

ричности. При увеличении массы заряда ВВ отмечено, что сосуд 4 разрушился с образованием осколков при нагружении взрывом с  $p_{дин} = 259$  МПа (расчетное разрушающее давление  $p_{ст} = 212$  МПа); у сосуда 3 при нагружении взрывом ( $p_{дин} = 228$  МПа) разрушились внутренний слой (длина трещины в среднем 18 мм) и резьбовое соединение горловины с пробкой ( $p_{ст} = 175$  МПа). У сосуда 1 при нагружении ( $p_{дин} = 235$  МПа) разрушился внутренний слой, образовалась трещина протяженностью 40 мм и разрушилось резьбовое соединение горловины с пробкой ( $p_{ст} = 100$  МПа). Сосуд 2 был подвергнут нагружению взрывом до  $p_{дин} = 176$  МПа ( $p_{ст} = 110$  МПа). Визуальное микроследование поверхностей сосуда, а также проверка на герметичность не выявили очагов разрушения.

Из анализа выполненного комплекса работ, включающего выбор конструкции СВД, изготовление и испытание внутренним взрывным нагружением при положительной температуре, следует:

1) предложенная конструкция и технология изготовления обеспечивают высокую конструктивную прочность по условиям динамических испытаний. Принимая во внимание одно из основных нормативных требований к сосуду такого типа (для применения в механизме натяжения и сдавания трактора Т-800 [2], где максимальное рабочее давление в режиме эксплуатации не превышает 30 МПа), можно заключить, что предложенная конструкция СВД имеет в среднем шестикратный запас прочности;

2) четырехслойный сферический сосуд, выполненный из сталей 09Г2 и 12ХГНМФ, обладает высокой сопротивляемостью хрупкому разрушению в условиях динамического нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сериков С. В., Пашков Ю. И. и др. Механика разрушения многослойных и армированных сосудов давления сферического типа при пониженной температуре испытания // Проблемы прочности.— 1990.— № 1.— С. 29—33.
2. Махутов П. А., Сериков С. В. и др. Количественное сопоставление характера разрушения сферических оболочек давления при пониженной температуре испытания // Проблемы машиностроения и автоматизации.— 1991.— № 1.— С. 64—73.
3. Взрывные явления. Оценка и последствия. Пер. с англ./Бейкер и др. Под ред. Я. Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда.— М.: Мир, 1986.— Кн. 1.
4. Александров А. П., Иванов А. Г. и др. Исследование пластического деформирования стальных сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении // ПМТФ.— 1982.— № 6.— С. 103—108.
5. Иванов А. Г., Учаев А. А. и др. Импульсное разрушение геометрически подобных объектов // Докл. АН СССР.— 1981.— 261, № 4.— С. 868—873.

г. Днепропетровск

Поступила в редакцию 27/VIII 1991,  
после доработки — 17/II 1991

УДК 666.233 : 534.222

Н. В. Козырев, Е. С. Голубева

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ ИЗ СМЕСЕЙ ТРОТИЛА С ГЕКСОГЕНОМ, ОКТОГЕНОМ И ТЭНОМ

Экспериментально исследованы зависимости выхода конденсированного углерода, ультрадисперсного алмаза (УДА) и доли УДА в углероде от состава литых смесей тротила с гексогеном, октогеном и тэном при детонации во взрывной камере. Изучены смеси с содержанием ТНТ от 90 до 35 %. Показано, что выход конденсированного углерода линейно падает с уменьшением количества тротила в смеси; доля алмазной фазы в углероде при этом монотонно возрастает (для смесей с тэном) либо выходит на стационар (для смесей с гексогеном, октогеном). Зависимость выхода УДА от состава ВВ носит экстремальный характер: максимум выхода достигается при содержании тротила 60—70 %.

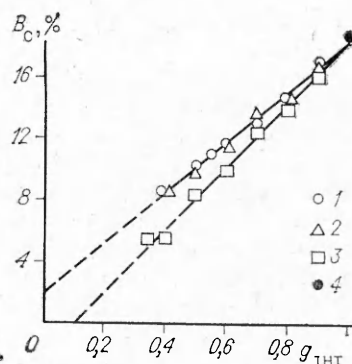


Рис. 1. Зависимость выхода конденсированного углерода  $B_c$  от состава смесей тротила с гексогеном (1), октогеном (2), тэном (3) (4 — прессованный ТНТ).

