

03;05;12

Кинетика внедрения кумулятивной струи в хрупкие материалы

© Б.В. Румянцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: brum@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 18 июня 2008 г.)

На основе анализа экспериментальных результатов по проникновению кумулятивных струй (КС) в хрупкие материалы обосновывается предположение о нарушении непрерывного гидродинамического внедрения. Проникновение кумулятивной струи в хрупкий материал имеет 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. Необходимыми условиями вторичного внедрения являются высокая прочность хрупких материалов, а также высокая скорость разрушения, обеспечивающая откол и схлопывание стенок каверны. Скачкообразное проникновение прекращается с приходом волны разгрузки в зону первичного внедрения.

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

Введение

Повышенная способность хрупких материалов (ХМ) — стекло, керамика и горных пород — к поглощению кумулятивной струи была обнаружена в 1950-х гг., в частности, в работах ФТИ РАН [1]. Впоследствии это явление было использовано для защиты от высокоскоростного удара. Однако обнаруженную в экспериментах повышенную способность керамики и стекла к поглощению КС не удалось объяснить только высоким прочностным сопротивлением ХМ [2]. К середине 1980 гг. сформировалось мнение, что внедрение КС в керамику и стекла осложняется радиальным воздействием каверны на кумулятивную струю [3–7], которое проявляется в значительном замедлении внедрения [5] вплоть до его временной приостановки [6,7] и в снижении глубины пробития по сравнению с пробитием металлов. Но количественные оценки влияния радиального воздействия не проводились.

В настоящей работе исследуется кинетика проникания КС и ХМ с целью описания ее в рамках гидродинамической теории кумуляции.

Экспериментальная часть

На рис. 1 приведена схема эксперимента. Кумулятивный заряд I из взрывчатого вещества массой 40 г с кумулятивной воронкой из меди толщиной 0,8 мм с полным углом при вершине 60° и диаметром в основании 20 мм располагался на расстоянии 60 мм от преграды 2. При детонации заряда формировалась медная струя с градиентом скорости от 6,5 до 1,5 км/с.

Преграда выполнялась из пластин хрупкого материала суммарной толщиной T_{BM} . Параметры исследованных ХМ приведены в таблице. Между пластинами помещались контактные датчики, отмечавшие время внедрения

КС на заданную глубину. Для фиксирования конечной глубины пробития пластины ХМ размещались на

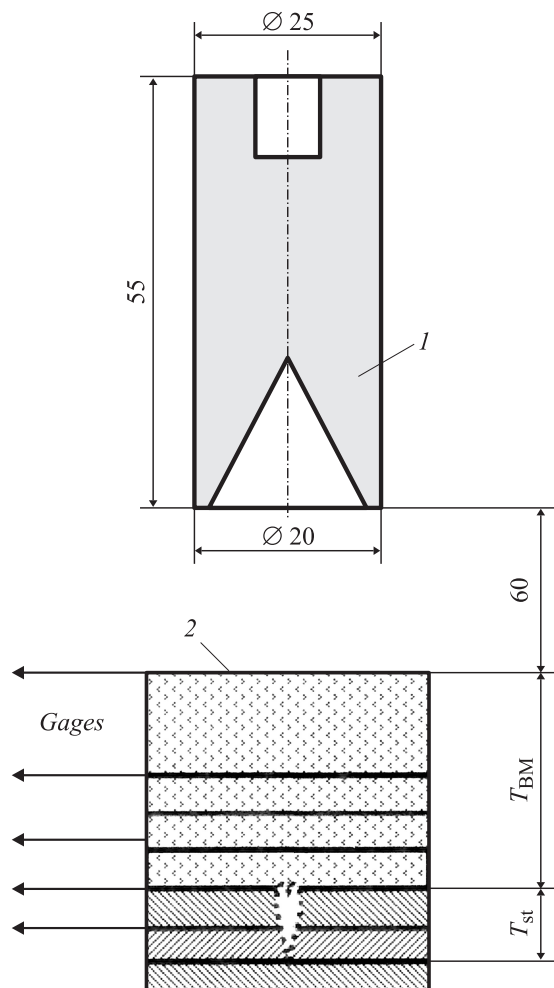


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — кумулятивный заряд; 2 — преграда из пластин хрупкого материала из стали толщиной T_{BM} и T_{st} .

