

О ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ СТЕКЛЯННЫХ СТЕРЖНЕЙ

*В. С. Кузьмин, В. С. Никифоровский**(Москва, Новосибирск)*

Многие литературные источники отмечают, что прочность твердых тел на растяжение при динамическом нагружении отличается от прочности в статических условиях. Например, в [1] для стекла встречаем соответственно значения 2,1 и 1,4 кбар (10^3 кг/см²), причем динамическое значение найдено в результате численной интерференции падающего измеренного и отраженного импульсов.

Различие в значениях предела можно объяснить по-разному, например так. Статическое нагружение характерно медленным по сравнению со скоростью распространения звуковых волн c_0 изменением напряженного состояния. В этом случае нагруженным оказывается весь стержень, и его прочность определяется прочностью наиболее слабого звена σ_0 . При динамическом воздействии следует рассматривать не весь образец, а только его часть, захваченную, например, фазой растяжения волны $\lambda = c_0 T$, где T — длительность фазы растяжения. Вполне естественно ожидать, что в этой части, перемещающейся по образцу, может не оказаться наислабейшего звена с прочностью σ_0 , но есть более прочное, «свое» наислабейшее для λ с характерным $\sigma_0^* \geq \sigma_0$ звено. С уменьшением λ (увеличение скорости нарастания) вероятность появления в λ звена с прочностью σ_0 уменьшается. Это может привести к возрастанию прочности.

Ранее рассматривалась зависимость предельных значений от условий нагружения (увеличение скорости нагружения, уменьшение времени воздействия, см., например, [2]); отмечены случаи разрушения материала не на участке нарастания, а при уменьшении активного растяжения [3], а также возможность разрушения материала не при первом, а при втором и т. д. отражении одного и того же импульса [4]. Однако при обсуждении этого вопроса следует иметь в виду следующие соображения.

1. Разрушение материала в «точке» и «образца» целиком — суть различные понятия [5, 6]. Первое отражает свойства материала, второе — свойства образца-конструкции, которые, естественно, могут меняться в зависимости от условий эксперимента. Поэтому, в частности, понятно, почему для разрушения «образца» иногда необходимо несколько отражений, тогда как в ряде точек материал может быть разрушенным уже в первой фазе растяжения и даже при сравнительно небольших величинах напряжений.

2. Весьма важно иметь точные данные о напряженно-деформированном состоянии среды в точке разрушения. Можно показать, что произвол в доопределении неполных экспериментальных данных (форма сигнала, амплитуда — характер затухания и т. п.) дает возможность при обработке одного и того же эксперимента рассчитать в несколько раз отличающиеся в зависимости от предположений величины предела прочности [7].

Определенные возможности в этом плане появляются в экспериментах на объектах из стекла, например на стержнях. В данной работе обсуждаются постановка и результаты такого эксперимента. Здесь фиксируется фотоупругая картина [8, 9], позволяющая судить о напряженном состоянии материала и одновременно с этим — момент разрушения [3].

Эксперименты выполнены на стеклянных стержнях диаметром $d = 4,4$ — $4,75$ мм, длиной $L = 500$ — 1400 мм. Скорость продольной волны,

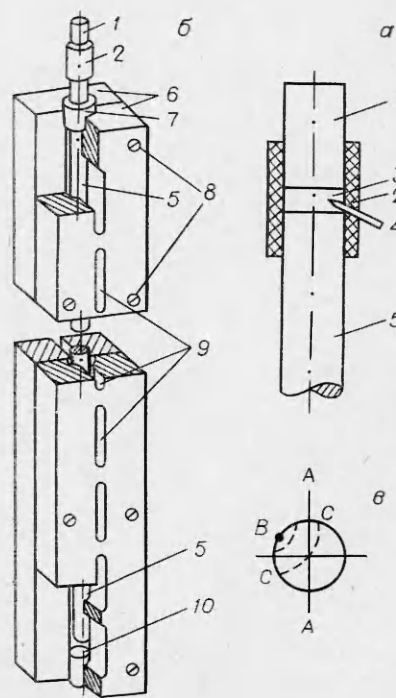
измеренная методом динамической фотоупругости в режиме фоторегистратора [9], равна $c_0 = 5,16 \cdot 10^3$ м/с. Плотность стекла $\rho = 2,2$ г/см³. Оптическая постоянная по напряжению $\sigma_0^{1,0} = 310$ МПа (кг/см²) определена на свободно подвешенном цилиндрическом стержне ($d = 4,8$ мм, $L = 300$ мм) на расстоянии $l = 250$ мм от нагруженного импульсной нагрузкой конца. При этом производилась одновременная регистрация кинограммы интерференционных полос $m(t)$ и продольных смещений $u(t)$ с 15-кратным увеличением в режиме фоторегистратора по методике [3]. Использовалась поляризационно-оптическая установка на основе камеры СФР-1 [9, 10]. Во всех экспериментах, включая тарировочные, при съемке использовался свет с длиной волны $\lambda_1 = 644$ нм.

