

УДК 539.374

## О ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССОВ НА ФРОНТЕ ИМПУЛЬСА СЖАТИЯ НА ОТКОЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА И СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОМУ ВНЕДРЕНИЮ

Ю. И. Мещеряков, А. К. Диваков

Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург

Испытания на тыльный откол конструкционной стали 38ХНЗМФА, алюминиевого сплава Д-16, меди М-2, мартенситно стареющей стали 02Н18К9М5-ВИ, сплава ХН75ВМЮ, бериллия и других материалов показали, что откольная прочность коррелирует с порогом структурной неустойчивости материала на сжатие на переднем фронте импульса сжатия. Показано, что величина порога структурной неустойчивости на сжатие, полученная в экспериментах по одноосной деформации плоских мишеней, определяет прочность сопротивления высокоскоростному внедрению в модели Алексеевского — Тейта.

Ключевые слова: откольная прочность, высокоскоростной удар, структурная неустойчивость материала.

**Введение.** Как известно, откольное разрушение материала в плоских волнах нагрузки является результатом интерференции волн разгрузки, распространяющихся от свободных поверхностей ударника и мишени внутрь мишени. При определенном соотношении между толщинами ударника и мишени внутри мишени создаются растягивающие напряжения, приводящие к отколу. Принято считать, что откольная прочность является достаточно объективной характеристикой динамической прочности материала на растяжение в микросекундном диапазоне длительности нагружения [1]. В действительности при прохождении переднего фронта импульса имеет место предварительное сжатие материала. Прежде чем в откольной зоне будут созданы растягивающие напряжения, динамическое сжатие достигает некоторой критической величины и происходят необратимые структурные и прочностные изменения материала. В настоящей работе на примере ударного нагружения серии материалов исследовано влияние процессов на переднем фронте волны на динамическую прочность материала при отколе и высокоскоростном внедрении.

**1. Методика и результаты эксперимента.** Эксперименты по ударному нагружению различных материалов в условиях одноосной деформации проводились на легкогазовой пушке калибра 37 мм. Ударное нагружение мишеней осуществлялось в диапазоне скоростей ударника  $50 \div 600$  м/с. Во всех опытах толщины мишени и ударника выбирались такими, чтобы реализовывался тыльный откол. Скорость ударника определялась измерением временного интервала между двумя сигналами, генерируемыми при пересечении ударником двух лазерных лучей вблизи нагружаемой поверхности мишени. Погрешность измерения скорости ударника не превышала 1 %. Скорость свободной поверхности плоских мишеней регистрировалась с помощью скоростного двухканального интерферометра [2]. Методика эксперимента позволяет наряду с профилем средней скорости свободной поверхности  $U_{fs}(t)$  измерять зависимость среднеквадратичного отклонения массовой скорости от

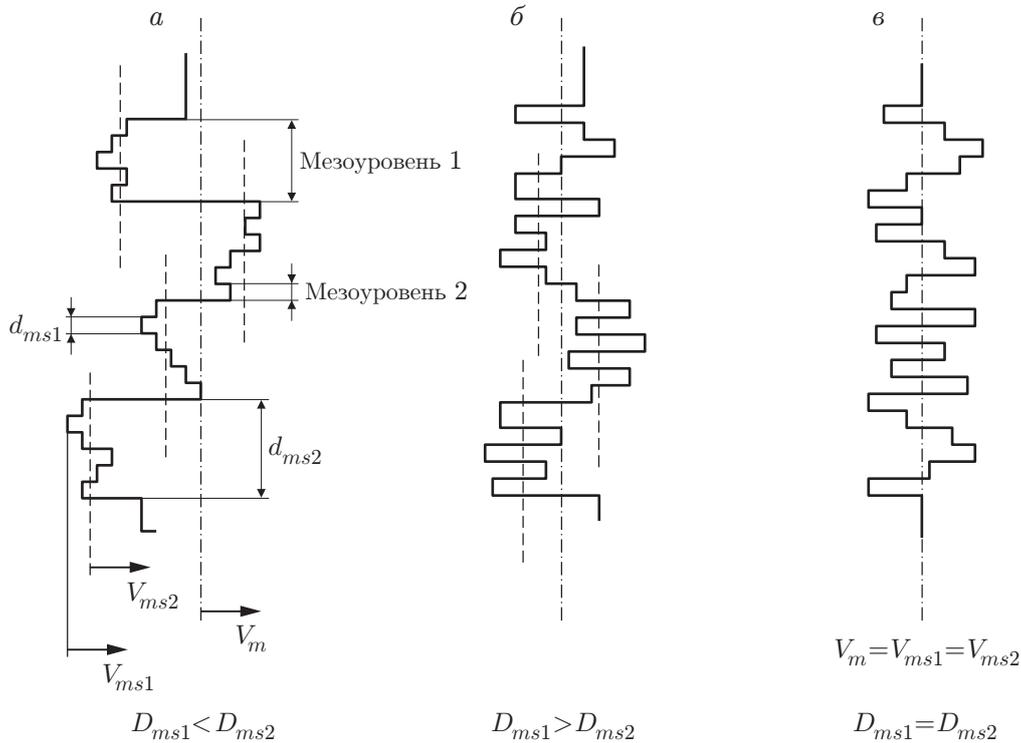


Рис. 1

времени  $D(t)$ . При данном подходе фронт ударной волны представляется как усредненное движение деформируемой среды с некоторой средней скоростью  $U(t)$ , которое сопровождается флуктуациями скорости на двух или более масштабных уровнях, характеризующимися дисперсией скорости  $D_{ms}^2$ .

