

Рис. 6. Зависимость эффективной энергии основного взрыва от скорости в центре купола.

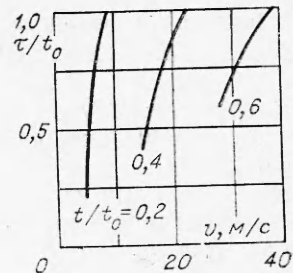


Рис. 7. Зависимость времени задержки от скорости купола.

ментально показано, что время задержки второго взрыва существенно влияет на объем выброшенного грунта. Взаимодействие зарядов в этой работе осуществлялось через раздробленную первым взрывом породу. Вопросы коррекции при этом рассмотрены не были.

Институт физики
Земли АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
28/VII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Садовский, В. Н. Родионов. Наука и жизнь, 1973, 11.
2. М. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов. Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. Н. А. Гужов, П. Ф. Коротков. ПМТФ, 1975, 6.
4. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1973.
5. Влияние интервалов замедления на объем воронки при взрывах на выброс. Реферативная информация о передовом опыте. Вып. 6. ЦБНТИ, 1972.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛА В ИНТЕНСИВНЫХ ВОЛНАХ СЖАТИЯ

Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. Н. Дремин

С целью выяснения механизма деформирования хрупких материалов при ударном сжатии проведены измерения анизотропии напряжений в сжатом ударной волной стекле и откольной прочности стекла непосредственно после ударного сжатия. Амплитуда волны сжатия изменялась в диапазоне от 60 до 230 кбар. Результаты измерений показывают, что образующиеся при разрушении раздавливанием в волне сжатия частицы образца могут свободно скользить относительно друг друга (по крайней мере при разгрузке), но прочность образца в целом на разрыв остается довольно высокой. Это объясняется образованием расплавленных прослоек между частицами образца в процессе его деформирования.

Знание особенностей деформирования хрупких материалов при ударном сжатии необходимо для анализа процессов, протекающих при сильных подземных взрывах, а также в условиях взрывной или лазерной обработки материалов. Известные работы [1—3] по исследованию ударной сжимаемости кварца и керамических материалов не дают достаточно надежных данных для однозначных выводов о механизме деформирования хрупких материалов в ударной волне, но в ряде случа-

ев на основании совпадения ударной адиабаты с расчетной или экстраполированной кривой всестороннего сжатия сделан вывод о том, что при превышении предела упругости в ударной волне хрупкие материалы раздавливаются на отдельные слабо связанные между собой частицы и при дальнейшем деформировании анизотропия напряжений в образце отсутствует, материал ведет себя подобно жидкости.

Для получения дополнительной информации о характере деформирования хрупких материалов при ударном сжатии в данной работе проведены исследования анизотропии напряжений в ударно-сжатом стекле и измерения откольной прочности стекла. Стекло было выбрано как наиболее доступный и однородный модельный хрупкий материал. Предполагалось, что если в волне сжатия происходит разрушение образца и механическая связь между образующимися частицами отсутствует, то напряжения в сжатом образце должны быть изотропны, а прочность образца на разрыв при отколе близка к нулю.

Схема опытов по измерению анизотропии напряжений поясняется рис. 1. Образцы составлялись из нескольких прямоугольных пластин стеклами К-8. Между пластинами оставлялись две заполненные фторопластовыми пленками узкие щели, одна из которых была ориентирована параллельно плоскости фронта волны сжатия, а вторая — перпендикулярно плоскости фронта. Одномерная волна сжатия с амплитудой в образцах $\sigma_x = 110-220$ кбар создавалась ударом алюминиевых пластин толщиной 7 или 10 мм с диаметром плоского участка в момент соударения не менее 65 мм, разогнанных до скорости $1,8 \div 2,8$ км/с с использованием взрывных устройств [4]. Ударная волна вводилась в образец через алюминиевый или медный экран толщиной 4—6 мм. Волны сжатия интенсивностью 90—100 кбар создавались генератором ударных волн с профилем давления, близким к прямоугольному [5]. Поперечные размеры образцов перекрывали поверхность соударения; толщина образцов в направлении сжатия составляла 20—30 мм.

