

22. Morris C. E., Fritz J. N., Holian B. Quasi-elastic high pressure waves in 2024 Al and Cu // *Shock Waves in Condensed Matter*, 1981.— N. Y., 1982.— P. 382—386.
23. Kusubov A. S., van Thiel M. Dynamic yield strength of 2024 Al at 313 kbar // *J. Appl. Phys.*— 1969.— 40, N 2.— P. 893—894.
24. Дремин А. П., Канель Г. П., Черникова О. Б. Сопротивление пластической деформации алюминия АД1 и дюралюминия Д16 в условиях ударного сжатия // *ПМТФ.*— 1981.— № 4.— С. 132—138.
25. Curran D. R. Nonhydrodynamic attenuation of shock waves in Al // *J. Appl. Phys.*— 1963.— 34, N 9.— P. 2677—2690.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 3/IV 1991

УДК 531.355

А. А. Кожушко, И. И. Рыкова, А. Б. Синани

### СОПРОТИВЛЕНИЕ КЕРАМИК ВНЕДРЕНИЮ УДАРЯЮЩЕГО ТЕЛА ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Исследовано сопротивление керамических материалов внедрению ударяющего тела при скоростях внедрения выше скорости роста хрупкого разрушения. Установлено, что сопротивление, обусловленное прочностью керамики, достигает 20—30 ГПа и связано с их пластическим деформированием, реализующимся в условиях высокоскоростного удара. Сопротивление керамики деформированию задается характерным для них высоким уровнем динамического предела упругости и почти на порядок выше, чем для металлов. Существенное дополнение инерционного сопротивления керамики внедрению сопротивлением деформированию приводит к смещению границ применимости гидродинамической модели в область более высоких по сравнению с металлами скоростей.

Гидродинамическая теория высокоскоростного соударения твердых тел, основанная на модели идеальной несжимаемой жидкости, применима в условиях, когда сопротивление внедрению определяется инерционными силами, по сравнению с которыми собственным сопротивлением деформированию взаимодействующих тел можно пренебречь [1]. Если материал ударяющего тела рассматривать как идеальную жидкость, а материал преграды — как твердое тело с заданной прочностью, граница применимости гидродинамической модели определяется скоростью взаимодействия, при которой инерционное сопротивление преграды становится соизмеримым с сопротивлением ее деформированию [2, 3]. Эта скорость является функцией отношения динамической твердости материала преграды к его плотности  $H_D/\rho_1$ , т. е. зависит от удельной работы деформирования. Экспериментально показано, что для преград из металлических материалов гидродинамическая модель с достаточной степенью точности применима при скоростях соударения  $v \geq 1,5 \div 3,5$  км/с — в зависимости от величины  $H_D/\rho_1$  и плотности ударяющего тела  $\rho_2$  [4—6]. Очевидно, что с ростом  $H_D/\rho_1$  при заданной  $\rho_2$  граница применимости гидродинамической модели смещается в область более высоких скоростей.

Для керамических материалов, по оценке [7], гидродинамическая модель применима при  $v \gg 4$  км/с. Такая оценка согласуется с представлениями о реализации высокой прочности керамики при скоростях внедрения ударяющего тела  $u$ , превышающих предельную скорость роста хрупкого разрушения (трещин) в керамике [8, 9]. В этих условиях прочностные свойства хрупких тел (в отличие от квазистатического нагружения) определяются не дефектами структуры материала и их развитием, а прочностью межатомных связей [8, 10]. Значительная прочность межатомных связей, характерная для керамических материалов [10, 11], в сочетании с небольшой их плотностью должна обуславливать даже при весьма высоких скоростях соударения существенное дополнение инерционного сопротивления.

