

05.1;07;12

## Откол в стекле К8 при субмикросекундном ударном нагружении

© Ю.В. Судьенков

С.-Петербургский государственный университет

Поступило в Редакцию 24 января 2001 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований динамической прочности оптического стекла К8 при субмикросекундной длительности ударного нагружения. Импульс давления длительностью 80 ns генерировался при воздействии лазерного излучения на алюминиевую фольгу.

В экспериментах с помощью лазерного дифференциального интерферометра измерялась скорость свободной поверхности образцов, а также регистрировалось начало разрушения у свободной поверхности по отраженному от возникающей при отколе трещины излучению He-Ne-лазера.

Экспериментальные исследования позволили впервые получить данные о динамической прочности стекла в субмикросекундном диапазоне длительностей ударного нагружения. Для стекла К8 критическое напряжение откола оказалось равно  $0.45 \pm 0.03$  GPa.

Отмечается, что результаты экспериментальных исследований временных характеристик процесса разрушения, а также данные фрактографического анализа зоны разрушения не позволяют однозначно утверждать о существовании стадии накопления повреждений при разрушении неорганических стекол.

Неорганические стекла являются традиционными модельными материалами для исследований прочности хрупких материалов [1,2]. В то же время информация о динамической прочности неорганических стекол весьма немногочисленна и разноречива [3,4], а при длительностях нагружения порядка и менее  $10^{-7}$  s полностью отсутствует. Эти причины, с учетом широкого применения стекла К8 для изготовления оптических изделий, и определили выбор материала исследований.

Нагружение образцов производилось импульсами давления длительностью 80 ns, возбуждаемыми при воздействии импульсного лазерного излучения на тонкий слой алюминия, находящегося в контакте с образцом [5]. Для реализации плоского нагружения осуществлялись меры по равномерному распределению энергии по области облучения. Образцы

представляли собой цилиндры из оптического стекла К8 диаметром 24 mm и высотой 22 mm с полированными торцами; диаметр зоны нагружения равнялся 10 mm. Такое соотношение диаметров образца и области нагружения гарантировало задержку прихода волн разгрузки с боковых стенок цилиндра в зону разрушения на величину  $> 2 \cdot 10^{-6}$  s. Продольная скорость звука в стекле К8, измеренная в эксперименте, равнялась  $c_1 = 5890 \pm 30$  m/s.

Скорость свободной поверхности образцов измерялась лазерным дифференциальным интерферометром с фотоэлектрическим счетом полюс и стабилизированной рабочей точкой [5].

Одновременно с измерением скорости свободной поверхности для определения момента разрушения образцов регистрировалось излучение He-Ne-лазера, зеркально отраженное от плоскости, возникающей при отколе трещины. Луч лазера под углом  $\sim 45^\circ$  направлялся на свободную поверхность образца вблизи центра зоны нагружения. Отраженный от возникающей при отколе трещины свет через микрообъектив, сфокусированный на плоскость откола ( $\sim 0.2$  mm от поверхности), регистрировался фотоумножителем.

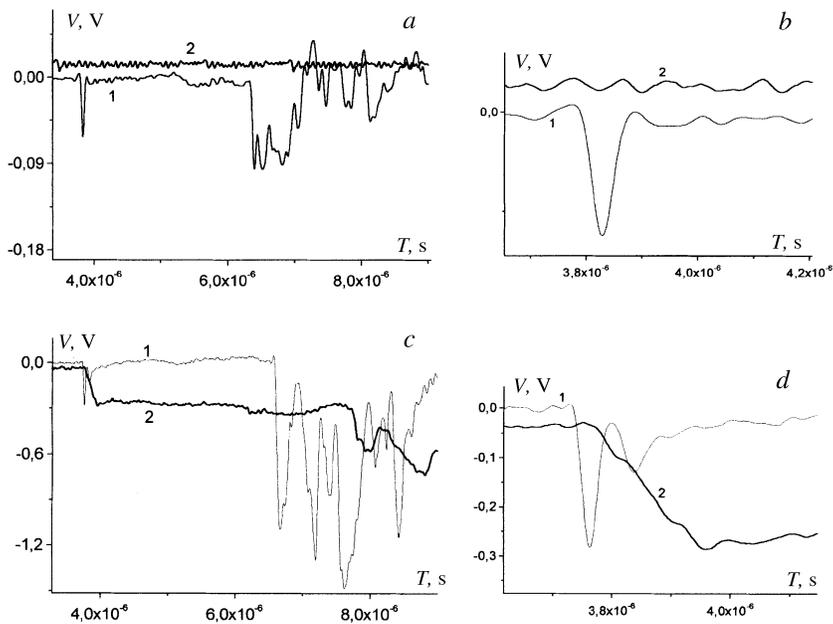
Электрические сигналы с фотоприемников подавались на осциллограф TDS-754C.C. Запуск осциллографа осуществлялся сигналом с фотодиода, на который отвечала часть импульса излучения мощного лазера. Временное разрешение измерений было не хуже 2 ns.

