

ОБ ОБРАЗОВАНИИ АЛМАЗА ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ СИНТЕЗЕ

А.Ю. Бабушкин, А.И. Лямкин*

В работе обсуждаются механизм образования алмаза в детонационной волне и факторы, определяющие его конечный выход. Закономерности синтеза укладываются в схему: углеродные кластеры → аморфный углерод → алмаз. Область синтеза алмаза определяется вторым звеном в данной последовательности превращений, на р–Т плоскости она характеризуется линией гистерезиса и переходным участком неполного превращения аморфного углерода. Постдетонационные потери алмаза объяснены вторичными химическими реакциями. Расчеты показали, что выход алмаза в значительной степени зависит от внешних факторов: массы заряда, типа и параметров газа, заполняющего взрывную камеру, причем максимальный выход достигается в условиях изэнтропического расширения продуктов детонации.

При определенных условиях в продуктах взрыва конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), имеющих в своем составе избыточный углерод (положительный углеродный баланс), присутствует дисперсный алмаз (средний размер частиц ~5 нм). В традиционной постановке синтез алмаза осуществляется во взрывной камере, заполненной инертным газом. После подрыва заряда ВВ во взрывной камере остается конденсированный остаток, состоящий из смеси алмазных и неалмазных форм углерода. При оптимальных условиях выход алмаза для некоторых ВВ может достигать 5 процентов и более от массы заряда.

Основные особенности синтеза алмаза, связанные с его выходом, проявляются в системе тротил-гексоген (ТГ). При неизменных внешних условиях выход алмаза проходит через максимум при увеличении относительной доли гексогена в ТГ. Причем для однокомпонентных ВВ (тротил и гексоген) в продуктах взрыва отмечаются только его следы. Выход алмаза в значительной степени зависит также от внешних условий – массы заряда, сорта и давления газа, заполняющего взрывную камеру.

Отмеченные закономерности можно объяснить характером и условиями протекания детонационного синтеза. Основными факторами, определяющими выход алмаза, являются: двухстадийный характер образования алмаза, химические и теплофизические процессы в продуктах детонации (ПД) при их постдетонационном расширении.

1. О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗА

Имеющиеся опытные и расчетные результаты позволяют сделать определенные заключения о характере протекания детонационного превращения ВВ и образования алмаза.

1. Образование алмаза происходит в детонационной волне в зоне химической реакции

Алмаз является фазой высокого давления. При детонации ВВ наиболее благоприятные условия для его образования реализуются в детонационной волне. В принципе рост алмазных частиц возможен и в тейлоровской волне разрежения, пока там существуют благоприятные термодинамические условия. Опытные данные свидетельствуют, что рост алмазных частиц завершается в зоне химической реакции. Так, в [1] исследовалась зависимость распределения и среднего размера алмазных частиц от формы и величины заряда. Неизменность данных характеристик свидетельствует, что образование частиц происходит в одинаковых условиях, т.е. в зоне химической реакции, которая для стационарной детонационной волны определяется природой ВВ.

Другое свидетельство представлено в работе [2], в которой исследовалась зависимость скорости детонации от начальной плотности ВВ, таких как ТНТ, ТГ 50/50 и ТГ 75/25. На двух из них, для ТГ 50/50 и ТГ 75/25, зафиксировано два излома, для ТНТ – один. Особенность на зависимости $D(\rho_0)$ свидетельствует о некотором событии, происходящем в зоне химической реакции. В случае ударных волн излом на зависимости скорости ударной волны от массовой скорости вызван полиморфным превращением нагруженного вещества. В этой связи несомненно, что излом на кривой $D(\rho_0)$ тоже обусловлен некоторым полиморфным превращением, происходящем в зоне химической реакции. Первый излом по интерпретации [2] для данных ВВ вызван появлением в продуктах детонации алмаза, второй излом – завершением перехода свободного углерода в алмазную форму.

