

05;12

## Кинематика волн разрушения в стекле

© А.А. Богач, Г.И. Канель, С.В. Разоренов

Институт проблем химической физики РАН,  
Черноголовка Московской обл.  
E-mail: kanel@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2001 г.

Представлен новый способ наблюдений волн разрушения в стекле, с использованием которого удалось надежно и воспроизводимо фиксировать явление, измерить скорость распространения волны разрушения и зафиксировать увеличение продольного напряжения в ней. В проведенных экспериментах регистрировались напряжения в импульсе упругого ударного сжатия при его входе в стопку стеклянных пластин и выходе из нее. На каждой поверхности стыка между пластинами происходило расщепление волны сжатия с образованием проходящей и отраженной волн разрушения, что сопровождалось уменьшением напряжения в лидирующей упругой волне.

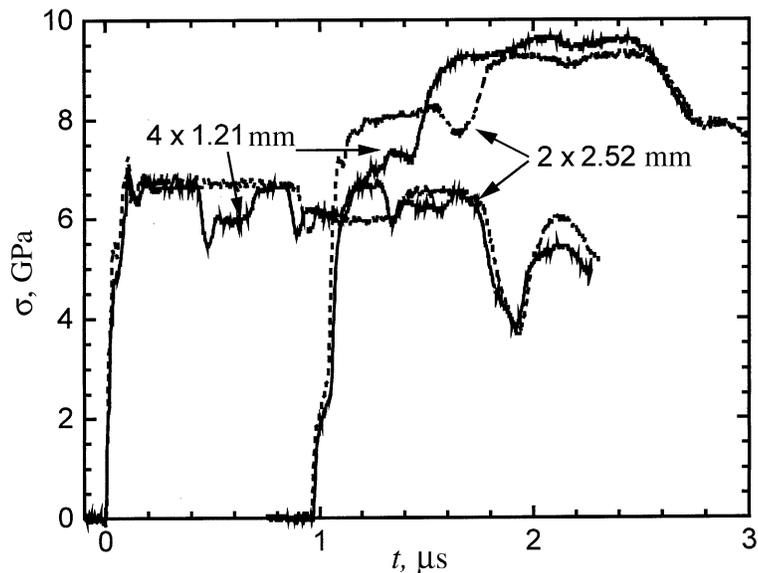
Известно, что при ударном сжатии стекол возможно образование в них волн разрушения в области упругого деформирования [1–3]. Волна разрушения представляет собой сетку трещин, которые инициируются на поверхности и распространяются внутрь тела с дозвуковой скоростью. Специфическим отличием стекла в этом отношении является наличие многочисленных зародышевых микротрещин на поверхности при практически бездефектной внутренней структуре. Распространение волны разрушения сопровождается уменьшением девиаторных напряжений и потерей прочности материала на разрыв. Для образования волны разрушения необходимо, чтобы действующее напряжение превышало некоторый предел; при уменьшении действующего напряжения волна разрушения останавливается. Кинематические закономерности

распространения волн разрушения не изучены. Существующие экспериментальные данные, в частности, не выявляют изменений продольного напряжения в волне, так что остается неясным даже вопрос о том, можно ли описывать волны разрушения известными уравнениями механики сплошной сжимаемой среды.

В данном сообщении представлены предварительные результаты экспериментов с образцами натриево-известкового стекла, составленными из нескольких пластин. Измеренная плотность стекла составляет  $2.45 \text{ g/cm}^3$ , продольная скорость звука  $5.58 \text{ km/s}$ . Стекло не имеет четко выраженного динамического предела упругости; переход к неупругому ударному сжатию происходит при напряжениях выше  $6\text{--}8 \text{ GPa}$  [3]. Для обеспечения воспроизводимых условий инициирования разрушения поверхности стеклянных пластин подвергались шлифовке порошком SiC с размером частиц  $40 \text{ }\mu\text{m}$ . Импульсы ударного сжатия генерировались ударом алюминиевой пластины толщиной  $7 \text{ mm}$ , разогнанной до скорости  $1.15 \text{ km/s}$  использованием взрывного устройства. Ударная волна вводилась в стеклянный образец через медный экран толщиной  $5.5 \text{ mm}$  и после прохождения по образцу отражалась от медной преграды такой же толщины. С применением манганиновых датчиков давления [1] регистрировались профили сжимающего напряжения на входе в образец и на выходе из него. Датчики изолировались фторопластовыми пленками толщиной  $50\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$ .

На рис. 1 приведены результаты двух опытов с образцами стекла, составленными из четырех пластин толщиной  $1.21 \pm 0.06 \text{ mm}$  и двух пластин толщиной  $2.52 \text{ mm}$  соответственно. Предполагаемая схема волновых взаимодействий показана на рис. 2. Стыки между шлифованными пластинами представляют собой пористые прослойки и по этой причине они возбуждают отраженные импульсы разрежения. Эти отражения распространяются назад к первому датчику и вызывают короткие отрицательные выбросы на регистрируемом им волновом профиле в моменты времени, соответствующие точкам 2 и 2' на рис. 2. Измеренные интервалы времени между этими точками с хорошей точностью равны периодом циркуляции упругих волн в пластине соответствующей толщины.

