

даемые закономерности распространения трехволновой конфигурации. Таким образом, начальная плотность ВВ оказывает кардинальное влияние на закономерности отражения конически сходящихся ДВ в генераторах волн с цилиндрической геометрией, динамику формирования и развития возникающей конфигурации течения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М., Демченко М. Г. Маховское взаимодействие детонационных волн в нитрометане // ФГВ.— 1981.— 17, № 1.— С. 153—155.
2. Müller F. Mach-reflection of detonation waves in condensed high explosives // Propellants and Explosives.— 1973.— 3, N 3.— P. 115—118.
3. Souletis J., Groux J. Continuous observation of Mach bridge and Mach phenomena // Eighth Symp. (Int.) on Detonation.— Albuquerque, 1985.— V. 3.— P. 839—847.
4. Феоктистова Е. А. Опытное обнаружение маховского отражения детонационных волн в твердом ВВ // Докл. АН СССР.— 1961.— 136, № 6.— С. 1325—1327.
5. Dunne B. B. Mach reflection of detonation waves in condensed high explosives // Phys. Fluids.— 1961.— 4, N 7.— P. 918—924.
6. Argous J. P., Peyre C., Thouvenin J. Observation and study the conditions for formation of Mach detonation waves // Fourth Symp. (Int.) on Detonation.— Washington, 1965.— P. 135—141.
7. Laumborn B. D., Wright P. M. Mach interaction of two plane detonation waves // Ibid.— P. 142—151.
8. Дерibas А. А., Костюков Н. А., Ставер А. М. Столкновение плоских детонационных волн в аммоните № 6ЖВ // ФГВ.— 1975.— 11, № 3.— С. 456—462.
9. Соловьев В. С., Андреев С. Г., Левантовский А. В. и др. Оптические и рентгенографические исследования детонационных свойств низкоплотных ВВ на основе гексогена // Горение и взрыв.— М.: Наука.— 1972.— С. 452—454.
10. Соловьев В. С., Аттетков А. В., Бойко М. М. и др. Экспериментальное исследование механизма детонации в низкоплотных ВВ // ФГВ.— 1986.— 22, № 4.— С. 88—92.

г. Москва

Поступила в редакцию 11/II 1992

УДК 534.222.2 : 553.81 : 54—114

*В. Н. Коломийчук, И. Ю. Мальков*

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗА УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ АЛМАЗНОЙ ФАЗЫ В УСЛОВИЯХ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ

Экспериментально исследован синтез ультрадисперсного алмаза в условиях детонации. Сопоставлением данных взрывного эксперимента и результатов, полученных при исследовании сохранных порошков УДА методами малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и электронной микроскопии, изучены закономерности синтеза алмазной фазы при детонации вторичных ВВ.

Исследование образования ультрадисперсной алмазной фазы углерода (УДА) при детонации конденсированных ВВ с отрицательным кислородным балансом имеет большое значение для понимания физико-химии углерода в детонационных волнах, детонационного превращения в целом.

Обычно, как при промышленном производстве УДА, так и в научных исследованиях используют прессованные или литые двухкомпонентные смеси [1—5], где один из компонентов (наиболее широкое применение нашел тринитротолуол — ТНТ) служит основным поставщиком свободного углерода, а второй, как обычно полагают, источником дополнительной энергии, необходимой для достижения эффективного протекания синтеза. В работах [6—8] показано, что синтез УДА происходит и в случае смесевых составов типа мощное ВВ + жидкая инертная органическая добавка.

Непосредственное (экспериментальное) изучение эволюции углерода в детонационной волне чрезвычайно затруднено, что объясняется об-

© В. Н. Коломийчук, И. Ю. Мальков, 1993.

щими методическими проблемами, с которыми приходится сталкиваться при исследовании взрывных процессов. Достаточно перспективным представляется сопоставление результатов взрывного эксперимента (сохранение продуктов детонации при их разлете в ограниченном объеме) с данными, полученными при изучении сохраненного УДА методами структурного анализа, например, малоуглового рассеяния рентгеновских лучей, который позволяет получать информацию о среднем размере частиц и распределения частиц по размерам [9, 10]. Причем, поскольку частицы УДА являются своеобразными «реликтами» зоны детонационного превращения, полученные при таком сопоставлении данные будут полезны для понимания происходящих в ней процессов.