Таким образом, конечный выход алмаза в первую очередь определяется его выходом в зоне химической реакции. Выход алмаза в плоскости Чепмена-Жуге находили из численных расчетов. Расчетная схема основана на уравнениях идеальной детонации и предположении химического равновесия в ПД:

$$D = v_0^2 \sqrt{(p - p_0)/(v_0 - v)} = \min_{v < v_0}$$

* © А.Ю. Бабушкин, Красноярский государственный технический университет, 2003; e-mail: vepom@kgtu.runnet.ru, А.И. Лямкин, Красноярский государственный технический университет, 2003; e-mail: vepom@kgtu.runnet.ru.

$$e - e_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)(v_0 - v), \tag{1}$$

$$g = \min_{n_j \geq 0}$$

где D – скорость детонации; p – давление; v – удельный объем; e – удельная внутренняя энергия; $g(p, T, n_j)$ – удельная энергия Гиббса; n_j – мольный состав ПД. Термодинамические характеристики газообразных продуктов детонации определялись с помощью уравнения Беккера-Кистяковского-Вильсона (БКВ):

$$\frac{pV}{nRT} = 1 + xe^{\beta x}, \quad x = \frac{\kappa \sum k_i n_i}{V(T + \theta)^\alpha},$$

здесь T – температура; R – универсальная газовая постоянная; V – объем газа; $\alpha, \beta, \kappa, \theta$ – параметры; n_i, k_i – количество молей и коэффциент i -го газового компонента; $n = \sum n_i$. Конденсированные продукты считались несжигаемыми.

Результаты расчетов приведены на рис. 1, 2. Термодинамические параметры детонации (давление и температура) системы ТГ попадают на фазовой диаграмме углерода в область стабильного алмаза. Наблюдается соответствие между конечным выходом конденсированного углерода (КУ) и расчетом. Меньший выход КУ и алмаза по сравнению с расчетом объясняется тем, что часть углерода при расширении переходит в газовую фазу. При полном превращении выход алмаза соответствовал бы прямой 3'. Отклонение зависимости от прямой (при содержании ТНТ > 60%) свидетельствует о появлении в составе ПД неалмазных форм углерода, несмотря на благоприятные для образования алмаза термодинамические условия. Отметим, что аналогичные результаты наблюдаются для смесей октогена с тротилом и тэна с тротилом [13].

Конденсация углерода, по мнению [3], является на самом деле равновесной, появление неалмазного углерода обусловлено дисперсностью углеродных частиц, которая приводит к смещению линии равновесия графит-алмаз в область более высоких давлений. Однако в этом случае должен наблюдаться резкий спад выхода алмаза с увеличением доли ТНТ в смеси. В действительности уменьшение выхода алмаза происходит плавно и по давлению значительно растянуто. Данной версии присущи и другие недостатки [15]. В этой связи несомненно, что закономерности синтеза непосредственно обусловлены кинетикой конденсации углерода и образования алмаза в детонационной волне.

2. Свободный углерод конденсируется в зоне химической реакции в аморфном виде по механизму жидко-капельной коалесценции

Важная информация о химических процессах в детонационной волне была получена методом меченых атомов [4–7]. В работе [4] исследовался состав продуктов взрыва гомогенного ВВ бис-тринитроэтиладипата, меченного атомами ^{13}C и ^{18}O , и смеси ТНТ с аммиачной селитрой, меченной атомом ^{15}N . Изотопные соотношения в продуктах взрыва гомогенного ВВ свидетельствуют, что в детонационной волне происходит полное разрушение молекул и последующая рекомбинация атомов случайным образом. Перемешивание же продуктов разложения составляющих гетерогенного ВВ незначительно, и диффузия в детонационной волне ограничена размером ~0.6 мкм.

Вывод [4] о полном перемешивании продуктов детонации на атомарном уровне был подтвержден в работах [5, 6, 7]. В них исследовалась степень участия в образовании алмаза неравнозначных углеродных атомов. Особый интерес в этом отношении представляет бензольное кольцо молекулы ТНТ. В работе [5] использовалась смесь октогена и ТНТ в пропорции 60/40. Часть молекул ТНТ метились изотопом ^{13}C , который вводился в метильную группу. Полученные данные свидетельствуют, что все атомы углерода ТНТ (метильной группы и бензольного

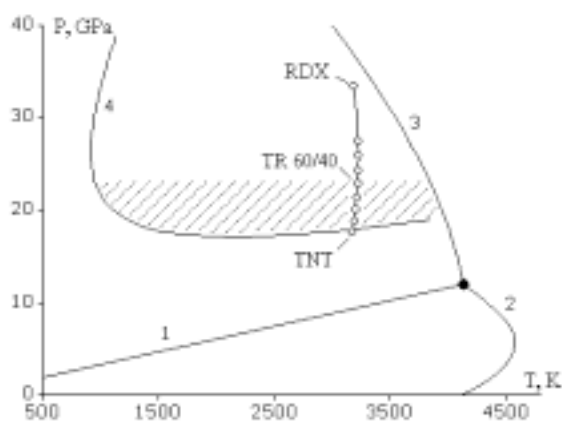


Рис. 1. Параметры детонации системы ТГ в плоскости Жуге: о – расчет; 1, 2, 3 – [14]; 4 – [8]

