

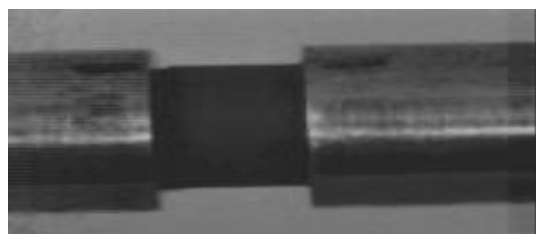
ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КАРБИДА БОРА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ПОВЕДЕНИЯ  
ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗКАХ

В.А. Огородников, С.В. Ерунов, А.И. Лебедев, К.Н. Панов, А.В. Кальманов, Г.Я. Карпенко,  
В.В. Ковалдов, А.В. Романов, Е.В. Кулаков, А.С. Пупков, С.Ю. Согрин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Ударно-волновые свойства карбида бора исследованы достаточно подробно в диапазоне давлений на фронте ударной волны от 13 до 220 ГПа с использованием метода отражения и лазерной интерферометрии [1]-[3]. В области давлений выше 13 ГПа зарегистрирована двух волновая конфигурация, которая интерпретирована как упругопластический переход. Однако область более низких давлений менее исследована и поэтому не исключено, что при давлениях выше 13 ГПа имеет место фазовый, а не упругопластический переход. Так, например, в нитриде бора при давлении 12 ГПа наблюдали полиморфное превращение из гексагональной модификации в кубическую [4]. В связи с этим возникла необходимость в уточнении поведения ударной адиабаты карбида бора в области более низких давлений ( $P \leq 13$  ГПа).

С изготовленными во ВНИИЭФ образцами из карбида бора были проведены исследования динамической прочности на сжатие и растяжение. Опыты проводили с использованием составного стержня Гопкинсона [5] и баллистической установки БУТ-76 [6]. На рисунке 1 приведены фотографии образцов до и после испытания на составном стержне Гопкинсона. Результаты опытов приведены на рисунке 2 в виде  $\sigma$ - $\epsilon$  и  $W$ - $t$  диаграмм, а в таблице приведены некоторые исходные данные по материалу образцов и прочностные характеристики, полученные при обработке результатов опытов.

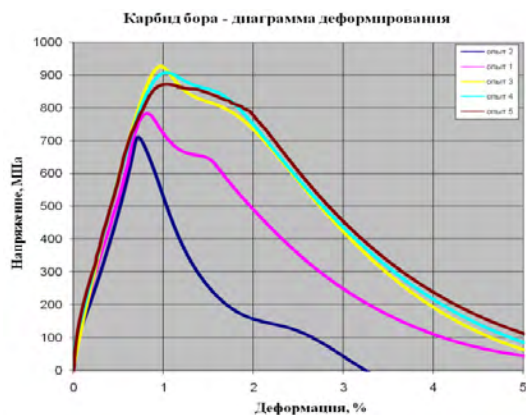


/а/

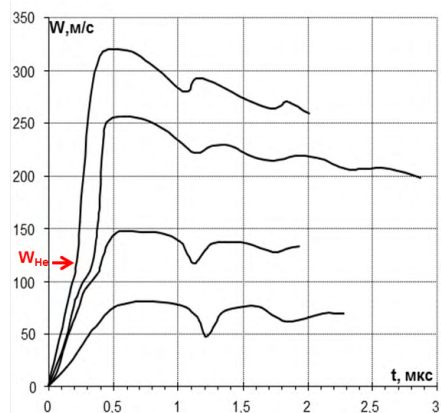


/б/

Рисунок 1. Фотографии образцов до /а/ и после /б/ испытания на составных стержнях Гопкинсона



/а/



/б/

Рисунок 2. Диаграммы сжатия  $\sigma(\epsilon)$  – (а) и профили скорости свободной поверхности – (б) образцов из карбида бора, полученные на составном стержне Гопкинсона и БУТ-76 соответственно

