ударно-волновых процессов позволяют регистрировать в реальном масштабе времени не только среднюю массовую скорость $u(x, t)$, вариацию скорости $D(t)$ (корень квадратный из дисперсии), но и так называемый дефект скорости $\Delta U(t)$, определяемый как разность скорости ударника $U_{уд}$ при симметричном соударении и максимального значения скорости свободной поверхности U_{fs}^{\max} на плато импульса сжатия. В случае если массовая скорость измеряется на плато импульса сжатия, дефект скорости равен $\Delta U = U_{уд} - U_{fs}^{\max}$. При симметричном соударении ударника и мишени, когда их акустические импедансы равны ($\rho_l^{уд} C_l^{уд} = \rho_l^M C_l^M$), массовая скорость среды равна половине скорости свободной поверхности мишени: $u(x_0, t) = U_{уд}/2$. В идеальном случае в соответствии с правилом удвоения скорости при выходе ударной волны на свободную поверхность массовая скорость связана со скоростью свободной поверхности соотношением $U_{fs} = 2u$. В результате дефект скорости на плато импульса сжатия равен нулю: $\Delta U = 0$. В действительности вследствие обмена энергией процессов на мезо- и макроуровнях происходит уменьшение скорости на плато импульса сжатия, поэтому значение дефекта скорости также уменьшается: $\Delta U \neq 0$. В работах [11–15] показано, что в динамически нагружаемых гетерогенных средах вследствие обмена энергией процессов на различных масштабных уровнях дефект скорости и дисперсия связаны соотношением

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

На рис. 2 представлены зависимости скорости свободной поверхности и вариации скорости от времени, полученные при ударном нагружении мишени толщиной 15 мм из спла-

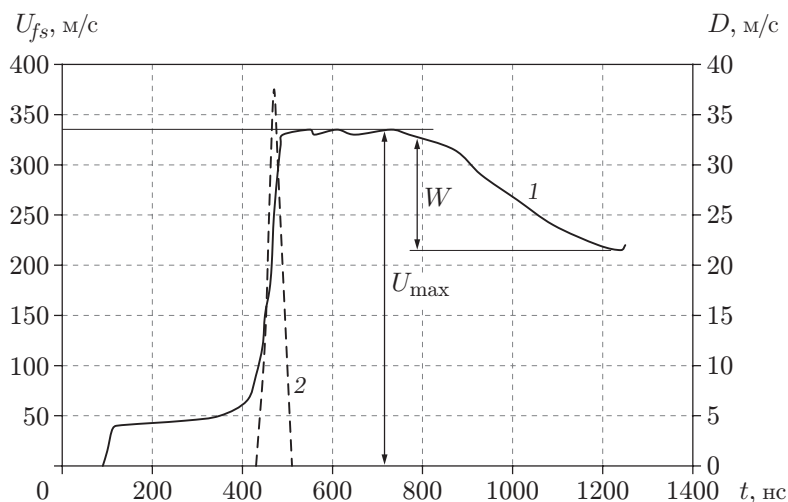


Рис. 2. Зависимости скорости свободной поверхности (1) и вариации скорости (2) от времени, полученные при ударном нагружении мишени толщиной 15 мм из алюминиевого сплава марки Д16 со скоростью $U_{уд} = 370$ м/с

ва марки Д16 со скоростью $U_{уд} = 370$ м/с. Видно, что вариация скорости достигает максимального значения в середине фронта, а в конце фронта становится равной нулю. Это означает, что в стационарной ударной волне пульсации скорости обратимы и существуют только в пределах стационарного пластического фронта, при этом происходит перенос количества движения и энергии с макроуровня на мезоуровень и обратно.

