

05.1;12

Особенности кинетики высокоскоростного внедрения в 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 РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 21 ноября 1996 г.

В работе исследована кинетика высокоскоростного внедрения деформируемых стержней в керамики. 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 интенсивным ударным нагрузкам.

В последние годы интенсивно исследуются высокотвердые хрупкие материалы (в частности, керамики) с точки зрения перспективности их использования для защиты от высокоскоростного удара [1,2]. Для понимания поведения керамик в этих условиях большое значение имеет изучение развития во времени процесса внедрения ударяющего тела. Это связано с тем, что сопротивление хрупких тел внедрению, в отличие от пластичных, должно сильно изменяться во времени. Имеющиеся работы [3–5] качественно подтверждают такое изменение, но не позволяют установить общие закономерности изменения параметров внедрения в течение всего процесса.

Целью настоящей работы было изучение кинетики внедрения деформируемых металлических стержней в керамики различного состава с высоким разрешением во времени в течение всего процесса взаимодействия.

Исследование производилось с помощью 4-кадровой рентгеноимпульсной установки с экспозицией ~ 0.1 мкс (рабочее напряжение — 400–450 кВ). В опытах получались данные о положении стержня в керамике в определенные, фиксированные с точностью 0.1 мкс моменты времени. Дифференцирование полученных кривых путь–

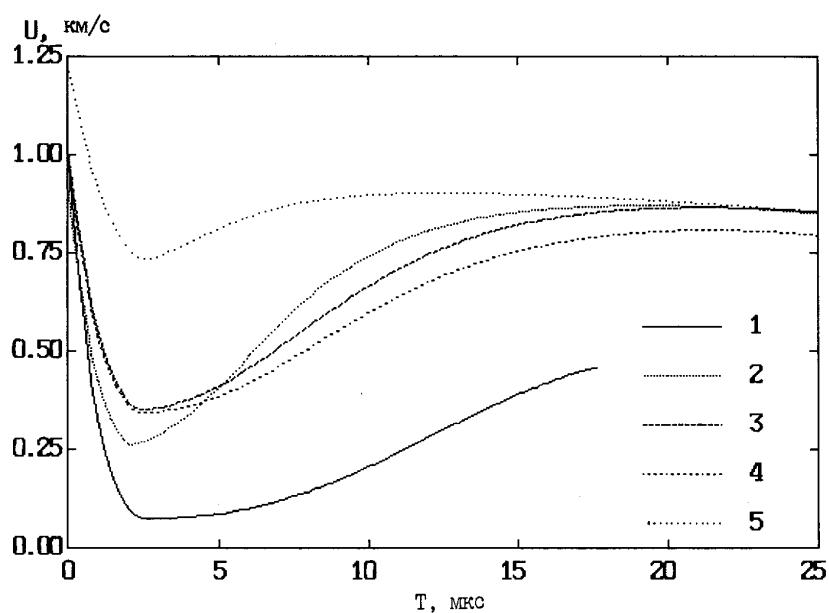


Рис. 1.

время позволяло установить зависимость от времени скорости внедрения, которая однозначно характеризует сопротивление внедрению [6].

Ударное нагружение керамик осуществлялось стержнями из мягкой стали и пластичного вольфрамового сплава (диаметр 3 мм, длина 30 мм) при скоростях от 1300 до 1600 м/с.

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

На рис. 1 приведены зависимости скорости внедрения U от времени t после момента соударения для AlN/TiN (1), Al₂O₃ (2), B₄C (3), SiC (4) и силикатного стекла (5) при ударе стальным стержнем со скоростью 1600 м/с. Эти зависимости для исследованных материалов имеют общий характер: на всех кривых $U(t)$ можно выделить три характерных участка.

Первый — нисходящая ветвь кривой — соответствует переходу от массовой скорости, определяемой ударными адиабатами взаимодействующих тел [7], к скорости внедрения. Иными словами, эта ветвь отражает переход от ударно-волнового перемещения контактной поверхности к собственно внедрению.