Проведена экспериментальная оценка величины сопротивления ряда керамик внедрению ударяющего тела, определяемого их прочностными

Материал преграды	$\rho_1 \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$H_M$ , ГПа	$R_1$ , ГПа
B <sub>4</sub> C	2,4	475	42—49	38,6+7,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8	407	20—25	26,0+5,5
SiC	3,0	330	25—30	22+4,2
SiO <sub>2</sub>	2,5	75,6	9—10	14,4+2,5

свойствами, как фактора, дополняющего инерционное сопротивление. Опыты проводились при скоростях соударения  $v = 3 \div 7$  км/с, которые обеспечивали внедрение в установившемся режиме со скоростями  $u$ , превышающими скорость роста трещин в керамике. Прочностная со-

ставляющая сопротивления внедрению определялась из известного уравнения давлений в точке торможения соударяющихся тел, обладающих заданной прочностью (например, [12]):

$$1/2 \cdot \rho_1 u^2 + R_1 = 1/2 \cdot \rho_2 (v - u)^2 + Y_2 \quad (1)$$

как слагаемое  $R_1$  давления в преграде. Материал ударяющего тела (Cu) рассматривался в (1) как идеальная жидкость ( $Y_2 = 0$ ): такое допущение вполне оправдано, так как инерционное давление в ударяющем теле на 2 порядка превышает предел текучести  $Y_2$ . Величина  $R_1$  рассчитывалась по данным измерения  $v$  и  $u$  [5, 9].

Экспериментальные результаты представлены в таблице, где приведены величины плотности  $\rho_1$  исследованных керамик, продольного модуля упругости  $E$  и микротвердости  $H_M$  по данным [11]. Полученные результаты свидетельствуют, что прочностное сопротивление керамик внедрению  $R_1$  по порядку величины составляет 0,1  $E$ , т. е. находится на уровне, близком к прочности материалов с совершенным строением.

Для понимания природы столь больших значений прочностной составляющей  $R_1$  сопротивления внедрению для керамических материалов следует обратиться к условиям нагружения преграды при высокоскоростном внедрении ударяющего тела. Их рассмотрение можно ограничить (как упрощающее допущение) условиями в точке торможения на оси ударяющего тела, где действуют максимальные напряжения. При высокоскоростном соударении большие напряжения в преграде локализованы в зоне непосредственно у контактной поверхности [4, 7, 12, 13], где материал одноосно деформируется, находясь в состоянии всестороннего сжатия. Такие условия аналогичны достигаемым при нагружении плоской ударной волной, поэтому в точке торможения к материалу преграды можно применить известные закономерности ударно-волнового нагружения твердых тел (например, [14, 15]).

Если в условиях всестороннего сжатия максимальные касательные напряжения  $\tau$  вызывают сдвиговые деформации  $\theta$ , превосходящие предельные значения, при которых прекращается рост напряжений ( $d\tau/d\theta = 0$ ), т. е. превышает предел упругости Гюгонио  $\sigma_{HEL}$ , вещество переходит в состояние пластического течения. Подобные переходы регистрируются и при ударно-волновом нагружении хрупких тел выше  $\sigma_{HEL}$  [14, 16, 17]. Таким образом, при высоких скоростях соударения, обеспечивающих внедрение со скоростями, большими скорости роста трещин, и достаточно высокий уровень сжимающих напряжений, создаются условия для пластического деформирования керамик. В этом случае прочностные свойства керамик определяются величиной  $\sigma_{HEL}$ , которая в несколько раз превосходит  $\sigma_{HEL}$  для пластичных металлических материалов [7].

Возможность пластического деформирования хрупких тел в условиях высокоскоростного удара позволяет подойти к вопросу о прочностном сопротивлении керамик внедрению ударяющего тела с позиций, аналогичным используемым для пластичных материалов.