Параметры хрупких материалов

Наименование, размер пластин материала, mm	Плотность, ρ_t , kg/m ³	Скорость упругих волн, km/s		Твердость (алмазная пирамида), GPa	Динамическое сопротивление, R_t , GPa
		C_l	C_t		
Карбид кремния 80 × 80 × 20	3000	11.1	6.8	17	6
Силикатное стекло 80 × 80 × 10	2500	5.86	3.57	5.5	5
Ситалл 80 × 80 × (10–34)	2400	6.38	3.73	8.4	4

пластинах из стали Ст-40 с твердостью HB = 1.9 GPa. Элементы КС, не израсходованные при внедрении в слой ХМ толщиной T_{BM} , пробивали сталь на глубину T_{st} (остаточная глубина пробития). При полном раходе КС в избыточном слое ХМ конечная глубина внедрения определялась приблизительно по пробитию контактных датчиков, расположенных в ХМ.

Методика

Особенности внедрения КС выявлялись путем сопоставления экспериментальных данных с расчетной траекторией проникновения в осевом гидродинамическом приближении (ГД-приближение). Движение струи в преграде моделировалось течением маловязких, несжимаемых сред с учетом прочностных свойств [8]. Глубина пробития преграды находилась численным интегрированием уравнений внедрения:

$$dP = dL/(V_j/U - 1),$$

$$dt = dP/U,$$

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

где dP — прирост глубины внедрения; dL — длина элемента кумулятивной струи; V_j, U — скорость подлета и внедрения элемента струи; t — время внедрения; ρ_j, Y_j и ρ_t, R_t — плотность и динамическое сопротивление материалов струи (индекс j) и преграды (индекс t) соответственно. Значения ρ_j, Y_j для медной струи принимались равными 8900 kg/m³ и 0.23 GPa. Прочностное сопротивление для ХМ находилось из описания экспериментальных результатов на начальном участке внедрения.

Формирование КС в результате детонации кумулятивного заряда, растяжение и разрыв струи рассчитывались по методике, приведенной в [8]. Расчет позволял проследить историю формирования, полет каждого элемента кумулятивной струи и его вклад в увеличение каверны в преграде.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2–4 приведены экспериментальные результаты определения времени внедрения кумулятивной струи в стекло, ситалл и карбид кремния на заданную глубину. Там же приведены результаты расчета параметров внедрения в осевом ГД-приближении (штриховая кривая 1). Видно, что экспериментальные значения времени начиная с некоторого момента отклоняются от ГД-приближения в сторону больших времен внедрения. Формально это отражало бы увеличение сопротивления прониканию, как отмечалось в [9]. С другой стороны, согласно [10], для этой области внедрения должно проявляться уменьшение сопротивления внедрению вследствие возможного разрушения ХМ перед областью внедрения. Более того, на уровне ~ 40–60 mm наблюдается временное прекращение внедрения и дальнейшее его возобнов-

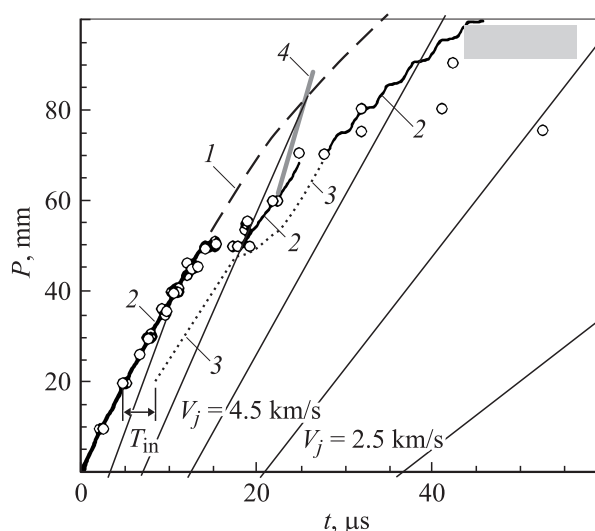


Рис. 2. Экспериментальные значения времени внедрения кумулятивной струи в стекло (○) и расчетные траектории внедрения: 1 — гидродинамическое приближение, 2, 3 — первичное и вторичное внедрение соответственно, 4 — траектория движения боковой волны разгрузки по оси внедрения. Тонкие прямые — сетка траекторий полета элементов КС с обозначенными значениями скоростей. Серая область — конечная глубина пробития (экстраполяция).