Исследования в этом направлении начаты авторами при активной поддержке академика В. М. Титова более четырех лет назад, и в настоящее время накоплен достаточно большой экспериментальный материал. Цель данной работы — обобщение результатов этих исследований. Часть из них была выборочно опубликована в [4—8].

### Методика экспериментов

Исследовалось образование УДА при детонации сплавов тротила с различным содержанием гексогена, октогена, тэна и других мощных ВВ, а также смесей октогена с различными органическими жидкостями. Диаметр зарядов варьировался от 10 до 100 мм, масса — от 50 до 2000 г. Эксперименты проводились во взрывных камерах объемом ~2 и 0,16 м<sup>3</sup>. Методика сохранения и анализа образующегося при взрыве конденсированного углерода, в том числе УДА, описана в [4, 11]. Во всех экспериментах внешние условия охлаждения продуктов детонации ПД — давление инертного газа в камере перед подрывом или толщина оболочки заряда ВВ — подбирались так, чтобы по возможности более полно подавить вторичные реакции, неизбежно возникающие при взрывах зарядов ВВ в ограниченном объеме.

Кривые распределения частиц УДА по размерам восстанавливались по экспериментально определенной интенсивности рассеянных под малыми ( $7^\circ < 2\theta < 7^\circ$ ) углами рентгеновских лучей и затем усреднялись для нескольких измерений. Кривая распределения частиц по размерам  $f_n(R)$  рассчитывалась по интегральному уравнению

$$I(h) \sim \int f_n(R) R^6 i_0(hR) dR,$$

где  $I(h)$  — экспериментальная кривая интенсивности рассеяния;  $i_0(hR)$  — формфактор рассеяния. Для сферических частиц

$$i_0(hR) = \frac{3(\sin hR - hR \cos hR)}{h^3 R^3},$$

$h = 2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda}$ ;  $\theta$  — угол рассеяния.

В отличие от работы [4] средний размер частиц  $d_{ср}$  вычислялся при помощи машинной обработки кривых в пределах главного максимума, а не во всем диапазоне измерения (0—300 Å), что позволяет в значительной степени избежать вклада вторичных структур (поличастицы, фракталы, и т. д.).

### Результаты экспериментов

**Масштабный эффект.** На первой стадии исследования наибольший интерес (что объяснялось поиском возможностей расширения практического использования данного метода синтеза) представляло изучение масштабного эффекта, т. е. влияние размеров заряда ВВ на дисперсность образующейся алмазной фазы. Показано, что рост частиц алмаза в детонационной волне существенно ограничен: при увеличении разме-

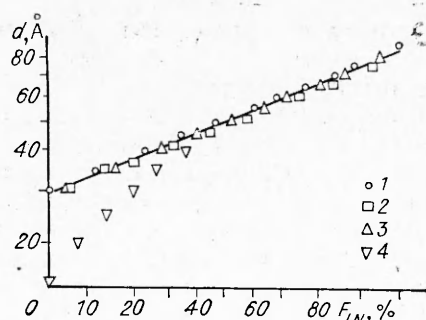


Рис. 1. Распределения частиц УДА по размерам для ТГ50/50 в вероятностных координатах.  $M_{ВВ}$ , г: 1 — 1000, 2, 3 — 100. Условия охлаждения: 1 —  $CO_2$  ( $p = 5$  атм), 2 —  $CO_2$  ( $p = 1$  атм), 3 — ледяная оболочка массой 500 г.

ров заряда более чем на порядок адекватного изменения среднего размера УДА не наблюдалось. Кроме того, поскольку единственно инвариантной зоной при изменении размеров заряда ВВ является зона химических реакций, эти данные позволили сделать вывод о том, что синтез УДА в основном заканчивается в этой зоне [4, 5].

В настоящей работе не обнаружено влияния на рост частиц УДА и внешних условий охлаждения. Так, при взрыве зарядов ВВ в газообразном азоте, под давлением, достаточным для подавления «вторичных» реакций, и аналогичных зарядов в массивной ледяной оболочке средний размер и распределение частиц УДА по размерам существенно не изменились (рис. 1).