На рис. 1 качественно показана конфигурация волнового фронта. Согласно классификации, предложенной в [3], мезоуровень 1 включает структурные элементы, средний размер которых находится в пределах  $0,1 \div 10,0$  мкм, средний размер структурных элементов мезоуровня 2 принадлежит интервалу  $50 \div 500$  мкм. Согласно классификации, предложенной в [4], мезоуровень 2 называется суперструктурным уровнем. На рис. 1 видно, что фронт волны, распространяющейся в гетерогенной среде, имеет сложную многомасштабную структуру, причем отдельные участки фронта имеют разные скорости. Мгновенные значения скорости на мезоуровне 1 обозначены  $V_{ms1}$ , а дисперсия скорости на мезоуровне 1 —  $D_{ms1}$ . Средняя скорость на мезоуровне 1 показана штриховой линией, при этом для мезоуровня 2 эта скорость является мгновенной. Разброс скоростей на мезоуровне 2 характеризуется дисперсией  $D_{ms2}$ . Штрихпунктирными линиями показана средняя скорость на мезоуровне 2  $V_{ms2}$ , которая также является макроскопической массовой скоростью среды  $V_m$ . Такая иерархия масштабных уровней имеет место в случае, когда  $D_{ms1} < D_{ms2}$  (рис. 1, а). В случае, когда  $D_{ms1} > D_{ms2}$  (рис. 1, б), средняя макроскопическая массовая скорость среды совпадает со средней скоростью на мезоуровне 1. В случае, когда дисперсии массовой скорости на соседних уровнях соизмеримы (рис. 1, в), средние значения скорости на мезоуровне 1 и мезоуровне 2 совпадают и являются макроскопической массовой скоростью среды.

Результаты экспериментов для меди М-2 представлены в табл. 1 ( $h_m, h_{уд}$  — толщины мишени и ударника;  $U_{уд}$  — скорость ударника;  $U_{max}$  — максимальная скорость свободной поверхности на плато импульса сжатия;  $U_h$  — скорость свободной поверхности на упругом

Таблица 1

Номер опыта	$h_M$ , мм	$h_{уд}$ , мм	$U_{уд}$ , м/с	$U_{max}$ , м/с	$U_h$ , м/с	$D$ , м/с	$W$ , м/с	$U_A$ , м/с
1	5,01	2,0	43,8	40,8	5	0	33,40	35
2	5,00	2,0	61,6	63,2	5	0	48,20	55
3	5,01	1,9	93,9	91,7	4	11,50	49,84	85
4	10,07	1,78	117,0	120,0	4	14,24	60,00	110
5	5,00	1,9	140,4	144,0	4	13,61	60,75	120
6	5,00	1,9	176,6	166,1	4	22,41	62,24	150
7	5,01	1,9	184,1	183,9	5	14,40	69,94	154
8	5,00	1,9	189,0	185,6	4	28,22	58,55	168
9	5,00	1,9	261,0	232,3	5	49,39	59,32	220

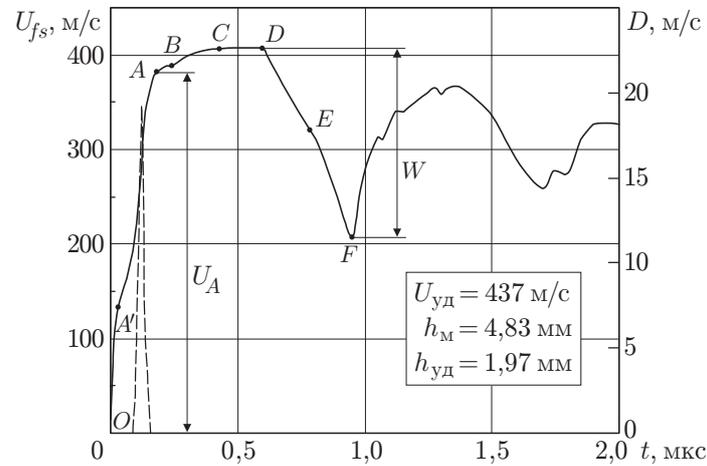


Рис. 2

предвестнике;  $D$  — среднеквадратичное отклонение скорости;  $W$  — разность между максимальным значением скорости свободной поверхности и ее значением на заднем фронте в точке первого реверса профиля скорости (иногда эту величину называют откольной скоростью, так как с ее помощью вычисляется откольное напряжение  $\sigma = 0,5\rho C_0 W$ );  $U_A$  — скорость свободной поверхности на переднем фронте импульса в точке, где резко изменяется угол наклона фронта, прежде чем последний перейдет в плато).