Поскольку щели в образце заполнены малопрочным материалом, после прохождения волны сжатия в щели, ориентированной параллельно фронту волны, с некоторым запаздыванием устанавливается давление, равное напряжению σ_x в стекле в направлении сжатия, а в щели, ориентированной перпендикулярно фронту волны сжатия, устанавливается давление, равное напряжению σ_y в образце в поперечном направлении. Если в щелях разместить датчики давления, то в одном опыте можно измерять одновременно величины главных нормальных напряжений σ_x и σ_y в одномерно сжатом образце. В данной работе для измерения давлений использовались манганиновые датчики (пьезосопротивления) [6], чувствительные элементы которых представляли собой манганиновые ленты толщиной $\sim 0,02$, шириной $\sim 0,4$ и длиной 15—18 мм, расположенные в обеих щелях, параллельно фронту волны сжатия. Для уменьшения погрешности, связанной с нестабильностью свойств манганина, датчики готовились из смежных кусков манганиновой ленты и идентично обрабатывались. Сопротивление датчиков составляло $1 \div 1,3$ Ом, пропускаемый через них в процессе измерений импульс тока имел амплитуду 8 А. Датчики σ_y устанавливались обычно на расстоянии 5 мм от экрана, датчики σ_x — на расстоянии 5 мм или на границе между экраном и образцом. Толщина фторопластовых прокладок, отделявших датчики от поверхностей образца, составляла 0,04—0,1 мм с каждой стороны. Таким образом, общая толщина щелей составляла

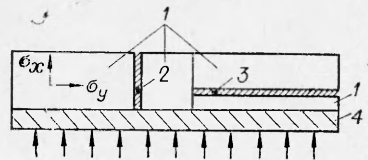


Рис. 1. Постановка опытов по измерению анизотропии напряжений в стекле.

1 — пластины образца, 2, 3 — датчики напряжений σ_x и σ_y соответственно; 4 — экран. Стрелками показано направление удара.

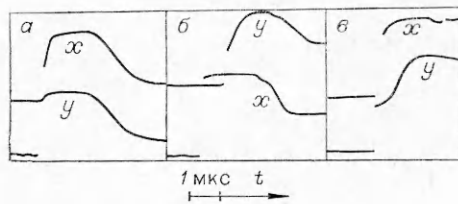


Рис. 2. Осциллограммы опытов по регистрации профилей $\sigma_x(t)$ (отмечены буквой x) и $\sigma_y(t)$ (отмечены буквой y). Условия нагружения: а) удар алюминиевой пластины толщиной 10 мм со скоростью 2,3 км/с через алюминиевый экран, $\sigma_{x \max} = 170$ кбар. б) удар алюминиевой пластины толщиной 10 мм со скоростью 1,35 км/с через медный экран, $\sigma_{x \max} = 109$ кбар, датчик σ_x расположен на границе раздела с экраном; в) нагружение генератором прямоугольной ударной волны, $\sigma_{x \max} = 95$ кбар, оба датчика установлены на расстоянии 7 мм от экрана.

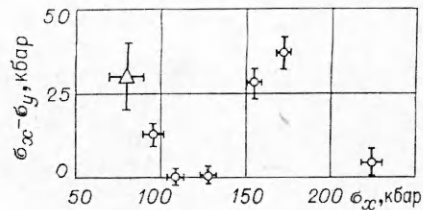


Рис. 3. Зависимость $\sigma_x - \sigma_y$ в ударно-сжатом стекле К-8 от амплитуды σ_x волны сжатия. Треугольником обозначено состояние в упругом предвестнике.

пределы погрешности измерений, а толщины прокладок от 0,1 до 0,04 мм может приводить к завышению показаний датчика σ_y на 10%.