2. Методика и результаты эксперимента. Ударное нагружение плоских образцов из хрупких материалов в условиях одноосной деформации (плоского соударения) выполнено на легкогазовой метательной установке (пушке) калибром 37 мм. В большинстве экспериментов толщина мишени и ударника подбирались таким образом, чтобы реализовывался тыльный откол мишени. Для регистрации профилей скорости свободной поверхности использовался модифицированный скоростной двухканальный интерферометр Sandia с высоким пространственным (приблизительно 50 мкм) и временным (порядка 1 нс) разрешением [16, 17]. Предполагалось, что распределение частиц по скоростям в ударной волне имеет гауссову форму. В этом случае вариация скорости определяется по уменьшению контрастности интерференционного сигнала. Помимо скорости свободной поверхности $U_{fs}(t)$, вариации массовой скорости $D(t)$ и дефекта скорости $\Delta U(t)$ данная методика позволяет определять величину порога структурной неустойчивости на переднем фронте импульса сжатия и откольную прочность материала (см. рис. 2).

2.1. Габродиабаз. До начала ударных испытаний образцы, имевшие форму параллелепипеда размером $52,0 \times 52,0 \times 12,2$ мм, полировались, затем с использованием вакуумного способа напыления на них наносилось алюминиевое покрытие толщиной $20 \div 25$ мкм, что обеспечивало зеркальное отражение луча интерферометра от тыльной поверхности мишени. Результаты испытаний образцов из габродиабаза приведены в табл. 1 ($h_m, h_{уд}$ — толщины мишени и ударника, $U_{уд}$ — скорость реального ударника, $U'_{уд}$ — скорость ударника, полученная путем пересчета скорости для случая, когда материалы ударника и мишени идентичны, D_{max} — вариация скорости, U_{n1}, U_{n2} — пороговые значения скорости, при которых возникает структурная неустойчивость материала на ударное сжатие, W — откольная прочность, Δt — время, в течение которого происходит локальное разрушение материала при ударном сжатии).

Таблица 1

Результаты ударных испытаний образцов из габродиабаза

Номер эксперимента	h_m , мм	$h_{уд}$, мм	$U_{уд}$, м/с	$U'_{уд}$, м/с	D_{max} , м/с	U_{n1} , м/с	U_{n2} , м/с	W , м/с	Δt , нс
1	12,12	2,93	38,8	37,2	6,7	—	28,5	11,1	35
2	11,97	2,91	95,8	92,0	9,2	67,0	87,9	—	50
3	12,25	2,93	122,4	117,5	10,4	74,7	100,8	—	40
4	12,15	2,93	131,0	126,0	10,6	73,3	105,4	—	35

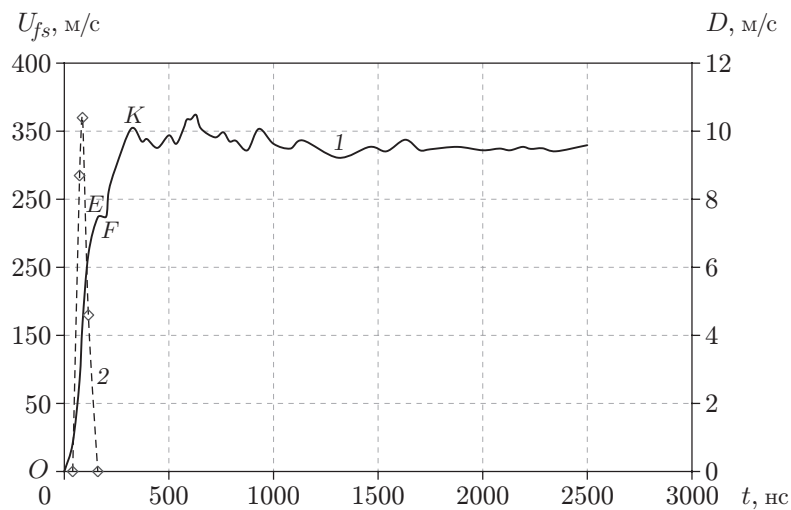


Рис. 3. Зависимости скорости свободной поверхности (1) и вариации скорости (2) от времени, полученные при ударном нагружении мишени из габродиабаза со скоростью $U_{уд} = 117,5$ м/с