На рис. 2 представлены зависимости скорости свободной поверхности плоской мишени из стали 30ХН4М (сплошная линия) и среднеквадратичного отклонения скорости (штриховая линия) от времени. Получаемый при регистрации интерферометром профиль скорости свободной поверхности имеет несколько характерных зон, которые четко прослеживаются во всех опытах: отрезок  $OA'$  — упругий предвестник,  $A'A$  — пластический фронт,  $AB$  — переходная зона,  $BC$  — пологий участок пластического фронта нагрузки,  $CD$  — плато импульса сжатия, на котором скорость свободной поверхности остается постоянной,  $DE$  — упругий предвестник разгрузки,  $EF$  — пластический фронт разгрузки.

Проведены ударные испытания меди М-2, алюминиевого сплава Д-16, бериллия, стали 38ХН3МФА, мартенситно стареющей стали 02Н18К9М5-ВИ и сплава ХН75ВМЮ. В экспериментах получены профили скорости свободной поверхности  $U_{fs}(t)$  и среднеквадратичного отклонения скорости частиц  $D(t)$ . Построены также зависимости величин  $U_A$  и  $W$  от скорости ударника  $U_{уд}$  (рис. 3–7).

**2. Обсуждение результатов.** На макроскопическом уровне форма переднего фронта и длительность отдельных участков импульса сжатия характеризуют динамику процес-

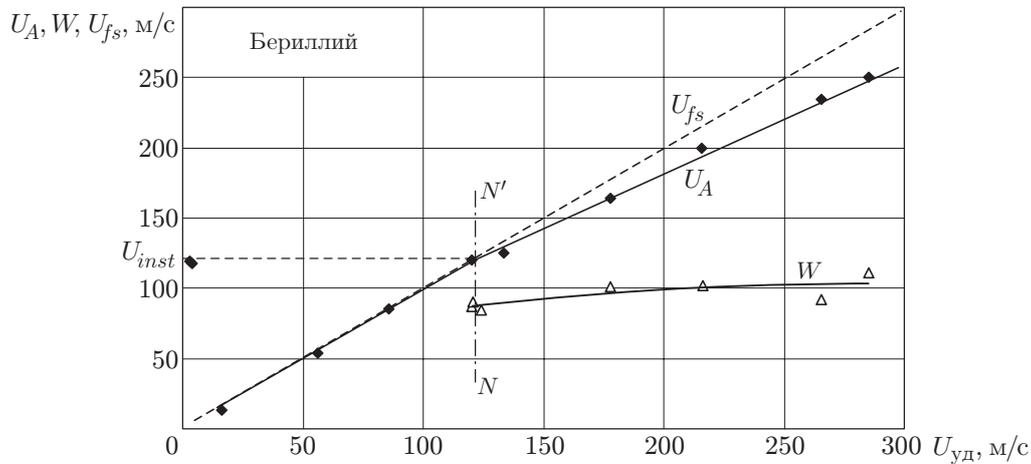


Рис. 3

сов, протекающих на микроуровне в момент прохождения ударной волны. Количественной характеристикой макроскопического отклика среды на ударное нагружение является пространственно-временной профиль волны  $U_{fs}(t)$ , обычно регистрируемый при ударных испытаниях плоских мишеней в условиях одноосной деформации. Количественной характеристикой флуктуационных процессов на микроуровне является температура как мера интенсивности хаотических движений атомов. На более высоких масштабных уровнях, в частности на мезоуровне, количественной характеристикой флуктуационных свойств среды является дисперсия скорости частиц. В настоящее время установлено, что характер дисперсии скорости в процессе ударного нагружения зависит от того, является волна стационарной или нестационарной. Экспериментально и теоретически показано, что в стационарных волнах дисперсия достигает максимального значения в середине фронта волны и стремится к нулю при приближении к вершине фронта [5]. На рис. 2 видно, что в тот момент, когда дисперсия скорости становится равной нулю, угол наклона фронта нагрузки резко уменьшается, что свидетельствует об изменении механизма релаксации напряжений. Начиная с этого момента релаксация осуществляется за счет другого механизма, причем его включение происходит не мгновенно, а в течение переходной стадии (отрезок  $AB$ ). По окончании переходной стадии напряжение вновь увеличивается, но с другой скоростью. В сущности, переход на новый режим динамического деформирования можно рассматривать как структурный фазовый переход, инициируемый ударным нагружением.