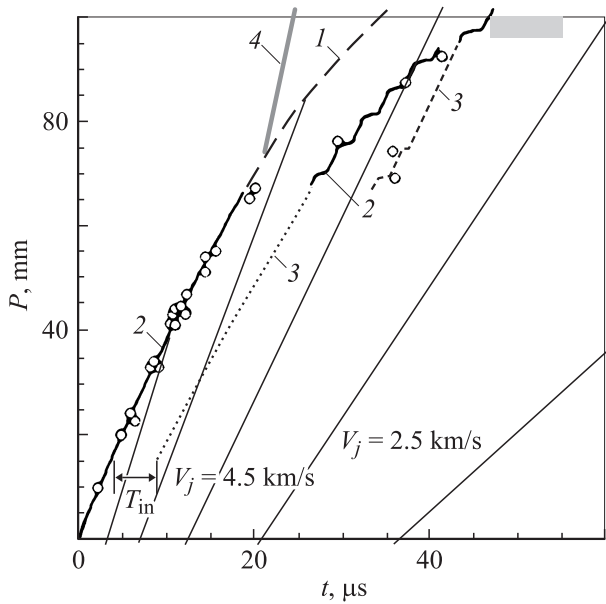


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для ситалла.

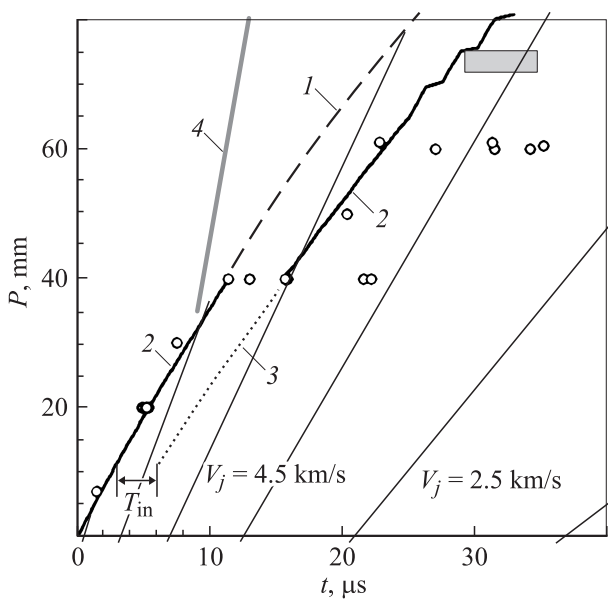


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для карбида кремния.

ление. Окончание внедрения КС в ХМ определялось экстраполяцией остаточных глубин пробития в стальных пластинах на нуль. Конечная глубина внедрения составляет 95 ± 5 мм для стекла и ситалла, 72 ± 10 мм — для карбида кремния (серая область на рис. 2–4), что меньше глубины проникания в стальную преграду (104 мм) и подтверждает эффективность ХМ при поглощении КС.

Указанные особенности могут быть объяснены с позиций радиального воздействия каверны в хрупком материале на КС [6,7]. Возможность радиального воздействия обусловлена слоупыванием стенок каверны и относи-

тельно малым соотношением радиусов струи и каверны в ХМ. При движении ХМ из зоны внедрения в объем каверны вследствие высокой скорости разрушения быстро формируется откольный слой,двигающийся к оси. Схлопывание каверны происходит за время t_{in} (см. рис. 2–4) и отсекает головную часть струи, которая обеспечивает начальное первичное внедрение (сплошная кривая 2 на рис. 2–4). Момент излома траектории свидетельствует об окончании внедрения головной части КС.

При непрерывном потоке элементов КС появляется возможность вторичного внедрения на слоупнувшемся материале каверны. Вторичное проникновение начинается на глубине опережения фронта разрушения от свободной лицевой поверхности и продолжается по всей глубине, на которой было инициировано слоупывание при первичном внедрении головной части КС, т.е. до временной „остановки“ внедрения. Расчет вторичного внедрения в ГД-приближении по слоупнувшемуся материалу при условии отсутствия прочности показан пунктиром 3 на рис. 2–4. 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 ХМ проявляется влияние боковых волн разгрузки в соответствии со следующими предпосылками [11]:

- при внедрении в дозвуковом режиме за волной сжатия SW , распространяющейся от зоны внедрения (рис. 5), могут образовываться центры разрушения (межзеренные границы, дефекты структуры ХМ). Но развитие 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 C_t), скорость роста трещин переменна и не превышает скорости фронта.

На рис. 5 приведено схематическое изображение конуса боковой волны разгрузки RW в столбце ХМ шириной B на момент начала опережения зоны внедрения. Волна сжатия SW с момента начала внедрения уходит вперед с продольной скоростью звука C_l . В связи с быстрым падением параметров в ней волну сжатия можно считать упругой. В то же время в области, непосредственно примыкающей к зоне внедрения КС, значения давления настолько велики, что ХМ находится в пластическом, в основном в упругопластическом, состоянии. Это определяет последующий процесс разгрузки ХМ в объем каверны и образование откольного слоя.

