

СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО СЖАТЫХ КОРУНДЕ, КАРБИДЕ БОРА И КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

А.Ю. Долгобородов, И.М. Воскобойников

В связи с расширением использования керамических материалов в области ударно-волновых технологий и высоких давлений значительный интерес представляет исследование их физических свойств при динамическом нагружении. Привлекательным является то, что при сравнительно невысокой плотности эти материалы обладают необычно высокими значениями скоростей звука в начальных условиях (около 10 мм/мкс) и динамических пределов упругости (5–15 ГПа). К настоящему времени накоплено значительное число данных по сжимаемости и пределам упругости при ударно-волновом нагружении таких материалов (см., например, [1–4]), что же касается процессов разгрузки ударно-нагруженного состояния, то здесь имеются только единичные работы. В [5] были измерены скорости звука за ударными фронтами для кварца и полевого шпата в диапазоне давлений 20–50 ГПа. Измеренные значения оказались близки к оценкам объемной скорости звука, что свидетельствует о потере прочности этих силикатов за ударным фронтом. Авторы связывали это с частичным плавлением материала и образованием за фронтом ударной волны смеси из твердых частиц и расплава на их поверхности. В данной работе проведены измерения скоростей звука в материалах с более высокими пределами упругости: корунде Al_2O_3 , карбиде бора B_4C и карбиде кремния SiC .

Образцы изготавливались горячим прессованием порошков. Содержание примесей в исходном продукте составляло менее 2%. Плотности образцов и упругие свойства материалов по данным [3,4] приведены в табл. 1, где ρ_{00} — плотность образцов; ρ_0 — теоретическая плотность; C_L и C_V — продольная и объемная скорость звука в начальных условиях; σ_H — динамический предел упругости; C_0 и b — коэффициенты в зависимости скорости пластической ударной волны от массовой скорости, записанной в виде $D = C_0 + bU$ (получены обработкой по методу наименьших квадратов данных [3,4] в диапазоне массовых скоростей 0.5–3.0 мм/мкс).

Для оценки скоростей звука за ударными фронтами использовались значения скоростей волн разрежения, определяемые по методу догоняющей разгрузки с использованием регистрации временного изменения свечения ударных фронтов в индикаторе (CCl_4), расположенном за образцами [6,7]. Метод обладает высокой чувствительностью благодаря сильной зависимости яркости излучения от амплитуды давления на фронте ударной волны при однократном сжатии многих органических жидкостей индикаторов при $P > 8$ ГПа (для CCl_4 при $P < 21$ ГПа яркостная температура может быть описана линейной зависимостью $T = 249 + 131 \cdot P$). Времена нарастания сигналов при вхождении в CCl_4 ударных волн с давлением более 8 ГПа составляют ~ 50 нс. При меньших давлениях использование CCl_4 становится неэффективным, поскольку возрастает толщина излучающего слоя и фронт ударной волны становится частично прозрачным.

Таблица 1.

Материал	ρ_{00} , г/см ³	ρ_0 , г/см ³	C_L , мм/мкс	C_B , мм/мкс	C_L/C_B	σ_H , кбар	C_0	b
Al ₂ O ₃	3.91	3.96	10.59	7.83	1.39	134 ± 8	8.33	1.77
B ₄ C	2.50	2.52	13.78	9.63	1.43	154 ± 10	8.11	1.61
SiC	3.10	3.22	11.40	7.71	1.48	80 ± 30	8.29	0.62

Яркость излучения в опытах регистрировалась в нормальном направлении к ударному фронту в индикаторе через диафрагму диаметром 5 мм, что исключало влияние боковых волн разрежения за время регистрации. Для измерений использовалась электронно-оптическая установка, состоящая из оптической системы, фотоэлектронных умножителей ФЭУ-92 и ФЭУ-119 и светофильтров для выделения двух участков спектра, на которых регистрировались яркостные температуры с эффективными длинами волн 420 и 720 нм. Для регулирования светового потока использовался набор нейтральных светофильтров НС-8. Запись фототоков проводилась на осциллографах С1-75 и С9-16. Для градуировки установки использовалась регистрация яркости свечения нормальной детонации химически чистого нитрометана, яркостная температура которой принималась равной 3700 К.