Сказанное не отрицает, что увеличение размеров зарядов или изменение внешних условий охлаждения могут оказывать влияние на формирование вторичных структур, образующихся из частиц УДА, и на совершенство строения (например, огранки, дефектности) самих этих частиц, что требует дополнительного исследования и составляет предмет самостоятельного интереса.

**Распределения по размерам частиц УДА.** После получения первых распределений УДА по размерам замечено, что они близки по своей форме к логарифмически нормальному типу распределений. Однако детального анализа не сделано. В данной работе проанализировано более 50 распределений, полученных для разных смесей.

Если распределение подчиняется логарифмически нормальному закону

$$f_{LN}(d) = \frac{1}{d\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp \left[ -\frac{\ln^2(d/\bar{d})}{2 \ln^2 \sigma} \right], \quad (1)$$

то функция

$$F_{LN}(d) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{\ln d/\bar{d}}{\sqrt{2} \ln \sigma},$$

определяющая число частиц с размером меньше  $d$ , в логарифмических вероятностных координатах должна представляться прямой линией. Значения  $\bar{d}$  и  $\sigma$  в выражении (1) находят при  $F_{LN}(d) = 50$  и  $84,13\%$  соответственно.

На рис. 1 представлена функция  $F_{LN}(d)$  для состава ТГ 50/50. Для вычисления  $F_{LN}(d)$  функции  $f_n(d)$ , полученные методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей, вводились в компьютер в 50 точках. На график нанесены значения для зарядов разной массы  $M_{ВВ}$  с существенно отличными условиями охлаждения. Видно, что все точки достаточно хорошо ложатся на одну прямую, при этом значения для  $\bar{d}$  и  $\sigma$  в (1) будут  $48 \text{ \AA}$  и  $1,43$ , соответственно. На рис. 1 для сравнения приведена функция для нормального распределения:

$$f_N(d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(d - \bar{d})^2}{2\sigma^2} \right]$$

с параметрами  $\bar{d}$  и  $\sigma$ , равными  $52 \text{ \AA}$  и  $20 \text{ \AA}$ , соответственно.

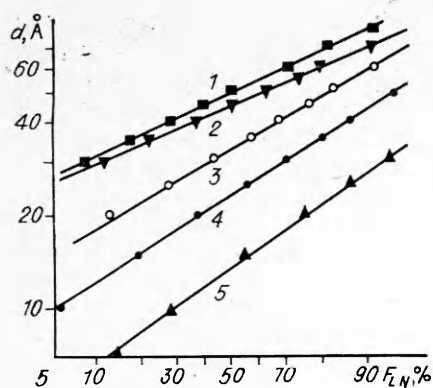


Рис. 2. Распределения по размерам частиц УДА, полученных при взрыве смесей октогена с органическими добавками [8], в вероятностных координатах.

1 — нитробензол; 2 — бензол; 3 — октанол; 4 — этиленгликоль; 5 — глицерин.

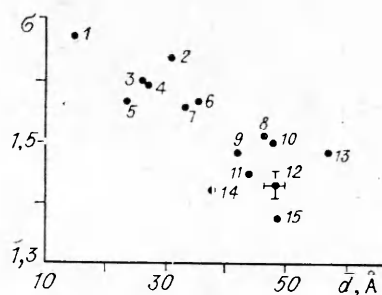


Рис. 3. Взаимосвязь между параметрами  $d$  и  $\sigma$  при логарифмически нормальном распределении по размерам частиц УДА, полученных при взрыве различных составов.

1 — глицерин; 2 — октанол; 3 — анилин; 4 — ТАТВ; 5 — этиленгликоль; 6 — гексан; 7 — парафин; 8 — пропаргиловый спирт; 9 — ацетон; 10 — нитробензол; 11 — тротил/тэн 30/70; 12 — ТГ 50/50; 13 — HNAV; 14 — ТНТ; 15 — октоген.

Некоторые распределения частиц УДА по размерам приведены на рис. 2. Видно, что распределения соответствуют логарифмически нормальному закону. На рис. 3 нанесены значения для  $d$  и  $\sigma$ , определенные для разных составов так, чтобы был виден весь диапазон их изменения, исследованный в данной работе.