Средняя скорость  $U_A$  (или нормальное напряжение), соответствующая началу переходной стадии, определяет динамический порог структурного перехода, который может быть обратимым или необратимым в зависимости от скорости деформации. На рис. 3 представлена зависимость скорости свободной поверхности, соответствующей этому порогу, от скорости ударника  $U_A(U_{уд})$  для поликристаллического бериллия. Видно, что при  $U_{уд} = 120$  м/с на кривой зависимости  $U_A(U_{уд})$  имеется излом, после которого угол наклона кривой существенно уменьшается. На рис. 3 приведена также зависимость откольной скорости от скорости ударника  $W(U_{уд})$ . Откольное разрушение материала начинается при скорости ударника, соответствующей излому на кривой зависимости  $U_A(U_{уд})$ . Это значит, что при  $U_{уд} = 120$  м/с в процессе структурного перехода в материале происходят необратимые изменения, в результате чего изменяется сопротивление материала ударному нагружению. Линия  $NN'$  проведена через точку, соответствующую скорости ударника, при которой градиент деформации в волне сжатия достигает критического значения и структурный переход становится необратимым. Скорость свободной поверхности, соответствующая структурному переходу, обозначена  $U_{inst}$ .

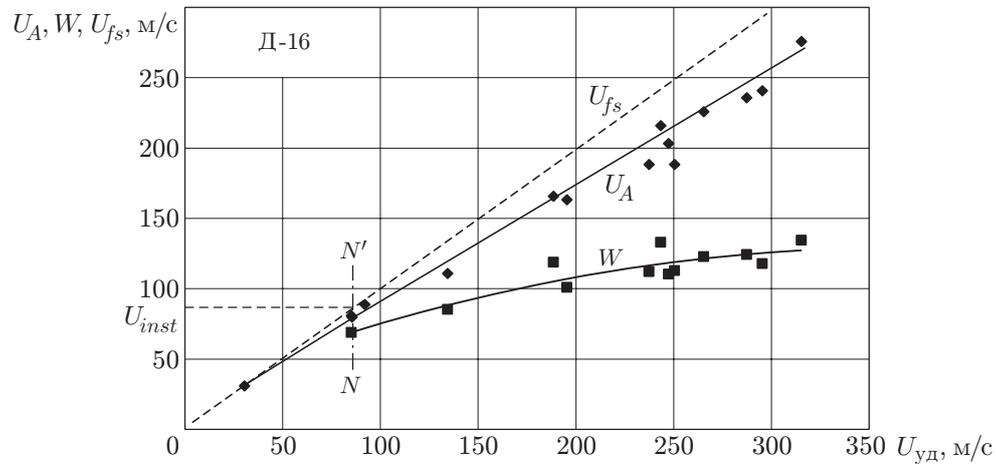


Рис. 4

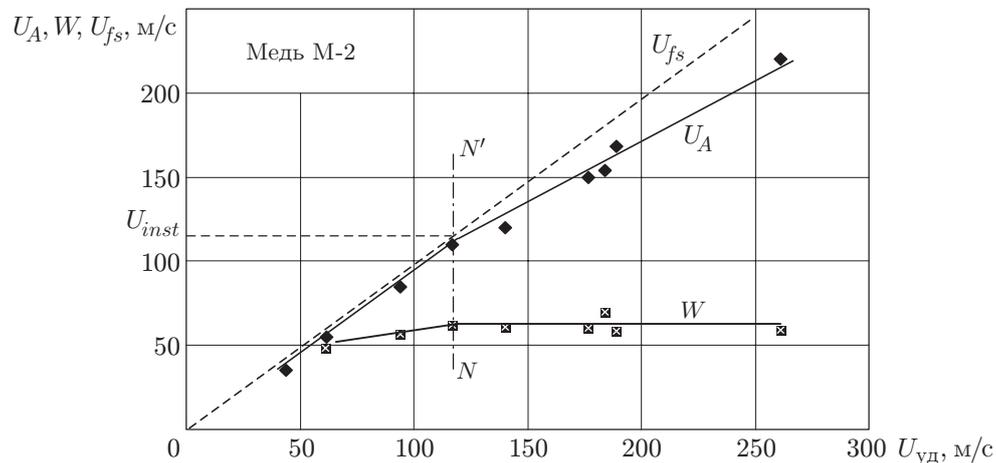


Рис. 5

Возможность существования необратимых структурных переходов теоретически исследована в работе [6]. Микродеформационная модель, основанная на решении нелинейного уравнения синус-Гельмгольца, предсказывает неустойчивое поведение кристаллической решетки, подвергнутой сдвиговой деформации в нелинейно-упругой области нагружения. Эта неустойчивость приводит к зарождению крупномасштабных структур, таких как мезоротации, полосы локализованного сдвига, вихревые образования и их комбинации. Указанные крупномасштабные структуры возникают задолго до перехода к макроскопической пластичности. Если градиент деформации не превышает некоторого критического значения, то эти структуры могут исчезнуть, т. е. на данной стадии описанный структурный переход является обратимым. При больших градиентах деформации имеет место бифуркационный переход от упругости к пластичности, в результате чего возникают структуры мезоскопического уровня, наблюдаемые при микроструктурных исследованиях.