Импульсная нагрузка осуществлялась взрывом торцевых зарядов ВВ (азид свинца) весом 5—10 мг. Зарядное устройство (фиг. 1, а) состоит из уплотнительного стального цилиндрика 1 и ограничительной полихлорвиниловой трубки 2. Иницирование заряда 3 производилось с помощью иглы-электрода 4. Изменение положения иглы и величины заряда позволяет варьировать форму и величину воздействия.

Для предотвращения разлета разрушенных частиц стеклянный стержень 5 помещен в специально разработанный разъемный пенал 6 (фиг. 1, б). Стержень свободно висит в пенале, поддерживаемый только резиновой втулкой 7. Пенал скреплен соединительными винтами 8. Для регистрации фотоупругой картины оставлены смотровые окна 9. Зазор между свободным торцом стержня и резиновым ограничителем 10 равен 1 мм. Предложенная конструкция пенала позволяет сохранять взаимное положение разрушенных частей стержня. После эксперимента пенал необходимо положить на заднюю стенку, снять переднюю и провести анализ и измерение осколков разрушения.

На фиг. 1, в показано также сечение стеклянного стержня, где линия А — А — плоскость наблюдения, В — возможная начальная точка разрушения, С — С — одно из положений фронта разрушения.

По описанной методике проведено 82 эксперимента, в данной работе обсуждаются результаты, полученные в 7 из них. Условия проведения и геометрические характеристики представлены в табл. 1, где в первой графе дана нумерация экспериментов в порядке обсуждения, в скобках — в порядке проведения; далее показаны вес заряда, длина и диаметр стержня, положение точки (метки) кинорегистрации (в миллиметрах) от нагруженного торца, а также отмечены положение ((в миллиметрах) от свободного торца — арабские цифры) и характер (римские цифры в скобках) разрушения. Римские цифры обозначают: I — интенсивное разрушение, II — зона мелких трещин, не нарушающих целостности стержня, III — ветвление трещин из одной точки, расположенной примерно посередине соответствующей зоны разрушения, IV — одна трещина поперек стержня,