Важным следствием наблюдаемого логарифмически нормального характера распределений, является вывод [11] о том, что основной механизм роста частиц УДА в условиях детонации — быстрая коагуляция, а не диффузионный перенос одиночных атомов к зародышам. На рис. 3 заметна тенденция уменьшения  $\sigma$  с ростом  $d$ . Однако относительно небольшой пройденный диапазон изменения  $d$  не позволяет уверенно сделать вывод вследствие ли это изменения механизма роста частиц [12, 13] или же влияние каких-либо других факторов.

**Дисперсность алмазной фазы.** Процесс коагуляции углерода — сильно экзотермическая реакция и в расчетах параметров детонации богатых углеродом ВВ размер образующихся частиц углерода — один из наиболее важных параметров, изменение значений которого позволяет воспроизвести в них многие особенности процесса детонации [14—16].

Простые оценки [3, 17] показывают, что время нахождения ПД в области термодинамической стабильности алмаза достаточно, чтобы частицы успевали вырасти до существенно больших размеров, чем это наблюдается в эксперименте. Некоторые возможные причины, способствующие ограничению роста частиц, обсуждаются в [3], однако его механизм в настоящее время не ясен. Факт ограничения роста частиц использован авторами [17] при моделировании процесса конденсации углерода в детонационном фронте. В [17] предполагается существование некоторого граничного размера  $r_{кр}$ : если частицы при соударении имеют размер больше  $r_{кр}$ , то они не могут коагулировать подобно жидким каплям, а образуют вторичные структуры лишь с частичной потерей своей индивидуальности.

Можно предположить, что поскольку с ростом температуры подвижность атомов и частиц увеличивается, а поверхностное натяжение уменьшается, повышение температуры синтеза при прочих равных условиях будет способствовать росту частиц до больших размеров. Обратный эффект, по-видимому, следует ожидать при увеличении давления.

Зависимость дисперсности УДА от температуры детонации прослеживается при синтезе из углерода ВВ, несмотря на то, что имеющиеся в литературе данные о температуре продуктов взрыва часто оказываются противоречивыми.

ВВ	$p_{ч-ж}$ , ГПа	$T_{ч-ж.}$ , К	$d_{ср.}$ нм
ТАТВ ( $C_6H_6N_6O_6$ , $\rho_0 = 1,895 \text{ г/см}^3$ )	29,7	2128 (ВКВ) 3270 (ЛД)	3,2
Z-TACOT ( $C_{12}H_4N_8O_{11}$ , $\rho_0 = 1,850 \text{ г/см}^3$ )	26,3	3033 (ВКВ) 3810 (ЛД)	5,4
HNAV ( $C_{12}H_4N_8O_{12}$ , $\rho_0 = 1,775 \text{ г/см}^3$ )	25,7	3448 (ВКВ) —	6,5

Так, в работе [18] сообщалось об образовании УДА при детонации ряда мощных ВВ (ТАТВ, Z-TACOT и HNAV). В таблице приведены значения параметров Жуге из [19] и данные о дисперсности частиц алмаза, полученные для составов ТАТВ/НМХ 70/30, Z-TACOT/НМХ 70/30 и

HNAV в данной работе. Видно, что с ростом температуры детонации средний размер частиц УДА увеличивается.

Сильную зависимость размера частиц от термодинамических параметров нагружения удалось проследить, исследуя синтез УДА в условиях детонации смесевых составов типа: октоген + жидкая органическая добавка [8]. По оценкам, давление и температура детонации для разных систем изменялись в пределах 20—30 ГПа и 2000—3500 К, и наблюдалось значительное (вплоть до 20 Å) уменьшение среднего размера образующихся частиц УДА при уменьшении сжимаемости добавки (см. рис. 2).

В случае использования добавок с большей сжимаемостью максимально достигаемая температура будет увеличиваться, а давление понижаться. В первом приближении для веществ, принадлежащих одному классу соединений с близкими химическими свойствами, можно считать, что температура падает с ростом плотности добавки, при этом размер частиц, как следствие, уменьшается. Однако следует иметь в виду, что при таком сопоставлении данных, полученных для веществ с существенно отличными физико-химическими свойствами, необходимо учитывать особенности их ударно-волнового поведения. Так, в работах [20, 21] показано, что для углеводородов с отличным отношением С/Н реализующиеся при одинаковом ударном давлении температуры сильно отличаются: в случае ударного сжатия ароматических углеводородов они выше, чем для предельных. Поэтому при сопоставлении данных, полученных для таких веществ, требуется более строгий подход и обоснованный расчет параметров нагружения.