Структурные переходы при динамическом сжатии наблюдаются для всех исследованных в данной работе материалов. На рис. 4 также виден излом на кривой зависимости  $U_A(U_{уд})$ , которому соответствует начало откольного разрушения (см. зависимость  $W(U_{уд})$ ).

Для пластичных материалов, таких как медь, вязкие высокопрочные стали, мартенситно стареющие стали и др., излом на кривой зависимости  $U_A(U_{уд})$  соответствует из-

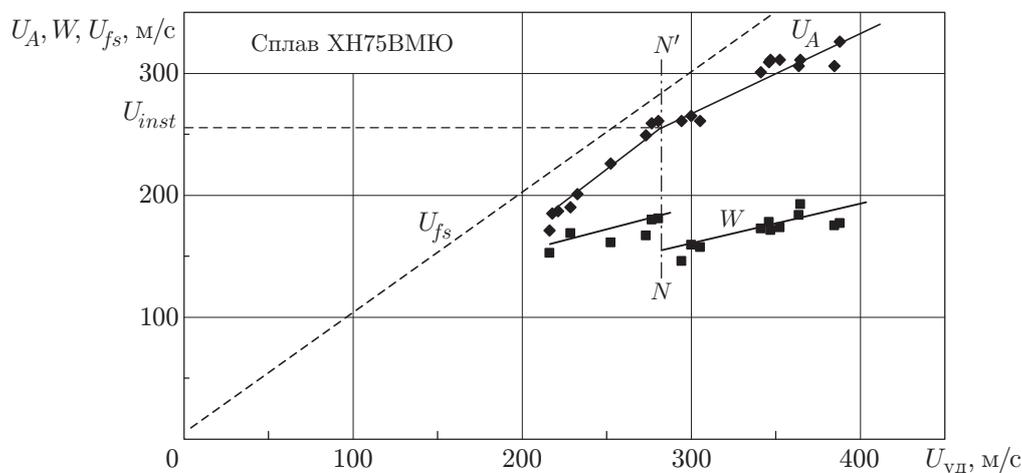


Рис. 6

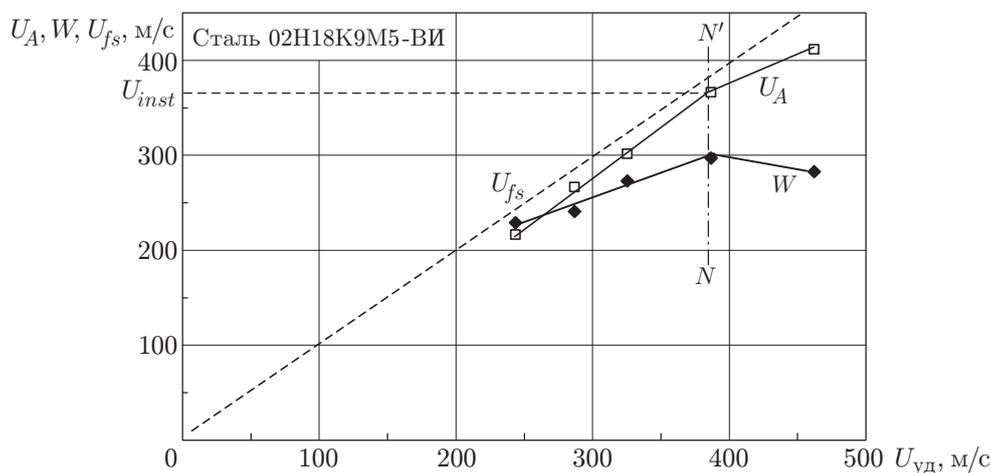


Рис. 7

менению характера зависимости откольной скорости от скорости ударника  $W(U_{уд})$ . Это следует из представленных на рис. 4–7 зависимостей  $U_A(U_{уд})$  и  $W(U_{уд})$ , полученных для указанных выше материалов. Видно, что изломы на кривых зависимостей  $U_A(U_{уд})$  и  $W(U_{уд})$  соответствуют одной и той же скорости ударника. Установлено, что чем выше порог неустойчивости материала на сжатие  $U_{inst}$ , тем выше его откольная прочность.

Для проверки данного утверждения проведены испытания двух партий высокопрочной стали 38ХНЗМФА. Одна из этих партий испытана в состоянии поставки, другая подвергнута стандартной температурной обработке с закалкой и средним отпуском. Результаты испытаний представлены на рис. 8, 9. Для первой партии стали (рис. 8) структурная неустойчивость наступает при  $U_{уд} = 200$  м/с, в то время как для второй (рис. 9) — при  $U_{уд} = 263$  м/с. Для первой партии стали пороговая скорость структурной неустойчивости  $U_{inst} = 159$  м/с, для второй  $U_{inst} = 232,7$  м/с. Соответственно для первой партии откольная скорость изменяется от 159 до 180 м/с (средняя скорость равна 169,5 м/с), для второй партии — от 180,7 до 203,3 м/с (средняя скорость равна 192 м/с). Таким образом, откольная прочность материала коррелирует с порогом динамической неустойчивости на сжатие  $U_{inst}$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что опыты по откольному разрушению при одноосном нагружении плоских мишеней не дают объективной информации о величине динамической прочности материала на растяжение в микросекундном диапазоне длительностей нагружения.