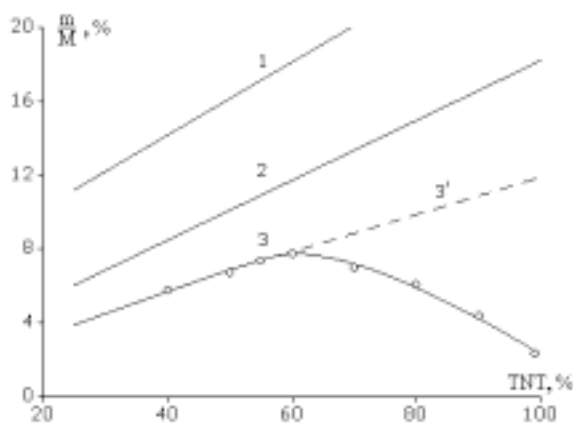


Рис. 2. 1 – расчетный выход алмаза в ПД в плоскости Ч-Ж; 2 – выход КУ в опыте [13]; 3 – выход алмаза в опыте [13] в зависимости от доли тротила в ТГ; М – масса ВВ, m – веса 1, 2, 3

кольца) равноправно участвуют в образовании КУ, в том числе и алмаза. При этом основная часть алмаза образуется из углерода, входящего в молекулу ТНТ, вклад октогена в КУ и алмаз заметно меньше и соответствует их выходу в опытах с чистым октогеном. Последнее означает, что в детонационной волне не происходит заметного смещения продуктов разложения смесевых составляющих. Аналогичные результаты получены в работах [6, 7], где исследовался синтез алмаза из составов ТГ, содержащих от 40 до 80% ТНТ. В опытах использовались составы с меченым гексогеном и отдельно составы с меченым тротилом. В тротиле метился атом углерода кольца, связанный с метильной группой. В качестве изотопной метки в обоих случаях применялся ^{14}C .

При полном разрушении молекул ВВ до атомарного уровня образование конденсированной фазы может идти по пути диффузионного роста частиц либо по механизму жидко-капельной коалесценции. Логарифмически нормальный вид кривых распределения алмазных частиц предполагает, согласно [1], что их рост происходит путем коалесценции алмазных кластеров. Вероятно, исходные кластеры состоят из “незадействованных” углеродных атомов одной молекулы ВВ. При таком характере конденсации возникновение кристаллической структуры на начальном этапе маловероятно: при слиянии частиц и релаксации поверхностной энергии происходит пластическое течение, разрушающее фрагменты упорядоченности. Вероятно, свободный углерод в детонационной волне вначале конденсируется в аморфном виде. Образование же алмаза происходит на следующем этапе, и область детонационного синтеза в плоскости p – T в конечном счете определяется особенностями превращения аморфного углерода в алмаз.

3. Алмаз в детонационной волне образуется в результате полиморфного превращения аморфного углерода. Область синтеза определяется гистерезисом данного превращения и имеет переходный участок

Образование алмаза начинается, когда аморфная частица достигает размера, при котором ее интенсивный рост прекращается (столкновение частиц не сопровождается слиянием). Алмазный зародыш, возникший внутри аморфной частицы, достраивает свою структуру с поверхности за счет массопереноса при вязком течении аморфного вещества. На линии фазового равновесия скорость превращения фаз обращается в ноль. В детонационной волне образование алмаза поэтому начинается не на линии фазового равновесия, а на линии интенсивного превращения или линии гистерезиса. Алмазный зародыш растет в условиях вязкого течения. С повышением внешнего давления скорость роста, на наш взгляд, резко возрастает, поэтому линия гистерезиса является вполне определенной. Таким образом, на фазовой диаграмме имеется область метастабильного существования аморфного углерода, ограниченная по давлению снизу линией равновесия, сверху – линией гистерезиса.

Линия равновесия аморфный углерод–алмаз из общих соображений будет лежать ниже линии равновесия графит–алмаз. По некоторым данным можно предположить, что она пересекает ось температур в районе 1500 К. Для детонационного синтеза определяющее значение имеет положение линии гистерезиса.

Ударно-волновой синтез алмаза осуществлен из углерода различной степени упорядоченности (сажа, пиро-литический графит и др.). Образование алмаза при ударном нагружении, согласно [8], в большинстве случаев протекает по диффузионному механизму, и по излому на ударных адиабатах в этой работе установлено положение линии гистерезиса ударно-иницированного превращения (рис. 1, кривая 4). Кроме того, как предполагается в [9], синтез алмаза осуществляется через промежуточную аморфную фазу.