Отдельно следует остановиться на данных, полученных для ТАТВ. В [14] отмечается, что расчет с учетом образования алмаза, который в случае ТНТ дает согласие расчетных и экспериментальных значений скорости детонации, в случае ТАТВ приводит к аномально завышенным значениям.

Низкая температура детонации ТАТВ влечет за собой, в соответствии со сказанным выше, образование более мелких (в сравнении, например, с ТНТ) частиц углерода и, как следствие, — увеличение вклада поверхности с большей энталпией образования, что и может приводить к уменьшению скорости детонации.

**Вклад в синтез компонентов смеси.** Исследования [4], а также данные [11, 22], свидетельствуют о том, что при детонационном превращении высокоплотных смесей типа тротил — гексоген (октоген) за время образования УДА не происходит полного объемного перемешивания продуктов частичного разложения компонентов заряда, а лишь существенно ограниченное смешение по границам зерен ВВ. Другими словами, различные компоненты заряда реагируют каждый в своем объеме, и образование частиц УДА из свободного углерода, выделяющегося при распаде молекул ТНТ и другого ВВ в смеси, идет в основном независимо.

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость содержания УДА в конденсированном углероде  $c_{УДА}$  от содержания гексогена и в литых зарядах  $c_{гг}$  ( $M_{ВВ} \sim 600 \text{ г}$ ,  $V_{к} \approx 2 \text{ м}^3$ ,  $CO_2 = 3 \text{ атм}$ ). Цифры озна-

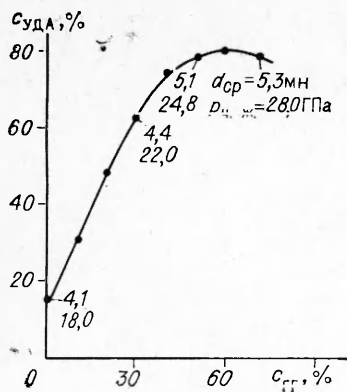


Рис. 4. Массовое содержание УДА в конденсированном углероде для сплавов тротила с гексогеном.

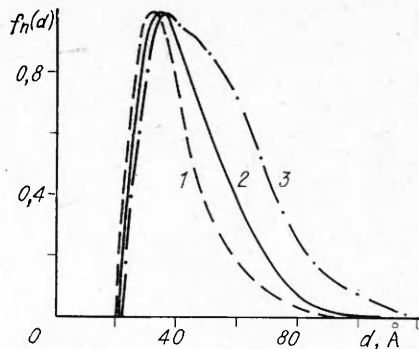


Рис. 5. Распределения частиц УДА по размерам.  
1 — ТНТ; 2 — ТГ 70/30; 3 — ТГ 30/70.

чают сверху вниз: средний размер образующихся частиц и давление в зоне Жуге. Типичные распределения частиц УДА по размерам для некоторых составов приведены на рис. 5.

Видно, что на зависимости рис. 4 можно выделить два участка. На первом с ростом  $c_{тр}$  в заряде содержание алмаза в общем выделившемся углероде быстро увеличивается, при этом средний размер образующихся частиц изменяется незначительно. Начиная с  $c_{тр} = 30-40\%$  картина качественно иная: характер изменения  $c_{УДА}$  сменяется на относительно более слабый, а средний размер и форма распределений, напротив, изменяются более заметно.

Как видно из рис. 5, распределение частиц УДА по размерам для состава ТГ 30/70 приближается к характерному двумодальному виду. К подобному виду можно прийти путем суперпозиции двух распределений так, как схематично показано на рис. 6: линия 1 соответствует распределению частиц УДА, образовавшихся при разложении основной массы зерен ТНТ, 2 — распределение частиц УДА, образовавшихся в переходной зоне и при разложении основной массы гексогена (относительно большие частицы), 3 — результирующее распределение. Задаваясь разумными (учитывающими кислородный баланс и экспериментальные данные по выходу конденсированного углерода и УДА для этих ВВ) массовыми вкладами в синтез каждого компонента, можно смоделировать данную ситуацию.