Второй участок соответствует внедрению с переменной скоростью. Здесь скорость изменяется от некоторого минимального значения в начальный момент внедрения до величины, близкой к постоянной.

Третий участок соответствует внедрению с постоянной скоростью.

Таким образом, процесс собственно внедрения можно условно разделить на две стадии: первая — "низкоскоростное внедрение", вторая — "квазистационарное внедрение".

Из данных о скорости внедрения можно оценить эффективное сопротивление внедрению. Под ним понимается сопротивление, имеющее прочностную природу и дополняющее инерционное сопротивление внедрению. Оно может быть рассчитано на основе известного уравнения Алексеевского–Тейта [8,9]

$$\rho_1 U^2/2 + R = \rho_2 (V - U)^2/2 + Y,$$

где ρ_1 и ρ_2 — соответственно плотность среды и ударяющего тела, V — скорость соударения, U — скорость внедрения, R и Y — соответственно параметры прочности среды и ударяющего тела.

Расчеты по такой схеме общеприняты [4,5]. Однако мы понимаем их сугубо оценочный характер. Приведенное выше уравнение справедливо, строго говоря, для внедрения в пластичные среды, отличного от внедрения в разрушающуюся хрупкую среду. Тем не менее даже оценка изменения эффективного сопротивления во времени может дать представление о кинетике хрупкого разрушения в процессе внедрения.

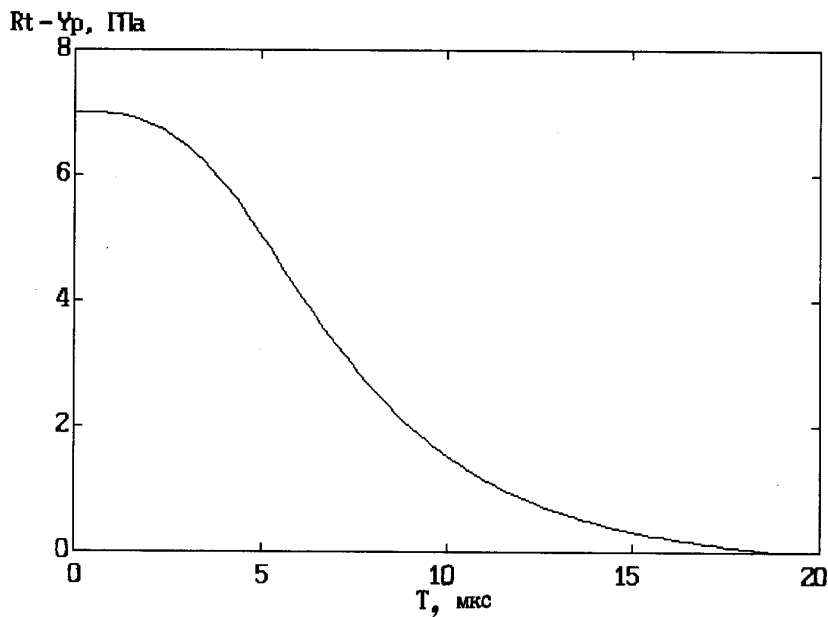


Рис. 2.

На рис. 2 приведена зависимость эффективного сопротивления $R-Y$ от времени t после соударения для Al_2O_3 при скорости удара стальным стержнем 1600 м/с. Приведенные данные свидетельствуют о прогрессивном уменьшении эффективного сопротивления. Сопоставление рис. 1 и 2 указывает на то, что наиболее высокое сопротивление материал оказывает на первой, низкоскоростной стадии взаимодействия. Первая стадия заканчивается исчерпанием прочности материала. На второй, квазистационарной стадии эффективное сопротивление падает до пренебрежимо низкого уровня, и скорость внедрения на ней близка к постоянной, рассчитанной в рамках гидродинамической модели [6]. Иными словами, сопротивление внедрению имеет инерционный характер и определяется только плотностью взаимодействующих тел.