Сопротивление деформированию при ударе характеризуется динамической твердостью  $H_D$ , которая связана с динамическим пределом теку-

части  $Y_D$  известной корреляционной зависимостью [4, 18]

$$H_D = (3 \div 3,5) Y_D, \quad (2)$$

а динамический предел текучести определяется из выражения

$$Y_D = \sigma_{\text{HEL}}(1 - 2\mu)/(1 - \mu), \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

На основе этих соотношений естественно сопоставить значения  $R_1$  и  $Y_D$  (по данным [7, 16, 17]). Такое сопоставление приведено на рис. 1, где линиями ограничена область, где выполняется корреляционная зависимость (2), экспериментальные точки: 1 —  $\text{SiO}_2$ , 2 —  $\text{SiC}$ , 3 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 4 —  $\text{V}_4\text{C}$ . Видно, что экспериментальные результаты удовлетворяют зависимости (2). Это позволяет отождествить величины  $R_1$  и  $H_D$  и в качестве прочностного сопротивления керамик принять сопротивление пластическому деформированию. К этому следует добавить, что экспериментальные значения  $R_1$  для керамик коррелируют с продольным модулем упругости  $E$  и близки к  $H_m$ . Указанные соотношения вполне закономерны.

Твердость в общем случае определяется критическим сдвиговым напряжением, т. е. пределом текучести, и коррелирует с показателями прочности межатомных связей и, следовательно, с модулями упругости. В керамиках предел текучести близок к теоретической прочности на сдвиг. Это связано с тем, что для керамик характерно большое решеточное сопротивление движению дислокаций (барьер Пайерлса), а также, как для поликристаллических материалов, велика степень дефектности. Кроме того, известно, что с уменьшением деформируемого объема снижается вероятность развития разупрочняющих материал дефектов, и характеристики прочности хрупких тел возрастают, достигая в пределе уровня, близкого к теоретическому. Такие условия достигаются при измерении микротвердости хрупких тел [11].

Уменьшению масштаба эксперимента (с точки зрения ослабления влияния разупрочнения) эквивалентны условия ударного взаимодействия, обеспечивающие в хрупком теле скорость внедрения, большую скорости роста трещин, составляющей  $\sim 0,3$  от продольной скорости звука. В этом случае прочностные свойства керамик реализуются на высоком уровне предела упругости Гюгонио и определяют достижение динамической твердости, близкой к их микротвердости, т. е. к теоретической прочности на сдвиг. Характерно, что при относительно низких скоростях соударения, когда фронт разрушения движется впереди поверхности контакта с ударяющим телом, прочностное сопротивление керамик резко падает и не превышает  $0,2-0,3$  от микротвердости [7].

Таким образом, анализ имеющихся данных дает основание считать, что в условиях высокоскоростного удара прочностное сопротивление преград и из пластичных (металлы), и из хрупких (керамики) материалов как фактор, дополняющий инерционное сопротивление внедрению, определяется сопротивлением деформированию, характеризуемым динамической твердостью. Природа реализации прочностных свойств этих классов материалов одинакова. С точки зрения сопротивления внедрению ударяющего тела керамики отличаются от металлов лишь количественно, обладая почти на порядок большей динамической твердостью. Связанная с этим большая величина удельной работы деформирования  $H_D/\rho_1$ , характерная для керамик, определяет и высокий уровень скоростей взаимодействия, задающий границу применимости к ним гидродинамической модели. Ниже приведены скорости внедрения  $u_n \cong 2(H_D/\rho_1)^{1/2}$ , составляющие нижнюю границу применимо-

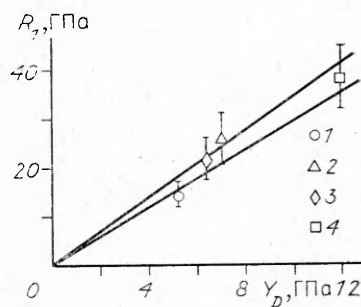


Рис. 1.