Зависимости скорости свободной поверхности и вариации скорости от времени для габродиабаза, полученные при $U_{уд} = 117,5$ м/с, показаны на рис. 3. Видно, что вариация скорости и средняя скорость для этого материала взаимосвязаны. При $U_{fs} = 74,7$ м/с (точка E) на волновом фронте имеется ступенька. Это свидетельствует о том, что произошло необратимое смещение структурного элемента, которое можно трактовать как начало локального разрушения материала. Из рис. 3 следует, что максимальное значение вариации скорости соответствует середине первого участка на профиле скорости, значение, равное нулю, — началу ступеньки. Поскольку вариация скорости характеризует релаксационные свойства среды, можно утверждать, что необратимое смещение структурного элемента на макроуровне начинается в тот момент, когда прекращается релаксация внутренних напряжений на мезоуровне. Аналогичные ступеньки имеются на профилях скорости, полученных при ударном нагружении этого материала со скоростью $U_{уд} = 92,3; 224,8$ м/с. При скоростях ударника, превышающих скорость, при которой наблюдается структуризация, происходит необратимая фрагментация материала, вследствие чего материал утрачивает сопротивляемость откольному разрушению. В результате ударного разрушения материал в откольной зоне всех образцов полностью разрушился на фрагменты различного размера. Распределение размеров фрагментов при различных скоростях соответствует геометрической прогрессии $L_1/L_{i-1} = K$ с коэффициентом подобия, принадлежащим интервалу $1,8 \div 2,5$ (табл. 2) [18].

Таблица 2

Результаты статистической обработки фрагментов, образующихся при разрушении образцов из габродиабаза

Номер эксперимента	L_i , мкм	L_i/L_{i-1}
1	1,0	—
2	2,5	2,50
3	5,0	2,00
4	11,0	2,20
5	22,0	2,00
6	40,0	1,80
7	90,0	2,25
8	180,0	2,00
9	400,0	2,20

Таблица 3

Химический состав исследуемых образцов чугунов

Номер партии	Массовая доля элементов, %									
	C	S	N	Si	P	S	Mn	Fe	Cu	Ti
1	4	0,07	0,0049	1,92	0,08	0,10	0,26	92,84	0,33	0,39
2	4	0,07	0,0052	1,79	0,15	0,07	0,20	93,49	0,08	0,14

2.2. *Чугун*. Проведены ударные испытания двух партий антифрикционных чугунов марки АЧС-3 с добавлением меди и титана. Химический состав чугунов обеих партий приведен в табл. 3. Результаты испытаний чугуна представлены на рис. 4 и в табл. 4 ($A_{осц}$ — амплитуда осцилляций на профиле скорости свободной поверхности мишени).

Несмотря на то что значения скорости ударного нагружения для обеих партий чугуна приблизительно равны, порог структурной неустойчивости и откольная прочность для чугуна второй партии оказались в два раза меньше. В чугуне первой партии на всем фронте волны сжатия имеется распределение частиц по скоростям на мезоуровне. Вторая партия чугуна характеризуется наличием крупномасштабных осцилляций вдоль всего фронта волны с периодом осцилляций порядка 100 нс и амплитудой $A_{осц} = 10 \div 13$ м/с. В то же время на профилях скорости свободной поверхности для чугуна первой партии отсутствуют ступеньки и осцилляции, что свидетельствует об отсутствии смещений структурных элементов относительно друг друга.

На рис. 5 показана структура чугуна с различным количеством добавок меди и титана при разрушении. Образцы из обеих партий серого чугуна состоят из феррито-перлитной основы с включениями графита пластинчатой формы. Исследования микроструктуры образцов, подвергнутых ударным испытаниям, показали, что образцы первой партии чугуна, в которых массовая доля легирующих добавок (меди и титана) больше, имеют более вязкий излом и меньшее количество трещин по сравнению с образцами второй партии чугуна (см. табл. 4). Это свидетельствует о влиянии добавок меди и титана, обуславливающим измельчение графитных включений в образцах первой партии чугуна, что улучшает динамические характеристики материала. Таким образом, металлографическая картина разрушения коррелирует с интерферометрическими данными о реакции материала на ударное нагружение.