Фиг. 1

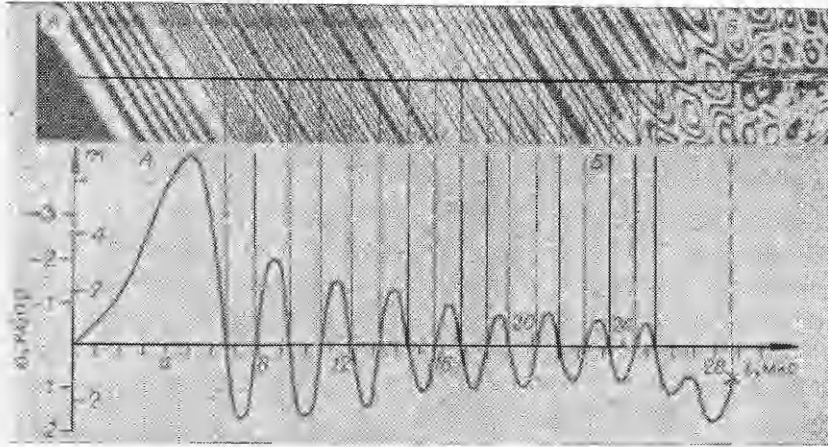
Таблица 1

Номер опыта	Вес заряда, мг	Длина стержня, мм	Расстояние метки от нагруженного конца стержня, мм	Диаметр стержня, мм	Расстояние от свободного торца (мм) и характер зон разрушения
1(8)	5	500	490	4,5	2—5(II), 5(IV), 5—8(II), 28—33(III), 109(IV), 120—124(V), 314(IV)
2(14)	10	500	490	4,5	0—10(I), 12(IV), 33—36(III), 82—86(V), 106(IV), 179—182(III), 204—209(V), 269, 313(IV), 341(VI), 383—388(IV), 429—435, 440—445, 452—463, 463—470(III), 473—485(V)
3(17)	10	783	700	4,75	0—15(I), 41—48(III), 72—74, 90—95, 155—159, 335, 372(IV), 374—378, 425, 429—440, 696—700(V), 710(VI), 724—728, 745—750(V), 759—774(VII).
4(19)	10	1080	1000	4,5	0—20(I), 20—29, 35—44, 65—72(III)
5(24)	10	1386	1250	4,6	0—18(I), 18—24(III), 54(IV), 60(III), 63, 67, 101, 106, 112, 136, 161, 209, 226, 238, 258, 302(IV), 306(III), 342, 390, 407, 436, 453, 462, 496(IV), 526(V), 594—597(I), 637—639, 647(III), 712—715(I), 758, 794, 910, 935, 957(IV), 966—974(I), 996(III)
6(25)	10	1350	—	4,65	0—18(I), 18, 20(IV), 22—30(III), 32, 64, 73, 106, 233(IV), 268—273(III), 298(IV), 312, 342(III), 391, 432, 442, 446(IV), 523—525(III), 560, 614, 620, 622(IV), 692—698(III), 791(IV)
7(27)	10	1245	1000	4,6	0—15(I), 15—21(III), 60, 147, 148, 154, 254, 305(IV), 371—377(III), 409, 422, 531(IV), 540(III), 590(IV), 634(VI), 640, 681, 687, 704, 706, 723(IV), 768—772(III), 910, 912(IV)

чаще всего такие трещины называют отколом, V — одиночная наклонная трещина, VI — трещины, расположенные крест-накрест, VII — зона продольных трещин.

На фиг. 2 (m — номера полос) показана кинограмма процесса нагружения и ее расшифровка в точке разрушения в момент, отмеченный крестиком на эюре. Можно увидеть фронт волны нагрузки ($A - A$) с последующими перемежающимися фазами растяжения и сжатия, фронт отраженной от свободного торца стержня волны ($B - B$), в глубине которой возникает серия трещин; наличие серии свидетельствует о возможном ветвлении. Эюра показывает, что процесс нагружения близок к одномерному, хотя и не является таковым. Соотношение длительности основной фазы сжатия к времени пробега волны поперек стержня ($\sim 0,9$ мкс) находится в пределах 5—7. Показателем неоднородности является также сложный характер эюры нагружения (многократная смена фаз растяжения-сжатия, сравнительно большие амплитуды этих фаз). В результате такой неоднородности появляется возможность разрушить стержень еще при прохождении падающего импульса (в его фазах растяжения) и имеет место чрезвычайно богатый набор разнообразных по характеру картин разрушения (см. табл. 1).

Эюры напряжений, представленные на фиг. 3, весьма характерны в этом смысле. Если в эксперименте 19 фаз растяжения в падающей волне оказалось недостаточно для разрушения и оно произошло за фронтом отраженной от свободного торца волны (фиг. 2), то в экспериментах 17,

