

## Скорость нагружения и хрупкость твердых тел

© А.А. Кожушко, А.Б. Синани

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: alex@mdlab.ioffe.ru

Переход в хрупкое состояние, который наблюдается у многих твердых тел при понижении температуры или возрастании скорости нагружения, может быть дополнен обратимым хрупко-вязким переходом при гиперсверхзвуковом нагружении, превышающем скорость роста трещин разрушения. Это явление реализуется при высокоскоростном внедрении в органические и неорганические стекла, а также керамики.

В работе Александрова и Журкова [1] показана возможность достижения высокопрочного состояния хрупких тел. Такое состояние может быть реализовано при исключении влияния поверхностных микродефектов, играющих в условиях нагружения роль очагов разрушения. На примере волокон из кварца и силикатного стекла было показано, что прочность этих материалов приближается к теоретическим значениям.

Идея [1] оказалась весьма плодотворной при исследовании высокоскоростного внедрения твердых тел в хрупкие среды. Исходя из выводов этой работы, авторы [2] впервые связали высокий уровень сопротивления хрупких тел внедрению с их высокопрочным состоянием, которое реализуется при исключении хрупкого разрушения, развивающегося впереди внедряющегося тела.

В общем случае сопротивление преграды внедрению имеет вид

$$P = \frac{1}{2} \rho_T U^2 + R \quad (1)$$

и складывается из инерционной ( $\frac{1}{2} \rho_T U^2$ ) и прочностной ( $R$ ) составляющих. Здесь  $\rho_T$  — плотность материала преграды,  $U$  — скорость внедрения.

Для пластичных тел вопрос о сопротивлении внедрению широко исследован и достаточно хорошо изучен [3–6]. Прочностная составляющая сопротивления внедрению  $R$ , как следует из большого числа экспериментальных данных, лучше всего коррелирует с динамической твердостью по Майеру, измеряемой при внедрении твердого конического индентора при скоростях 1–10 м/с.

Значительно более сложен вопрос о прочностном сопротивлении при внедрении в хрупкие среды. Как показано в [7,8], непрерывно растущее разрушение впереди внедряющегося тела приводит к превращению материала преграды в фрагментированную, несвязную среду с пренебрежимо низкой прочностью. В такой ситуации можно рассматривать лишь некоторое усредненное по времени и глубине внедрения прочностное сопротивление, которое, по оценкам [9], можно считать равным 0.2–0.4 от твердости материала преграды.

Экстраполяция величины  $R$  на начальный момент внедрения указывает на весьма высокий уровень прочностного сопротивления, близкий к твердости хрупких

преград [10]. Столь же высокая прочность была зарегистрирована при внедрении в неорганические стекла и керамики со скоростями выше скорости фронта разрушения [11–13]. Предполагается, что в этих условиях внедряющееся тело непрерывно взаимодействует с неповрежденной средой, и доминирующую роль в прочностном сопротивлении внедрению должны играть процессы пластического деформирования, а не кинетика разрушения материала преграды. Иными словами, в хрупких средах с ростом скорости внедрения можно ожидать аномальный „хрупко-вязкий“ переход, и формирование кратера должно иметь такой же характер, как и в пластичных материалах.

Выводы работ [11–13] следуют из опытов при скоростях соударения  $V = 4–8$  км/с, которые обеспечивают скорость внедрения выше скорости фронта разрушения в стеклах и керамиках. Возникает вопрос, имеет ли обнаруженное изменение в поведении хрупких материалов при высокоскоростном ударе общий характер, т.е. реализуется ли оно для любых тел, находящихся в хрупком состоянии, в широком диапазоне скоростей. Однако проведение опытов с керамиками, отличающимися высокой скоростью роста трещин, требует скоростей соударения около 10 км/с и выше, что в настоящее время трудно осуществимо. С этой точки зрения представляют интерес исследования с полимерными стеклами, которые характеризуются скоростью роста трещин на порядок ниже по сравнению с керамиками [14].

Настоящая работа направлена на изучение прочностного сопротивления полимерных стекол внедрению в широком диапазоне скоростей нагружения (удара) и сравнение их поведения с поведением высокомодульных керамик. Цель работы — проверка общего характера поведения хрупких материалов при высокоскоростном ударе, а также предложение критерия перехода к гиперсверхзвуковому удару для хрупких материалов.