При отражении волны сжатия от свободной боковой поверхности образуется сходящаяся волна разгрузки RW , которая последовательно подходит к каверне, зоне внедрения, выходит на ось внедрения и далее уходит вслед за волной сжатия. Траектория движения

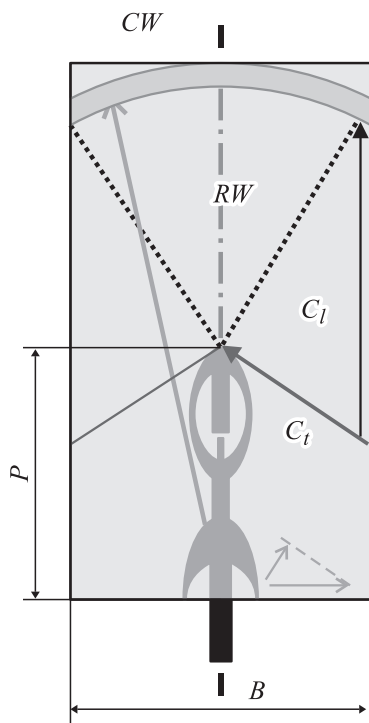


Рис. 5. Волновая картина в преграде на момент опережения внедрения КС боковой волной разгрузки: CW — волна сжатия от момента начала внедрения; RW — сходящаяся к оси боковая волна разгрузки; C_l, C_t — продольная и поперечная скорость звука; B — поперечный размер преграды из ХМ; P — глубина внедрения на момент опережения боковой волной разгрузки.

сходящейся волны разгрузки по оси столба ХМ, совпадающей с осью проникновения, после опережения зоны внедрения (линия 4 на рис. 2–4) определяется уравнением

$$P_{RW} = ((tC_l)^2 - (B/2)^2)^{0.5} - B \operatorname{tg}(C_l/C_t)/2,$$

где P_{RW} — координата движения боковой волны разгрузки по оси внедрения; B — ширина или диаметр пластин ХМ преграды; t — время от начала внедрения; C_l, C_t — продольная и поперечная скорость звука в хрупком материале.

При опережении зоны внедрения волной разгрузки происходит разрушение материала с образованием и раскрытием трещин и пор за фронтом волны разгрузки [11]. При этом ХМ теряет прочность и при последующем внедрении образование каверны соответствует материалу без прочности, откол и схлопывание стенок каверны отсутствуют, вторичное внедрение прекращается.

Как видно из экспериментальных данных, при поперечном размере пластин ХМ 80×80 мм для стекла и ситалла проявляется до двух периодов скачкообразного внедрения. Для карбида кремния раннее опережение волной разгрузки зоны внедрения приводит к отсут-

ствию второго периода схлопывания вследствие разрушения материала впереди зоны проникания.

Отмеченные особенности проникания КС в ХМ подтверждаются зависимостью остаточной глубины пробития в стали от толщины слоя ХМ на рис. 6, где приведены экспериментальные результаты поглощения КС преградой из стекла толщиной T_{gl} и стали. Видно, что замещение стали стеклом до определенной толщины (участок зависимости 1 на рис. 6) приводит к уменьшению глубины пробития стали с эффективностью, более чем в 2 раза превышающей значение, соответствующее гидродинамическому соотношению М.А. Лаврентьева $(\rho_{gl}/\rho_{st})^{0.5}$, где ρ_{gl} — плотность стекла, ρ_{st} — плотность стали (линия 3 на рис. 6). Это подтверждает схлопывание каверны в ХМ и вторичное срабатывание КС.

После превышения толщины слоя стекла глубины (участок зависимости 2 на рис. 6), где боковая волна разгрузки опережает зону внедрения, уменьшение остаточной глубины пробития стали происходит в соответствии с соотношением М.А. Лаврентьева. При опережении зоны внедрения боковой волной разгрузки происходит разрушение ХМ и его сопротивление прониканию определяется только плотностью, процесс схлопывания и вторичное срабатывание КС отсутствуют. Чем меньше поперечный размер пластины ХМ, тем раньше прекращается вторичное срабатывание КС (на рис. 6 приведены результаты для поперечных размеров пластин стекла 80×80 и 50×50 мм). В работе [7] приведены аналогичные результаты для КС различной длины.