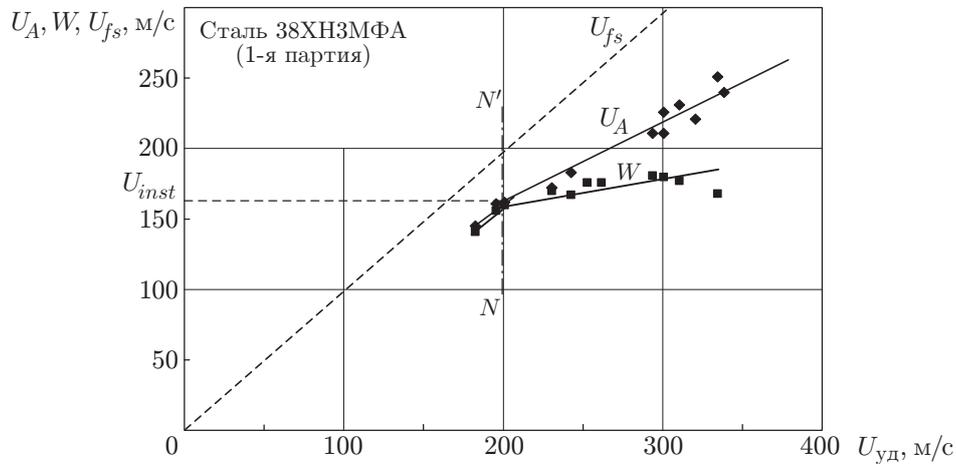


Рис. 8

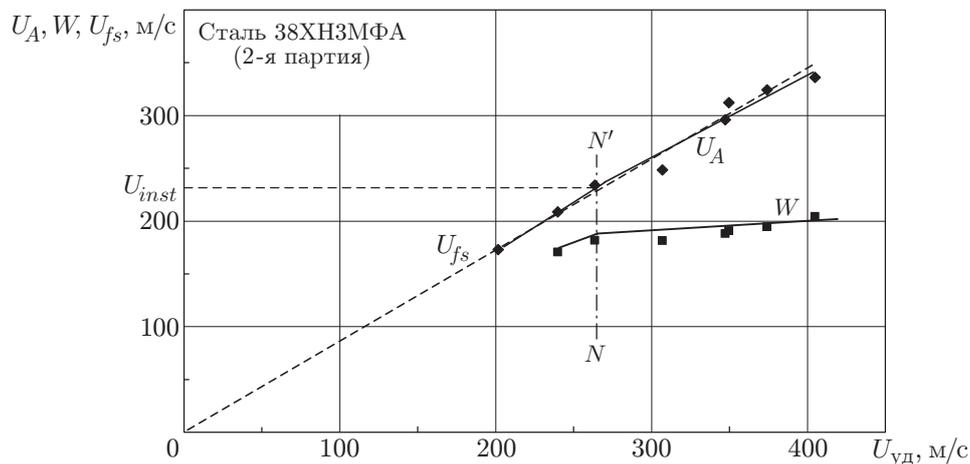


Рис. 9

**3. Структурная неустойчивость материала и сопротивление высокоскоростному внедрению.** Нормальное напряжение, при котором происходит необратимый структурный переход на переднем фронте импульса сжатия в условиях одноосной деформации, следует рассматривать как независимую прочностную характеристику материала, определяющую порог динамической устойчивости материала на динамическое сжатие. Учет этой характеристики важен не только при разработке теоретических моделей одноосного деформирования, но и при расчете параметров высокоскоростного проникания. Как известно, глубина проникания удлиненных ударников в полубесконечную преграду определяется модифицированным уравнением Бернулли, которое получило название уравнения Алексеевского — Тейта [7, 8]:

$$Y + \rho_{уд}(U_{уд} - U_M)^2/2 = \rho_M U_M^2/2 + R.$$

Здесь  $U_M$  — массовая скорость в материале мишени непосредственно перед ударником;  $Y$ ,  $R$  — эмпирические константы, определяющие динамическую прочность материалов ударника и мишени соответственно. От величины  $R$  зависит, насколько поведение материала преграды отличается от поведения идеальной несжимаемой жидкости. Микромеханизмы деформации, определяющие величину  $R$ , являются предметом современных исследований микропластичности. В известных работах о проникании высокоскоростных удлиненных

Таблица 2

Материал мишени	$\sigma_h$ , ГПа	$R$ , ГПа	$C_{пл}$ , мм/мкс	$U_{inst}$ , м/с	$\sigma_i$ , ГПа
Алюминий Д-16	0,35	0,6 ÷ 0,7	5,35	80	0,58
Сталь 38ХНЗМФА	1,65	2,80 ÷ 3,29	5,00	159	3,12
Мартенситно стареющая сталь 02Н18К9М5-ВИ	4,10	7,0 ÷ 8,2	5,05	383	7,39
Титановый сплав ВТ-6	2,88	4,90 ÷ 5,75	5,30	440	5,17