Таблица. Результаты ударно-волновых испытаний

Материал	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_l$ , км/с	$c_0$ , км/с	$\nu$	$h$ , мм	$W_0$ , м/с	$\sigma_{HE}$ , ГПа	$Y$ , ГПа	$D$ , км/с	$P$ , ГПа	$\sigma_p$ , ГПа	$\Delta_{отк.}$ , мм
V <sub>4</sub> C+6%TiC	2,50±0,01	12,5±0,1	9,1±0,2	0,22	9,8	99	-	-	-	1,08	0,45	2,1-3,8
					9,7	160	1,39	0,99	11,2	1,65	0,57	
					9,8	269	1,15	0,82	11,6	2,83	0,52	
					9,8	348	-	-	12,5	3,98	0,59	

В таблице приняты следующие обозначения:

$\rho_0$  – начальная плотность материала образцов;

$c_l, c_0$  – продольная и объемная скорость звука;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$h$  – толщина образца;

$W_0$  – скорость ударника из алюминия толщиной 5 мм;

$\sigma_{HE}$  – упругий предвестник Гюгонио;

$P, D$  – давление и скорость УВ;

$Y = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \rho_0 c_l W_{HE}$  – динамический предел текучести;

$\sigma_p = 0,5 \rho_0 c_0 (W_{max} - W_{min})$  – откольная прочность;

$\Delta_{отк.}$  – толщина откольного слоя;

$\sigma_v$  – предел прочности на сжатие.

Из данных рисунка 2 и таблицы следует, что динамическая прочность на сжатие  $\sigma_v=700-900$  МПа  $\sigma_v$ , ГПа 000 МПа и растяжение  $\sigma_p=500-600$  МПа более, чем на порядок меньше указанной в [1]-[3] величины. Это подтверждает наше предположение о том, что при давлениях 13,7-16,2 ГПа в [1]-[3] наблюдали не упругопластический, а фазовый переход. Действительно, если рассмотреть полученные результаты в  $\sigma$ - $V$  координатах (рисунок 3), с учетом предположения об упругопластическом ( $\sigma_{HE} \sim 1,1$  ГПа) и фазовом ( $\sigma_H \sim 13,7$  ГПа) переходах, то можно говорить о корреляции результатов работ [1]-[3] и данной работы.

