

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕКЛА  
ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ НАГРУЖЕНИЯН.А. З л а т и н, А.А. К о ж у ш к о,  
И.И. Р ы к о в а

Весьма низкая прочность силикатного стекла в условиях квазистатического нагружения обусловлена наличием на его поверхности дефектов (микротрещин), играющих роль очагов разрушения. Удаление дефектов стравливанием поверхностного слоя позволяет повысить прочность стекла почти на два порядка (до 3–3,5 ГПа) [1]. С уменьшением масштаба эксперимента при длительности разрушения, меньшей времени развития отдельных дефектов, регистрируются значения прочности хрупких тел, близкие к теоретическим (например, для кварцевых волокон  $\sim 10$  ГПа) [2, 3].

Таким образом, исключение влияния развития дефектов дает возможность реализовать высокую структурную прочность силикатных стекол.

Исключить определяющую роль роста трещин в процессе разрушения стекла можно путем увеличения скорости нагружения до величин, превышающих скорость роста трещин. В этих условиях прочность хрупких тел должна определяться не дефектами структуры и их развитием, а прочностью межатомных связей [4, 5].

Такое нагружение реализуется при высокоскоростном ударе, который обеспечивает скорость движения ударяющего тела в хрупкой среде (скорость внедрения), превышающую скорость роста трещин. Для количественной оценки прочности стекла в условиях высокоскоростного удара целесообразно обратиться к задаче о сопротивлении среды внедрению деформируемого ударяющего тела при его установившемся движении.

Для случая взаимодействия тел, прочностью которых можно пренебречь, задача решена в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости, положенной в основу гидродинамической теории высокоскоростного соударения [6]. Согласно этой модели, сопротивление среды внедрению ударяющего тела определяется инерционными силами. При движении ударяющего тела в среде с заданной прочностью необходимо учитывать дополнение инерционных сил сопротивления силами, обусловленными прочностью или пластичностью среды (преграды) [7]. В этом случае зависимость скорости внедрения  $u$  от скорости удара  $v$  определяется соотношением

$$u/v = \alpha \lambda / (1 + \alpha \lambda), \quad (1)$$

где  $\lambda = (\rho_1 / \rho_2)^{1/2}$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – соответственно плотность преграды и ударяющего тела,

$$\alpha = (1 + 2\sigma_1 / \rho_1 u^2)^{-1/2}, \quad (2)$$

$\sigma_1$  - характеристика прочностных или деформационных свойств материала преграды, дополняющих инерционное сопротивление (для пластичных тел равная динамической твердости [9]). В выражении (2) предполагается, что сопротивлением деформированию ударяющего тела можно пренебречь.

Таким образом, исходя из данных измерения скоростей  $v$  и  $u$ , по (1) и (2) можно оценить составляющую сопротивления внедрению, которая определяется реализуемой при высокоскоростном ударе прочностью стекла.

В настоящей работе оценивалась величина  $\sigma_1$  для силикатного стекла при соударении с медным стержнем. Условия соударения обеспечивали внедрение со скоростями  $u = 1,8-2,8$  км/с, которые превышали скорость роста трещин в стекле ( $\sim 1,5$  км/с). Опыты проводились с образцами толщиной 15 мм. Скорость внедрения определялась по времени между замыканиями ударяющим телом электроконтактных датчиков, расположенных на лицевой и тыльной сторонах образца.

По данным измерения скоростей  $v$  и  $u$ , в условиях высокоскоростного удара  $\sigma_1 = 14,4 \pm 2,5$  ГПа и по порядку величины соответствует его теоретической прочности на растяжение.

Однако сопоставление величины  $\sigma_1$  именно с величиной теоретической прочности не представляется достаточно оправданным. Более обоснованно считать, что величина  $\sigma_1$  определяется не полным разрывом межатомных связей на поверхности контакта, а достижением в некоторой близлежащей области критического сдвигового напряжения и последующего пластического течения [4, 8]. Подобный переход хрупких тел в текучее состояние наблюдался при их ударно-волновом нагружении [8].

С этой точки зрения целесообразно обратиться к характеристикам сопротивления материала преграды деформированию. Для пластичных тел такой характеристикой является динамическая твердость  $H_D$ , связанная с динамическим пределом текучести  $\sigma_{SD}$  корреляционной зависимостью  $H_D \approx 3\sigma_{SD}$  [9, 10]. Величина  $\sigma_{SD}$  связана с динамическим пределом упругости Гюгоньо  $\sigma_{HEL}$ , который регистрируется как амплитуда упругого предвестника при ударно-волновом нагружении соотношением  $\sigma_{SD} = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \sigma_{HEL}$ , где  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

По данным [11], для силикатного стекла  $\sigma_{HEL} = 7,3$  ГПа. Этому значению  $\sigma_{HEL}$  при  $\mu = 0,22$  соответствует динамический предел текучести  $\sigma_{SD} = 5,2$  ГПа. Если принять  $H_D = 3\sigma_{SD}$ , оценка динамической твердости стекла приводит к величине  $H_D = 15,6$  ГПа. Полученные экспериментально значения прочностного сопротивления стекла того же состава внедрению ударяющего тела  $\sigma_1 = 14,4$  ГПа удовлетворительно согласуются с величиной его динамической твердости, следующей из данных измерения динамического предела упругости.

Анализ полученных результатов дает основание предполагать, что при внедрении в стекло ударяющего тела со скоростями, большими скорости роста трещин, инерционное сопротивление внедрению

дополняется, как и в случае пластичных тел, в основном, сопротивлением стекла деформированию. Деформирование стекла обусловлено достижением в нагруженной зоне контакта с ударяющим телом сжимающих напряжений, под действием которых превосходится динамический предел упругости, и стекло переходит в текучее состояние.

Таким образом, при внедрении ударяющего тела со скоростями, большими скорости трещин, реализуется высокопрочное состояние стекла. В этих условиях силикатное стекло имеет высокий динамический предел текучести, который определяет сопротивление деформированию на уровне 10–20 ГПа.

Авторы признательны А.Д. Изотову, В.Б. Лазареву, Г.С. Пугачеву и А.Б. Синани за плодотворную дискуссию.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Байкова Л.Г., Витман Ф.Ф., Пугачев Г.С., Пух В.П. – ДАН СССР, 1965, т. 163, № 3, с. 617–620.
- [2] Николаевский В.Н. – Препринт № 123 ИПМ АН СССР. М., 1979.
- [3] Бартенев Г.М. Строение и механические свойства неорганических стекол. М: Стройиздат, 1966.
- [4] Изотов А.Д., Лазарев В.Б. – ЖФХ, 1986, т. 60, № 1, с. 192–196.
- [5] Кожушко А.А., Рыкова И.И., Изотов А.Д., Лазарев В.Б. – Изв. АН СССР, Неорг. материалы, 1987, т. 23, № 12, с. 2087–2093.
- [6] Лаврентьев М.А. – УМН, 1957, т. 12, № 4, с. 41–52.
- [7] Златин Н.А., Кожушко А.А. – ЖТФ, 1982, т. 52, № 2, с. 330–334.
- [8] Альтшулер Л.В. – УФН, 1965, т. 85, № 2, с. 197–258.
- [9] Златин Н.А. В кн.: Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974, с. 194–240.
- [10] Tate A. – Int. J. Mech. Sci., 1977, v. 19, N 2, p. 121–123.
- [11] Дремин А.Н., Ададуров Г.А. – ФТТ, 1964, т. 6, № 6, с. 1757–1762.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
21 июня 1988 г.