Опыты проводились с типичным полимерным стеклом — полиметилметакрилатом (ПММА), имеющим следующие свойства (см. таблицу).

Следует иметь в виду, что вязко-хрупкий переход при внедрении в полимерные материалы достигается не всегда, даже при высоких скоростях нагружения. Эта трудность была преодолена проведением опытов при температуре жидкого азота (77 К).

## Физико-механические свойства полиметилметакрилата

Свойство	Температура, К		Условия измерений
	300	77	
Плотность, $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	1.18	1.20	$\nu = 5$ MHz $\nu = 1.67$ MHz $U = 2 \cdot 10^{-4}$ m/s
Скорость продольной волны, $C_L$ (м/с)	2700	3100	
Скорость сдвиговой волны, $C_S$ (м/с)	1300	1600	
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0.34	0.32	
Твердость, $H$ (МПа)	250	900	

В образцы ПММА внедрялись жесткие инденторы (твердостью HRC~60) с 90° конической головной частью при скоростях взаимодействия (индентирования или удара) в диапазоне от 10<sup>-4</sup> до 10<sup>3</sup> м/с.

В области скоростей от 10<sup>-4</sup> до 1 м/с регистрировалась глубина внедрения  $h$  и нагрузка на индентор  $P$ . Твердость исследуемого материала определялась из гладкой части кривой  $P(h)$  (рис. 1), согласно [15], в виде

$$H = \frac{P_2}{\pi \Delta h^2} \left( 1 - \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta h$  — приращение глубины отпечатка при увеличении нагрузки от  $P_1$  до  $P_2$ .

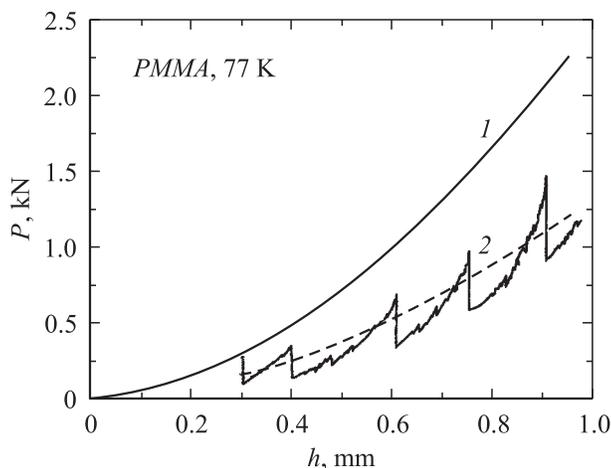


Рис. 1. Диаграмма „Нагрузка ( $P$ )–глубина внедрения ( $h$ )“ для ПММА при скоростях внедрения 0.06 (1) и 8 мм/с (2).

Сопротивление внедрению  $R$  определялось из наибольшей средней нагрузки  $P$  (подобно штриховой кривой 2 на рис. 1), исходя из выражения

$$R = P/\pi r_0^2, \quad (3)$$

где  $r_0$  — радиус отпечатка на уровне исходной поверхности образца.

Ударное нагружение в диапазоне скоростей 10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> м/с производилось жесткими ударниками диаметром 7.62 мм, длиной 60 мм, с 90° конической головной частью. В опытах с помощью многокадровой высокочастотной фотографической установки регистрировались положения тыльной части тормозящегося

ударника. Таким образом находилась кривая „положение ударника–время“, а исходя из нее можно легко найти мгновенное значение сопротивления внедрению [3,6].

Найденное сопротивление может быть отождествлено с прочностным сопротивлением  $R$ . Это оправдано, так как в условиях опыта (относительно низкая скорость удара, низкая плотность преграды) силы инерционного сопротивления играют очень малую роль в общем сопротивлении и, в первом приближении, ими можно пренебречь.

При измерении твердости радиус отпечатка  $r_0$  при внедрении 90° конического индентора равен глубине  $h$ . Тогда уравнение (3) можно переписать в виде

$$R = P/\pi r_0^2 = P/\pi h^2. \quad (4)$$

Плавная кривая  $P(h)$  (подобная кривой 1 на рис. 1) свидетельствует о совпадении твердости  $H$  и сопротивления внедрению  $R$ . Это выполняется при „мягком“ нагружении со скоростью 0.06 мм/с. При более высокой скорости 8 мм/с на кривой  $P(h)$  наблюдаются „срывы“ (кривая 2). Эти срывы вызваны зарождением и ростом трещин вокруг отпечатка и частичной разгрузкой материала. В результате усредненная кривая  $P(h)$  (штриховая линия 2) проходит значительно ниже плавной кривой (1). Это различие наглядно показывает, что сопротивление внедрению  $R$  при более высокой скорости нагружения становится меньше, чем твердость  $H$ .