сти гидродинамической модели [3] для керамик и легких сплавов высокой твердости на основе алюминия В-95 и титана ВТ-6, характеризующихся наибольшей для металлических материалов величиной  $H_D/\rho_1$  [5]:

Материал	В <sub>4</sub> С	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	SiO <sub>2</sub>	В-95	ВТ-6
$H_D/\rho_1$ , МДж/кг	16,1	6,8	7,3	5,8	0,82	0,80
$u_n$ , км/с	7,5	4,9	5,1	4,5	1,7	1,65

Необходимо иметь в виду, что возможность единого подхода к пластичным и хрупким материалам должна быть ограничена рассмотрением сопротивления внедрению ударяющего тела. При скоростях внедрения выше скорости трещины пластическое деформирование керамик может реализоваться в области всестороннего сжатия, у поверхности контакта с ударяющим телом. При выходе из этой зоны нагруженный и деформированный материал, обладающий значительной упругой энергией (~50 Дж/г при напряжениях  $\sigma_{нел}$  для керамик) разгружается на свободной поверхности (стенках каверны). Разгрузка вызывает большие растягивающие напряжения и деформации, превосходящие предельные для керамик величины. В результате происходит интенсивное разрушение керамик и разлет материала со скоростью ~100 м/с.

В [19] предложена модель, согласно которой при внедрении кумулятивной струи в хрупкий материал (стекло) воздействие диспергированного материала преграды на струю вызывает нарушение ее сплошности и, как следствие, — сокращение эффективной длины. Авторы [19] рассматривают такое сокращение как единственный фактор, обуславливающий уменьшение по сравнению с расчетом для гидродинамической модели глубины внедрения кумулятивной струи в хрупкие материалы высокой твердости. Игнорировать влияние этого фактора нельзя, так же как и абсолютизировать его. В определенных условиях, зависящих от свойств кумулятивной струи и конструкции преграды, воздействие разрушенного материала может значительно уменьшить проникающую способность кумулятивной струи. Но как физический фактор, безусловно и закономерно определяющий уменьшение глубины внедрения ударяющего тела (и кумулятивной струи в том числе), следует рассматривать дополнение инерционного сопротивления керамик значительным сопротивлением деформированию.

Согласно гидродинамической модели, путь в преграде (приращение глубины каверны)  $\Delta L$  и длина  $\Delta l$  израсходованной на этом пути части ударяющего тела соотносятся как

$$\Delta L/\Delta l = \lambda, \quad (4)$$

где  $\lambda = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$ . Для преград с заданной динамической твердостью выражение (4) принимает вид [3]

$$\Delta L/\Delta l = \alpha\lambda, \quad (5)$$

где безразмерный коэффициент  $\alpha = (1 + 2H_D/\rho_1 u^2)^{-1/2}$  определяет степень уменьшения глубины внедрения по сравнению с расчетом для гидродинамической модели вследствие влияния сопротивления материала преграды деформированию. Коэффициент  $\alpha$  уменьшается по мере увеличения относительного вклада сопротивления деформированию в общее сопротивление материала преграды внедрению,

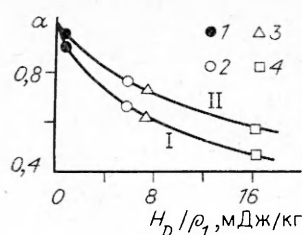


Рис. 2.

т. е. с ростом удельной работы деформирования  $H_D/\rho_1$  и снижением скорости внедрения  $u$ . Это демонстрируют приведенные на рис. 2 зависимости  $\alpha$  от  $H_D/\rho_1$  для скоростей внедрения 3 (I) и 4 км/с (II) и значения  $\alpha$  для сплава В-95 (1), SiO<sub>2</sub> (2), SiC (3) и В<sub>4</sub>С (4). Видно, что в керамиках величина  $\Delta L/\Delta l$  существенно отличается от рассчитанной по (4) для гидродинамической модели, в то время как для

сплава В-95 отличие от расчета не выходит за пределы экспериментальной погрешности.