Типичные осциллограммы опытов приведены на рис. 2. Величины σ_x и σ_y в сжатом стекле измерялись после выхода сигналов на «плато»; ввиду различия инерционности датчиков сопоставление величин σ_x и σ_y в процессе их быстрого изменения затруднено. Результаты измерения $\sigma_x - \sigma_y$ суммированы на рис. 3 (сжимающие напряжения приняты положительными). Каждая точка на рис. 3 получена усреднением данных 2—3 опытов.

Амплитуда σ_x упругого предвестника в стекле К-8 по данным предыдущих исследований [7] и по измерениям, проведенным в представляемой работе, составляет 80±10 кбар при пройденном предвестником расстоянии 5—7 мм от экрана. Измеренное в ряде опытов амплитудное напряжение в предвестнике в поперечном направлении $\sigma_y = 50 \pm 5$ кбар. Если бы стекло при сжатии вело себя упругопластически, то $\sigma_x - \sigma_y \approx 30$ кбар после сжатия оставалась бы примерно постоянной при увеличении амплитуды волны сжатия [8]. Между тем, проведенные в данной работе измерения показывают, что при амплитудах волины сжатия 100—130 кбар разность напряжений падает до нуля. Дальнейшее увеличение интенсивности сжатия до 170—180 кбар приводит к появлению анизотропии напряжений и росту величины $\sigma_x - \sigma_y$ до 30—40 кбар. В опытах с амплитудой $\sigma_x = 110$ и 175 кбар удалось обнаружить анизотропию напряжений после разгрузки до 55 и 35 кбар соответственно (при этих значениях сигналы выходят на «плато»). После разгрузки величины σ_y и σ_x в пределах погрешности измерений совпадают. При упругопластическом поведении материала анизотропия напряжений после разгрузки должна менять знак, но не исчезать. Поэтому результаты измерений можно рассматривать как подтверждение представлений о раздавливании хрупких материалов в ударной волне.

Появление анизотропии напряжений в стекле при сжатии до $\sigma_x = 130$ —170 кбар может быть связано с формой частиц, образующихся при раздавливании образца в волне сжатия — эффект, сходный с дилатансией [9]. При раздавливании в образце образуется система пересекающихся в пространстве микротрещин скола; образец при этом можно представить себе состоящим из плотно уложенных частиц (блоков) с плоскими гранями. В процессе дальнейшей деформации эти блоки смещаются относительно друг друга, причем в условиях одномерного сжатия взаимное смещение блоков сопровождается их вращением, кото-

рое, однако, затруднено формой блоков. Заметим, что образование и смещение блоков стекла непосредственно в волне сжатия наблюдалось в [7]. По-видимому, появление анизотропии напряжения при $\sigma_x = 130-170$ кбар свидетельствует о невозможности вращения блоков без раскрытия трещин или дальнейшего разрушения блоков — частицы «упираются» друг в друга.

Интересно сопоставление профилей $\sigma_x(t)$ и $\sigma_y(t)$ при относительно малой интенсивности волны сжатия (90 кбар), близкой к динамическому пределу упругости стекла. Из осциллограммы, приведенной на рис. 2, в, видно существенное различие характера профилей: если σ_x достигает своего максимума асимптотически, то σ_y меняется явно немонотонно. Из этого сопоставления можно выявить закон релаксации сдвиговых напряжений. Видно, в частности, что скорость релаксации напряжений, малая в начале и в конце процесса, проходит через максимум. Характерное время процесса релаксации напряжений в данных условиях ~ 1 мкс.

Откольная прочность измерялась на оконном стекле с плотностью $2,47 \text{ г/см}^3$ и продольной скоростью звука $5,46 \text{ км/с}$. Толщина образцов составляла $6-12 \text{ мм}$, поперечные размеры $\sim 100 \text{ мм}$. Схема опытов показана на рис. 4. Проведено четыре серии опытов, в которых нагружение образцов проводилось либо ударом алюминиевой пластины толщиной 2 мм , разогнанной до скорости $0,85$ или $3,2 \text{ км/с}$, либо с использованием накладного заряда ВВ, отделенного от образца медным экраном толщиной 10 мм . Кроме того, проводилась рентгеноимпульсная съемка разлета образца после выхода волны сжатия на свободную поверхность, и с помощью магнитоэлектрического метода измерения массовой скорости [5] уточнялся ход кривой разгрузки ударно-сжатого стекла.