Таким образом, образование алмаза в детонационных и ударных волнах на конечном этапе протекает одинаково – из аморфного углерода. Это предопределяет совпадение соответствующих линий гистерезиса. О совпадении свидетельствует тот факт, что первый излом на зависимости $D(\rho_0)$ составов ТГ находится на линии гистерезиса ударно-иницированного синтеза алмаза [8].

Так как превращение в алмаз идет с конечной скоростью, то к линии гистерезиса будет примыкать переходный участок. В его пределах превращение в детонационной волне является незавершенным и в плоскости Чепмена-Жуге конденсированный углерод будет представлен двумя фазами: аморфной и алмазной.

Верхняя граница переходного участка соответствует излому на зависимости β (рис. 2). На этом основании ширина переходного участка (заштрихованная область на рис. 1) оценивается диапазоном давлений 17–23 ГПа. С помощью данных рис. 2 можно также оценить выход алмаза в плоскости Чепмена-Жуге. Следующими факторами, определяющими конечный выход алмаза, являются фазы расширения и последующего химического взаимодействия ПД с окружающей средой.

II. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ВЫХОД АЛМАЗА

ПД после детонации ВВ испытывают взрывное расширение, в процессе которого химический и фазовый состав ПД может претерпеть значительные изменения. Потери алмаза при расширении являются необратимыми и обусловлены термическим отжигом и химическим взаимодействием с газообразными ПД. Величина потерь и, соответственно, выход алмаза определялись из численных расчетов.

1. Постановка задачи

Задача решалась в сферической постановке: сферическая взрывная камера, в центре которой располагается шарообразный заряд ВВ. Начальное состояние ПД задавалось условиями изэнтропии Чепмена-Жуге для плотно-

сти, равной плотности ВВ. Поле скоростей обеспечивало в первый момент равномерное расширение и равенство полной энергии ПД и энергии ВВ.

Расчетная модель основана на уравнениях газовой динамики и предположении локального химического равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} - v \operatorname{div} \vec{U} &= 0, \\ \frac{d\vec{U}}{dt} + v \operatorname{grad}(p + q) &= 0, \\ T \frac{ds}{dt} + q \frac{dv}{dt} &= 0, \\ g &= \min_{n_j \geq 0} \end{aligned} \quad (2)$$

где \vec{U} – массовая скорость; q – искусственная вязкость; s – удельная энтропия, остальные обозначения как в (1). Свойства ПД описывались уравнением БКВ, окружающий газ рассматривался идеальным с постоянным показателем адиабаты. Предполагалось, что углерод конденсируется на поверхности существующих углеродных частиц и термический отжиг происходит при достижении пороговой температуры, а результатом этих процессов является неалмазный (аморфный) углерод. Различие термодинамических свойств алмаза и неалмазного углерода не учитывалось. Температура термического отжига в расчетах принята равной 3500 К. Такой выбор основан на данных Ф. Банди, который установил, что до данной температуры алмаз выдерживает импульсный нагрев [10]. Таким образом, локальный и интегральный выход алмаза определяется условием

$$\text{локальный выход алмаза} = \begin{cases} \min(KУ), & T_m < 3500 \text{ К}, \\ 0, & T_m \geq 3500 \text{ К}, \end{cases}$$

где T_m – максимальная (пиковая) температура. Отметим, что пиковые температуры отслеживаются после начальной, изэнтропической по характеру, стадии расширения ПД.

В предельном случае ударных волн (УВ) малой интенсивности состояние ПД в любой момент находится на изэнтропе Чепмена-Жуге. Этот случай рассчитывался отдельно как изэнтропическое расширение

$$S = S_{CJ},$$

где S – энтропия ПД; S_{CJ} – ее значение в плоскости Жуге. Полученные результаты представлены на рис. 3. Видно, что содержание КУ при таком расширении проходит через минимум, который в соответствии с нашими предположениями, определяет выход алмаза. Таким образом, объясняется существенно меньший выход алмаза из гексогена по сравнению с ожидаемым [1]. Меньший выход в тротиле имеет другое объяснение – неполное превращение в зоне химической реакции аморфного углерода в алмаз.

Имеется дополнительное свидетельство в пользу выдвинутых предположений о характере потерь. Так, для ТГ 50/50 выход алмаза может достигать 10%, расчет дает 9,5%. 10% выход получен на зарядах, помещенных в массивную ледяную оболочку. Для ТНТ выход алмаза в режиме пересжатой детонации, по данным [1], оценивается 15%, расчет дает 18%.

