

**ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ АРМКО-ЖЕЛЕЗА
ПРИ УСЛОЖНЕННОМ ОДНОМЕРНОМ НАГРУЖЕНИИ***Е. Н. Еремченко, Т. И. Якушева, А. М. Молодец**Институт химической физики РАН,
142432 п. Черноголовка*

Представлена комплексная первичная экспериментальная информация по отколу в составных образцах — пластинах из железа Армко, нагружаемых двумя следующими друг за другом ударами плоского ударника. Эта информация состоит из результатов макрокинетического исследования процесса откола в виде профилей напряжения на границе образца с «мягкой» преградой и результатов исследования откольной микроповрежденности, возникшей в тех же экспериментах, в которых зарегистрирована история напряжения во время откола. Выявлено распределение удельной поверхности микротрещин внутри сохраненных сплошных и составных образцов. На основании сопоставления результатов макрокинетических измерений с данными микроструктурных наблюдений откольной поврежденности выявлена качественная картина эволюции откольного разрушения железа Армко при усложненном одномерном нагружении.

Известно, что подавляющее большинство экспериментальных работ по изучению откола проводится в условиях одномерного нагружения. Это обусловлено тем, что получаемая в таких условиях первичная информация легче всего поддается строгой интерпретации и с наибольшим успехом используется для выяснения механизма откольного разрушения и определения некоторых количественных характеристик откола (см., например, [1]).

Зачастую данные по одномерному нагружению используются и для проверки работоспособности построенных моделей путем сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования этих же экспериментов. Как правило, совпадение оказывается удовлетворительным. Однако этот успех может быть в большей степени следствием того, что моделируется тот же эксперимент, из которого взяты численные его характеристики, и в меньшей степени правильностью модели. В связи с этим представляют интерес такие экспериментальные данные по отколу, которые, сохраняя привлекательность одномерного нагружения, существенно отличаются историей волнового нагружения и распределением откольной поврежденности от тех, которые легли в основу построения какой-либо конкретной модели. Совпадение результатов численного моделирования и такого эксперимента будет, очевидно, более весомым аргументом правильности используемой модели, а в случае различия позволит эффективнее отслеживать и исправлять ее недостатки.

В данной работе представлена комплексная первичная экспериментальная информация по отколу в составных образцах — пластинах из железа Армко, нагружаемых двумя следующими друг за другом ударами плоского ударника.

Во время ударно-волнового нагружения манганиновым датчиком регистрировали профиль напряжения на границе образца с «мягкой» преградой, что позволило получить косвенную макрокинетическую информацию о процессе откола [2]. В этих экспериментах также принимались меры по «мягкому» сохранению образцов для того, чтобы затем качественно и количественно проанализировать откольную микроповрежденность, возникшую в тех же экспериментах, где зарегистрирована история напряжения

во время откола. Таким образом проводился второй тип исследования, при котором извлекалась информация об индивидуальных микротрещинах и их распределении в сохраненном составном образце с известной сложной историей нагружения.

Результаты макрокинетических измерений

На рис. 1,а представлена схема нагружения образцов и техника регистрации профилей напряжения манганиновым датчиком 6. Плоская ударная волна (УВ) генерировалась взрывной линзой 1 диаметром 100 мм. В контакте с линзой находился железный экран 2 такого же диаметра и толщиной 15 мм, к которому приклеивался алюминиевый ударник 3 толщиной 3 и диаметром 60 мм. Поскольку акустическая жесткость алюминия меньше, чем у железа, после выхода УВ на свободную поверхность ударника он отлетает от экрана с некоторой скоростью (здесь 600 ± 10 м/с). Ударник плоско соударяется с поверхностью мишени 4. Своеобразие такой конфигурации экспериментальной сборки заключается в том, что после соударения с железной мишенью ударник изменяет направление движения, т. е. он отлетает навстречу движущемуся экрану и после взаимодействия с ним вновь изменяет направление. Затем цикл повторяется. В результате таких ревербераций ударник наносит серию ударов по мишени, количество которых зависит в основном от начального зазора между мишенью и экраном [3]. В настоящих экспериментах производилось два удара с интервалом ~ 4 мкс. На рис. 1,б показана история напряжения, зарегистрированная манганиновым датчиком в толстой (5–6 толщин ударника) железной мишени, нагружаемой устройством 1–3. Видно, что нагружение проводится двумя прямоугольными импульсами сжатия, каждый из которых состоит из фронта волны сжатия, «полки» и проходящей волны разгрузки.