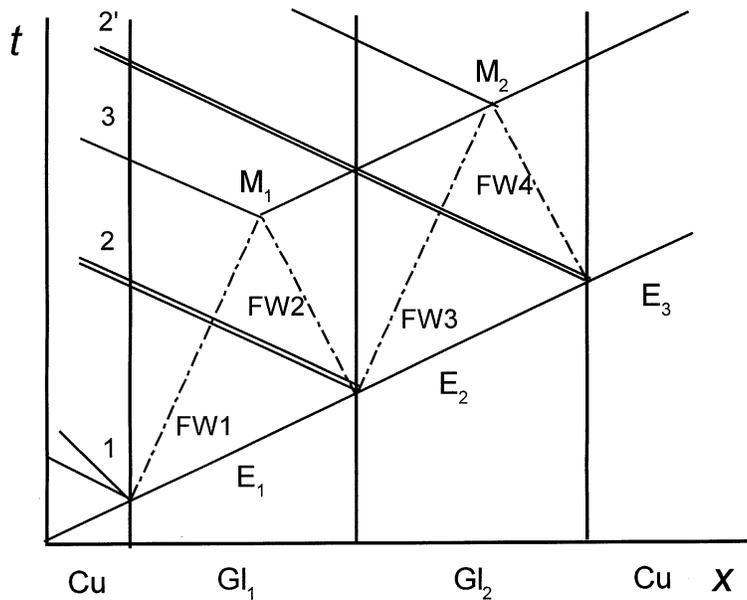
Как показывают измеренные волновые профили, возврат величины сжимающего напряжения к уровню, заданному условиями соударения, происходит ступенчатым образом. Интервал времени между ступеньками пропорционален толщине пластин стекла, из чего следует, что



**Рис. 1.** Результаты измерений профилей сжимающего напряжения в опытах с образцами стекла, составленными из пластин толщиной 1.21 mm и 2.52 mm соответственно.

данная особенность связана с формированием двух волн сжатия, распространяющихся вслед друг другу с разными скоростями. Поскольку максимальные напряжения соответствуют области упругого деформирования, вторая волна, по-видимому, является волной разрушения. Поскольку волна разрушения, очевидно, не может дважды проходить через один и тот же слой материала, вторая ступенька в отраженной волне (точка 3 на рис. 2) соответствует выходу на датчик волны сжатия, сформировавшейся в результате взаимодействия двух встречных волн разрушения в точках  $M_1$  и  $M_2$  на рис. 2. Приняв скорости всех волн, за исключением волн разрушения, равными продольной скорости звука, из рассмотрения диаграммы расстояние–время и измеренных интервалов времени скорость волны разрушения в первых (в направлении сжатия) пластинах определена равной 1.56 km/s, что соответствует предельной скорости роста трещин в стекле.

Датчики давления, расположенные на выходе из образца, регистрируют четко выраженные ступенчатые волны сжатия. Величина сжи-



**Рис. 2.** Предполагаемая диаграмма волновых взаимодействий в координатах расстояние  $x$ –время  $t$ .  $Gl_1$ ,  $Gl_2$  — пластины сборного стеклянного образца,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  — траектория фронта упругой волны сжатия в пластинах,  $FW1$ ,  $FW2$ ,  $FW3$  — траектории волн разрушения.

мающего напряжения за фронтом первой волны уменьшается с увеличением количества пластин в сборке и соответственно поверхностей, на которых инициируется разрушение. Интервал времени между волнами возрастает с увеличением толщины пластин, в то время как для упругопластической волны сжатия при равных общих толщинах образцов этот интервал должен был быть одинаков. Вместе с тем нет четкой пропорциональности между толщинами пластин в сборке и интервалом времени между волнами сжатия. Количественный анализ волновых профилей, регистрируемых вторыми датчиками, затруднен тем, что при отражении ударной волны в стеклянном образце от медной преграды сжимающие напряжения выходят из области упругого деформирования.

В общих чертах процесс ударного сжатия на основе полученных данных представляется следующим. По мере распространения упругой

волны сжатия на каждой поверхности в стопке стеклянных пластин инициируются волны разрушения. В результате на каждой поверхности происходит расщепление волны сжатия. При этом каждый раз происходит уменьшение напряжения в лидирующей упругой волне. Приращение напряжения в волне разрушения определяется фиксированной скоростью ее распространения и степенью дополнительного продольного сжатия при разрушении. Существенно, что скорость этой волны определяется скоростью роста трещин, которая не связана непосредственно со сжимаемостью материала. Полученные результаты подтверждают, что волна разрушения представляет собой волну сжатия и для ее математического описания можно воспользоваться известными уравнениями механики сжимаемых сред.

При достаточно большом количестве пластин в стопке напряжение в лидирующей упругой волне должно уменьшиться до величины предела инициирования разрушения. С приближением к пределу следует ожидать уменьшения скорости волн разрушения и затем прекращения их инициирования. В результате должна сформироваться волновая конфигурация, типичная для ударного сжатия поликристаллических хрупких материалов с лидирующей упругой волной, амплитуда которой определяется пределом разрушения, и волной неупругого сжатия, в которой происходит разрушение и уплотнение материала. При этом длительность второй волны должна соответствовать времени распространения разрушения через отдельные пластины, а скорость ее распространения — объемной сжимаемостью материала. Таким образом, открываются новые возможности для исследований механизмов разрушения горных пород, керамики и других поликристаллических хрупких материалов при сжатии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01–01–00436.

## Список литературы

- [1] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Изд-во „Янус-К“, 1996. 407 с.
- [2] Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Hongliang He, Fuqian Jing, Xiaogang Jin // High Pressure Research. 1998. V. 16. P. 27-44.
- [3] Brar N.S. // Shock Compression of Condensed Matter — 1999 / Ed. by M.D. Furnish et al. 2000. AIP CP 505. P. 601–606.