

05

## Кинетика внедрения кумулятивной струи в стекло

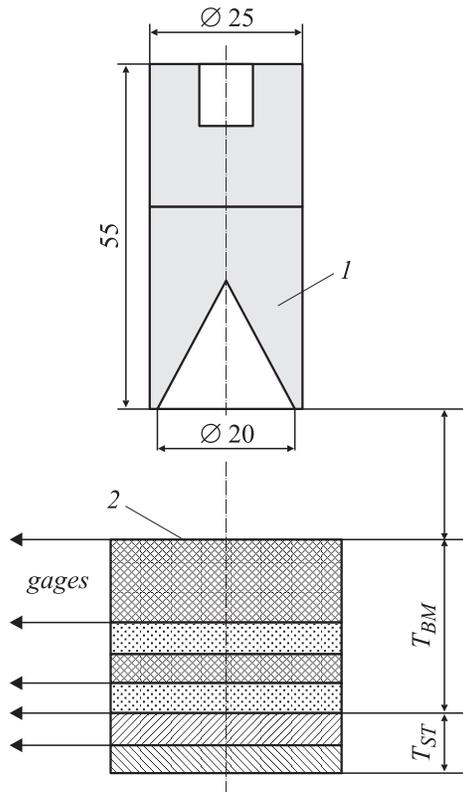
© Б.В. Румянцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: brum@mail.ioffe.ru*Поступило в Редакцию 23 апреля 2008 г.*

На основе анализа экспериментальных результатов по внедрению кумулятивной струи (КС) в стекло обосновывается предположение о нарушении непрерывного гидродинамического внедрения. Проникание КС в стекло носит скачкообразный характер и состоит из гидродинамического участка внедрения, схлопывания каверны и вторичного внедрения на схлопнувшемся материале. При непрерывном поступлении КС процесс повторяется по глубине внедрения. Необходимым условием вторичного внедрения является высокая прочность стекла и высокая скорость разрушения, обеспечивающая откол и схлопывание стенок каверны. Скачкообразное проникание снимается с приходом волны разгрузки в зону первичного внедрения.

PACS: 47.85.Dh, 62.50.-p, 81.05.Je, 81.05.Kf, 83.50.-v.

Еще в 50-х г. XX в., в частности в работах ФТИ РАН [1], была обнаружена повышенная способность хрупких материалов: стекла, керамик, горных пород — к поглощению кумулятивной струи (КС). Впоследствии это явление было использовано для защиты от высокоскоростного удара. К середине 80-х гг. сформировалось убеждение, что внедрение в керамики стекла осложняется радиальным воздействием каверны на КС [2,3], проявляющимся в значительном замедлении внедрения [4], вплоть до временной приостановки [5], в снижении глубины пробития



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — кумулятивный заряд; 2 — пластины стекла и стали толщиной  $T_{BM}$  и  $T_{ST}$ .

по сравнению с металлами. Однако количественный учет влияния радиального воздействия отсутствует.

В работе исследовалась кинетика проникания КС в стекло с целью описания ее в рамках гидродинамической теории кумуляции.

На рис. 1 приведена схема эксперимента. Кумулятивный заряд из взрывчатого вещества массой 40 г, с кумулятивной воронкой из меди толщиной 0.8 мм с полным углом при вершине  $60^\circ$  и диаметром в основании 20 мм располагался на расстоянии 60 мм от

преграды из пластин  $80 \times 80 \times 10$  mm известково-натриевого стекла плотностью  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Между пластинами находились контактные датчики, отмечающие время прихода КС на данную глубину внедрения. Для фиксирования конечной глубины пробития пластины стекла размещались на пластичном материале. Обычно это были стальные пластины. При детонации заряда формировалась медная струя с градиентом скоростей от 6.5 до 1.5 km/s, которая внедрялась в преграду из стекла.