Для возникновения откола в мишени необходимо в добавление к проходящей организовать встречную волну разгрузки (см., например, [2]). С этой целью толщина железной мишени 4 (см. рис. 1,а) выбиралась небольшой (примерно две толщины ударника), а на ее тыльную поверхность приклеивалась пластина 5 из материала с меньшей, чем у железа, акустической жесткостью. Между образцом и «мягкой» пластиной помещался манганиновый датчик толщиной 0,03 мм, отделяемый от пластины 5 и железного образца тефлоновыми пленками толщиной 0,04 мм. Воздух между датчиком, пленкой, стеклом и мишенью вытеснялся вакуумной смазкой, которая заполняла все зазоры при тщательной притирке пластины к мишени.

В экспериментах пластины изготавливались из отшлифованного по 6–7-му классу чистоты стекла «легкий крон» ЛК-105 с начальной плотностью $\rho = 2,237$ г/см³ и представляющего аналог стекла «пирекс». Выбор именно этого материала обусловлен высоким (6 ГПа) значением динами-

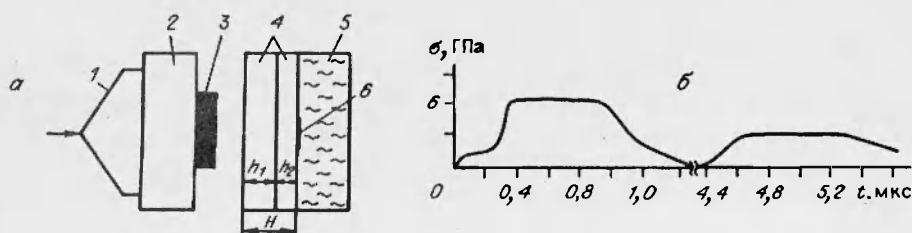


Рис. 1. Схема усложненного одномерного нагружения образцов (а) и история напряжения в мишени при двойном ударе (б).

H — толщина образца; h_1 и h_2 — толщины первой и второй пластин составного образца.

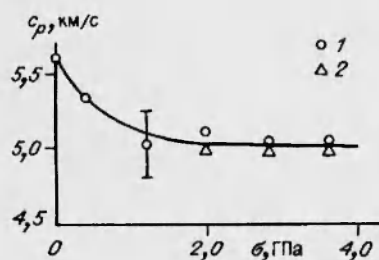


Рис. 2. Зависимость фазовых скоростей распространения уровней одинакового напряжения от напряжения при нагрузке (1) и при разгрузке (2).

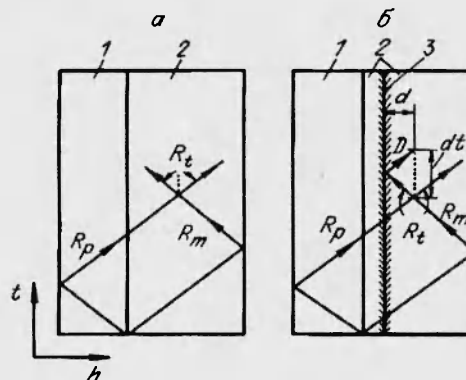


Рис. 3. Схема волновых взаимодействий в сплошном (а) и в составном (б) образцах: Z_1 — ударник; 2 — образец; 3 — разрез; d — расстояние от места откола до разреза, dt — время действия растягивающих напряжений в плоскости откола.

ческого предела упругости [4], что позволяло предполагать его деформирование упругим до напряжения 6 ГПа. Специально для целей данной работы исследовалось динамическое поведение стекла ЛК-105 при сжатии до 4 ГПа и разгрузке. Для этого с помощью манганинового датчика определялась эволюция сжатия, генерируемого устройством 1–3 в плоских пластинах стекла. Затем находились зависимости фазовой скорости распространения уровней одинакового давления $c_p(\sigma)$ от давления в волне сжатия и последующей волне разгрузки. Результаты этих измерений, показанные на рис. 2, свидетельствуют, что в координатах напряжение — массовая скорость как нагрузка, так и разгрузка стекла ЛК-105 осуществляются по одной и той же кривой, т. е. упруго. При этом производная по напряжению данной кривой определяется графиком рис. 2.