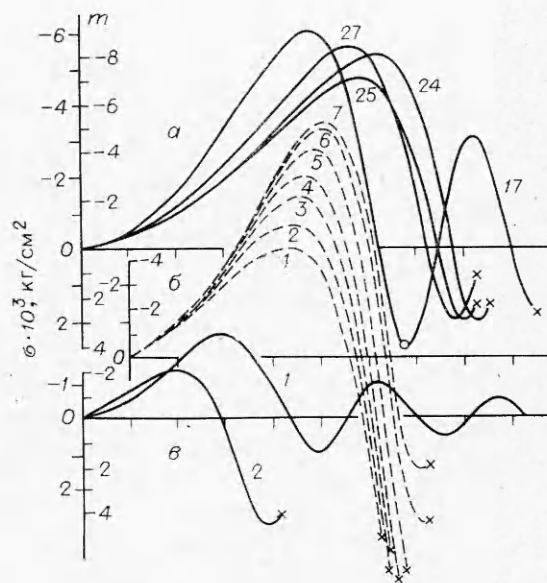


Ф и г. 2

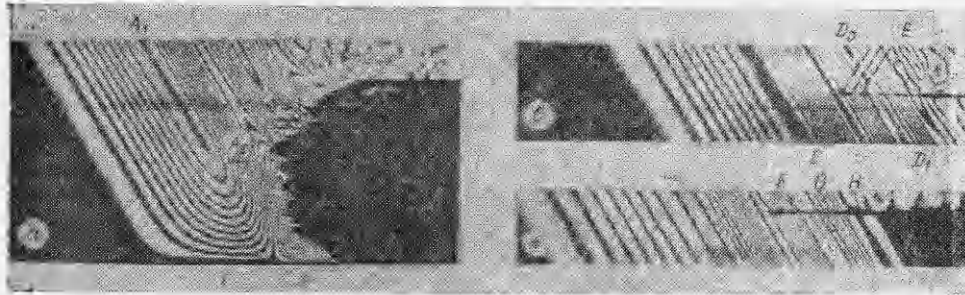
24, 25, 27 (фиг. 3, а) разрушение, момент наступления которого отмечен на эпюрах крестиками, могло произойти в фазах растяжения падающей волны. На эпюре эксперимента 17 точкой на первой фазе растяжения отмечено начало разрушения, еще не попавшее в область видимости, крестиком на второй фазе отмечен момент появления трещины в области видимости.

Штриховыми линиями (фиг. 3, б) показаны эпюры в семи соседних точках в эксперименте 14, расположенных соответственно на расстоянии от свободного торца стержня: линия 1 — 3,4 мм; 2 — 4,7 мм; 3 — 6,0 мм; 4 — 6,4 мм; 5 — 7,9 мм; 6 — 9,7 мм; 7 — 11,9 мм. Во всех этих точках в указанные крестиками моменты времени происходит разрушение. Этот эксперимент в отличие от предыдущих близок к традиционному откольному. Показанный на фиг. 3, в случай (эксперимент 8) больше всего похож на традиционный откольный эксперимент. Здесь линией 1 дана эпюра в падающей волне, линия 2 соответствует изменению продольного напряжения в точке разрушения (крестик — момент разрушения) на расстоянии 3,7 мм от свободного торца.

Фиг. 4 демонстрирует ряд интересных элементов кинограмм рассмотренных здесь экспериментов. На фиг. 4, а показано множественное разрушение в эксперименте 14. Видна фаза сжатия I с гребнем максимальных значений $A_1 - A_1$; разрушение начинается в фазе



Ф и г. 3



Ф и г. 4

растяжения II и имеет вид обширной черной области — непрерывная зона дробления. Эта зона начинается с ряда единичных трещин («язычки» на левой стороне черной области), все семь трещин возникли независимо друг от друга в близкие моменты времени. На кинограмме эксперимента 17 (фиг. 4, б) видимая трещина возникла в момент D_1 . Однако возмущение падающего импульса волной $E - E$ показывает, что в исследуемом сечении (плоскость трещины и ее продолжение, показанное штриховой линией до пересечения с волной возмущения $E - E$) начальное разрушение уже есть в момент D_0 . Разрушение в этом случае произошло в момент D_0 в точке B (фиг. 1, в), расположенной не в плоскости наблюдения $A - A$. Этот момент удалось восстановить по волне возмущения $E - E$, порожденной развивающимся разрушением. В момент D_1 фронт разрушения $C - C$ (трещина) пересекает луч наблюдения и становится видимым. На фиг. 3, а на соответствующей эюре эти особенности нашли следующее отражение: точка — начало разрушения, звездочка — видимая трещина. В эксперименте 27 (фиг. 4, в) наблюдается сначала малое раскрытие трещины в момент F , затем ее последующее сужение в фазе очередного сжатия в моменты G и, наконец, ее новое раскрытие в момент H и дальнейшее развитие. Все это показывает, что начало разрушения — зародышевый дефект в точке B (см. фиг. 1, в) оказался вблизи плоскости наблюдения $A - A$.