Плоские ударные волны в исследуемых образцах создавались ударом разогнанной продуктами взрыва заряда ВВ дюралюминиевой пластины диаметром 40 мм. После прохождения ударной волны через достаточно тонкие образцы в индикатор регистрировалось постоянное в течение времени τ свечение, которое резко спадало после момента прихода к ударному фронту в индикаторе волны разгрузки с тыльной поверхности ударника. С увеличением толщины образцов времена сохранения постоянной яркости (давления на фронте ударной волны в индикаторе) τ уменьшается и трапециидальная форма импульса переходит в треугольную. Толщина образца H , при которой происходит переход к треугольной форме, принимается за базу, на которой тыльная волна разгрузки догоняет ударный фронт в образце. По значениям τ при различных толщинах образца h строилась зависимость, экстраполяция которой к нулевому значению h определяет величину H . Для случая различных материалов ударника и образца скорость звука за ударным фронтом в образце определяется по выражению

$$C_2 = H (D_2 - u_2) ((H D_2^{-1} - t_2) D_2)^{-1},$$

$$t_2 = h_1 (C_1 + u_2 + D_1 - w) (D_1 C_1)^{-1},$$

где h_1 — толщина ударяющей пластины, D_1 — скорость отраженной волны в ударнике, C_1 — скорость звука в ударнике за этой волной, D_2 и u_2 — скорость ударной волны и массовая скорость в образце (определяются по ударным адиабатам), w — скорость ударника.

Для материала ударника — дюралюминия Д 16 использовалась ударная адиабата в виде $D_1 = 5.328 + 1.338u_1$, $\rho_0 = 2.786$ г/см³, скорость C_1 определялась с учетом данных [7] для образцов дюралюминиевого проката по соотношению $C_1 = 1.16(D_1 + 1.338u_1)(D_1 - u_1)/D_1$. Помимо скорости звука в этих же опытах определялись точки на изоэнтропах после разгрузки керамики в СС1₄.

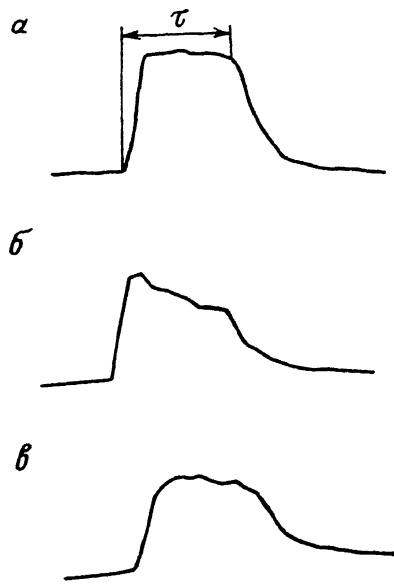
Таблица 2.

Al ₂ O ₃		B ₄ C		SiC	
h, мм	τ, мкс	h, мм	τ, мкс	h, мм	τ, мкс
2.45	0.60	2.35	0.64	2.35	0.67
2.50	0.55	2.49	0.65	2.54	0.66
2.99	0.54	2.50	0.62	4.00	0.31
3.00	0.53	2.70	0.56	5.80	0.14
3.68	0.42	3.10	0.60		
4.02	0.44	3.13	0.60		
4.93	0.36	3.22	0.57		
7.07	0.06	4.03	0.52		
		4.05	0.45		