Железный образец, в котором стимулировалось откольное разрушение, представлял собой диск диаметром 100 мм с отшлифованными по классу 6 чистоты плоскими поверхностями. Толщина образца выдерживалась постоянной, $H \approx 5,80 \pm 0,05$ мм. Такой образец мог состоять как из одной, так и из двух прижатых друг к другу пластин толщиной h_1 и h_2 ($H = h_1 + h_2$). В таблице приведены точные значения h_2 в конкретных опытах. Волновая картина в составных образцах ничем не отличается от таковой в сплошных образцах при сжимающих нагрузках в первом нагружающем импульсе, поскольку для волны сжатия место контакта, очевидно, не является препятствием. Однако столь же очевидно, что через контакт не может пройти волна растяжения. Поэтому развитие

Номер опыта	h_2 , мм	$h_{s3} \pm 0,2$, мм	$h_{s2} \pm 0,2$, мм	$h_{s1} \pm 0,2$, мм	$h_{t1} \pm 0,1$, мм	$h_{t2} \pm 0,1$, мм	dt , мкс
27	0	—	4,8	2,6	2,7	2,7	—
19	4,0	—	5,3	2,4	2,5	2,6	0,58
20	3,6	—	5,0	2,3	2,4	2,7	0,46
21	3,2	—	4,8	2,3	2,6	2,7	0,27
25	2,2	3,8	2,6	1,6	2,8	2,7	0,14
26	1,8	—	4,7	2,6	2,8	2,6	0,24

откольной поврежденности, которая стимулируется растягивающими напряжениями, будет при прочих равных условиях развиваться в составном образце иначе, чем в сплошном.

Эти соображения качественно иллюстрируются $h - t$ -диаграммой (рис. 3). На рис. 3,а представлена традиционная схема откольного эксперимента при плоском одномерном соударении пластины-ударника со сплошной пластиной-мишенью, в которой возникает волна растяжения R_t при взаимодействии двух волн разрежения: проходящей R_p и встречной R_m . Волна растяжения стимулирует откол внутри мишени. Если же в этой схеме мишень сделать не сплошной, а состоящей из двух пластин (рис. 3,б), т. е. как бы поместить внутри образца разрез, то волна R_t , достигнув плоскости разреза, отразится от нее волной сжатия D . Достигнув плоскости откола, волна D сбросит действующие там растягивающие напряжения.

Таким образом, меняя местоположение разреза в мишени, можно изменять время действия растягивающих напряжений и, следовательно, влиять на зарождение и рост микроповрежденности [5]. Иными словами, разрез можно рассматривать как некий инструмент, с помощью которого можно целенаправленно регулировать процесс откольного разрушения. Наконец, если образец с разрезом нагружается двумя следующими друг за другом ударами, то история напряжений в мишени еще более усложнится, поскольку теперь в отличие от схемы рис. 3,а в образце будут взаимодействовать около десятка волн сжатия и разрежения.

В постановке рис. 1 проведена регистрация истории напряжения на границе образцов со стеклом во время развития откола как в сплошном, так и в составных образцах (при различном местоположении разреза в них), нагружаемых двойным ударом. Результаты регистрации приведены на рис. 4.