Электрические сигналы с фотоумножителей интерферометра (кривая 1) и контроля отраженного света (кривая 2) при ударах, не вызывающих разрушений, представлены на рис. 1, *a, b* (рис. 1, *b* — увеличенный фрагмент этих осциллограмм).

В этом случае сигнал с фотоумножителя контроля отраженного света (кривая 2) отсутствует. Скорость смещения свободной поверхности представляет одиночный импульс (кривая 1) с длительностью  $t_{sh} = 80$  ns, соответствующий выходу импульса сжатия на поверхность в момент времени  $t = 3.76 \mu\text{s}$ . Скорость свободной поверхности  $v = 18.2$  m/s и соответствует величине напряжения в волне сжатия 0.136 GPa.

На рис. 1, *c, d* представлены те же сигналы при величине нагружения, приводящей к разрушению вблизи свободной поверхности образца.

Скорость свободной поверхности (кривая 1) равна  $v = 58.6$  m/s и напряжение соответственно — 0.438 GPa. Наблюдается картина, характерная для откольного механизма разрушения. После импульса

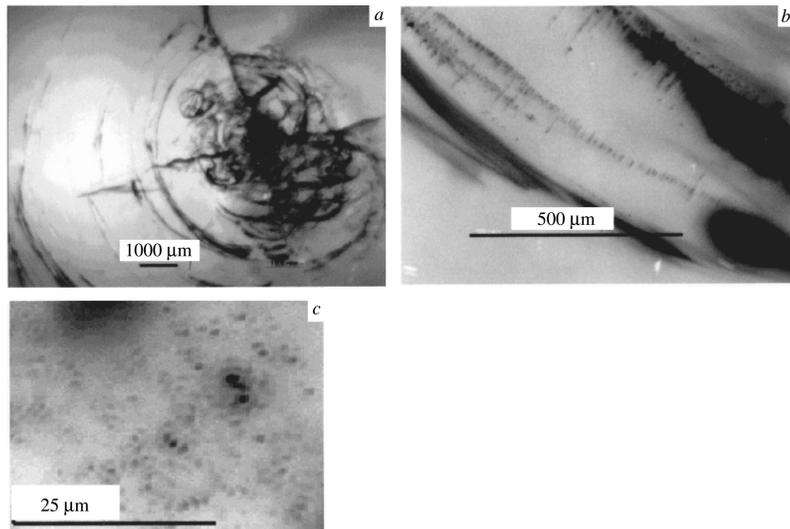


**Рис. 1.** Осциллограммы сигналов с фотоумножителей интерферометра (1) и контроля отраженного света (2): *a, b* — разрушение образца отсутствует; *c, d* — разрушение у свободной поверхности образца.

нагружения появляется откольный импульс, возникающий в результате отражения импульса растяжения от поверхности разрушения. Задержка его относительно импульса нагружения должна быть равна:  $t_s = 2h/c_1$ , где  $h$  — расстояние от свободной поверхности до плоскости откола.