Откольная прочность определялась различными способами:

- 1) по длительности импульса $\sigma_x(t)$ при соударении откольной пластины с мишенью определялась толщина пластины. Откольная прочность стекла определялась затем по толщине откольной пластины и измеренному профилю $\sigma_x(t)$ в стекле, аналогично работе [10];
- 2) из сравнения амплитудных значений σ_x при выходе волны сжатия из образца в плексиглас и при соударении откольной пластины с плексигласовой мишенью можно определить разность между максимальной скоростью свободной поверхности и скоростью откольной пластины. Откольная прочность определяется затем по разнице скоростей и наклону изэнтропы разгрузки стекла, подобно работе [11];
- 3) если откол в образце происходит после отражения короткого импульса сжатия в образце от границы раздела с менее жесткой эталонной средой, то информация об отколе приходит на границу раздела в виде второго импульса сжатия [12]. Откольную прочность в этом случае можно оценить по амплитуде второго импульса, а также по профилю $\sigma_x(t)$ в падающей волне, соотношению динамических жесткостей образца и эталонного материала и времени запаздывания второго импульса [12].

Типичные осциллограммы опытов приведены на рис. 5. Следует отметить, что после откола происходят многократные отражения импульса сжатия в откольной пластине от ее поверхностей; откольная пластина колеблется, вибрирует в полете. В результате форма регистрируе-

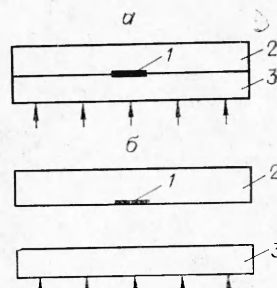


Рис. 4. Постановка опытов по исследованию откола.

а) схема опытов по регистрации профилей $\sigma_x(t)$ в стекле или на границе между стеклом и эталонной средой: 1 — датчик давления, 2 — пластина стекла или плексигласа, или слой ацетона, 3 — пластина стекла, стрелками показано направление удара; б) схема опытов по регистрации импульса давления при соударении откольной пластины с мишенью: 1 — датчик давления, 2 — плексигласовая мишень, 3 — образец.

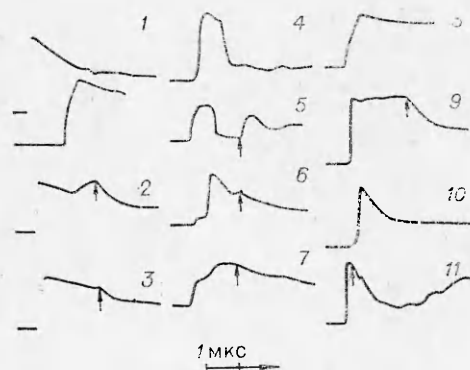


Рис. 5. Осциллограммы опытов по исследованию откола в стекле, полученные в первой (1—3), во второй (4—7), третьей (8, 9) и четвертой (10, 11) серии опытов.

1 — $\sigma_x(t)$ на границе с экраном (верхний луч) и на расстоянии 6 мм от экрана; 2, 3 — профили давления при соударении откольной пластины с мишенью, отстоящей на 2 и 4 мм от поверхности образца, стрелками отмечен момент прихода фронта волны разрежения от тыльной поверхности откольной пластины; 4, 5 — $\sigma_x(t)$ в стекле и на границе между стеклом и ацетоном во второй серии опытов; 6, 7 — профили давления при соударении откольной пластины с мишенью, расположенной на расстояниях 1 и 4 мм; 8, 10 — $\sigma_x(t)$ в стекле, нагруженном ударом алюминиевой пластины со скоростью 3,2 км/с на расстояниях 12 и 6 мм от поверхности соударения; 9, 11 — профили давления при соударении откольной пластины с мишенью в третьей и четвертой серии опытов.