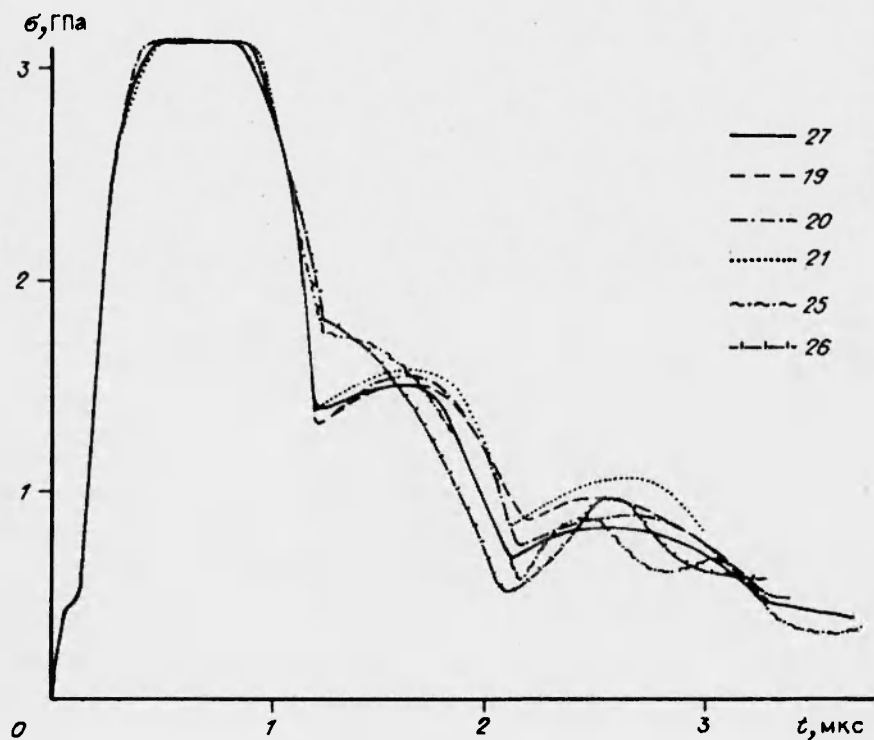


Рис. 4. Зависимость напряжения σ на границе образца со стеклом от времени t (цифры — номер эксперимента).

Результаты микроструктурного исследования откольной поврежденности

Металлографические исследования выполнялись так же, как и в [1]. Из центральной части сохраненного образца вырезали параллелепипед с основанием 12×12 мм (рис. 5, а). Грань А, перпендикулярная основанию, шлифовалась, затем подвергалась электротравлению в 15 %-м растворе соли Мора при плотностях тока 10 мА/см. Такой режим электротравления позволял выявлять не только микротрещины, но и фигуры травления внутри отдельного монокристаллического зерна. Как известно, по форме фигур травления можно определить ориентацию кристаллографических плоскостей отдельного зерна относительно плоскости шлифа. Если же в зерне присутствует микротрещина, то, выявив фигуры травления в ее непосредственной близости, можно судить об ориентации микротрещины относительно определенных атомных плоскостей зерна. На рис. 6 представлены фотографии микротрещин на фоне фигур травления исследуемого материала. Аналогично [1] оказалось, что подавляющее большинство микротрещин располагается так, что след трещины параллелен стороне квадратов или прямоугольников фигур травления (рис. 6, а). Известно [6], что стороны квадратов и прямоугольников фигур травления, полученные при использовании данного травителя, выявляют направления плоскостей (100). Расположение микротрещин, показанное на рис. 6, а, означает, что подавляющее большинство микротрещин, образовавшихся при отколе в железных образцах, являются микротрещинами скола и располагаются в плоскостях (100) отдельных зерен-монокристаллов. Микротрещины, расположенные параллельно другим кристаллографическим плоскостям, например микротрещина в плоскости (111) (рис. 6, б), встречаются крайне редко.

В работе изучалось распределение в образце микротрещин с линейным размером 10–50 мкм. Для этого на грани А (см. рис. 5, б) подсчитывали

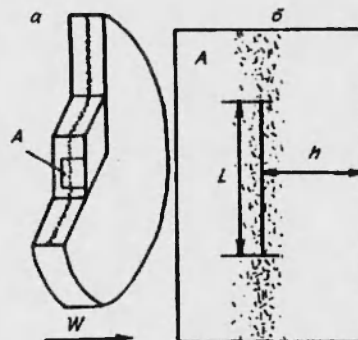


Рис. 5. Схемы изготовления шлифов сохраненных образцов (а) и нахождения распределения удельной поверхности микротрещин в образце (б):

W — направление удара; h — расстояние от границы образца со стеклом; L — длина секущей линии.

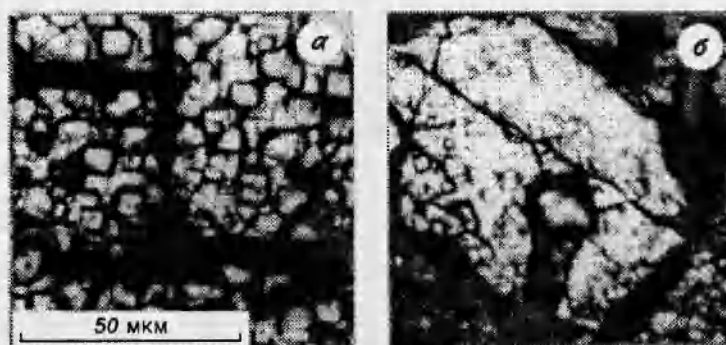


Рис. 6. Микротрещина скола на фоне фигур травления, лежащая в плоскостях (100) (а) и (111) (б).