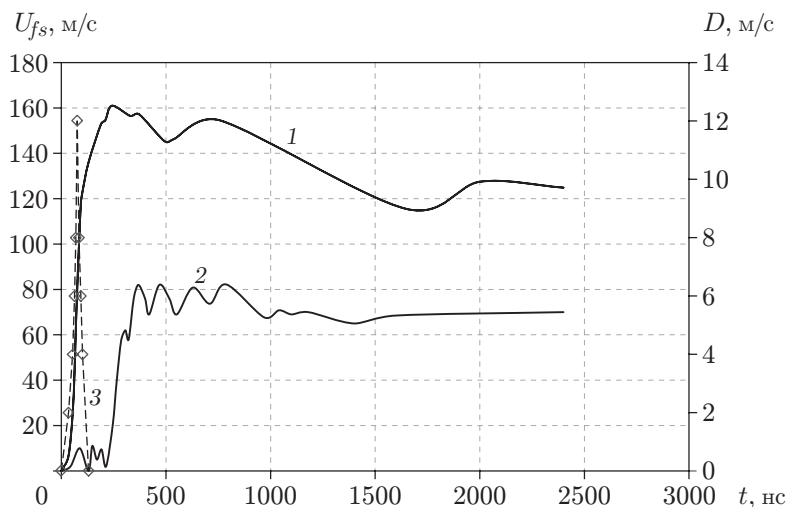


Рис. 4. Зависимости скорости свободной поверхности (1, 2) и вариации скорости (3) от времени, полученные при ударном нагружении мишеней из чугуна: 1 — $U_{уд} = 224,8$ м/с, 2 — $U_{уд} = 98,3$ м/с

Таблица 4

Результаты ударных испытаний исследуемых образцов чугунов

Номер партии	$U_{уд}$, м/с	U_{n1} , м/с	W , м/с	$A_{осц}$, м/с	Δt , с
1	221,3	161	27,0	—	—
2	224,8	82	14,5	12	214

2.3. *Плавленый кварц.* Результаты ударных испытаний образцов из плавленого кварца при различных скоростях ударника приведены в табл. 5 и на рис. 6. На рис. 6 видно, что в плавленом кварце вариация скорости на переднем фронте импульса сжатия не равна нулю. Кроме того, на кривой зависимости $U_{fs}(t)$ отсутствуют ступеньки, свидетельствующие о локальной структурной неустойчивости материала. За переходной зоной ($t > 20$ нс) на кривой $U_{fs}(t)$ имеется плато импульса сжатия. В отличие от случая габродиабаза осцилляции скорости на плато импульса не приводят к необратимому разрушению материала. В плавленом кварце откольного разрушения не происходит ни при $U_{уд} = 98,3$ м/с, ни при $U_{уд} = 224,8$ м/с. Однако с увеличением скорости ударника величина откольной прочности значительно уменьшается ($W = 34,7$ м/с при $U_{уд} = 98,3$ м/с и $W = 23,1$ м/с при $U_{уд} = 224,8$ м/с). При этом амплитуда осцилляций на плато импульса возрастает с увеличением скорости ударного нагружения. В отличие от габродиабаза при ударном нагружении плавленого кварца, являющегося аморфным хрупким материалом, происходит разрушение всего образца.

2.4. *Бериллий.* На рис. 7 представлена зависимость максимального значения скорости свободной поверхности на плато импульса сжатия $U_{max} = f(U_{уд})$ от скорости ударника для бериллия. Видно, что при малых скоростях ударника ($U_{уд} < 122$ м/с) прямая $U_{max} = f(U_{уд})$ практически совпадает с прямой $U_{fs} = U_{уд}$, а при $U_{уд} > 122$ м/с $U_{max} < U_{уд}$. Точка излома на кривой зависимости $U_{max} = f(U_{уд})$ определяет порог структурной неустойчивости при сжатии (линия AA'). Результаты анализа зависимости откольной прочности от скорости ударника $W = f(U_{уд})$ показывают, что откол начинается при скорости ударника, при которой на кривой зависимости $U_{max} = f(U_{уд})$ имеет место

