

Кинетика высокоскоростного внедрения в высокотвердые хрупкие среды

© А.С. Власов, Ю.А. Емельянов, Е.Л. Зильбербранд, А.А. Кожушко, А.И. Козачук,
Г.С. Пугачев, А.Б. Синани

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: alex@mdlab.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 11 февраля 1999 г.)

Исследована кинетика внедрения деформируемых стальных и вольфрамовых стержней в высокотвердые хрупкие среды (керамики и стекло) при скоростях соударения 1.3–1.6 km/s. Установлено, что внедрение протекает как двухстадийный процесс. На первой стадии скорость внедрения возрастает по мере разрушения керамики. Вторая стадия соответствует квазистационарному внедрению в среду, лишенную прочности. Показано, что именно первая стадия определяет высокий уровень сопротивления керамики при интенсивном ударном воздействии. Также установлена зависимость сопротивления внедрению от геометрии преграды и ударного давления.

В последние годы интенсивно исследуются высокотвердые хрупкие материалы (в частности, керамики) с точки зрения перспективности их использования для защиты от высокоскоростного удара [1,2]. Однако эффективность керамик оценивалась, как правило, по конечным результатам, например, по остаточной глубине внедрения в помещенную за керамику металлическую мишень-свидетель.

Конечные результаты могут дать только обобщенные, усредненные характеристики исследуемого процесса, что представляется существенным лишь при решении определенных частных задач. Однако они не позволяют раскрыть механизм такого сложного, сильно зависящего от времени процесса, как внедрение в керамики, и тем самым эффективно использовать эти материалы в условиях высокоскоростного удара.

Для получения представлений о поведении керамик при динамических нагрузках с учетом кинетики разрушения таких хрупких сред необходимо получить большой массив экспериментальных данных с хорошим временным разрешением параметров внедрения в широком диапазоне изменения условий опыта.

К настоящему времени опубликованы работы [3–8], в которых приведены некоторые данные по исследованию кинетики процесса высокоскоростного внедрения в керамики и стекла. Анализ этих данных приводит к выводу, что сопротивление керамик внедрению сильно изменяется со временем: оно постоянно уменьшается по мере разрушения керамики. Однако известные опубликованные результаты относятся к частным случаям и не могут дать полную информацию об общих закономерностях высокоскоростного внедрения в керамики.

Цель настоящей работы — систематическое изучение развития во времени высокоскоростного внедрения в керамики в течение всего процесса. Работа включала в себя изучение кинетики в широком диапазоне изменения условий соударения в зависимости от состава и свойств керамик, геометрии образцов и давлений при ударе.

1. Эксперимент

Ударное нагружение исследуемых материалов осуществлялось стержнями из мягкой стали и пластичного вольфрамового сплава (диаметр 3, длина 30 mm) при скоростях удара от 1.3 до 1.6 km/s.

Опыты производились на образцах оксида алюминия (Al_2O_3), карбида кремния (SiC), нитрида алюминия с нитридом титана (AlN/TiN-70/30 wt.%), карбида бора (B_4C) и силикатного стекла с поперечными размерами 20×20 и 40×40 mm и толщиной 100 mm. Поперечные размеры изменялись для того, чтобы проследить влияние разрушения с боковых поверхностей. Толщина образцов позволяла исключить влияние разрушения с тыльной свободной поверхности образца в течение всего процесса взаимодействия. Свойства исследованных материалов приведены в таблице.

Исследования производились с помощью четырехкадровой рентгеноимпульсной установки с экспозицией $\sim 0.1 \mu s$ (рабочее напряжение 400–450 kV). В опытах получались данные о положении стержня в керамике с точностью 0.2 mm в определенные, фиксированные с точностью $0.1 \mu s$ моменты времени. По этим данным

Физико-механические характеристики исследованных материалов

Материал	Al_2O_3	SiC	AlN/TiN	B_4C	Стекло
Плотность (ρ), g/cm ³	3.88	2.95	3.25	2.44	2.3
Скорость продольной волны (C_l), km/s	10.4	10.5	9.3	12.8	5.7
Скорость сдвиговой волны (C_t), km/s	6.2	6.6	5.75	7.8	3.4
Изгибная прочность (σ), МПа	230	140	190	350	150
Вязкость разрушения (K_{IC}), MN · m ^{-3/2}	3.8	3.4	4.2	3.6	0.8

строились кривые зависимости положения контактной границы ударник/преграда (глубина внедрения) и тыльного торца ударника от времени.

