

УДК 539.422.22

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН РАЗРУШЕНИЯ  
ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ СТЕКОЛ**

© 2011 г.

*А.Н. Паршиков, С.А. Медин*

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

parshikov@ihed.ras.ru

*Поступила в редакцию 24.08.2011*

Получено аналитическое решение для плоской волны хрупкого разрушения материала, нагруженного упругой волной сжатия, в котором применена модель разрушения с условием типа Друкера – Прагера и заданной величиной скорости распространения волны разрушения. Осуществлено обобщение волновой модели разрушения, дополненной пороговыми критериями, на двумерные течения в разрушающихся пластинах. Проведено моделирование соударения стеклянных пластин с жесткой стенкой. Получены трехволновые и двухволновые структуры разрушения в пластине. Получены данные по загущению головной упругой волны и остановке волны разрушения под воздействием догоняющей разгрузки, распространяющейся из области растекания разрушенного материала у стенки.

*Ключевые слова:* волны сжатия и разрушения, стекло, условие Друкера – Прагера, пороги хрупкого разрушения.

Сжатие стекол и, возможно, других хрупких материалов ударной волной при условии превышения порогового напряжения сопровождается возникновением волны разрушения материала. Волна разрушения распространяется по сжатию в ударной волне упругому хрупкому материалу со скоростью, меньшей скорости звука и близкой к предельной скорости роста трещин. Волна разрушения имеет узкий фронт, в котором происходит нарушение сплошности материала в результате взрывного роста трещин.

Впервые математические модели для описания процессов разрушения хрупких материалов в условиях, когда разрушение локализовано в тонком слое (фронте), распространяющемся по материалу, были предложены в конце 60-х годов XX века [1, 2]. В [1] состояние разрушенного материала определялось дополнительным соотношением типа условия пластичности Мизеса, а разрушение материала допускалось при достижении перед фронтом предельной величины касательного напряжения. Принималось также, что в разрушенном материале модуль объемного сжатия имеет такое же значение, как и в неразрушенном материале. Скорость распространения волны разрушения определялась в результате решения задачи как функция критериев разрушения и упругих свойств. В [2] замыкающее соотношение на фронте разрушения задавалось введением допустимой величины разности значений удельной упругой энергии материала на фронте.

Формирование волн разрушения в экспериментах было впервые описано в [3, 4]. Ударные волны генерировались в плоских стеклянных образцах и регистрировалась скорость их тыльной поверхности. На осциллограммах фиксировался приход импульса сжатия, отраженного от фронта волны разрушения.

**Результаты моделирования  
в двумерном приближении**

В плоском двумерном приближении методом SPH решалась задача удара стеклянной пластины размерами  $h \times l = 40.4 \times 3.2$  мм о жесткую стенку с начальной скоростью  $u_0 = -1000$  м/с (пластина движется справа налево). Стенка располагается в точке  $x = 0$ . Расчетная область вмещала 12800 расчетных SPH-частиц размерами  $0.1 \times 0.1$  мм каждая. Все частицы, расположенные на границе расчетной области, в момент времени  $t = 0$  полагались полностью разрушенными ( $D = 1$ ); тем самым имитировались поверхностные дефекты стекла, являющиеся источником зарождения волны разрушения.

Результаты расчетов иллюстрируются рис. 1, на котором показано двумерное распределение (уровни значений) параметра разрушения в моменты времени 1 мкс (а), 1.6 мкс (б) и 2 мкс (в). Из рис. 1а видно, что в начальный момент времени в ударяющейся пластине формируются три волны разрушения: прямая фронтальная, идущая