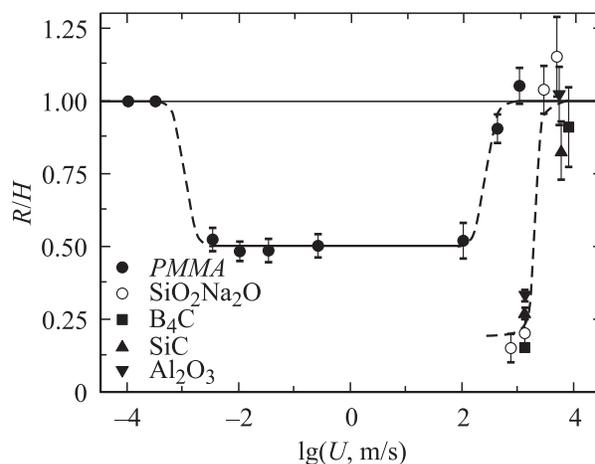


Рис. 2. Зависимость отношения сопротивления  $R$  к твердости  $H$  материала преграды от скорости внедрения.

Зависимость отношения  $R/H$  от скорости внедрения приведена на рис. 2. В отличие от пластичных материалов с практически постоянным  $R/H$  это отношение для ПММА зависит от скорости и обнаруживает два отчетливых перехода, первый из которых можно связать с вязко-хрупким переходом. Скорость внедрения, соответствующую этому переходу ( $\sim 10^{-3}$  m/s), можно назвать „скоростью охрупчивания“ аналогично температуре хрупкости, характерной для полимерных стекол. Начиная с этой скорости, сопротивление внедрению определяется главным образом кинетикой разрушения, поскольку зарождение и рост трещин разрушения вокруг отпечатка (кратера) определяют уменьшение сопротивления по сравнению с твердостью преграды. Дальнейшее увеличение скорости внедрения очень слабо влияет на сопротивление внедрению, которое остается примерно постоянным вблизи значения, равного 0.5 от твердости.

Наблюдаемое для ПММА отношение  $R/H = 0.5$  значительно выше среднего  $R/H$  для керамик, найденного в [9] (рис. 2). Это значит, что даже в хрупком состоянии ПММА в отличие от керамик не превращается в лишенную прочности среду. Этот факт указывает на смешанный механизм (пластическое течение и разрушение) внедрения в рассматриваемом диапазоне скоростей.

При скоростях удара выше 400 m/s наблюдается резкое увеличение сопротивления внедрению, и  $R/H \rightarrow 1$ . Это означает, что кратерообразование в ПММА происходит по механизму пластического течения, а контактная граница ударник-преграда движется впереди фронта разрушения. В этих условиях сопротивление внедрению определяется фундаментальными свойствами материала преграды, и реализуется высокопрочностное состояние хрупкого материала. Можно предположить, что скорость около 400 m/s близка к предельной скорости распространения разрушения  $V_f$  в ПММА. Это согласуется с данными прямых измерений скорости роста трещин [16].

На рис. 2 приведены полученные ранее [11,12] данные авторов для силикатного стекла и керамик. Эти материалы ведут себя подобно ПММА: в них также обнаруживается четкий хрупко-вязкий переход. Однако переход в керамиках происходит при скоростях, на порядок более высоких, чем в ПММА, что полностью соответствует различию в упругих свойствах ПММА и керамик, в частности, скорости звука, которая определяет максимальную скорость распространения разрушения.

Таким образом, из опытов, проведенных в широком диапазоне скоростей взаимодействия от  $10^{-4}$  до  $10^3$  m/s, следует, что скорость влияет на сопротивление хрупких тел двояко.

Во-первых, при низких скоростях взаимодействия повышение скорости нагружения вызывает „охрупчивание“ материала, т.е. зарождение и рост трещин вокруг зоны внедрения (отпечатка или кратера). Скорость, при которой происходит вязко-хрупкий переход может быть названа скоростью охрупчивания ( $V_b$ ). При  $V > V_b$  сопротивление внедрению определяется кинетикой разрушения материала преграды. Охрупчивание приводит к

резкому снижению сопротивления внедрению по сравнению с твердостью преграды.