2. Результаты опытов и обсуждение

Для аппроксимации экспериментальных данных непрерывной зависимостью была разработана программа, основанная на модели Тейта–Алексеевского [9,10], для случая внедрения деформируемого стержня в сплошную среду. Эта программа позволяла получать также зависимости скорости внедрения U (скорости контактной границы ударник/преграда), скорости тыла ударника V и длину ударника L от времени после удара T или глубины внедрения P .

Скорость внедрения U и скорость сокращения ударника dL/dT , как известно, являются достаточно полными характеристиками сопротивления внедрению. На рис. 1 приведены зависимости $U(T)$ для исследованных материалов при ударе стальным стержнем при скорости $V_0 = 1.6$ km/s. На всех кривых можно различить три участка.

Первый — нисходящая ветвь кривой — соответствует переходу от массовой скорости в момент времени $T = 0$, определяемой ударными адиабатами взаимодействующих тел [11], к скорости собственно внедрения. Иными словами, эта ветвь отражает переход от ударно-волнового перемещения контактной границы к непосредственно внедрению.

Второй участок кривой — восходящая ветвь — соответствует начальной стадии внедрения, которое начинается с некоторой минимальной скорости, возрастающей со временем до примерно постоянного уровня. Третий участок соответствует внедрению с постоянной скоростью.

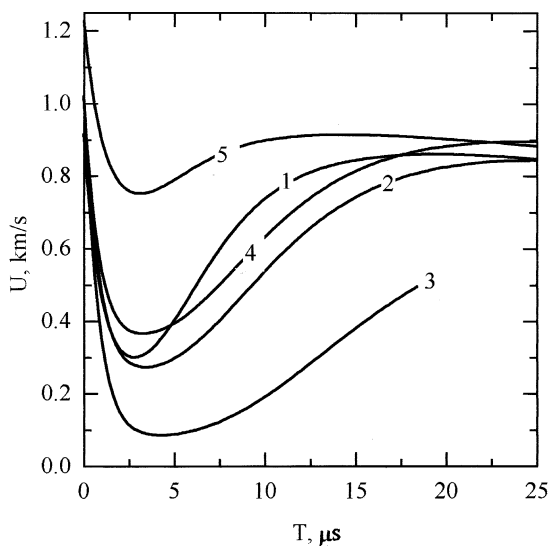


Рис. 1. Зависимость скорости внедрения стального ударника ($V_0 = 1.6$ km/s) в керамические преграды от времени. 1 — Al_2O_3 , 2 — SiC , 3 — AlN/TiN , 4 — B_4C , 5 — стекло.

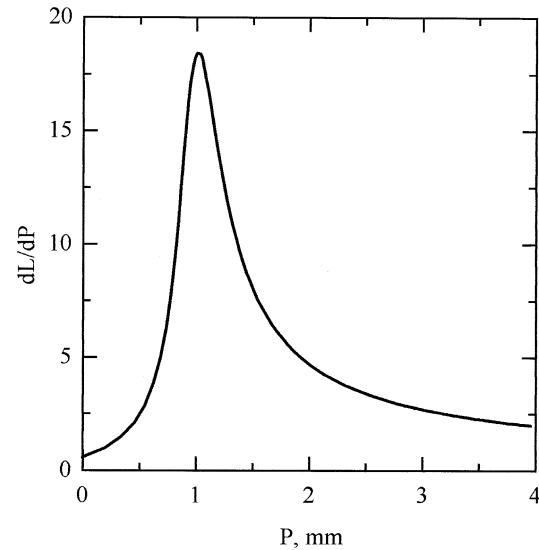


Рис. 2. Зависимость скорости сокращения dL/dP стального ударника ($V_0 = 1.6$ km/s) от глубины внедрения P .