Интересно отметить, что подобная трансформация распределений не наблюдается в случае сплавов тротила с тэном при изменении содержания последнего в заряде. На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости выхода углерода для составов тротил — гексоген [4] и тротил — тэн (данная работа) от содержания тротила в смеси. Из соп-

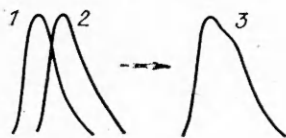
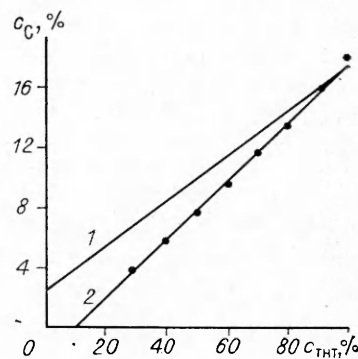


Рис. 6. Моделирование распределения по размерам частиц УДА для ТГ 30/70.

Рис. 7. Выход конденсированного углерода для сплавов.

1 — тротил — гексоген; 2 — тротил — тэн.



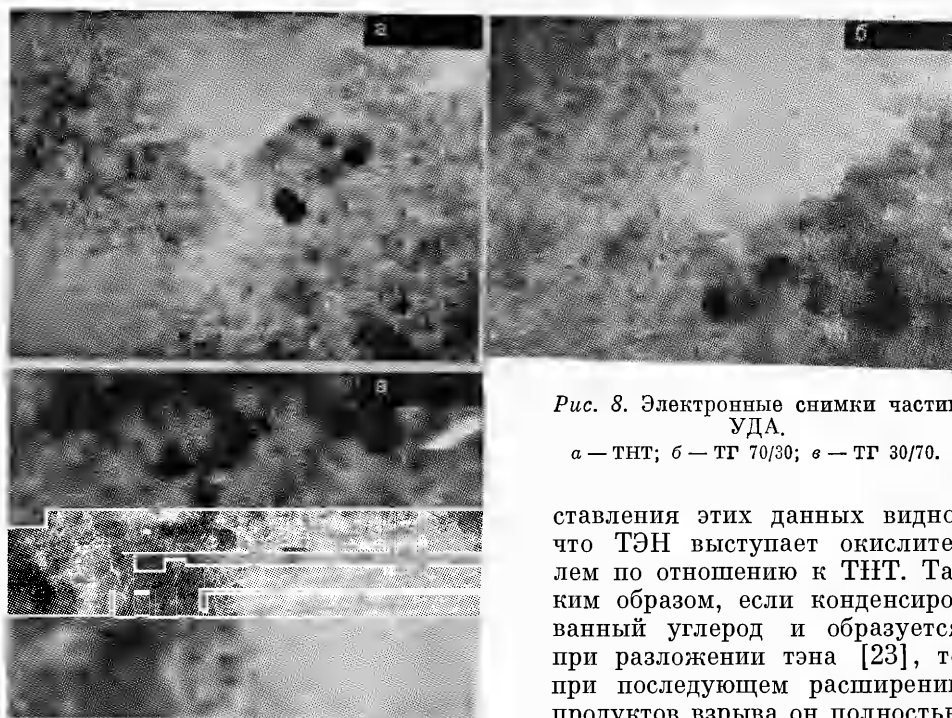


Рис. 8. Электронные снимки частиц УДА.  
а — ТНТ; б — ТГ 70/30; в — ТГ 30/70.

ставления этих данных видно, что ТЭН выступает окислителем по отношению к ТНТ. Таким образом, если конденсированный углерод и образуется при разложении тэна [23], то при последующем расширении продуктов взрыва он полностью переходит в газообразные

продукты детонации, при этом окисляется и часть углерода, конденсирующегося при разложении зерен ТНТ. В этом смысле порошки УДА, полученные для сплавов тротила с тэном, состоят из частиц, образовавшихся при разложении только зерен ТНТ, и не «загрязнены» частицами, образующимися из углерода тэна.

Очевидно, что для более детального рассмотрения механизма синтеза УДА в условиях детонации гетерогенных двух- и более компонентных составов помимо влияния значений реализующихся термодинамических параметров и массового вклада в синтез каждого из компонентов, необходимо анализировать и учитывать процессы, обусловленные механической, физической и химической неоднородностью среды, которые могут существенно проявляться по границам зерен ВВ в переходной зоне.