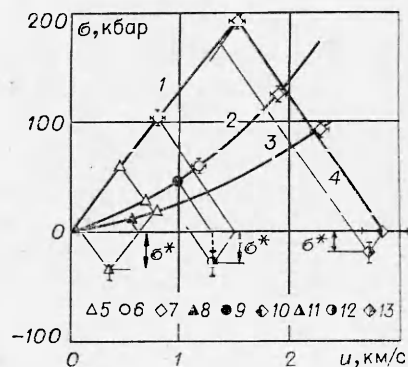


Рис. 6. Графические построения для определения откольной прочности по экспериментальным данным.

1—3 — ударные адиабаты стекла, плексигласа и ацетона соответственно; 4 — кривая разгрузки стекла; 5—7 — результаты амплитудных измерений в опытах серий 2—4; 8 — амплитуда второго импульса сжатия при регистрации $\sigma_x(t)$ на границе с ацетоном; 9 — параметры при соударении откольной пластины с плексигласовой мишенью в опытах серии 3; 10 — начальная скорость свободной поверхности стекла (опыты серии 4), определенная магнитотелеметрическим методом; 11—13 — расчетные растягивающие напряжения в плоскости разрыва образца (опыты серий 2—4 соответственно).

мого при соударении откольной пластины с мишенью импульса $\sigma_x(t)$ зависит от того, в какой фазе колебаний произошло соударение (см. рис. 5, 2, 3, 6, 7), что существенно снижает точность определения откольной прочности.

Результаты амплитудных измерений суммированы в виде точек на σ_x — u -диаграмме на рис. 6. Там же показаны графические построения, проводившиеся для определения откольной прочности σ^* первым (точки 7, 10, 13), вторым (точки 6, 9, 12) и третьим (точки 5, 8, 11) способами. При амплитудах волны сжатия, превышающих динамический предел упругости данного стекла (~ 60 кбар), наклон изэнтропы разгрузки, определенной по результатам амплитудных измерений, несколько больше наклона ударной адиабаты стекла, что обусловлено его необратимым уплотнением при сжатии [7].

Найденные в результате измерений величины откольной прочности стекла σ^* приведены в таблице. Там же указана схема нагружения, скорость ударника w , толщина образцов h , амплитуда волны сжатия в плоскости откола σ_1 , амплитуда волны сжатия перед выходом ее на свободную поверхность σ_2 и толщина откольной пластины δ . Образцы толщиной 12 мм составлялись из двух пластин по 6 мм.

Определение откольной прочности третьим способом проводилось только при минимальной амплитуде волны сжатия (60 кбар). В качестве эталонной среды использовался ацетон. Максимальная величина растягивающих напряжений в стекле после отражения импульса сжатия от границы раздела с ацетоном составляла 35 кбар. Судя по результатам опытов, стекло выдерживало это напряжение без разрушения. При этом отражение волны растяжения в стекле происходило на границе контактирующего с ударником приповерхностного слоя толщиной не более 1,5 мм. По-видимому, этот приповерхностный слой разрушался распространявшимися с поверхности трещинами. Надежное определение

Результаты измерений откольной прочности

Номер серии опытов	Условия нагружения	σ_{1s} , кбар	σ_2 , кбар	δ , мм	Откольная прочность (кбар), определенная способами		
					1	2	3
1	Детонация заряда ВВ, ударная волна вводится в образец через медный экран, $h=6$ мм	130	90	5,5—6,0	$\geq 35 \pm 10$	$\geq 30 \pm 10$	—
2	Удар алюминиевой пластины: $w=0,85$ км/с, $h=6$ мм						
3	$w=3,2$ км/с, $h=12$ мм	170	100	5,5—6,0	$\geq 30 \pm 10$	$\geq 30 \pm 10$	—
4	$w=3,2$ км/с, $h=6,0$ мм	210	190	$1,0 \pm 0,2$	20 ± 10	20 ± 10	—

откольной прочности первым или вторым способом в этой серии опытов затруднено сильной зависимостью формы регистрируемого при соударении с мишенью импульса (рис. 4, б) от величины зазора между образцом и мишенью. Однако при рентгеноимпульсной съемке разлета образца его разрушение не фиксировалось, что дает основание предполагать, что стекло в этих опытах выдерживало без разрушения максимальные растягивающие напряжения ~ 50 кбар.