Таким образом, внедрение в керамику можно представить как двухстадийный процесс: первая стадия — низкоскоростное внедрение с увеличивающейся скоростью, вторая стадия — квазистационарное внедрение с постоянной скоростью. Поскольку в данных условиях скорость внедрения определяется сопротивлением внедрения, то первую стадию можно назвать стадией высокого сопротивления. Увеличение скорости внедрения (снижение сопротивления) на этой стадии можно объяснить развитием разрушения материала преграды во времени и исчерпанием его прочности. Следовательно, на второй стадии внедрение происходит в разрушенную, лишенную прочности среду, и сопротивление внедрению должно определяться главным образом инерционными силами.

Изменение сопротивления преграды внедрению можно также проследить на зависимости скорости сокращения ударника dL/dP от глубины внедрения P (рис. 2). Начальная переходная стадия здесь соответствует формированию квазистационарного течения ударника. После переходной стадии наблюдается интенсивное расходование ударника (стадия высокого сопротивления внедрению), за которой следует сокращение ударника с практически постоянной скоростью (внедрение в среду, лишенную прочности). Такая зависимость dL/dP полностью согласуется с зависимостью $U(T)$.

Приведенные на рис. 1 и 2 данные свидетельствуют о том, что высокое сопротивление внедрению реализуется только на начальной стадии процесса внедрения. Можно считать, что эта стадия заканчивается разрушением керамики и полной потерей прочности. Следовательно, высокая стойкость керамик к ударным воздействиям должна зависеть от параметров этой начальной стадии, в частности, от ее длительности и величины начальной минимальной скорости внедрения.

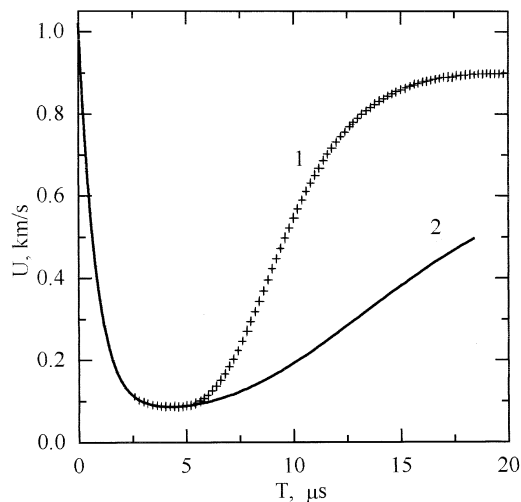


Рис. 3. Зависимость скорости внедрения стального ударника ($V_0 = 1.6$ km/s) в преграду AlN/TiN от времени при различных поперечных размерах преграды. 1 — 20×20 mm, 2 — 40×40 mm.

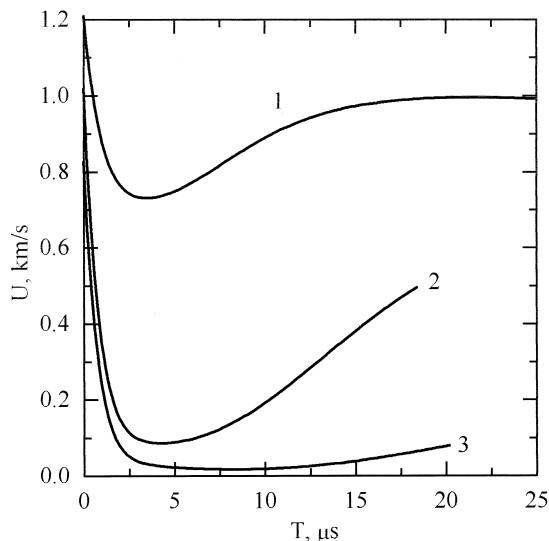


Рис. 4. Зависимость скорости внедрения вольфрамового (1) и стального (2,3) ударника в преграду AlN/TiN от времени. V_0 , km/s: 1, 2 — 1.6, 3 — 1.3.