Ультрадисперсные алмазы (УДА) образуются при детонационном разложении мощных взрывчатых веществ (ВВ) с отрицательным кислородным балансом из собственного углерода, входящего в их состав. Для синтеза УДА могут быть использованы различные индивидуальные и смесевые ВВ. Наиболее часто с этой целью применяются смеси тротила с более мощными ВВ — сенсibilизаторами: гексогеном, октогеном, триаминотринитробензолом [1—3]. Однако систематические исследования по влиянию состава различных смесей на выход УДА отсутствуют, а имеющиеся в литературе сведения носят противоречивый характер. В связи с этим данная работа посвящена изучению влияния состава гетерогенных смесей тротила с гексогеном (смеси ТГ), октогеном (ТО), тэном (ТТ) на выход конденсированного углерода С и алмаза в процессе детонационного синтеза во взрывной камере.

Экспериментальные исследования выполнялись следующим образом. Заряды для синтеза УДА цилиндрической формы диаметром 38 мм и массой 100 г готовили послойной заливкой в изложницу (5—8 слоев) с ухаживанием каждого слоя. Для литья использовались гексоген, октоген и тэн со средним ситовым размером кристаллов 160, 350 и 330 мкм соответственно. Гидростатическим методом контролировали плотность зарядов, которая составляла 0,975—0,98 от максимальной. Заряды подрывали во взрывной камере объемом 0,175 м<sup>3</sup> в среде азота с  $p = 0,8$  МПа. Заряд инициировали промежуточным детонатором (бустер, таблетки прессованного гексогена диаметром 20 мм, массой 8 г) и электродетонатором ЭД-8. Конденсированные продукты взрыва собирали, просеивали через сито с размером ячеек 0,315 мм, и из них с помощью магнитного поля удаляли магнитные примеси. Полученные продукты анализировали химическими методами на влажность, содержание общего углерода, алмаза и несгорающих примесей. По результатам анализов рассчитывали выходы конденсированного углерода  $B_c$ , алмаза  $B_{уда}$  в процентах от массы ВВ и долю алмазной фазы в С (отношение массы алмаза к массе конденсированного углерода  $B_{уда}/B_c$ ). Полученные величины корректировались с учетом выходов С и УДА из бустера. Поправки определены на основе проведения специальных экспериментов, каждая экспериментальная точка — среднее из 4—10 параллельных опытов.

На рис. 1 приведены зависимости выходов конденсированного С от состава исследованных смесей. С хорошей точностью для трех типов смесей экспериментальные точки описываются линейными зависимостями

$$B_c = A + Bg_{\text{ТНТ}}, \quad (1)$$

где  $g_{\text{ТНТ}}$  — массовая доля ТНТ в смеси ( $\sum g_i = 1$ ).

Смесь	A, %	B, %	$B_c^{\text{ТНТ}}$ , %
ТГ	1,98	16,25	18,23
ТО	2,06	15,94	18,00
ТТ	-2,08	20,34	18,26

Коэффициенты A и B, полученные обработкой результатов экспериментов по методу наименьших квадратов, приведены в таблице. При  $g_{\text{ТНТ}} = 1$  все три зависимости должны давать выход углерода, соответствующий  $B_c$  при взрыве чистого ТНТ. Полученные для исследованных смесей значения  $B_c^{\text{ТНТ}}$  близки между собой и хорошо соотно-

сятся как с литературными данными (18,1 % [2]), так и с экспериментально измеренной в тех же условиях величиной выхода С из прессованного ТНТ (заряд: масса 100 г, диаметр 40 мм, плотность 1,59 г/см<sup>3</sup>) — 18,7 %.

При  $g_{\text{ТНТ}} = 0$  полученные зависимости должны давать выходы углерода при взрыве сенсibilизаторов (параметр  $A$  в таблице). Видно, что предполагаемые значения  $B_C$  из гексогена и октогена близки между собой, как и следовало ожидать, исходя из равенства их брутто-формулы на единицу массы, и практически совпадают с экспериментальной величиной выхода конденсированного углерода из чистого гексогена — 2,0 % [4]. Тэн в описанных условиях подрыва не должен выделять свободного углерода. Полученные результаты позволяют предположить, что в случае гетерогенных смесей ВВ парциальный удельный выход С для каждого компонента есть величина постоянная, равная  $B_C$  для чистого компонента при его взрыве в соответствующих условиях. В таком случае зависимость (1) может быть переписана в виде

$$B_C = \sum B_C^i g_i,$$

где  $B_C$  — выход углерода из смеси ВВ;  $B_C^i$  — удельный выход углерода для  $i$ -го компонента смеси;  $g_i$  — мольная доля  $i$ -го компонента.