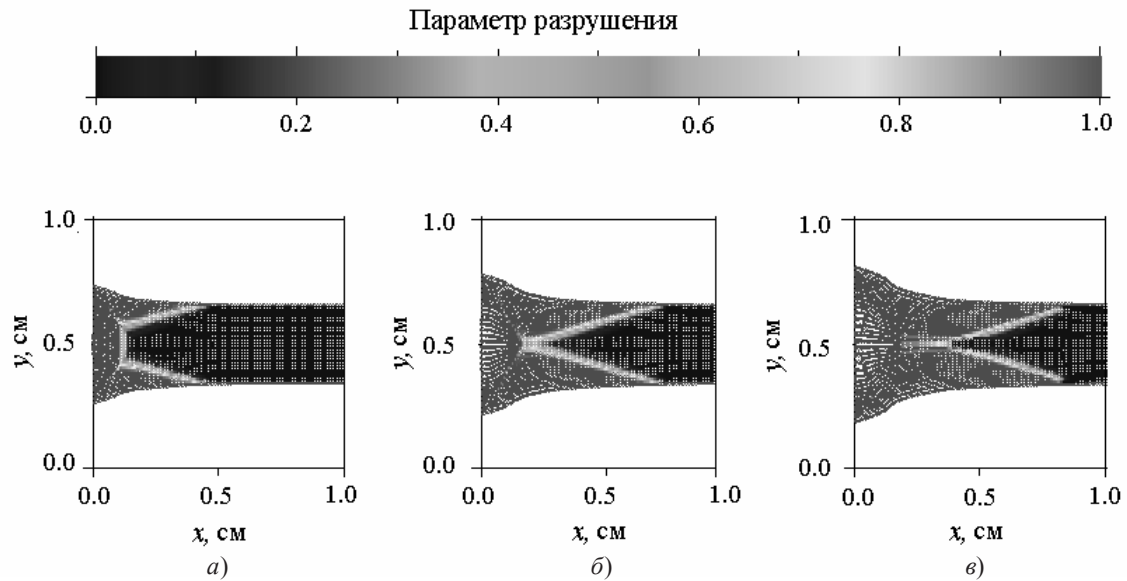


Рис. 1

от жесткой стенки, и две косые боковые, идущие от свободных поверхностей пластины внутрь материала, нагруженного ударной волной. Косые волны разрушения образуются за счет нагружения свободных поверхностей стекла скользящей ударной волной, и свободная поверхность становится источником волны разрушения после прохождения ударной волны. Одновременно от боковых поверхностей распространяются волны разгрузки. При этом происходит боковой разлет материала, начинающийся также после прохождения ударной волны. Вблизи жесткой стенки материал растекается вдоль ее поверхности.

*Работа выполнялась при поддержке гранта ПФИ Президиума РАН №2, 11.*

#### Список литературы

1. Григорян С.С. О некоторых работах по разрушению хрупких тел в динамических условиях // Изв. АН СССР. МТТ. 1977. №1. С. 173–181.
2. Слепян Л.И. О моделях в теории волн хрупкого разрушения // Изв. АН СССР. МТТ. 1977. №1. С. 181–186.
3. Канель Г.И., Разоренов С.В., Фортов В.Е., Абхезов М.М. Влияние волны разрушения на динамику импульса сжатия в стекле // IV Всесоюз. совещание по детонации. М.: Изд-во АН СССР. 1988. Т. 2. С. 104–110.
4. Kanel G.I., Rasorenov S.V., Fortov V.E. The failure waves and spallation in homogeneous brittle materials // Shock Compression of Condensed Matter – 1991 / Eds. S.C. Schmidt, R.D. Dick, J.W. Forbes, D.G. Tasker. New York, 1992. P. 451–454.

## SIMULATION OF FRACTURE WAVE PROPAGATION IN GLASS UNDER IMPACT COMPRESSION

*A.N. Parshikov, S.A. Medin*

An analytical solution for a plane brittle fracture wave in a material loaded by an elastic impact wave is obtained using the failure model with a failure condition of the Drucker – Prager type and the given velocity of propagation of the fracture wave. The two-dimensional fracture wave model supplemented by the threshold criteria is used for computing impact failure of glass plates. For the plates with free lateral boundaries three- and two-wave failure structures were revealed. Data on the attenuation of the heading elastic wave and the stoppage of the failure wave under an overtaking release wave are presented.

*Keywords:* impact and failure waves, glass, Drucker – Prager condition, brittle failure thresholds.