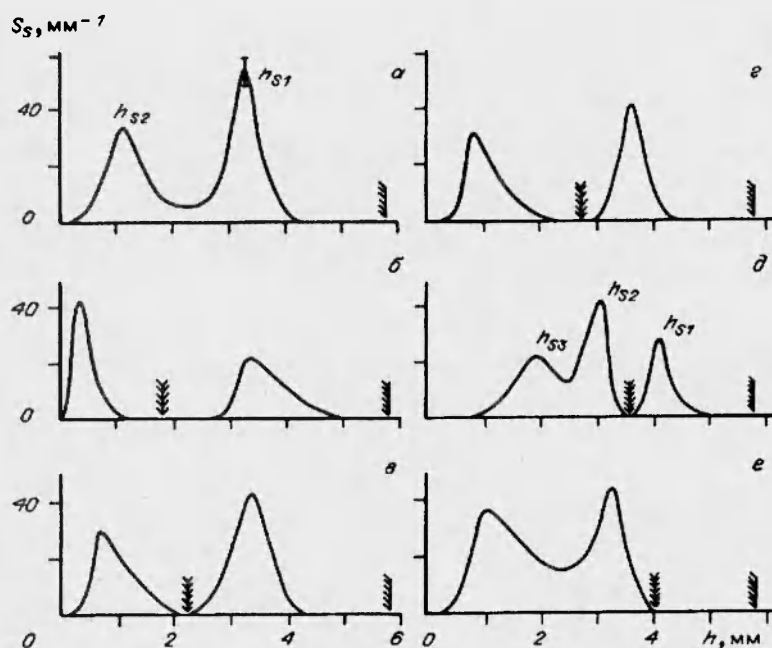


Рис. 7. Распределение удельной поверхности микротрещин $S_s(h)$ в образцах:

а-е — эксперименты 27, 19, 20, 21, 25, 26 соответственно (см. рис. 4); h — расстояние от границы образца со стеклом.

валось число точек $z(h)$ пересечения следов микротрещин с прямой линией заданной длины L , расположенной на расстоянии h от границы мишени со стеклом, и затем определялась удельная величина $PL(h) = z(h)/L$ (L — число точек пересечений на единице длины секущей линии [1]). Основываясь на соотношениях стереометрической металлографии (см. [7]) и считая микротрещину двумерным объектом, определяли суммарную поверхность микротрещин в единице объема $S_s(h) = 4PL(h)$ [1]. Таким образом, величина S_s , определенная на различных расстояниях от границы мишени, представляет собой распределение плотности поверхности микротрещин размером 10–50 мкм внутри отколоно поврежденного образца. Результаты таких измерений для образцов, профили напряжения для которых приведены на рис. 4, представлены на рис. 7, а в таблице — значения h_{s1} , h_{s2} и h_{s3} — расстояния от границы образца со стеклом до соответственно первого, второго и третьего максимумов распределения $S_s(h)$.

Обсуждение результатов

Обсуждение начнем с результатов регистрации профилей напряжения на границе образца и мишени. На рис. 4 видно, что все профили имеют характерный для откольных осциллограмм вид: на разгрузочной части импульса наблюдается излом, свидетельствующий о выходе на границу образца дополнительного импульса сжатия (откольного импульса). Затем следуют характерные для откола колебания напряжения, период которых обусловлен временем циркуляции этого импульса между местом его возникновения и границей образца с «мягкой» преградой. При этом в области откольного импульса заметна тенденция расположения графиков друг над другом по мере приближения разреза к границе образца со стеклом. В начале (см. эксп. 19, 20, 21 на рис. 4) эффект находится в пределах

погрешности измерений, но эта тенденция отчетливо видна в области откольного импульса графиков 25 и 26. Кроме этого, для составных мишеней с самой тонкой второй пластиной h_2 наблюдается еще одна особенность. Она заключается в том, что в опытах 25 и 26 после первой циркуляции дополнительного импульса сжатия период второго колебания напряжения оказывается примерно вдвое меньше предыдущего. Но и в этом случае моменты характерных точек первых двух минимумов графика остаются практически одинаковыми для всех кривых рис. 4.