Использование указанной выше процедуры для определения C_2 в материалах с двуволновой структурой ударного фронта, которая в исследуемом диапазоне наблюдается для керамики, вообще говоря, не совсем правильно. Впереди пластической волны распространяется упругий предвестник, который создает в индикаторе слабую ударную волну с перепадом давления 2–3 ГПа. Затем происходит циркуляция волн с нарастанием амплитуды до величины упругого предвестника и только затем до конечного состояния, определяемого интенсивностью пластической волны. В опытах свечение волн в индикаторе наблюдается после того, как последняя волна догонит ударный фронт, образованный в индикаторе упругим предвестником, поскольку интенсивность свечения от первичных волн мала из-за их амплитуды для регистрации, но достаточна для экранировки слабого излучения вторичных волн, поскольку температуры двукратного сжатия значительно ниже, чем однократного. Регистрируемые профили свечения ударных фронтов в индикаторе имеют форму, близкую к трапецидальной. Влияние предвестников не сказывается на нарастании сигналов, однако при определении скоростей волн разрежения нужно учитывать поправки на уменьшение времени постоянного свечения волн в индикаторе τ . Корректный расчет этих поправок затруднителен, однако можно оценить их максимальные значения для каждой конкретной толщины образцов (величина поправки меняется от 20 до 200 нс в зависимости от материала и толщины образца).

Полученные экспериментальные данные по измерениям τ без учета поправок приведены в табл. 2. Скорость ударника в этих опытах составляла 3.64 мм/мкс при толщине 1.90 мм.

Следует отметить некоторые особенности в виде профилей волн в индикаторе после различных образцов. На рисунке показаны характерные осциллограммы для опытов с разными материалами. Если после образцов Al₂O₃ в индикаторе регистрируются профили, аналогичные получаемым после сплошных металлических пластин, т.е. с постоянным в течение τ свечением, то после образцов B₄C регистрируются профили с небольшим спадом от начала до момента прихода волны разгрузки. Величина давления в SiC спадает от 15.2 до 14.3 и от 17.2 до 16.0 ГПа при скоростях ударника 3.20 и 3.62 мм/мкс соответственно. Такой спад может быть вызван протеканием за ударным фронтом процесса, сходного



Осциллограммы записи свечения ударных фронтов в четыреххлористом углеороде, помещенном за образцами:

a — Al_2O_3 , $б$ — B_4C , $в$ — SiC ;
 h , мин: a — 2.50, $б$ — 3.13, $в$ — 2.54;
 τ , мкс: a — 0.55, $б$ — 0.60, $в$ — 0.66.

с превращением вещества с увеличением удельного объема. Для образцов SiC помимо некоторого завала при нарастании сигнала до максимальных значений проявляется также некоторая особенность, связанная с расщеплением волны разгрузки, поскольку на спаде регистрируются две близко расположенные точки перегиба. В [4] отмечались особенности ударного сжатия SiC , возможность полиморфного превращения при давлении 24 ГПа и наличие трехударной конфигурации ударной волны. При разгрузке также возможно проявление расщепления волны, связанного с изменением кристаллической структуры материала.

Полученные зависимости $\tau(h)$ были обработаны по методу наименьших квадратов и найдены значения H при $\tau = 0$. Данные приведены в табл. 3. Здесь P_2 — давление за фронтом пластической ударной волны в образце, C_2 — значения скорости звука по регистрациям яркости свечения волны в индикаторе, C'_2 — наименьшие значения скорости звука с учетом максимальных поправок на влияние упругих предвестников на регистрацию. Высокие значения скоростей звука свидетельствуют об отсутствии потери прочности за фронтами ударных волн в корунде и карбидах в отличие от силикатов [5]. Волны разрежения распространяются в них со скоростями продольных волн.

Высокие скорости волн разрежения могут приводить к некоторым полезным с точки зрения технических приложений эффектам. В частности, если большая часть разгрузки происходит с высокими скоростями в упругой области, то в таких материалах должны быстро затухать ударные волны конечной длительности. Для проверки этого была выполнена серия экспериментов по определению коэффициента затухания ударных волн, образующихся при контактом взрыве заряда ВВ. Постановка опытов была подобной использованной в [8]. Образцы помещались на торце заряда октогена плотности 1.80 г/см^3 толщиной 10 мм. За образцами помещался CCl_4 . О затухании судили по уменьшению передаваемых в индикатор давлений с увеличением толщины образцов. Полученные данные

Таблица 3.