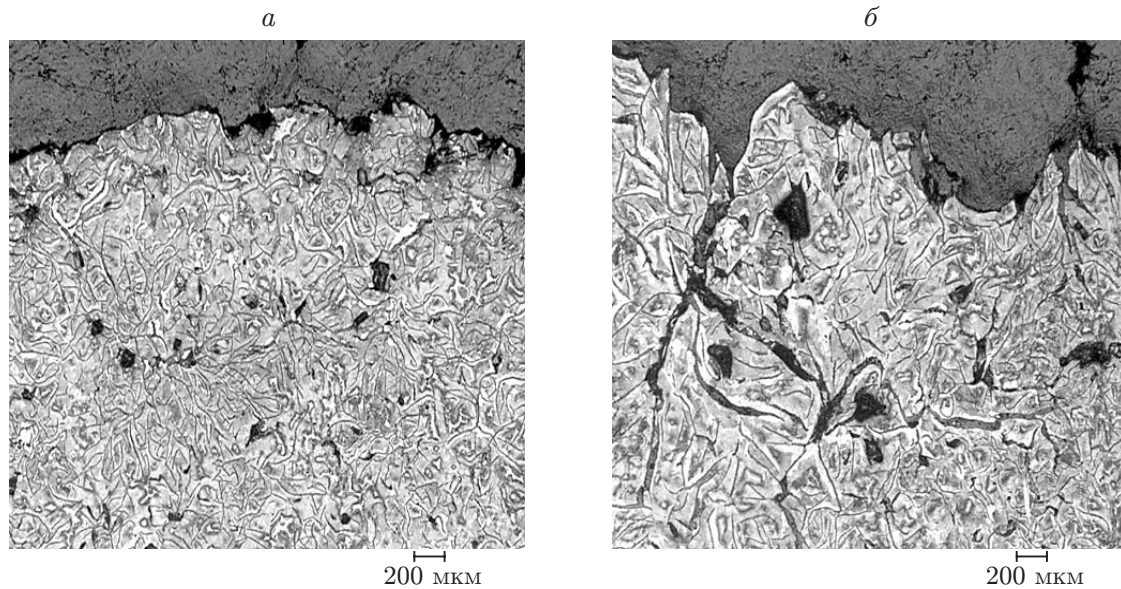


Рис. 5. Структура чугуна первой (а) и второй (б) партий после ударного нагружения со скоростью $U_{уд} \approx 220$ м/с

Таблица 5

Результаты ударных испытаний образцов плавленного кварца

Номер эксперимента	h_m , мм	$h_{уд}$, мм	$U_{уд}$, м/с	$U'_{уд}$, м/с	D_{max} , м/с	U_{n1} , м/с	U_{n2} , м/с	W , м/с	Δt , нс
1	5,02	1,95	86,5	98,4	13,2	65,7	—	34,7	34
2	5,22	1,95	197,7	224,8	10,6	214,6	—	3,1	17

излом. Для бериллия, как и для других рассмотренных материалов, на всем фронте волны вариация скорости массовой скорости не равна нулю.

В процессе обмена количеством движения появляются локальные растягивающие напряжения

$$\sigma_{ms2} = -\rho C \Delta U.$$

3. Энергетическая трактовка процессов разрушения. Исследуем связь между откольной прочностью и энергией процесса разрушения. В общем случае уравнение баланса энергии на мезоуровне может быть записано в виде [8]