Особенности проникания выявились сопоставлением экспериментальных данных с расчетной траекторией внедрения в осевом гидродинамическом приближении (ГД-приближение). Движение струи в преграде моделировалось течением маловязких, несжимаемых сред с учетом прочностных свойств [6]. Пробитие преграды находилось численным интегрированием уравнения внедрения (1) совместно с модифицированным уравнением Бернулли (2)

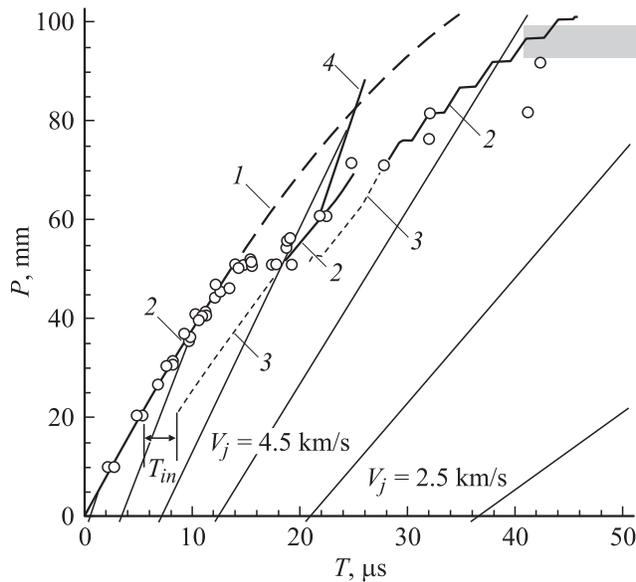
$$dP = dLU/(V_j - U), \quad (1)$$

$$R_t + \rho_t U^2/2 = Y_j + \rho_j (V_j - U)^2/2. \quad (2)$$

Здесь  $dL$  — длина элемента КС, обеспечивающая прирост глубины внедрения  $dP$ ;  $V_j$ ,  $U$  — скорости подлета и внедрения элемента струи;  $\rho_j$ ,  $Y_j$  и  $\rho_t$ ,  $R_t$  — плотность и динамическое сопротивление материалов струи и преграды соответственно. Значения  $\rho_j$ ,  $Y_j$  для медной струи принимались  $8900 \text{ kg/m}^3$  и  $0.23 \text{ GPa}$ . Прочностное сопротивление для стекла  $R_t = 5 \text{ GPa}$  находилось из описания экспериментальных результатов на гидродинамическом участке внедрения.

Формирование КС в результате детонации кумулятивного заряда, растяжение и разрыв струи рассчитывались по методике, приведенной в [6]. В итоге, расчет позволял проследить историю формирования, полет каждого элемента КС и его вклад в увеличение каверны в преграде.

На рис. 2 приведены экспериментальные результаты по времени внедрения КС в стекло и расчетная кривая внедрения  $l$  в осевом ГД-приближении. Видно, что экспериментальные времена, начиная с некоторого момента, отклоняются от ГД-приближения в сторону больших времен внедрения. Формально это отражало бы увеличение сопротивления проникновению, как отмечалось в [4]. С другой стороны,



**Рис. 2.** Экспериментальные времена (о) и расчетные траектории внедрения КС в стекло: 1 — гидродинамическое приближение, 2, 3 — первичное и вторичное внедрение соответственно, 4 — траектория движения боковой волны разгрузки по оси внедрения. Тонкие прямые — сетка траекторий полета элементов КС с обозначенными скоростями  $V_j$ . Серая область — конечная глубина пробития.

согласно [7], для этой области внедрения должно проявляться ослабление сопротивления внедрению вследствие возможного разрушения стекла перед областью внедрения. Более того, на уровне  $\sim 50$  mm наблюдается временная „остановка“ внедрения и дальнейшее его возобновление. Общая глубина внедрения, определенная по экстраполяции конечных глубин пробития в стальных пластинах на ноль, составляет 96 mm (серая область на рис. 2) и меньше глубины проникания в сталь (104 mm), что подтверждает эффективность стекла при поглощении КС.