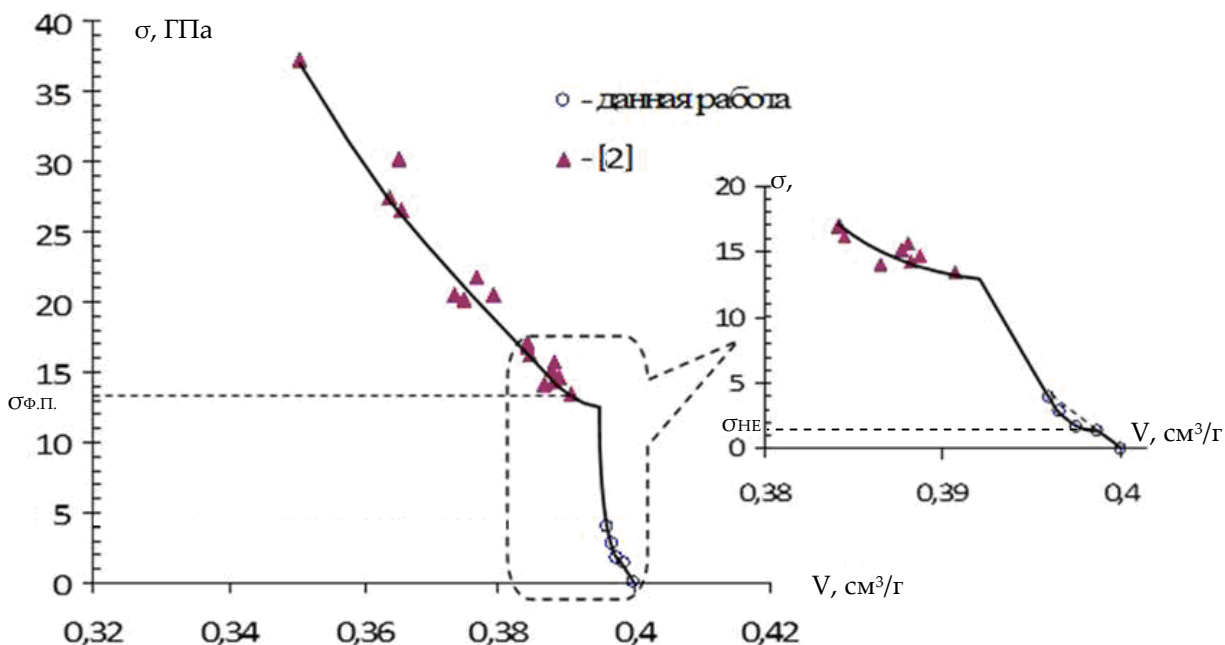
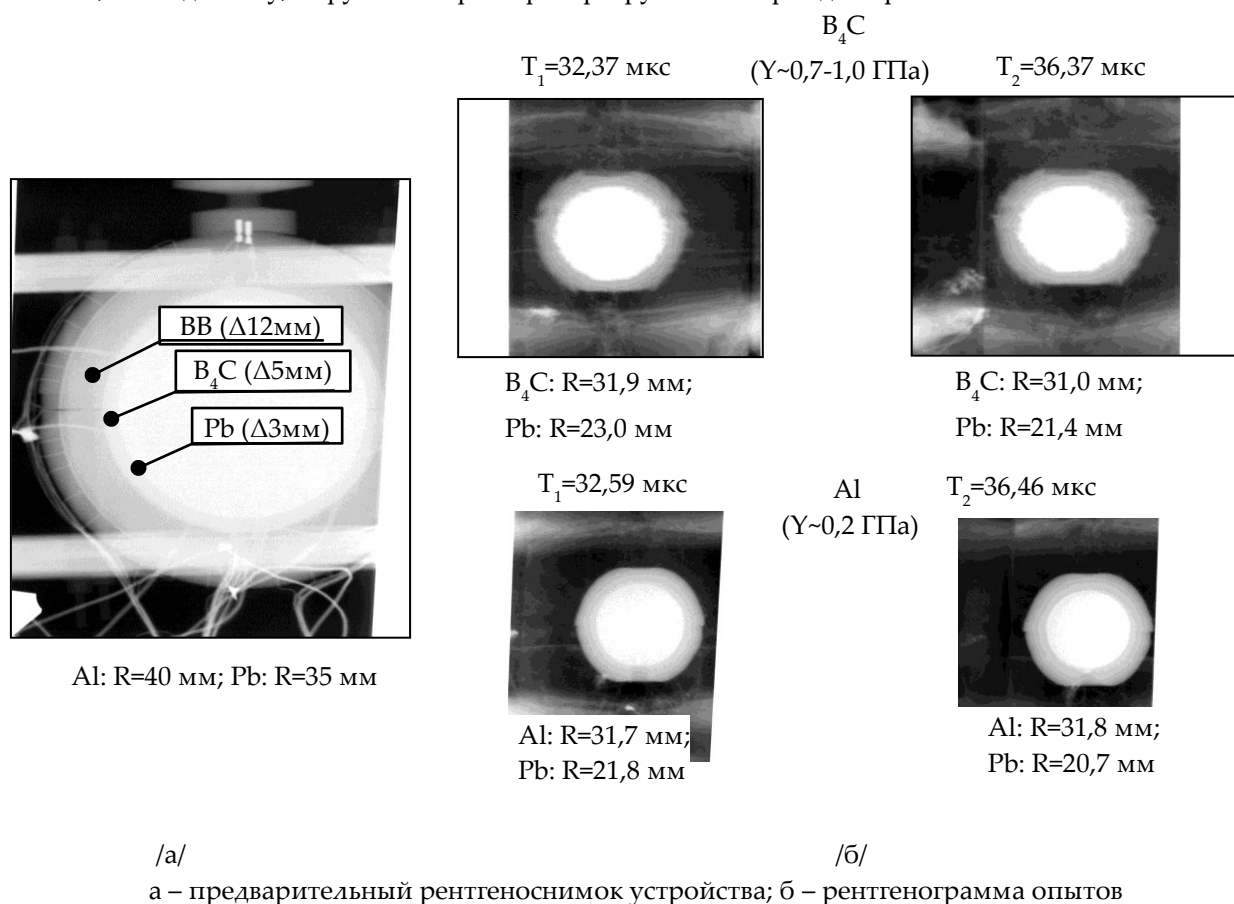