Во-вторых, при скоростях внедрения, превышающих  $V_f$  — скорость роста разрушения, происходит своего рода обратный „хрупко-вязкий“ переход. В этих условиях материал вновь обретает высокое прочностное сопротивление внедрению на уровне его твердости. По существу, кратерообразование при скоростях внедрения выше скорости роста разрушения  $V > V_f$  и индентирование при  $V < V_b$  — одно и то же явление, так как в обоих случаях исключено влияние трещин. Это означает, что сопротивление внедрению задается главным образом фундаментальными свойствами материала преграды.

Существование второго (хрупко-вязкого) перехода может быть использовано для того, чтобы физически обоснованно определить термин „гиперскоростной удар“ применительно к хрупким твердым телам.

Есть основания полагать, что скорость удара, обеспечивающая хрупко-вязкий переход, может быть принята как критерий гиперскоростного удара для хрупких преград. Очевидно, что критерий гиперскоростей сильно изменяется в зависимости от скорости распространения разрушения и, следовательно, скорости звука в хрупких материалах.

Следует отметить принципиальное различие характера перехода к гиперскоростям для пластичных и хрупких преград. В пластичных преградах в качестве границы перехода принимается скорость, при которой прочностными свойствами материала преграды можно пренебречь относительно инерционных сил сопротивления внедрению. В хрупких преградах эта граница определяется скоростью, при которой происходит хрупко-вязкий переход и наблюдается резкий рост прочностного сопротивления внедрению до уровня, соизмеримого в ряде случаев с инерционным.

## Список литературы

- [1] А.П. Александров, С.Н. Журков. Явление хрупкого разрыва. ГТТИ, М.-Л. (1933). С. 51.
- [2] Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин. В сб.: ЛФТИ АН СССР „Поведение материалов при артиллерийских и сверхартиллерийских скоростях удара“. Ч. 2. Киев (1958). С. 134.
- [3] Ф.Ф. Витман, В.А. Степанов. В сб.: „Проблемы прочности твердого тела“. Изд-во АН СССР (1959). С. 207.
- [4] А.П. Алексеевский. Физика горения и взрыва 2, 99 (1966).
- [5] A. Tate J. Mech. Phys. Solids 15, 387 (1967).
- [6] Н.А. Златин. В сб.: „Баллистические установки и их применение в экспериментальной технике“. Наука, М. (1974). С. 344.
- [7] А.С. Власов, Ю.А. Емельянов, Е.Л. Зельбербранд, А.А. Кожушко, А.И. Козачук, Г.С. Пугачев, А.Б. Синани. Письма в ЖТФ 23, 2, 68 (1997).
- [8] А.С. Власов, Ю.А. Емельянов, Е.Л. Зельбербранд, А.А. Кожушко, А.И. Козачук, Г.С. Пугачев, А.Б. Синани. ФТТ 41, 10, 1785 (1999).
- [9] J. Sternberg. J. Appl. Phys. 65, 9 3417 (1989).

- [10] G. Hauver, W. Gooch, P. Netherwood, R. Bench, W. Perciballi, M. Burkins. Proc. 13th Int. Symp. on Ballistics. (1992). Vol. 3. P. 257.
- [11] А.А. Кожушко, И.И. Рыкова, А.Б. Синани. Физика горения и взрыва *1*, 89 (1992).
- [12] В.Б. Лазарев, А.С. Баланкин, А.Д. Изотов, А.А. Кожушко. Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов. Наука, М. (1993). С. 175.
- [13] E.L. Zilberbrand, A.S. Vlasov, J.U. Cazamias, S.J. Bless, A.A. Kozhushko. Int. J. Impact Eng. **23**, *1*, 995 (1999).
- [14] В.Р. Регель, И.А. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая теория прочности твердых тел. Наука, М. (1974). С. 560.
- [15] А.Б. Синани, В.А. Степанов. В сб.: „Исследования при измерении твердости“. Стандартиздат, М.-Л. (1967). С. 180.
- [16] О.Ф. Киреенко, А.М. Лексовский, В.Р. Регель. Механика полимеров *5*, 842 (1970).