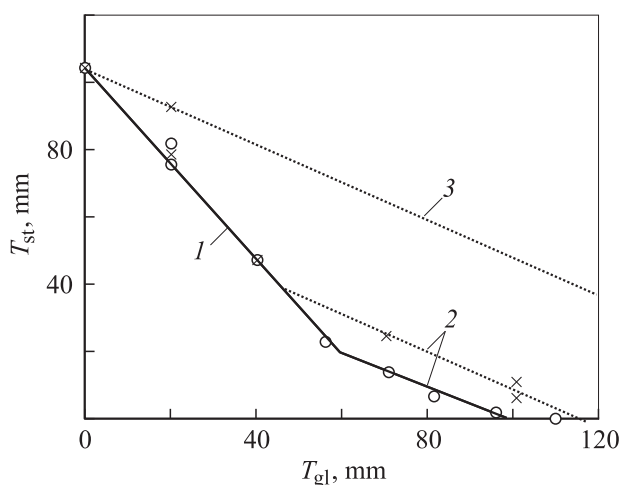


Рис. 6. Зависимость остаточной глубины пробития стального основания T_{st} от толщины слоя T_{gl} стекла из пластин 80×80 (○) и 80×80 (×): 1 — эффективный участок замещения стали стеклом со вторичным внедрением КС по схлопнувшейся хрупкой преграде; 2 — участок замещения разрушенным материалом без прочности; 3 — расчет по соотношению М.А. Лаврентьева.

Заключение

Из сопоставления с экспериментом видно, что ГД-приближение с учетом вторичного внедрения на схлопнувшемся материале каверны позволяет описать минимальные экспериментальные времена внедрения в хрупкие материалы вплоть до конечной глубины проникания. Более поздние времена внедрения после первого периода скачкообразного внедрения отражают проникание струи по остаткам отработанных элементов и раннее срабатывание частей КС на боковых стенках каверны.

По излому траектории внедрения можно определить скорость схлопывания откольного материала стенок каверны по уравнению:

$$V_c = r(V_j((\rho_j \rho_t)^{0.5}/R_t/4)^{0.5} - 1)/t_{in},$$

где V_c — скорость схлопывания материала стенок каверны, r — радиус струи.

Полученные значения скорости схлопывания 0.22, 0.24, 0.17 km/s для стекла, карбида кремния и ситалла соответственно соотносятся с откольной прочностью ХМ. Данная оценка является качественной и отражает механизм проявления прочности хрупких сред при внедрении КС через вторичные реакции хрупкого материала.

Таким образом, с позиций радиального взаимодействия кумулятивной струи и каверны рассмотрена кинетика внедрения КС в хрупкий материал. Предложена модель скачкообразного проникания с периодическим повторением первичного и вторичного внедрения на схлопнувшемся материале стенок каверны. Периодическое внедрение отражает влияние прочности хрупкого материала и прекращается при воздействии волны разгрузки.

Список литературы

- [1] Витман Ф.Ф., Златин Н.А., Петуховский В.И., Пугачев Г.С. // Сб. науч. тр. „Поведение материалов при артиллерийских и сверх артиллерийских скоростях удара“. Киев: Изд-во АН УССР, 1958. Ч. 2. С. 30–72.
- [2] Hornemann U. and Holzwarth A. // Int. J. Impact Engng. 1997. Vol. 20. P. 375.
- [3] Held M. // Proc. 14th Int. Symp. on Ballistics. Quebec, Canada, 1993. P. 45.
- [4] Moran B., Glenn L.A., Kusbov A. // J. de Physique Colloq. C 3. 1991. Suppl. III. Vol. 1. P. 147.
- [5] Белобородько В.А. Григорян А.И., Коновалов А.В., Маринин В.М., Терехин И.И., Томашевич И.И. // Тр. Междунар. конф. «III Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. С. 473.
- [6] Kozhushko A.A., Kozachuk A.L., Rummyantsev B.V., Sinani A.B., Vlasov A.S., Zilberbrand E.L. // Int. J. Impact Engng. 2003. Vol. 29. P. 385.
- [7] Румянцев Б.В. // Тр. Междунар. конф. „VII Харитоновские тематические научные чтения“. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 625.
- [8] Андреев С.Г., Бабкин А.Ф., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 2. С. 238.
- [9] Hauver G.E., Netherwood P.H., Benski R.F., Melani A. // Technical report BRL-TR-3273. U.S. Army Ballistic Research Laboratory. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1991. P. 56.
- [10] Satapathy S., Bless S.J. // J. Mech. Materials. 1996. Vol. 23. P. 323–330.
- [11] Strassburger E., Senf H. // Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik. Ernst-Mach-Institut Institutsteil Well am Rhein. Munchen, Germany, 1994. S. 115.