Рисунок 3. Сравнение экспериментальных данных, полученных в данной работе и в [1], представленных в  $\sigma$ - $V$  координатах

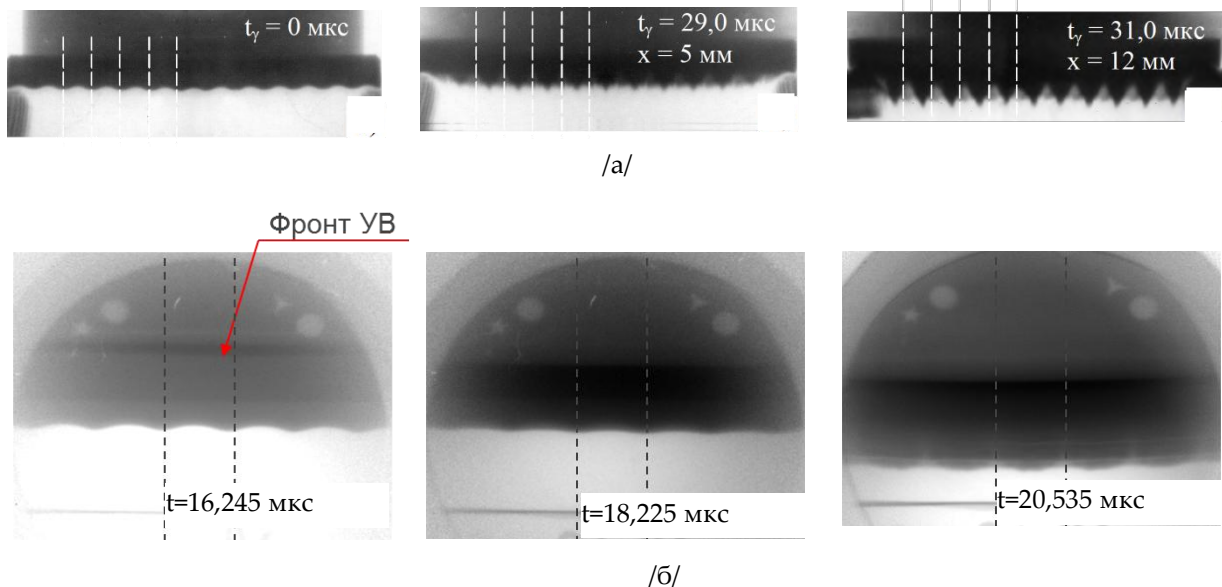
Дополнительно проведены специальные опыты с экспериментальным устройством, в котором исследовали схождение двухслойных оболочек, разгоняемых с помощью зарядов взрывчатого вещества, в постановке подробно описанной в [7]. В отличие от [7] внутреннюю оболочку из меди заменяли на оболочку из свинца, а наружную оболочку выполняли из алюминия марки АМг6 ( $\gamma=0,2$  ГПа [8]) или карбида бора.

На рисунке 4б приведены рентгенограммы опытов с такими оболочками на два одинаковых момента времени  $t_1 \approx 32,45$  мкс и  $t_2 \approx 36,45$  мкс, которые свидетельствуют о незначительном отличие положения наружной границы сжатой оболочки из свинца как при использовании наружной оболочки из алюминия, так и из карбида бора. Это обстоятельство указывает на близкие диссипативные потери при сжатии оболочек, определяемые динамическим пределом текучести их материала. Полученные результаты свидетельствуют о незначительном различии влияния прочности материала при использовании обеих легких оболочек (из алюминия или карбида бора) на динамику сжатия оболочек из свинца, что также подтверждает наше сомнение относительно аномально высокой прочности карбида бора. Некоторое отличие наблюдается в менее гладкой наружной поверхности оболочки из свинца, расположенной под оболочкой из карбида бора, что связано, по-видимому, с хрупким характером разрушения карбида бора.