Таким образом, выход конденсированного углерода в значительной степени зависит от состава ВВ. Образование конденсированного углерода в продуктах детонации (ПД) определяется протеканием двух реакций:



Максимальное выделение углерода в конденсированной форме в ПД происходит, когда кислород ВВ окисляет весь водород до воды, а остаток кислорода расходуется на окисление С до  $\text{CO}_2$ . Этот максимально возможный выход  $B_C^{\text{max}}$  приблизительно соответствует количеству С, которое существует в ПД в точке Чепмена — Жуге [5], а состав продуктов при этом отвечает максимально возможной теплоте взрыва [6]. В процессе расширения продуктов резко падает давление и равновесие в реакциях (2) сдвигается влево, при этом уменьшается количество углерода в продуктах взрыва. В результате конденсированный углерод, выделяющийся при взрыве, составляет только часть от максимально возможного его выхода.

С увеличением количества кислорода в составе ВВ при повышении доли сенсibilизатора эта часть снижается. Так, для чистого ТНТ наблюдаемый в экспериментах выход конденсированного углерода составляет 67,5 % от  $B_C^{\text{max}}$  для смесей ТГ-40 и ТТ-40 — 54 и 42 % соответственно (цифра в обозначении ВВ соответствует содержанию тротила в смеси). Таким образом, с увеличением количества кислорода в составе ВВ происходит все больший сдвиг реакций (2) влево, что может быть связано с повышением температуры ПД в отраженных от стенки и центра камеры ударных волнах с ростом мощности ВВ.

Если в качестве критерия, характеризующего выделение конденсированного углерода при взрыве ВВ использовать  $B_C^{\text{max}}$ , то экспериментальные значения  $B_C$  для всех исследованных типов смесей хорошо описываются единой линейной зависимостью (рис. 2)

$$B_C = -5,13 + 0,84 B_C^{\text{max}}. \quad (3)$$

Величина максимального выхода конденсированного углерода зависит от соотношения горючих элементов и кислорода в ВВ и находится по формуле

$$B_C^{\text{max}} = \mu_C [a - (c - b/2)/2] / m_0,$$

где  $\mu_C$  — молекулярная масса углерода;  $m_0$  — масса заряда ВВ общей формулы  $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ . Выражение (3) может быть использовано для оцен-

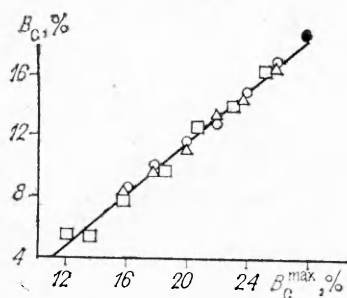


Рис. 2. Зависимость  $V_C$  ( $V_C^{\max}$ ) (обозначения аналогичны рис. 1).

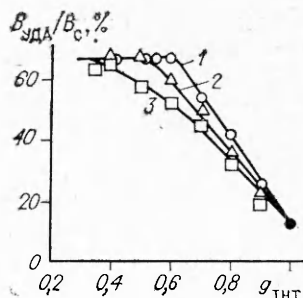


Рис. 3. Влияние состава смесей тротила с гексогеном (1), октогеном (2) и тэном (3) на долю алмазной фазы в конденсированном углеводе.

ки выхода углерода из других ВВ в условиях, обеспечивающих эффективное охлаждение ПД. Так, экспериментально измеренные значения выходов углерода при взрыве ТНАБ (бис(2,4,6-тринитрофинил)-диазин) и Z-ТАКОТА (2,4,8,10-тетранитро-5Н-бензотриазоло-/2,1-а/-бензотриазоли-6-ум) составляют 9,47 и 18,4 % соответственно [7]. Расчет по (3) дает для данных ВВ 10,5 и 18,2 % соответственно.

Зависимости доли алмазной фазы в конденсированном углеводе от состава исследованных ВВ приведены на рис. 3. Видно, что с увеличением мощности ВВ (повышением количества сенсibilизатора в заряде) отношение  $V_{УДА}/V_C$  возрастает. Однако в случае использования гексогена и октогена эти зависимости выходят на стационар после того, как содержание указанных компонентов в смеси достигнет 40—50 %, в то время как для смеси с тэном  $V_{УДА}/V_C$  монотонно возрастает с увеличением его содержания вплоть до 65 %. Следует отметить, что все три зависимости в конечном итоге достигают одного и того же значения  $V_{УДА}/V_C \sim 67$  %, однако содержание сенсibilизатора, при котором доля алмазной фазы в углеводе достигает этой величины, разное для всех трех ВВ.