ударников утверждается, что физический смысл параметров  $R$  и  $Y$  остается пока невыясненным [7, 8]. В ряде работ величина  $R$  отождествляется с динамической твердостью материала  $H_D$ , которая связана с динамическим пределом текучести  $Y_D$  корреляционной зависимостью [9]

$$H_D = (3 \div 3,5)Y_D. \quad (1)$$

В свою очередь динамический предел текучести определяется пределом текучести Гюгонио  $\sigma_h$ :

$$Y_D = \sigma_h(1 - 2\nu)/(1 - \nu) \quad (2)$$

( $\nu$  — коэффициент Пуассона).

Из анализа общих закономерностей процесса высокоскоростного внедрения, а также из анализа экспериментальных результатов следует, что прочностная характеристика сопротивления внедрению преград из пластичных (металлы) и хрупких (керамики) материалов определяется как инерционными силами, так и сопротивлением пластическому деформированию. Это значит, что если характер пластического деформирования меняется, например из-за изменения структурного механизма деформирования, то и прочностная составляющая сопротивления внедрению также меняется.

Однако опыты по высокоскоростному внедрению ударников в преграду не дают информации об изменении механизма пластического деформирования. В то же время анализ волновых процессов показывает, что в носовой части ударника, в так называемой точке стагнации (критической точке потоков на преграде вблизи ударника), реализуются условия одноосной деформации [8]. В отличие от опытов по высокоскоростному внедрению ударные испытания материалов в условиях одноосной деформации достаточно информативны. Это позволяет применять результаты испытаний при плоском соударении для определения прочностной характеристики материала мишени  $R$ , в качестве которой можно использовать напряжение  $\sigma_i$ , соответствующее потере динамической устойчивости на сжатие:

$$\sigma_i = \rho_m C_{пл} U_{inst}/2. \quad (3)$$

Здесь  $C_{пл}$  — скорость пластического фронта при испытаниях в условиях одноосной деформации.

В табл. 2 представлены результаты расчета величины  $R$  по формулам (1), (2) и параметра  $\sigma_i$  по формуле (3) для ряда конструкционных материалов, испытанных в условиях одноосной деформации. Значения напряжения на упругом предвестнике  $\sigma_h$  получены в опытах по одноосному деформированию. Из табл. 2 следует, что значения  $R$ , определяемые по методике Тейта, и значения порога динамической устойчивости на сжатие при одноосной деформации  $\sigma_i$  для каждого исследованного материала совпадают. Это свидетельствует о том, что прочностная характеристика сопротивления внедрению  $R$  имеет определенный физический смысл. Ее значение определяется порогом неустойчивости материала при динамическом сжатии в условиях одноосной деформации.