**Рисунок 4.** Результаты экспериментов по исследованию двухслойных оболочек алюминий-свинец и карбид бора-свинец

Отмеченная особенность хрупкого характера разрушения карбида бора особенно наглядно проявилась в сравнительных опытах с разгоном продуктами взрыва пластин из алюминия и карбида бора с профилированной свободной поверхностью, в постановке аналогичной, как и в [9]. На рисунке 5, приведены рентгенограммы свободной поверхности пластин из алюминия и карбида бора на два момента времени.



**Рисунок 5.** Радиограммы, полученные в опытах с пластинами из алюминия – (а) и карбида бора – (б)

В обоих случаях возмущения формируются в области проекции начального расположения выточек: в виде струй у пластин из пластичного алюминия и в виде откольных тарелочек у пластин из хрупкого карбида бора.

Таким образом, приведенные в данном сообщении результаты свидетельствуют о том, что динамическая прочность карбида бора достаточно высока ( $Y=0,8-1,0$  ГПа,  $\sigma_p=0,5-0,6$  ГПа), но она на порядок меньше приведенных в [1]-[3] значений.

### Список литературы

1. W.R. Gust, E.B. Royce, Dynamic Yield Strengths of B<sub>4</sub>C, BeO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics, // J. Appl. Physics, 1971, Vol. 42, № 1, p. 276-295.
2. E.B. Zaretsky, V.E. Paris, G.I. Kanel, A.S. Savinykh, Evidenced of ductile and brittle responses of ceramics under shock wave loading, // J. Phys. IV, France, 2003, 110, p. 917-922.
3. T.J. Holmgvist and T.J. Vogler, The response of silicon carbide and boron carbide subjected to shock-release-reshock plate-impact experiments, // Dymat, 2009, p. 119-125.
4. И.Н. Дулин, А.В. Альтшулер, В.Я. Ващенко, В.Н. Зубарев, Фазовые превращения нитрида бора при динамическом сжатии, // ФТТ, 1969, т. 11, вып. 5, с. 1252-1257.
5. В.П. Музыченко, С.И. Кашенко, В.А. Гусько, Применение составного стержня Гопкинсона при исследовании динамических свойств материалов, // Обзор. Заводская лаборатория. 1986, №1, с. 58-66.
6. В.Н.Минеев, В.П.Погорелов, А.Г.Иванов и др, Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках, // ФГВ, 1978, т.14, №3, с. 129-133.
7. И.В.Храмов, С.Ю.Седов, Р.С.Вахмистров, К.Л.Михайлюков, В.А.Аринин, Б.И.Ткаченко, В.Б.Титова, Ю.В.Янилкин, С.С.Соколов, И.Н.Павлуша, Т.В.Семенова, С.В.Потапов, И.А.Страбыкина, Е.Ю.Храмова, В.Р.Крутько, М.В.Вершинин, Е.А.Маврина, Г.С.Фирсова, Р.И.Козлова, В.И.Тимарёва, С.В.Делова, Верификация расчётов газодинамики с использованием результатов экспериментов по протонной радиографии, // Доклад на 11-й Международной конференции «Забабахинские научные чтения» (16-20 апреля 2012 г., т. Снежинск).
8. Г.И. Канель, С.В. Разоренов, В.Е. Фортов, Кинетика разрушения алюминиевого сплава АМг6М в условиях откола, // ПМТФ, 1984, №5, с.60-64.
9. В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, А.В. Романов и др, Моделирование струйных течений при выходе ударной волны на профилированную свободную поверхность, // ПМТФ, 2007, т.48, №1.