$$\delta E = \Delta U \delta U - c_m D^2, \quad (2)$$

где δE — изменение внутренней энергии вследствие обмена энергией процессов, происходящих на макро- и мезоуровнях; δU — амплитуда пластической волны; $c_m = dE/dD$ — энергоемкость процесса, происходящего на мезоуровне; D^2 — дисперсия скорости частиц на мезоуровне. Второй член в правой части выражения (2) характеризует энергию, обусловленную дисперсией скорости на мезоуровне. При $\Delta U > 0$ энергия расходуется на формирование мезоструктуры. В этом случае скорость изменения вариации скорости, т. е. скорость роста флуктуаций, становится больше среднего массового ускорения. При этом расход внутренней энергии компенсируется за счет энергии волнового фронта, что приводит к уменьшению максимального значения средней скорости на плато импульса сжатия, т. е. к появлению дефекта скорости. В случае $\Delta U = 0$ имеем

$$\rho \Delta U \delta U = c_m \rho D^2,$$

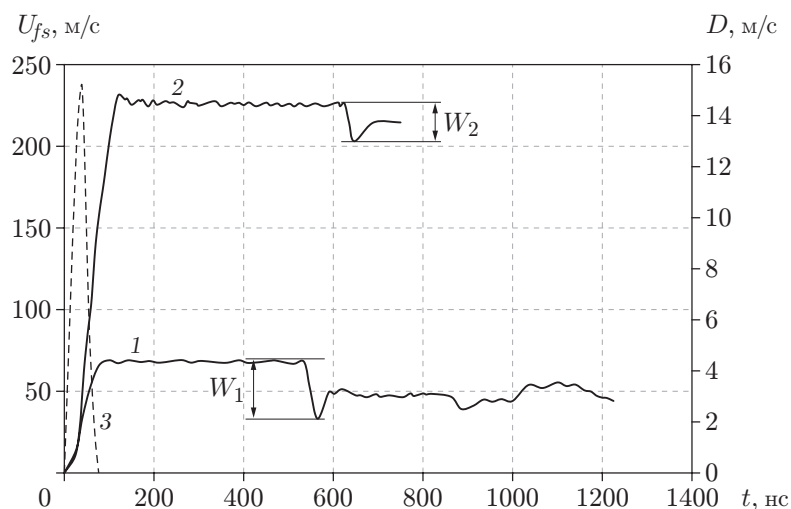


Рис. 6. Зависимости скорости свободной поверхности (1, 2) и вариации скорости (3) от времени, полученные при ударном нагружении мишеней из плавленого кварца:

1 — $U_{уд} = 98,4$ м/с, 2 — $U_{уд} = 224,8$ м/с

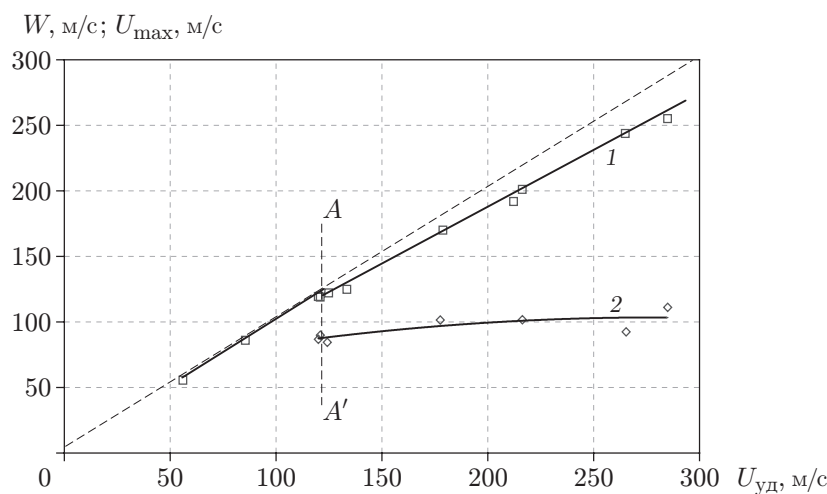


Рис. 7. Зависимости максимальной скорости свободной поверхности (1) и откольной прочности (2) от скорости ударника для поликристаллического бериллия:

штриховая линия — $U_{fs} = U_{уд}$, AA' — скорость ударника, при которой возникает структурная неустойчивость при сжатии

т. е. энергия флуктуаций на мезоуровне $c_m \rho D^2$ равна потере энергии вдоль пластического фронта $\rho \Delta U \delta U$ (динамически равновесный режим обмена энергией процессов на мезо- и макроуровнях). Когда потеря энергии на пластическом фронте за счет ее передачи на мезоуровень-1 становится больше энергии флуктуаций на этом мезоуровне, решеточный потенциал уменьшается (структурно-неустойчивое состояние среды) [19, 20].