Описанный характер изменения сопротивления хрупких сред внедрению естественно связать с кинетикой их разрушения. Для

процесса взаимодействия хрупких сред с ударяющим телом можно выделить два предельных случая: первый — деформирование ударяющего тела на поверхности неразрушенной керамики в режиме, близком к деформированию на "жесткой стенке" ($U = 0$), второй — движение в среде, лишенной прочности. В реальном процессе имеет место последовательный переход от первого режима ко второму, вызывающий прогрессивное снижение уровня сопротивления внедрению. Отсюда видно, что высокая стойкость керамик к ударным воздействиям определяется первой низкоскоростной стадией внедрения, а именно ее длительностью и минимальным значением скорости внедрения.

Длительность этой стадии и минимальная скорость внедрения существенно зависят для данного материала преграды от геометрии образца и величины давления на контактной поверхности, определяемого скоростью удара и плотностью ударяющего тела.

Из данных проведенных опытов следует, что с уменьшением поперечных размеров образца длительность низкоскоростной стадии внедрения сокращается. Разрушение образца происходит более интенсивно под действием волн растягивающих напряжений, распространяющихся от свободных боковых поверхностей. Время подхода этих волн к контактной поверхности, естественно, зависит от размера образца. Минимальная скорость внедрения не изменяется с уменьшением поперечных размеров образца. Это связано с тем, что в пределах выбранной геометрии образцов к моменту установления минимальной скорости внедрения волна растягивающих напряжений не достигает контактной поверхности.

Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением скорости удара и плотности ударяющего тела величина минимальной скорости внедрения возрастает, а длительность стадии низкоскоростного внедрения сокращается. Это объясняется повышением уровня ударно-волнового нагружения материала, что ускоряет зарождение и развитие хрупкого разрушения в образце.

Как видно из рис. 1, кинетика внедрения существенно различна для разных материалов. В частности, в стекле, характеризующемся наименьшей прочностью, твердостью и вязкостью разрушения, стадия низкоскоростного внедрения (высокого сопротивления) выражена слабее. Что касается керамических материалов, то вопрос о корреляции их физико-механических характеристик с параметрами процесса внедрения требует дальнейшего исследования.

Таким образом, в настоящей работе всесторонне исследована кинетика внедрения деформируемых стержней в керамики в течение всего процесса взаимодействия. Благодаря этому впервые удалось показать, что высокоскоростное внедрение в хрупкие тела протекает как двухстадийный процесс. Первая стадия — низкоскоростное внедрение с возрастающей по мере разрушения керамики скоростью, вторая стадия — квазистационарное внедрение в среду, лишенную прочности. Именно на первой стадии наблюдается высокий уровень сопротивления внедрению, и именно эта стадия определяет высокую эффективность керамик как конструкционного материала при интенсивных динамических нагрузках.

Список литературы

- [1] *Bless S., Rosenberg Z., Yoon B.* // *Int. J. Impact Eng.* 1987. V. 5. N 1–4. P. 165–171.
- [2] *Stenberg J.* // *J. Appl. Phys.* 1989. V. 65. N 9. P. 3417–3424.
- [3] *Зильбербранд Е.Л., Златин Н.А., Кожушко А.А., Положенко В.И., Пугачев Г.С., Синани А.Б.* // *Ж. техн. физ.* 1989. Т. 59. № 10. С. 54–58.
- [4] *Hawer G.E., Gooch W.A., Netherwood P.H., Benck R.F., Perciballi W.J., Burkins M.S.* // *Proc. 13th Int. Symp. on Ballistics.* Stockholm, 1992. P. 257–264.
- [5] *Orphal D., Franzen R., Piekutowski A., Forrestall M.* // *Int. J. Impact Eng.* 1996. V. 18. N 4. P. 355–368.
- [6] *Лаврентьев М.А.* // *Успехи мат. наук.* 1957. Т. 12. № 4. С. 41–56.
- [7] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* // *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.* М.: Наука, 1966. 688 с.
- [8] *Алексеевский В.П.* // *Физ. горения и взрыва.* 1966. Т. 2. № 2. С. 99–106.
- [9] *Tate* // *J. Mech. and Phys. Solids.* 1967. V. 15. N 6. P. 387–399.