Не претендуя на полноту, можно выделить следующие факторы, представляющие интерес для понимания детонационного превращения гетерогенных ВВ в целом:

- установление механического равновесия между компонентами смеси и продуктами их разложения; возможность возникновения микротурбулентности;

- неравномерность распределения температуры в микрообъемах взрывчатых составов; она может возникать как на стадии ударного сжатия смеси из-за разной сжимаемости компонентов, трения и т. п., так и в процессе превращения, и в этом случае обусловлена различной скоростью энерговыделения и отличием общего теплового эффекта при разложении составных частей смеси;

- процессы взаимодиффузии (перемешивания) продуктов разложения различных компонентов; установление химического равновесия.

На рис. 8 приведены типичные электронные снимки образцов УДА. Видно, что размер частиц изменяется в пределах 20—200 Å, причем вклад крупных увеличивается с ростом содержания гексогена в заряде. Видны также частицы с ярко выраженной, правильной огранкой размером 50 Å и более. Обращает на себя внимание наличие зон с от-

носительно мелкими и крупными ( $100\text{--}200 \text{ \AA}$ ) частицами. Исследования показали, что количество зон с относительно крупными частицами увеличивается с ростом содержания гексогена в заряде.

Распределение температуры в микрообъемах ВВ, обусловленное его механической неоднородностью, также будет существенно неоднородным. Следует, например, ожидать более высокой температуры в областях контакта кристаллов ВВ, в различного рода горячих точках и т. п. Образующиеся в областях локального перегрева частицы будут вырастать до больших размеров, что может быть одной из причин наличия более широких распределений частиц по размерам в эксперименте, чем в расчетной модели [17].

Известно, что скорость детонационного превращения гексогена в 2—5 раз выше скорости разложения ТНТ при той же плотности [24]. Более значителен в первом случае и общий тепловой эффект. Можно предположить, что на некоторых промежуточных стадиях превращения состава типа ТГ как целого средняя температура в микрообъемах, занимаемых гексогеном, будет выше, чем в объеме ТНТ. При малом содержании гексогена в заряде это не будет оказывать существенного влияния на синтез, и роль гексогена в заряде сводится в основном к повышению давления детонации, что приводит к возрастанию массовой скорости образования УДА (см. рис. 4), при этом средний размер частиц из-за ограничения роста возрастает незначительно.

С увеличением доли гексогена в заряде все большая масса ТНТ в процессе своего разложения будет успевать прогреваться от относительно горячих продуктов разложения гексогена. В соответствии с выше сказанным, это должно приводить к укрупнению образующихся частиц УДА, причем как на стадии их формирования, так и в процессе «вторичной» коагуляции, когда уже сформировавшееся в процессе превращения микрообъема ТНТ распределение частиц по размерам затем на стадии прогрева этого микрообъема будет изменяться в сторону увеличения вклада больших частиц.

Однако следует отметить, что поскольку в случае зарядов ТНТ — ТЭН трансформации распределений, аналогичной рис. 5, 6, не наблюдается, рассмотренный процесс взаимовлияния ПД различных компонентов смеси также существенно ограничен и происходит в достаточно малой (по сравнению с размерами зерен ВВ) зоне.

### Заключение

Предпринята попытка путем сопоставления результатов взрывного эксперимента и данных, полученных при исследовании сохраненных порошков УДА, проанализировать закономерности синтеза алмазной фазы в условиях детонации вторичных ВВ.

Полученные данные позволяют заключить, что в условиях детонации ВВ рост частиц УДА — процесс существенно ограниченный, практически не зависящий от размеров заряда ВВ и внешних условий охлаждения. Распределения частиц алмаза по размерам, как при синтезе непосредственно из углерода, входящего в молекулярную структуру ВВ, так и при разложении инертных органических веществ удовлетворительно соответствуют логарифмически нормальному типу распределений. Определяют дисперсность образующихся частиц УДА термодинамические параметры синтеза, что необходимо учитывать в термодинамических расчетах детонации. Влияние на синтез УДА различных компонентов заряда (тепло- и массообмен) носит существенно ограниченный характер.

Полученные данные могут свидетельствовать в пользу гипотезы, рассматривающей детонацию вторичных ВВ, как совокупность относительно быстрых и существенно более медленных реакций [25, 26], причем в случае смесевых составов в качестве медленных экзотермических



реакций может выступать не только процесс коагуляции углерода, выделяющегося при разложении каждого из компонентов в отдельности, но и диффузионные процессы между ними.