На рис. 3 приведена зависимость скорости внедрения U от времени при различных поперечных размерах образца. Видно, что длительность низкочастотной стадии внедрения сокращается с уменьшением поперечных размеров образца. Разрушение керамики в этом случае происходит быстрее под действием более интенсивных волн растягивающих напряжений, распространяющихся от свободных боковых поверхностей образца.

Зависимости скорости внедрения U от времени для различных давлений на контактной поверхности приведены на рис. 4. Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением плотности материала ударника и скорости соударения величина минимальной скорости внедрения возрастает, а длительность низкоскоростной стадии внедрения сокращается. Это объясняется повыше-

нием уровня ударно-волнового нагружения материала, что ускоряет зарождение и развитие хрупкого разрушения в образце.

Что касается влияния свойств высокотвердых хрупких сред на параметры низкоскоростной стадии внедрения, то, как следует из рис. 1, кинетика внедрения существенно различна для всех исследованных в работе материалов. В частности, в стекле, характеризующемся наименьшей прочностью, твердостью и вязкостью разрушения, стадия низкоскоростного внедрения (высокого сопротивления) выражена слабее. Однако вопрос о корреляции физико-механических характеристик керамических материалов с параметрами процесса внедрения требует дальнейшего исследования.

Таким образом, в результате систематических экспериментальных исследований процесса высокоскоростного внедрения пластичных ударников в хрупкие среды установлено.

1) Сопротивление внедрению в хрупкие среды сильно зависит от времени.

2) Внедрение в керамики и стекла идет как двухстадийный процесс. На первой стадии внедрение происходит со скоростью, возрастающей по мере разрушения керамики.

На второй — скорость внедрения близка к постоянной и определяется главным образом инерционным сопротивлением среды.

3) Длительность первой стадии внедрения и минимальная скорость внедрения, определяющие эффективность керамики при высокоскоростном внедрении, зависят от материала и геометрии преграды, а также от интенсивности удара. Увеличение длительности этой стадии и снижение минимальной скорости внедрения — путь к повышению эффективности керамик и стекол, противостоящих высокоскоростному удару.

Работа поддержана РФФИ (грант № 96-01-01207а).

Список литературы

- [1] S. Bless, Z. Rosenberg, B. Yoon. *Int. J. Impact Eng.* **5**, 1–4, 165 (1987).
- [2] J. Sternberg. *J. Appl. Phys.* **65**, 9, 3417 (1989).
- [3] M. Wilkins, C. Cline, C. Honodel. *Light Armor. Report UCRL-71817 Livermore Radiation Lab., Livermore* (1969).
- [4] Е.Л. Зильбербранд, Н.А. Златин, А.А. Кожушко, В.И. Полозенко, Г.С. Пугачев, А.Б. Синани. *ЖТФ* **34**, 10, 1123 (1989).
- [5] G. Hauver, P. Netherwood, R. Benck, W. Gooch, W. Perciballi, M. Burkins, *Proc. 13 th Int. Symposium on Ballistics* **3**, 257 (1992).
- [6] C. Anderson, V. Hohler, J. Walker, A. Stilp. *Proc. 14 th Int. Symposium on Ballistics*, **1**, 145 (1993).
- [7] D. Orphal, R. Franzen. *Int. J. Impact Engng.* **19**, 1, 1 (1997).
- [8] H. Ernst, K. Hoog, V. Wiesner. *Proc. 15 th Int. Symposium on Ballistics* **1**, 11 (1995).
- [9] В.П. Алексеевский. *Физика горения и взрыва* **2**, 2, 99 (1966).
- [10] A. Tate. *Mech. and Phys. Solids* **15**, 6, 387 (1967).
- [11] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М. (1984). 688 с.