По данным фиг. 3 и аналогичным им обычно определяют прочностные свойства материала. Такая подборка значений для критического напряжения σ_0 представлена в табл. 2, где цифры в скобках показывают максимальное напряжение растяжения, которое материал выдержал в исследуемой точке без разрушения.

Интересно отметить два факта: отсутствие единого значения, которое можно было бы принять (по этим данным) в качестве предела прочности на растяжение в динамическом режиме; на многих кривых момент разрушения отмечается на участке спада активного растяжения, причем «критическая» величина иногда в несколько раз меньше максимального растяжения.

Т а б л и ц а 2

Номер эксперимента	8							14							17	19	24	25	27
	2,6 (2,95)	4,9	5,85	5,2	6,1	5,85	4,5	2,95 (3,05)	1,65 (2,65)	0,65 (2,3)	1,5 (2,0)	1,5 (2,0)	0,65 (2,0)						
кбар	2,6 (2,95)	4,9	5,85	5,2	6,1	5,85	4,5	2,95 (3,05)	1,65 (2,65)	0,65 (2,3)	1,5 (2,0)	1,5 (2,0)	0,65 (2,0)						

Это можно объяснить по-разному. И в первую очередь следует заметить, что полученные данные требуют некоторой корректировки: а) поправка на неоднородность дает небольшое снижение амплитуд, хотя вряд ли уменьшит разброс; б) более существенное улучшение в этом смысле можно скорее всего ожидать при уточнении момента разрушения. Место начала разрушения может быть расположено на произвольном расстоянии от луча наблюдения $A - A$ (фиг. 1, в); это расстояние находится в пределах $l_1 = 0 - 0,5 d$. Если принять за скорость распространения трещины ее максимально возможную $c_{тр} = 0,38 c_0$ [11], то появляется достаточно широкая возможность уточнения момента разрушения $\Delta t \approx 0 - 1,2$ мкс.

Возвращаясь к представленным выше экспериментам, видим, что в эксперименте 17 можно достаточно точно оценить место и момент разрушения (точка на фиг. 3, а — момент времени D_0 на фиг. 4, б); в эксперименте 25 место разрушения весьма близко к линии наблюдения. Это дает цифры для предела прочности порядка $\sigma_0 = 2,0 - 2,6$ кбар, близкие к указанным в [1]. Тем не менее следует отметить, что стекло выдерживает достаточно большие напряжения растяжения (до 6 кбар) не только внутри среды, но и на границах (по направлению луча) и, следовательно, мы имеем дело с материалом, прочность которого является произвольной, определяется дефектами, расположенными на поверхности (в одном из 82 экспериментов имел место случай разрушения от внутреннего дефекта). Для точного определения прочностных характеристик материала необходимо иметь еще более точные сведения о напряженном состоянии в точке разрушения.

Поступила 27 III 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение. — В кн.: Разрушение. Т. 1. М., Мир, 1973.
2. Клещевников О. А., Софронов В. И. и др. Экспериментальная проверка критериев разрушения в опытах с медными образцами. — ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 8.
3. Кузьмин В. С. Об исследовании процессов разрушения на моделях из оптически чувствительных полимеров. — Сб. трудов Московского инженерно-строительного института, 1972, № 103.
4. Attewell P. V. Dynamics fracturing of rocks. — Colliery Engineering, 1963, vol. 40, N 376.
5. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск, Наука, 1979.
6. Тарасов Б. А. О временной зависимости прочности оргстекла при ударной нагрузке. — Проблемы прочности, 1972, № 12.
7. Никифоровский В. С., Тетенев Е. В., Фрейшист Н. А. О тыльном разрушении пластин. — ФГВ, 1979, № 6.
8. Фрохт М. М. Фотоупругость. Т. 2. М.—Л., ГИТТЛ, 1950.
9. Метод фотоупругости. Т. 2. Под общей ред. Н. А. Стрельчука, Г. Л. Хесина. М., Стройиздат, 1975.
10. Хесин Г. Л., Костин И. Х., Шиякин В. Н. Оптико-механические характеристики оптически чувствительных материалов при импульсном нагружении. — В кн.: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. М., Наука, 1965.
11. Шардин Х. Исследование скорости разрушения. — В кн.: Атомный механизм разрушения. М., Metallurgizdat, 1963.