Авторы благодарны А. Н. Чувилину за получение электронных снимков и Ф. А. Сагдиеву за помощь, оказанную при обработке данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // ФГВ.— 1990.— 26, № 3.— С. 123—125.
2. 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.
3. Greiner N. Roy, Phillips D. S., Johnson J. D. et al. Diamonds in detonatin soot // Nature.— 1988.— 333, № 6172.— P. 440—442.
4. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // ФГВ.— 1989.— 35, № 3.— С. 117—126.
5. Titov V. M., Anisichkin V. F., Mal'kov I. Yu. Synthesis of ultrafine diamonds in detonation waves: Prepr. Papers 9th Symp. on Detonation.— Portland, 1989.— P. 175—183.
6. Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Титов В. М. Синтез алмаза при динамическом нагружении органических веществ // Докл. АН СССР.— 1988.— 303, № 3.— С. 625—627.
7. Titov V. M., Anisichkin V. F., Mal'kov I. Yu. Diamond synthesis from dynamically loaded organic matter: Shock Compression of Condensed Matter, 1989.— Amsterdam, Elsevier Sci. Publ. B. V., 1990.— P. 659—662.
8. Мальков И. Ю. Образование ультрадисперсной алмазной фазы углерода в условиях детонации гетерогенных смесевых составов // ФГВ.— 1991.— 27, № 5.— С. 136—140.
9. Свергун Д., Фейгин Л. Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов.— М.: Физматгиз, 1988.
10. Kolomiichuk V. // React. Catal. Lett.— 1982.— 20.— P. 123—128.
11. Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Мальков И. Ю. и др. Исследование процесса детонации конденсированных ВВ изотопным методом // Докл. АН СССР.— 1990.— 314, № 4.— С. 879—881.
12. Grandvist C. G., Burham R. A. Ultrafine metal particles // J. Appl. Phys.— 1976.— 47.— P. 2200—2219.
13. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Лаиовок В. П. Физические явления в ультрадисперсных средах.— М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. Губин С. А., Одинцов В. В., Пеискин В. И. Термодинамические расчеты детонации конденсированных веществ // АН СССР. ИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1986.
15. Губин С. А., Одинцов В. В. и др. Влияние формы и размера кристаллов графита и алмаза на фазовое равновесие углерода и параметры детонации // АН СССР. ИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1989.
16. Mathias van Thiel, Francis H. Ree. Properties of carbon clusters in TNT detonation products: graphite — diamond transition // J. Appl. Phys.— 1987.— 62, N 5.— P. 1761—1767.
17. Ершов А. П., Куерштох А. Л. Образование фрактальных структур при взрыве // Письма в ЖТФ.— 1990.— 16, № 3.— С. 42—46.
18. Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Сагдиев Ф. А. Синтез алмаза при детонации ароматических нитросоединений: Пятое Всесоюз. совещание по детонации: Сб. докл. Красноярск, 1991.— Т. 1.
19. Mader Ch. L. Numerical modeling of detonation.— Berkly — Los Alamos — London: Calif. Press, 1979.
20. Ree Francis H. Systematics of high-pressure and high temperature behavior of hydrocarbons // J. Chem. Phys.— 1979.— 70.— P. 974—983.
21. Nellis W. J., Ree F. H., Trainor R. J. et al. Equation of state and optical luminosity of benzen, polybutene, and polyethylene shocked to 210 GPa // Ibid.— 1984.— 80.— P. 2789—2799.
22. Козырев И. 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.
23. Ree Francis H. A statistical mechanical theory of chemically reacting multiphase mixtures: Application to the detonation properties of PETN // J. Chem. Phys.— 1984.— 81.— P. 1251—1263.
24. Дремин А. Н., Савров С. Д. и др. Детонационные волны в конденсированных средах.— М.: Наука, 1970.
25. Shaw M. S., Johnson J. D. Carbon clustering in detonation // J. Appl. Phys.— 1987.— 62.— P. 2080—2085.
26. Tang P. K., Seitz W. L. et al. A study on the contribution of slow reaction in detonation // Shock Compression of Condensed Matter, 1989.— Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. B. V., 1990.— P. 279—282.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 14/VII 1992