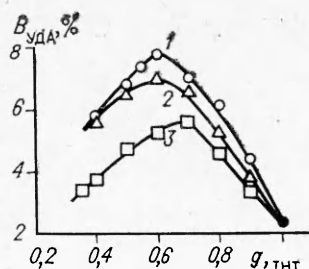
Наличие плато на рис. 3 может объясняться следующим. Поскольку синтез УДА происходит преимущественно из углерода молекул ТНТ [8], то существует определенное пороговое значение мощности детонационной волны, при превышении которого происходит эффективная деструкция молекулы тротила на углеродсодержащие фрагменты, превращающиеся в алмаз в условиях такой волны с достаточно высокой скоростью. Если мощность ДВ не достигает порогового уровня (или мала доля тротила, охваченного волной такой мощности — в случае гетерогенных смесей ВВ), то снижение доли УДА в углеводе может объясняться следующими причинами.

1. Происходит недостаточная деструкция молекул тротила и образуются фрагменты, неблагоприятные для построения алмазной структуры.

2. Скорость образования и роста алмазных частиц в условиях сравнительно слабой детонационной волны мала и значительная часть углерода конденсируется в виде неалмазных форм, которые не успевают за время существования высоких температуры и давления в заметной степени превратиться в УДА.

Рост содержания сенсibilизатора приводит к увеличению мощности детонационной волны, а в случае гетерогенных систем — и к повышению доли тротила, охваченного волной большей амплитуды, что выражается в росте скорости образования алмазных частиц. При достижении содержания сенсibilизатора определенного значения, соответствующего пороговому уровню мощности ДВ, практически весь ТНТ в зоне химических реакций оказывается охваченным такой волной и претерпевает конверсию в продукты с эффективным образованием алмазных структур.

Рис. 4. Зависимость выхода УДА от состава смесей тротила с гексогеном (1), октогеном (2) и тэном (3).



Дальнейший рост содержания сенсibilизатора не приводит к увеличению доли тротила, охваченного волной пороговой мощности, и отношение  $V_{\text{УДА}}/V_{\text{С}}$  остается постоянным или может начать уменьшаться, если  $V_{\text{С}}$  из чистого сенсibilизатора достаточно высок, а доля алмазной фазы в выделяемом углероде низка.

Положение точки стабилизации или максимума зависимости  $V_{\text{УДА}}/V_{\text{С}}$  от состава ВВ определяется мощностью применяемого сенсibilизатора, его химическим составом, растворимостью в тротиле, а также дисперсностью. Так как тэн — менее мощное ВВ, чем октоген или гексоген, то для достижения точки стабилизации необходимо большее его содержание в смеси с ТНТ и стационарный участок на зависимости  $V_{\text{УДА}}/V_{\text{С}}$  от состава смесей ТТ отсутствует. Достижение точки стабилизации аналогичной зависимости при меньшем содержании гексогена, чем октогена, объясняется меньшей дисперсностью последнего. С повышением дисперсности сенсibilизатора положение точки стабилизации сдвигается в сторону увеличения содержания ТНТ в смеси.

На рис. 4 приведены зависимости выхода УДА от состава исследованных смесей. Все три зависимости имеют экстремальный характер: максимум выхода алмазов достигается при содержании тротила ~60 % для смесей с октогеном и гексогеном, и при 65—70 % для смесей с тэном. Наличие экстремума объясняется конкуренцией двух процессов. Рост давления в детонационной волне с увеличением количества сенсibilизатора в смеси благоприятствует синтезу алмазных частиц из ТНТ, но при этом снижается общий выход конденсированного углерода. Таким образом, после достижения величины  $V_{\text{УДА}}^{\text{max}}$  выход начинает уменьшаться, поскольку снижение общего выхода углерода не компенсируется ростом доли УДА в нем. Поведение зависимостей  $V_{\text{С}}$  и  $V_{\text{УДА}}/V_{\text{С}}$  показано на рис. 1 и 3, откуда видно наличие экстремума при изменении выхода УДА с составом смеси.

Авторы выражают признательность А. П. Ванделю за полезные замечания при обсуждении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // Докл. АН СССР.— 1988.— 302, № 3.— С. 611—613.
2. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // ФГВ.— 1989.— 25, № 3.— С. 117—126.
3. Greiner N. R., Phillips D. S., Johnson J. D. et al. Diamonds in detonation soot // Nature.— 1988.— 333, № 5.— P. 440—442.
4. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.— 704 с.
5. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации.— М.: Мир, 1985.— 384 с.
6. Пепекин В. И., Махов М. И., Лебедев Ю. А. Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР.— 1977.— 232, № 4.— С. 852—855.
7. Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Сагдеев Ф. А. Синтез алмаза при детонации ароматических нитросоединений // V Всесоюз. совещ. по детонации: Сб. докл.— Красноярск, 1991.— С. 27—30.
8. Козырев Н. В., Брыляков П. М., Сен Чел Су и др. Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов // Докл. АН СССР.— 1990.— 314, № 4.— С. 889—891.