В случае сплошной мишени дополнительный импульс однозначно свидетельствует о развитии откольного разрушения, поэтому он называется откольным. В случае же составной мишени дополнительный импульс сжатия может быть обусловлен не только отколом, но и отражением волны растяжения от разреза. Отличить один вариант от другого позволяют оценки расстояния между регистрирующим датчиком и местом возникновения дополнительного импульса сжатия внутри образца. Эти оценки производятся по времени выхода дополнительной волны сжатия или по периоду последующих колебаний напряжения [2, 8]. Пусть h_{t1} — расстояние от датчика до места возникновения дополнительной волны сжатия внутри образца. Тогда, согласно [8], время t_1 от момента прохождения фронта пластической волны сжатия до момента выхода откольного импульса оценивается как $t_1 = h_{t1}/c_0 + h_{t1}/c_1$, где c_0 и c_1 — объемная и продольная скорости звука в мишени. В дальнейшем откольный импульс отражается поочередно от границы со стеклом и границы поврежденного слоя, расположенной на глубине h_{t2} в мишени, т. е. циркулирует в слое образца толщиной h_{t2} со скоростью продольных звуковых волн. Поэтому период колебаний t_2 графика напряжения после откольного импульса состоит, очевидно, из двукратного времени прохождения звуковым возмущением откольной пластины h_{t2} или пластины h_2 , прилегающей к стеклу (см. рис. 1, а), со скоростью c_1 , т. е. $t_2 = h_{t2}/2c_1$. По этим двум формулам для t_1 и t_2 с использованием для c_1 и c_0 справочных значений ($c_1 = 5,9$ и $c_0 = 4,64$ мм/мкс) оценивались величины h_{t1} и h_{t2} (см. таблицу). Из таблицы видно, что для сплошных и составных мишеней значения h_{t1} и h_{t2} практически одинаковы и совпадают с одной из координат пика поврежденности. Это означает, что в обоих случаях дополнительная волна сжатия зарождается в месте возникновения поврежденности, т.е. обусловлена развитием откольного разрушения.

На основании данных таблицы и профилей напряжения можно сделать еще некоторые заключения. Так, для составных образцов характерна следующая закономерность: пока разрез располагается между двумя пиками поврежденности сплошного образца, h_{t1} и h_{t2} совпадают с координатой первого пика поврежденности h_{s1} . Если же разрез проходит между границей образца со стеклом и первым пиком поврежденности сплошного образца, величины h_{t1} и h_{t2} совпадают не с первым, а со вторым пиком h_{s2} составного образца, т. е. в случаях, когда в составном образце возникают три пика поврежденности, первым по времени идет пик h_{s2} .

Второй после выхода откольного импульса период колебания графика напряжения для опытов 25 и 26 оказывается меньше первого. Это означает, что откольный импульс циркулирует по пластине толщиной h_{s2} лишь один раз. Во время же второго прохождения он отражается от некоторого препятствия внутри пластины h_{s2} . Этим препятствием может оказаться либо место контакта пластин составного образца, либо откольно поврежденный слой h_{s1} . Если бы препятствием оказался откольно поврежденный слой, то это свидетельствовало бы о том, что откольный слой на расстоянии h_{s1} от датчика сформировался во время циркуляции откольного импульса, образовавшегося в области пика h_{s2} . Однако достоверно иденти-

фицировать причину изменения периода колебаний графика напряжения в этом случае трудно из-за отсутствия записи профилей напряжения после трех первых колебаний.

Наконец заметим, что по разнице d между местоположением разреза h_2 и пика поврежденности h_{s1} можно оценить время действия растягивающих напряжений в плоскости откола dt . Поскольку волна растяжения отражается от разреза волной сжатия, то при наличии разреза растягивающие напряжения в плоскости откола h_{s1} будут существовать лишь до тех пор, пока волна растяжения не преодолеет расстояние d и, отразившись от него волной сжатия D , не вернется в плоскость h_{s1} . Очевидно, это время можно оценить как $dt = 2d/c_1 = 2(h_2 - h_{s1})/c_1$ (см. рис. 3,б). Полученные в таком приближении оценки dt для соответствующих опытов приведены в таблице. Видно, что в выполненных экспериментах время dt варьируется от максимального 0,58 мкс до минимального 0,14 мкс.