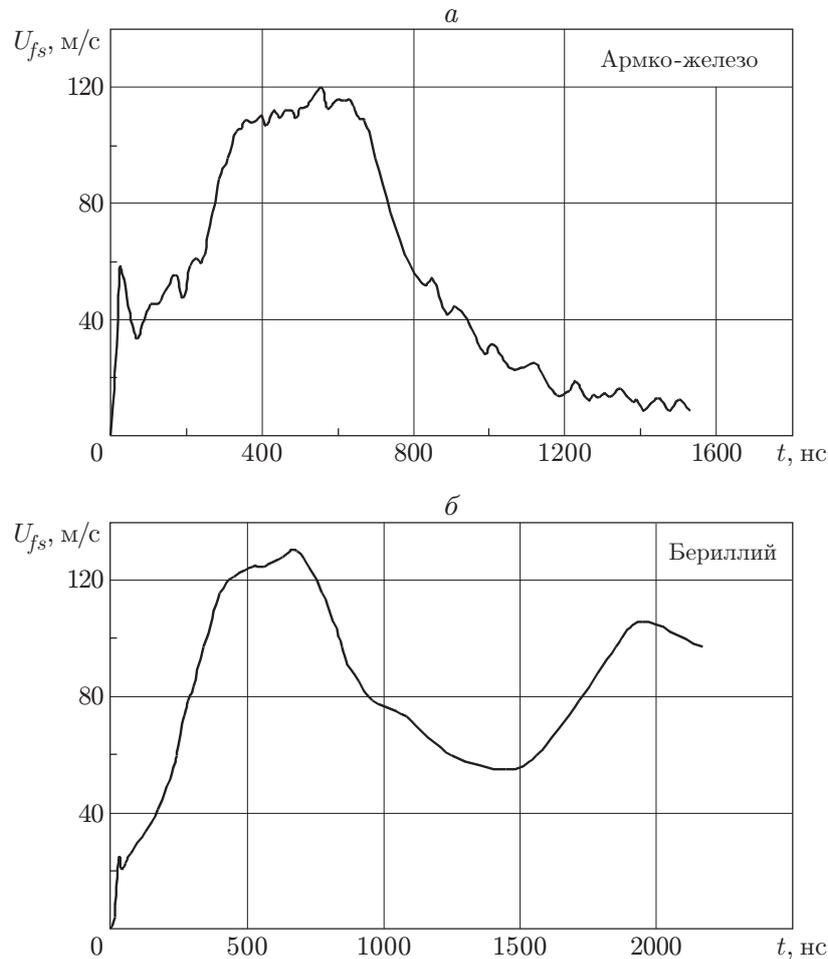


Рис. 10

В случае стационарных пластических волн неустойчивость материала при ударном сжатии инициируется при такой скорости деформации, когда дисперсия массовой скорости на мезоуровне 1 как способ релаксации внутренних напряжений отсутствует. В этот момент инициируется релаксация на более крупномасштабном структурном уровне, так называемом мезоуровне 2 [3, 4]. Возбуждение мезоуровня 2 в вязком материале может происходить и при массовой скорости ниже порога структурного перехода  $U_A$ . Для пояснения последнего утверждения на рис. 10, *a, б* соответственно приведены зависимости скорости свободной поверхности для вязкого материала (армко-железа) и хрупкого материала (бериллия) от времени, зарегистрированные с помощью скоростного интерферометра. На рис. 10, *a* профиль имеет ярко выраженный осцилляционный характер, в то время как на рис. 10, *б* профиль гладкий. Поскольку поперечные размеры лазерного луча интерферометра совпадают с размером структурного элемента на мезоуровне 2 ( $100 \div 500$  мкм), осцилляции скорости на профиле для армко-железа соответствуют движениям структурного элемента на мезоуровне 2 как целого и характеризуют релаксацию структуры на этом масштабном уровне. Зависимость  $U_{fs}(t)$  для бериллия соответствует характеру дисперсии, показанному на рис. 1, *б*, аналогичная зависимость для армко-железа соответствует характеру дисперсии, показанному на рис. 1, *a*. В хрупком материале ниже порога структурной неустойчивости мезоуровень 2 “заморожен”, так что релаксация внутренних напряжений осуществляется только за счет подвижности структурных элементов на мезоуровне 1. По-

сле того как релаксационные способности материала на мезоуровне 1 исчерпаны, происходит рост внутренних напряжений до значения, при котором инициируется релаксация на мезоуровне 2. В вязком материале, таком как армо-железо, возбуждение мезоуровня 2 начинается практически сразу после упругого предвестника, так что релаксация внутренних напряжений в этом материале происходит одновременно на двух структурных уровнях.

Длительность переходной зоны  $AB$  (см. рис. 2) определяет масштаб структуры на мезоуровне 2. В частности, длительность переходной зоны для профиля, представленного на рис. 2, составляет 100 нс. В стали при скорости пластического фронта, равной 5 мм/мкс, размер переходной зоны  $d_{ms2} = 500$  мкм, что соответствует мезоуровню 2.

**4. Выводы.** Анализ фронта волны при одноосной деформации и процесса откольного разрушения плоских мишеней показывает, что опыты по откольному разрушению не дают объективной информации о величине динамической прочности материала на растяжение в микросекундном диапазоне длительностей нагружения. Откольная прочность материала существенно зависит от того, произошли ли необратимые процессы потери структурной устойчивости материала на фронте импульса сжатия.

Порог структурной неустойчивости материала при ударном сжатии в условиях одноосной деформации определяет прочностную характеристику сопротивления преград высокоскоростному внедрению удлиненных ударников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глушак Б. П., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.
2. Mescheryakov Yu. I., Divakov A. K. Multiscale kinetics of microstructure and strain-rate dependence of materials // *Dymat J.* 1994. N 1. P. 271–287.
3. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.
4. Владимиров В. И., Иванов В. Н., Приемский Н. Д. Мезоскопический уровень пластической деформации // *Физика прочности и пластичности.* Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1986. С. 69–79.
5. Хантулева Т. А., Мещеряков Ю. И. Кинетика и нелокальная гидродинамика формирования мезоструктуры в динамически нагружаемых средах // *Физ. мезомеханика.* 1999. Т. 2, № 5. С. 5–17.
6. Аэро Э. Л. Микромасштабные деформации в двумерных решеточных структурных переходах при критическом сдвиге // *Физика твердого тела.* 2000. Т. 42, № 6. С. 1147–1153.
7. Лазарев В. Б., Баланкин А. С., Изотов А. Д., Кожушко А. А. Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов. М.: Наука, 1993.
8. Hohler V., Stilp A. J. Long-rod penetration mechanics // *High velocity impact dynamics.* N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1990. P. 321–404.
9. Тейт А. Теория торможения длинных стержней после удара по мишени // *Механика.* 1968. № 5. С. 125–137.

*Поступила в редакцию 18/XI 2002 г.,  
в окончательном варианте — 17/III 2003 г.*