Определим величину локального смещения, вызванного обменом количеством движения между макроуровнем и мезоуровнем-2 на примере ударного нагружения габродиабаза при скорости ударника $U_{уд} = 117,5$ м/с (см. рис. 3). Участку OE профиля скорости и профилю вариации скорости соответствуют значения $D = 10,5$ м/с, $u = 74,5$ м/с. На основе данных рис. 3 с использованием выражения (1) получено значение дефекта скоро-

сти $\Delta U = 1,47$ м/с. Локальное смещение на мезоуровне ΔS_1 определяется длительностью процесса энергообмена $\Delta t = 47$ нс, в течение которого вариация скорости не равна нулю. При ударе со скоростью $U_{уд} = 117,5$ м/с величина локальных смещений структурных элементов на мезоуровне равна $\Delta S_1 = \Delta U \Delta t = 0,1 \cdot 10^{-4}$ см. Таким образом, пульсации массовой скорости инициируют локализованные смещения размером порядка 100 нм. По окончании пульсаций вариация скорости становится равной нулю и обратимые локальные смещения на мезоуровне исчезают. Затем в результате смещения структурного элемента как целого на временном профиле импульса сжатия появляется горизонтальная ступенька ($\Delta t_2 = 40$ нс). Наличие этой ступеньки свидетельствует о дальнейшей релаксации напряжения, в результате чего происходит смещение структурных элементов $\Delta S_2 = 2,98 \cdot 10^{-4}$ см.

Таким образом, релаксационный процесс, происходящий на фронте импульса сжатия в габродиабазе, можно разделить на два этапа: 1) появление обратимых микросмещений размером 100 нм за счет флуктуаций массовой скорости на мезоуровне; 2) появление смещений размером приблизительно 3 мкм вследствие смещений структурных элементов на макроуровне. Порог локальной структурной неустойчивости на макроуровне для всех образцов габродиабазы оказался приблизительно одинаковым (75 м/с), что соответствует напряжению $\sigma_1 = -\rho C U_{n1}/2 = -0,5 \cdot 3,05 \cdot 6,25 \cdot 10^5 \cdot 75 \cdot 10^2 = 0,715$ ГПа. Величина скорости U_{n1} , соответствующая описанной выше ступеньке, определяет первый порог устойчивости при сжатии. После завершения процесса релаксации материал вновь оказывает сопротивление динамическому разрушению, о чем свидетельствует наличие участка волнового фронта FK , на котором скорость U_{fs} увеличивается (см. рис. 3). Второй порог устойчивости на ударное сжатие U_{n2} соответствует моменту появления плато на кривой $U_{fs}(t)$.

Заключение. Для всех испытанных хрупких материалов характерно наличие на переднем фронте импульса сжатия пульсаций массовой скорости. Количественной характеристикой пульсаций ударно-нагружаемой среды является вариация массовой скорости. Хрупкие материалы оказывают сопротивление ударному сжатию до тех пор, пока имеется обратимый обмен импульсом и энергией процессов, происходящих на мезо- и макроуровнях. После прекращения указанного энергообмена инициируется структурный переход с мезоуровня на макроуровень. Структурный переход происходит за конечное время, составляющее для габродиабазы приблизительно 50 нс, для плавленого кварца — 20 нс, для бериллия — 110 нс, для чугуна — 150 нс.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Asay J. R., Chhabildas L. C.** Paradigms and challenges in shock wave research // High-pressure shock compression of solids. V. 6. Old paradigms and new challenges. N. Y.: Springer-Verlag, 2003. P. 58–119.
2. **Grady D. E.** Steady rise-time and spall measurement on Uranium (3–16 GPa) // Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. N. Y.: Marcel Dekker, 1986. P. 763–780.
3. **Meshcheryakov Yu. I., Divakov A. K., Zhigacheva N. I., et al.** Dynamic structures in shock-loaded copper // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 64301–64316.
4. **Yano K., Horie Y.** Diskrete-element modeling of shock compression of polycrystalline copper // Phys. Rev. B. 1999. V. 59, N 21. P. 13672–13680.
5. **Holian B. L., Lomdahl P. S.** Plasticity induced by shock waves in nonequilibrium molecular-dynamics simulations // Science. 1998. V. 280. P. 2085–2088.
6. **Krivtsov A. M.** Relation between spall strength and mesoparticle velocity dispersion // Intern. J. Impact Engng. 1999. V. 23. P. 477–487.