Обсудим теперь данные по сохраненным образцам. Распределение плотности поверхности микротрещин размером 10–50 мкм внутри откольно поврежденного образца для краткости будем называть просто распределением поврежденности. На рис. 7,а показано распределение поврежденности внутри сплошного образца после нагружения его двойным ударом. Это распределение имеет два ярко выраженных пика. В соответствии с выводами, полученными при обсуждении рис. 4, можно сказать, что пики образовывались в следующей последовательности. Сначала в результате первого удара возникла поврежденность около границы образца со стеклом (первый пик h_{s1}). Причем к моменту второго удара поврежденность в первом пике достигла такой степени, что этот поврежденный слой оказался акустически непрозрачным для второго импульса сжатия. Иными словами, откольно поврежденный слой в области первого пика стал играть роль «мягкой» преграды, от которой второй импульс сжатия отразился встречной волной разрежения. При взаимодействии этой волны разрежения с проходящей волной разрежения второго импульса возникли растягивающие напряжения, приведшие к возникновению второго пика поврежденности h_{s2} .

Последовательность образования пиков поврежденности в составных образцах в основном такая же, как и в сплошном. При наличии лишь двух пиков сначала образовался пик h_{s1} , а затем аналогично процессу в сплошном образце сформировался пик h_{s2} . Для одной из составных мишеней с самой тонкой второй пластиной вначале образовался пик h_{s2} (см. рис. 7,д), затем, вероятно, во время циркуляции откольного импульса возник пик h_{s1} и, наконец, в результате второго удара ударника сформировался пик h_{s3} .

Общая черта всех экспериментов — образование пика поврежденности в результате взаимодействия встречной волны разрежения с проходящей волной разрежения импульса сжатия от первого удара. Этот пик поврежденности располагается практически на одном и том же расстоянии от границы образца со стеклом. Волновая предыстория для этого пика также не меняется от опыта к опыту. Различие заключается лишь в том, что в разных опытах изменяется расстояние d от пика до разреза, которое определяется временем действия растягивающих напряжений dt . Потому можно было ожидать различия в максимальном значении поврежденности: по мере уменьшения времени dt должна была бы уменьшаться амплитуда пика поврежденности. К сожалению, точность измерения поврежденности не позволила выявить какую-либо закономерность в зависимости $S_s(dt)$. Можно лишь утверждать, что через время, не большее $dt = 0,14$ мкс, после возникновения откольного импульса откольная поврежденность достигает такой степени, что превращает исходный монолитный слой образца в акустически непрозрачный для импульса сжатия, циркулирующего между

плоскостью датчика и поврежденным слоем.

В целом введение разреза в образец, с одной стороны, ощутимо влияет на профили напряжения (см. рис. 4), а с другой, — нетривиально изменяет вид распределения поврежденности. Так, при вариации расположения разреза в мишени первый пик остается практически на месте (см. рис. 7,б-е). Ближний к поверхности пик поврежденности (см. рис. 7,б-г) смещается вслед за разрезом. Наконец, когда разрез располагается между первым пиком поврежденности сплошного образца и стеклом, картина радикально изменяется — на распределении поврежденности составного образца может возникнуть третий пик, который располагается в ближней к стеклу пластине составного образца. Очевидно, эти нюансы обусловлены количественными характеристиками кинетики развития откольной поврежденности при данной усложненной волновой картине. Поэтому детально истолковать эволюцию распределения поврежденности и профилей напряжения в этом случае можно с помощью численного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молодец А. М., Лебедев В. И., Дремин А. Н. Микроструктурные закономерности откольного разрушения железа // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 101–108.
2. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1979.
3. Канель Г. И., Молодец А. М., Дремин А. Н. Изменение прочностных свойств металлов в ударных волнах // Физика металлов и металловедение. 1978. Т. 46, № 1. С. 200–202.
4. Молодец А. М., Орлов А. В., Дремин А. Н. Влияние температуры на релаксацию динамического предела упругости стекла // 9 Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Детонация: Сб. докл. Черноголовка, 1989. С. 74–77.
5. Молодец А. М. Длительность процесса откольного разрушения // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1980. Вып. 48. С. 111–115.
6. Кудрявцев И. П. Текстуры в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1976.
7. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976.
8. Молодец А. М., Дремин А. Н. Две стадии процесса откольного разрушения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 249, № 6. С. 1361–1364

Поступила в редакцию 4/VIII 1993 г.