Указанные особенности могут быть объяснены с позиций радиального воздействия каверны в хрупком материале на КС, когда внедрение сопровождается схлопыванием каверны на КС [2–5]. Возможность радиального взаимодействия обусловлена относительно малым соот-

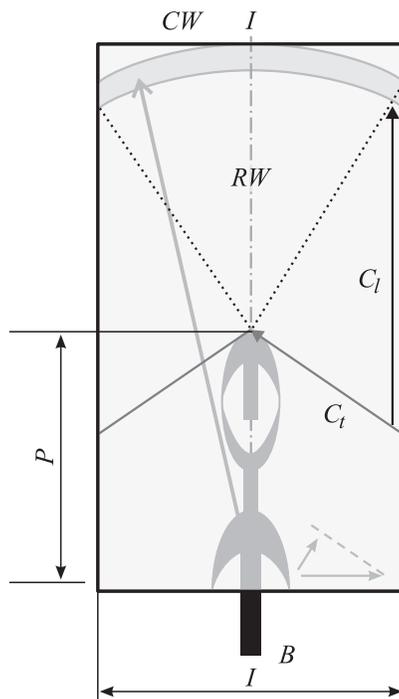
ношением радиусов каверны и струи для хрупких материалов (ХМ), сочетающих малую плотность с высокой прочностью. При разгрузке ХМ из зоны внедрения вследствие высоких скоростей разрушения быстро формируется откольный слой,двигающийся к оси. Схлопывание каверны происходит за время  $T_{in}$  (рис. 2) и отсекает головную часть струи, которая обеспечивает первичное внедрение (сплошная кривая 2 на рис. 2). Момент излома траектории свидетельствует об окончании внедрения головной части КС. При непрерывном потоке элементов КС появляется возможность вторичного внедрения на схлопнувшемся материале каверны. Вторичное проникание начинается на глубине опережения разрушения от свободной лицевой поверхности и продолжается по всей глубине, на которой было инициировано схлопывание при первичном внедрении головной части КС, т.е. до временной „остановки“ внедрения. Расчет вторичного внедрения в ГД-приближении по схлопнувшемуся материалу при условии отсутствия прочности показан пунктирной кривой 3 на рис. 2. При выходе вторичного проникновения в непробитый материал восстанавливается первичное внедрение и процесс может повторяться до окончания поступления элементов КС.

Это идеальная схема. В действительности при ограниченных размерах пластин стекла проявляется влияние боковых волн разгрузки в соответствии с предпосылками [8]:

При внедрении в дозвуковом режиме за волной сжатия  $CW$  на рис. 3 могут образовываться центры разрушения (межзеренные границы, дефекты структуры ХМ). Но развития трещин с образованием свободных поверхностей, микропор, которые отвечают за прочность неомогенного ХМ, не происходит. Рост трещин возможен только с приходом волны разгрузки.

Фронт инициирования развития трещин распространяется со скоростью сдвиговых возмущений (поперечная скорость звука), скорость роста трещин переменна и не превышает скорости фронта.

На рис. 3 приведено схематическое изображение конуса боковой волны разгрузки  $RW$  в столбе ХМ шириной  $B$  на момент начала опережения зоны внедрения. Волна сжатия  $CW$  с момента начала внедрения убегает вперед с продольной скоростью звука  $C_l$ . В связи с быстрым падением параметров в ней  $CW$  можно считать упругой волной. В то же время в зоне, непосредственно примыкающей к зоне внедрения, давления от внедряющейся КС настолько велики, что ХМ находится в пластическом, в основном упругопластическом, состоянии.



**Рис. 3.** Волновая картина в преграде на момент опережения внедрения КС боковой волной разгрузки:  $CW$  — волна сжатия от момента начала внедрения;  $RW$  — сходящаяся к оси боковая волна разгрузки;  $C_l$ ,  $C_t$  — продольная и поперечная скорости звука;  $B$  — поперечный размер преграды из ХМ;  $P$  — глубина внедрения на момент выхода конической боковой волны разгрузки  $RW$  на ось внедрения.