Приведенные зависимости согласуются с экспериментальными данными [5, 8, 9] и свидетельствуют о заметном влиянии на параметры процесса высокоскоростного внедрения ударяющего тела реализуемых в этих условиях прочностных свойств керамик.

Основной вывод, который следует из экспериментальных результатов и их анализа, состоит в том, что при внедрении в керамику ударяющего тела со скоростями, превышающими скорость роста хрупкого разрушения, создаются условия для пластического деформирования керамики. Сопротивление керамик деформированию (динамическая твердость) определяется характерным для них высоким уровнем предела упругости Гюгонио и почти на порядок превосходит динамическую твердость металлов. Значительное влияние прочностных свойств керамик на сопротивление внедрению ударяющего тела ограничивает область применимости гидродинамической модели к материалам этого класса более высокими по сравнению с металлами скоростями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // УМН.— 1957.— 12, № 4.— С. 41.
2. Кинеловский С. А., Тришин Ю. А. Физические аспекты кумуляции // ФГВ.— 1980.— 16, № 5.— С. 266.
3. Златин И. А., Кожушко А. А. Гидродинамические модельные представления в теории высокоскоростного взаимодействия твердых тел и пределы их применимости // ЖТФ.— 1982.— 52, № 2.— С. 330.
4. Perez E. Etude experimental et theoretique de la penetration de sibles metalliques semi-infines par des projectiles et de vitesse superieure a 2000 m/s // Sciences et techniques de l'armement.— 1982.— 56, N 1.— P. 111.
5. Златин И. А., Кожушко А. А., Рыкова И. И. Экспериментальная оценка границ применимости гидродинамической модели к процессу соударения твердых тел // ФГВ.— 1989.— 25, № 4.— С. 41.
6. Кинеловский С. А., Маевский К. К. Проникание кумулятивной струи в прочную преграду // ПМТФ.— 1989.— № 2.— С. 150.
7. Sternberg J. Material properties determining the resistance of ceramics to high velocity penetration // J. Appl. Phys.— 1989.— 65, N 9.— P. 3417.
8. Кожушко А. А., Рыкова И. И., Изотов А. Д. и др. Прочность и разрушение керамических материалов при высокоскоростном деформировании // Изв. АН СССР. Неорг. материалы.— 1987.— 23, № 12.— С. 2078.
9. Златин И. А., Кожушко А. А., Рыкова И. И. Реализация высокопрочного состояния стекла при больших скоростях нагружения // Письма в ЖТФ.— 1988.— 14, № 16.— С. 1498.
10. Изотов А. Д., Лазарев В. Б. Теоретическая прочность керамических материалов // Изв. АН СССР. Неорг. материалы.— 1985.— 21, № 5.— С. 706.
11. Сверхтвердые материалы/Под ред. И. И. Францевича.— Киев: Наук. думка, 1980.
12. Сагомонян А. Я. Проникание.— М.: Изд-во МГУ, 1984.
13. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях/Под ред. И. А. Златина, Г. И. Мишина.— М.: Наука, 1974.
14. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН.— 1965.— 85, № 2.— С. 197.
15. Могилевский М. А., Мышкин И. О. О теоретической прочности кристалла в условиях ударно-волнового нагружения // ФГВ.— 1988.— 24, № 6.— С. 106.
16. Дремин А. Н., Адауров Г. А. Поведение стекла при динамическом нагружении // ФТТ.— 1964.— 6, № 6.— С. 898.
17. Gust W., Roice E. Dynamic yield stress of ceramics // J. Appl. Phys.— 1971.— 42, N 1.— P. 276.
18. Tate A. A theory of deceleration of long rods after impact // J. Mech. Phys. Solids.— 1967.— 15, N 2.— P. 387.
19. Solve G., Caguoux J. The behaviour of pyrex glass against a shaped charge jet // Bull. Am. Phys. Soc.— 1989.— 34, N 7.— P. 1741.

г. Ленинград

Поступила в редакцию 19/III 1990