Материал	u_2 , мм/мкс	D_2 , мм/мкс	P_2 , ГПа	H , мм	C_2 , мм/мкс	C'_2 , мм/мкс	P_{CCl_4} , ГПа	P_3 , ГПа
Al ₂ O ₃	1.36	9.92	52.8	7.8	16.2 ± 0.2	15.2	15.7 ± 0.2	17.2
	1.40	9.97	54.6	—	—	—	17.6 ± 0.3	18.0
B ₄ C	1.44	10.43	37.5	—	—	—	15.2 — 14.5	16.5
	1.65	10.77	44.4	8.2	18.8 ± 0.3	16.4	17.2 — 16.0	20.3
	1.75	10.93	47.8	—	—	—	20.0 — 19.5	22.2
SiC	1.60	9.28	46.0	6.7	16.6 ± 0.3	13.0	17.8 ± 0.3	20.2
	1.69	9.34	48.9	—	—	—	19.5 ± 0.5	22.0

Примечание. Для B₄C вместо ошибок P_{CCl_4} указаны значения давления в начале и конце записи.

обрабатывались под экспоненциальную зависимость $P(h) = P_0 \exp(-\alpha h)$, где P_0 — давление в CCl₄ при $h = 0$, α — коэффициент затухания. Было получено для Al₂O₃ $P_0 = 17.6 \pm 0.1$ и $\alpha = 1.71 \pm 0.02 \cdot 10^{-1}$, для B₄C $P_0 = 20.0 \pm 0.2$ и $\alpha = 1.70 \pm 0.02 \cdot 10^{-1}$, для SiC $P_0 = 18.8 \pm 0.6$ и $\alpha = 1.39 \pm 0.04 \cdot 10^{-1}$ (P_0 в ГПа, α в мм⁻¹). Для сравнения можно привести данные из [8] по коэффициентам затухания в других материалах для алюминия $\alpha = 0.48 \cdot 10^{-1}$, йодистого калия $\alpha = 0.71 \cdot 10^{-1}$, нитрида бора $\alpha = 1.00 \cdot 10^{-1}$, расчет коэффициента затухания для сплошного Al₂O₃ в предположении, что разгрузка происходит в пластической волне дает $\alpha = 0.25 \cdot 10^{-1}$. Т.е. для исследованных материалов можно сделать вывод, что разгрузка в значительной степени происходит в упругой области и приводит к очень высоким коэффициентам затухания в отличие от других материалов.

Упругая разгрузка приводит также к сильной несимметричности изоэнтроп расширения по отношению к ударным адиабатам в координатах давление-массовая скорость. В табл. 3 приведены значения давлений в CCl₄, полученные в опытах и рассчитанные в предположении зеркальности изоэнтроп разгрузки и ударных адиабат (P_3). Налицо отклонение от зеркальности в сторону уменьшения давления при равных массовых скоростях для всех трех материалов.

Таким образом, проведенные измерения скоростей звука и коэффициентов затухания в образцах корунда, карбида бора и карбида кремния показали сохранение их высоких прочностных свойств в волнах разгрузки при динамическом нагружении до 50 ГПа. Волны разрежения в этих материалах распространяются со скоростями продольных волн, а значительная часть спада давления происходит в упругих волнах, что определяет высокие значения коэффициентов затухания ударных волн.

Список литературы

- [1] Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1968. 312 с.
- [2] Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 299-427.
- [3] Gust W.H., Royce E.B. // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. N 1. P. 276-295.
- [4] Gust W.H., Holt A.c., Royce E.B. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 44. N 2. P. 550-560.

- [5] *Grady D.E., Murri W.J., De Garly P.S.* // *J. Geophys. Research.* 1975. Vol. 80. N 35. P. 4857-4861.
- [6] *Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М.* // *ФГВ.* 1989. Т. 25. № 1. С. 88-93.
- [7] *Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю.* // *Детонация.* Черногловка, 1989. С. 91-94.
- [8] *Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю.* // *Детонация и ударные волны.* Черногловка, 1986. С. 9-13.

Институт химической физики им. Н.Н.Семенова
Москва

Поступило в Редакцию
4 марта 1992 г.