Это определяет последующий процесс разгрузки ХМ в свободный объем образовавшейся зоны внедрения. После волнообмена со свободной боковой поверхностью  $RW$  последовательно подходит к каверне, зоне внедрения, и выходит на ось внедрения и далее уходит вслед за волной сжатия. При опережении внедрения волной разгрузки происходит раскрытие трещин и пор за фронтом  $RW$  [8], если в волне сжатия был преодолен порог напряжений по разрушению материала. При этом ХМ

теряет прочность и при последующем внедрении образование каверны соответствует материалу без прочности и откол стенок каверны отсутствует. Траектория движения  $RW$  по оси столба ХМ, совпадающего с осью внедрения, определяется уравнением (3):

$$P = h - B/2 \operatorname{tg}(C_1^2 t / C_t / h) \dots \dots h = ((C_1^2 t)^2 - (B/2)^2)^{0.5}, \quad (3)$$

где  $t$  — время от начала внедрения до прихода  $RW$  на глубину  $P$  в ХМ;  $B$  — ширина или диаметр столба ХМ;  $C_1$ ,  $C_t$  — продольная и поперечная скорости звука ХМ.

Траектория движения конической волны разгрузки впереди внедрения отображена в виде размытой линии 4 на рис. 2. С момента опережения  $RW$  первичного внедрения дальнейшее проникание идет в среду без прочности, схлопывания каверны не происходит и вторичное внедрение прекращается. При поперечных размерах пластин 80 мм проявляется до двух периодов скачкообразного внедрения.

Из сопоставления с экспериментом видно, что ГД-приближение с учетом вторичного внедрения на схлопнувшемся материале каверны позволяет описать минимальные времена внедрения в стекло вплоть до конечной глубины проникания. Более поздние времена внедрения после первого периода скачкообразного внедрения отражают проникание струи по остаткам отработанных элементов и ранее срабатывание частей КС на боковых стенках каверны. По излому траектории внедрения можно определить скорость схлопывания откольного материала стенок каверны по уравнению (4):

$$V_{SP} = r_j \left( V_j \sqrt{\frac{\sqrt{(\rho_j \rho_t)}}{4R_t}} - 1 \right) / T_{in}, \quad (4)$$

где  $V_{SP}$  — скорость схлопывания материала стенок каверны;  $r_j$  — радиус струи.

Полученное значение скорости схлопывания откольного материала 0.22 km/s соотносится с откольной прочностью стекла на уровне 1.5 GPa. Данная оценка является качественной и отражает механизм проявления прочности хрупких сред при внедрении КС через вторичные реакции материала.

Таким образом, с позиций радиального взаимодействия КС и каверны рассмотрена кинетика внедрения КС в хрупкий материал.

Предложена модель скачкообразного проникновения с периодическим повторением первичного и вторичного внедрения на схлопнувшемся материале стенок каверны. Особенности траектории проникновения кумулятивной струи в хрупкий материал описываются периодическим внедрением до глубины влияния боковой волны разгрузки.

## Список литературы

- [1] *Витман Ф.Ф., Златин Н.А., Петуховский В.И., Пугачев Г.С.* Поведение материалов при артиллерийских и сверхартиллерийских скоростях удара. Сб. трудов ФТИ РАН II. Ч. 2. Киев: Изд-во АН УССР, 1958. С. 30.
- [2] *Held M.* // *Armour*. 14<sup>th</sup> Intern. Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993. P. 45.
- [3] *Moran B., Glenn L.A.* et al. // *J. de Physique Colloq*. C 3. 1991. Suppl. III. V. 1. P. 147–154.
- [4] *Hauver G.E., Netherwood P.H., Bensk R.F., Melani A.* Penetration of shaped-charge jets into glass and crystalline quartz. Technical report BRL-TR-3273. U.S. Army Ballistic Research Laboratory. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1991. P. 56.
- [5] *Kozhushko A.A., Kozachuk A.L., Rummyantsev B.V., Sinani A.B., Vlasov A.S., Zilberbrand E.L.* // *Intern. J. Impact Engng*. 2003. V. 29. P. 385–390.
- [6] *Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А.* и др. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Изд. 3-е. Т. 2. Гл. 17. С. 238.
- [7] *Satapathy S., Bless S.J.* // *J. Mech. Materials*. 1996. V. 23. P. 323–330.
- [8] *Strassburger E., Senf H.* // *Experimental Investigations of Wave and Fracture Phenomena in Impacted Ceramics*. Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, Institutsteil Well am Rhein. Munchen, Germany, 1994. P. 115.