7. **Кривцов А. М., Мещеряков Ю. И.** Компьютерное исследование возбуждения дисперсии скоростей мезочастиц в результате прохождения ударной волны // Тр. 26-й Всерос. шк.-семинара “Анализ и синтез нелинейных механических колебательных систем”, Санкт-Петербург, 16–22 июня 1998 г. СПб.: Изд-во С.-Петерб. политехн. ун-та, 1998. Т. 2. С. 258–267.
8. **Grady D. E., Kipp M. E.** The growth of unstable thermoplastic shear with application to steady-wave shock compression of solids // J. Mech. Phys. Solids. 1987. V. 3, N 1. P. 95–119.
9. **Индейцев Д. А., Мещеряков Ю. И., Кучмин А. Ю., Вавилов Д. С.** Многомасштабная модель распространения стационарных упругопластических волн // Докл. АН. Механика. 2014. Т. 458, № 2. С. 165–168.
10. **Meshcheryakov Yu. I.** Particle velocity non-uniformity and steady wave propagation // Intern. J. Shock Waves, Detonat. Explosive. 2016. V. 26. P. 2–16.
11. **Meshcheryakov Yu. I.** Meso-macro energy exchange in shock-deformed and fractured solids // High pressure shock compression of solids. V. 6. Old paradigms and new challenges. N. Y.: Springer-Verlag, 2003. P. 169–213.
12. **Meshcheryakov Yu. I., Divakov A. K., Barakhtin B. K., Zhigacheva N. I.** Interscale momentum exchange in dynamically deformed heterogeneous medium // Proc. of the conf. “Shock compression of condensed matter — 2011”, Chicago (USA), 26 June — 1 July 2011. N. Y.; Melville: AIP Press, 2012. P. 1109–1112.
13. **Мещеряков Ю. И.** Кинетическая модель динамики среды // Хим. физика. 2005. Т. 24, № 11. С. 28–35.
14. **Meshcheryakov Yu. I.** Mesoscopic effects and particle velocity distribution in shock compressed solids // Proc. of the conf. “Shock compression of condensed matter — 1999”, Snowbird (USA), June 27 — July 2, 1999. N. Y.; Melville: AIP Press, 2000. P. 1065–1070.
15. **Мещеряков Ю. И.** Об эволюционном и катастрофическом режимах энергообмена в динамически деформируемой среде // Докл. АН. Механика. 2005. Т. 401, № 6. С. 765–768.
16. **Asay J. R., Barker L. M.** Interferometric measurements of shock-induced internal particle velocity and spatial variation of particle velocity // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 2540–2546.
17. **Mescheryakov Yu. I., Divakov A. K.** Kinetics of microstructure and strain-rate dependence of materials // Dymat J. 1994. V. 1, N 4. P. 271–287.
18. **Садовский М. А.** Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989.
19. **Хантулева Т. А., Мещеряков Ю. И.** Кинетика и нелокальная гидродинамика формирования мезоструктуры в динамически деформируемых средах // Физ. мезомеханика. 1999. Т. 2, № 5. С. 5–17.
20. **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.

*Поступила в редакцию 25/І 2018 г.,
после доработки — 7/VI 2018 г.
Принята к публикации 25/VI 2018 г.*