В опытах первой и третьей серии разрушение пластин образцов также не зафиксировано. Приведенные в таблице величины σ^* равны максимальным растягивающим напряжениям и соответствуют нижней оценке откольной прочности.

Рентгеноимпульсная съемка разлета образцов в опытах 1, 3, 4 подтверждает данные о толщинах откольных пластин, полученные в результате измерений длительностей импульсов $\sigma_x(t)$ на границе соударения откольной пластины с мишенью.

Резюмируя результаты измерений откольной прочности, необходимо сказать следующее. После ударного сжатия стекла до 60 кбар, т. е. не выше динамического предела упругости, его прочность при отколе соответствует прочности стекла на разрыв в нормальных условиях [13] в случае, когда поверхность образца очищена от дефектов и разрушение инициируется в объеме на внутренних дефектах (как и при отколе). После ударного сжатия до 90—200 кбар откольная прочность стекла несколько уменьшается, но остается довольно высокой. На основании литературных данных [1—3] предполагалось, что в волнах сжатия такой интенсивности должно произойти разрушение образца стекла на отдельные связанные слабо частицы, в результате чего прочность на разрыв образца в целом должна стать исчезающе малой.

Таким образом, измерения анизотропии напряжений в сжатом стекле и откольной прочности его после сжатия показывают, что образующиеся при разрушении в волне сжатия частицы могут свободно скользить относительно друг друга (по крайней мере при разгрузке), но нужно приложить значительное усилие, чтобы оторвать эти частицы друг от друга. Это можно понять, если предположить образование расплавленных прослоек между частицами стекла в процессе деформирования образца в волне сжатия, подобных наблюдавшимся ранее в [14] для первоначально монокристаллического образца кварца после ударного нагружения. В этом случае измеренная в опытах с большой амплитудой волны сжатия откольная прочность фактически соответствует прочности на разрыв расплавленного стекла. Заметим, в связи с этим,

что для жидкой ртути, например, откольная прочность составляет 10 кбар [15].

Авторы благодарят Г. А. Савельеву за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

*Отделение ИХФ АН СССР,
Черноголовка*

*Поступила в редакцию
8/VI 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. G. R. Fowles. J. Geophys. Res., 1967, 72, 22, 5729.
 2. T. J. Ahrens, W. H. Gust, E. B. Royce. J. Appl. Phys., 1968, 39, 10, 4610.
 3. W. H. Gust, E. B. Royce. J. Appl. Phys., 1971, 42, 1, 276.
 4. Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев. ФГВ, 1974, 10, 6, 884.
 5. С. А. Колдунов, К. К. Шведов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1973, 9, 2, 295.
 6. Г. И. Канель. ВИНТИ, отд. научн. фондов, № 477—74, деп. от 28 февр. 1974 г.
 7. Г. И. Канель, А. М. Молодец. ЖТФ, 1976, 46, 2, 404.
 8. G. R. Fowles. J. Appl. Phys., 1961, 32, 8, 1475.
 9. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
 10. А. Н. Дремин, Г. И. Канель, А. М. Молодец. ФГВ, 1972, 8, 2, 283.
 11. Л. В. Альтшулер, С. А. Новиков, И. И. Дивнов. Докл. АН СССР, 1966, 166, 1, 67.
 12. D. C. Erlich, D. C. Wooten, R. C. Crewdson. J. Appl. Phys., 1971, 42, 13, 5495.
 13. П. Я. Бокин. Механические свойства силикатных стекол. Л., «Наука», 1970.
 14. А. В. Ананьин, О. Н. Бреусов и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 426.
 15. G. A. Carlson. J. Appl. Phys., 1975, 46, 9, 4069.
-