На осциллограмме отраженного света (кривая 2) возникает сигнал, соответствующий образованию трещины. Задержка его относительно импульса нагружения в случае разрушения по откольному механизму должна равняться  $t_1 = h/c_1$ .

Вычисленные по экспериментальным значениям  $t_s = 65$  ns и  $t_1 = 31$  ns значения  $h_s = 0.191$  mm,  $h_1 = 0.186$  mm практически совпадают и подтверждаются фрактографическими исследованиями.



**Рис. 2.** Фрактограммы области разрушения: *a* — общий вид области разрушения; *b, c* — поверхность откольной трещины (0.19 mm от свободной поверхности).

Разрушение в последующие моменты времени развивается в откольном слое. Регистрируется развитие разрушения ( $t = 6.2 \mu s$  — кривая 2) и движение поверхности ( $t = 6.32 \mu s$  — кривая 1), обусловленное приходом волн разгрузки с боковой поверхности в зону откольного разрушения. Наиболее интенсивное образование новых поверхностей разрушения наблюдается при  $t = 7.72 \mu s$  (кривая 2), что соответствует времени прихода волн Рэлея с боковой поверхности в зону разрушения.

На рис. 2 представлен характерный вид разрушений вблизи свободной поверхности образцов. Общий вид картины разрушения (рис. 2, *a*) обусловлен возникновением откола с последующим разрушением откольного слоя и напоминает характерный вид разрушения, наблюдаемый при испытаниях на симметричный изгиб тонких пластин.

На рис. 2, *b* приведена фрактограмма поверхности откольной трещины, находящейся параллельно свободной поверхности на глубине

$\cong 0.19 \text{ mm}$  и представляющей собой гладкую поверхность с лучевой структурой на периферии. На гладкой поверхности трещины наблюдаются (рис. 2, *c*) дефекты в виде пор с размерами  $\leq 1 \text{ }\mu\text{m}$  и плотностью порядка  $8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ . Наиболее вероятно, что эти следы воздушных пузырьков, которые присутствуют в стекле.

Отметим отсутствие микротрещин в виде "розеток", наблюдаемых при многоочаговом механизме зарождения откола в органических стеклах и щелочно-галоидных кристаллах [5–7]. Этот факт свидетельствует либо об отсутствии накопления повреждаемости при динамическом разрушении таких хрупких материалов, либо о том, что пространственный масштаб микроповреждений меньше разрешения оптической микроскопии ( $\leq 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ).

Таким образом, результаты экспериментальных исследований убедительно показывают, что начало разрушения образцов стекла К8 при субмикросекундном нагружении происходит по откольному механизму при значениях напряжений  $0.45 \pm 0.03 \text{ GPa}$ .

Полученные результаты не позволили пока однозначно определить, как развивается процесс хрупкого разрушения при отколе в неорганических стеклах — как многостадийный процесс с накоплением повреждений или как катастрофическое событие. Также вызывает вопросы достаточно низкое значение откольной прочности, с одной стороны превышающее в 5 раз значение временной прочности ( $0.09 \text{ GPa}$ ) стекла К8 [2], с другой стороны — в 3 раза меньшее значения, полученного в [3], и на порядок — оценок, представленных в [4]. Этот факт не совсем согласуется с представлениями о характере динамической ветви в кинетической модели прочности.

Работа поддержана грантом РФФИ 98–01–00340.

## Список литературы

- [1] Пух В.П. Прочность и разрушение стекла. Л., 1973. С. 155.
- [2] Иванов А.В. Прочность оптических материалов. Л., 1989. С. 144.
- [3] Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсных нагрузках. Киев, 1991. С. 288.
- [4] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М., 1996. С. 407.

- [5] Судьенков Ю.В., Иванов Э.В. Прочность и разрушение материалов и конструкций. СПб: изд. С.-ПбГУ, 1999. В. 18. С. 220–227.
- [6] Златин Н.А., Пугачев Г.С., Белендир Э.Н. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 9. С. 1780–1784.
- [7] Блинов В.И., Геринг Г.И., Елисеев Н.А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 11. С. 2228–2231.