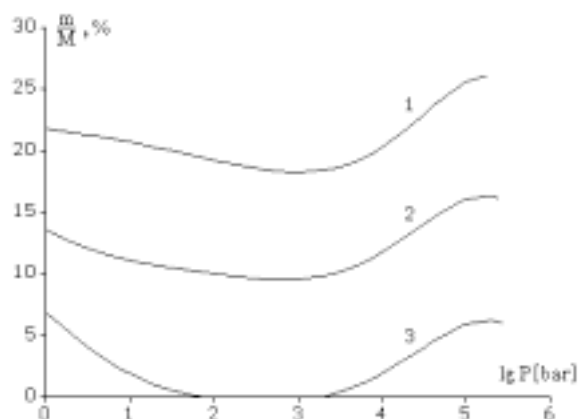


Рис 3. Количество КУ на изэнтропе расширения ПД: 1 – тротил; 2 – ТГ 50/50; 3 – гексоген ($r_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$)

2. Результаты расчетов

Максимальный выход алмаза для данного состава ВВ достигается, когда параметры сохранения обеспечивают близкий к изэнтропическому режим расширения ПД. Потери алмаза в этом случае будем называть основными. За исключением идеализированного случая неограниченного расширения в вакуум, ПД при расширении подвергаются воздействию УВ. Чем интенсивнее УВ, тем значительно отклоняется состояние ПД от изэнтропы Чепмена-Жуге и тем весомее потери алмаза. Таким образом, в УВ возникают дополнительные потери, величина которых зависит от внешних условий.

В газодинамических расчетах исследовалось влияние массы заряда и давления окружающего газа на выход алмаза на примере состава ТГ 50/50 и газов CO_2 и N_2 . На рис. 4а-4г показаны четыре последовательные фазы течения

ПД. Вертикальные риски на горизонтальной оси отмечают положение границы раздела ПД с внешним газом.

После детонации ВВ формируется УВ в окружающем газе и внутренняя УВ, распространяющаяся в ПД (рис. 4а). Возникновение внутренней УВ связано со спецификой сферического расширения. Скорость внутренней УВ относительно вещества меньше скорости течения, и поэтому она относится потоком к стенке камеры. Отражившись от стенки камеры, УВ выходит на границу раздела ПД-газ (рис. 4б) и после распада разрыва переходит в ПД. Последовательное сжатие ПД внутренней и отраженной УВ близко к изэнтропическому, поэтому дополнительные потери невелики. Далее отраженная УВ догоняет внутреннюю и формируется сильная УВ (рис. 4в). В результате ПД делятся на сравнительно разреженное и горячее внутреннее ядро и более плотную и холодную внешнюю область, которую успела сжать внутренняя УВ. В расчетах установлено, что горячее ядро дает основной вклад в дополнительные потери алмаза (рис. 5, 6). Далее волна отражается от центра симметрии и выходит на контактную границу ПД-газ (рис. 4г). Картина течения усложняется из-за взаимодействия УВ с границей раздела горячих и холодных ПД. Дальнейшая циркуляция ударных волн протекает с существенно меньшей интенсивностью и не приводит к изменению достигнутых расчетных величин (локального выхода алмаза и пиковых температур).

На рис. 5 и рис. 6 приведены, соответственно, зависимости локального выхода алмаза и пиковой температуры от лагранжовой координаты заряда. В рамках исходных положений, потерь алмаза, связанных с его отжигом, не обнаружено. Кроме того, из сопоставления рисунков следует, что пиковые температуры в присутствии КУ не превышают 1500 К. На этом основании можно считать, что реального отжига алмаза не происходит, поскольку величина 1500 К значительно меньше разумных оценок температуры отжига, и его потери целиком обусловлены химическими реакциями.

При увеличении давления окружающего газа или уменьшении массы заряда интенсивность УВ и размер горячего ядра уменьшаются, причем ядро может исчезнуть. Таким образом, параметры синтеза влияют на величину конечного выхода алмаза. Соответствующие зависимости приведены на рис. 7. Отметим, что в случае заполнения камеры азотом выход алмаза при тех же параметрах (давлении и массе заряда) существенно меньше.

Установлено своего рода подобие расчетных величин. Локальный выход алмаза и пиковая температура, а именно, их зависимость от приведенной лагранжовой координаты определяются отношением массы заряда к

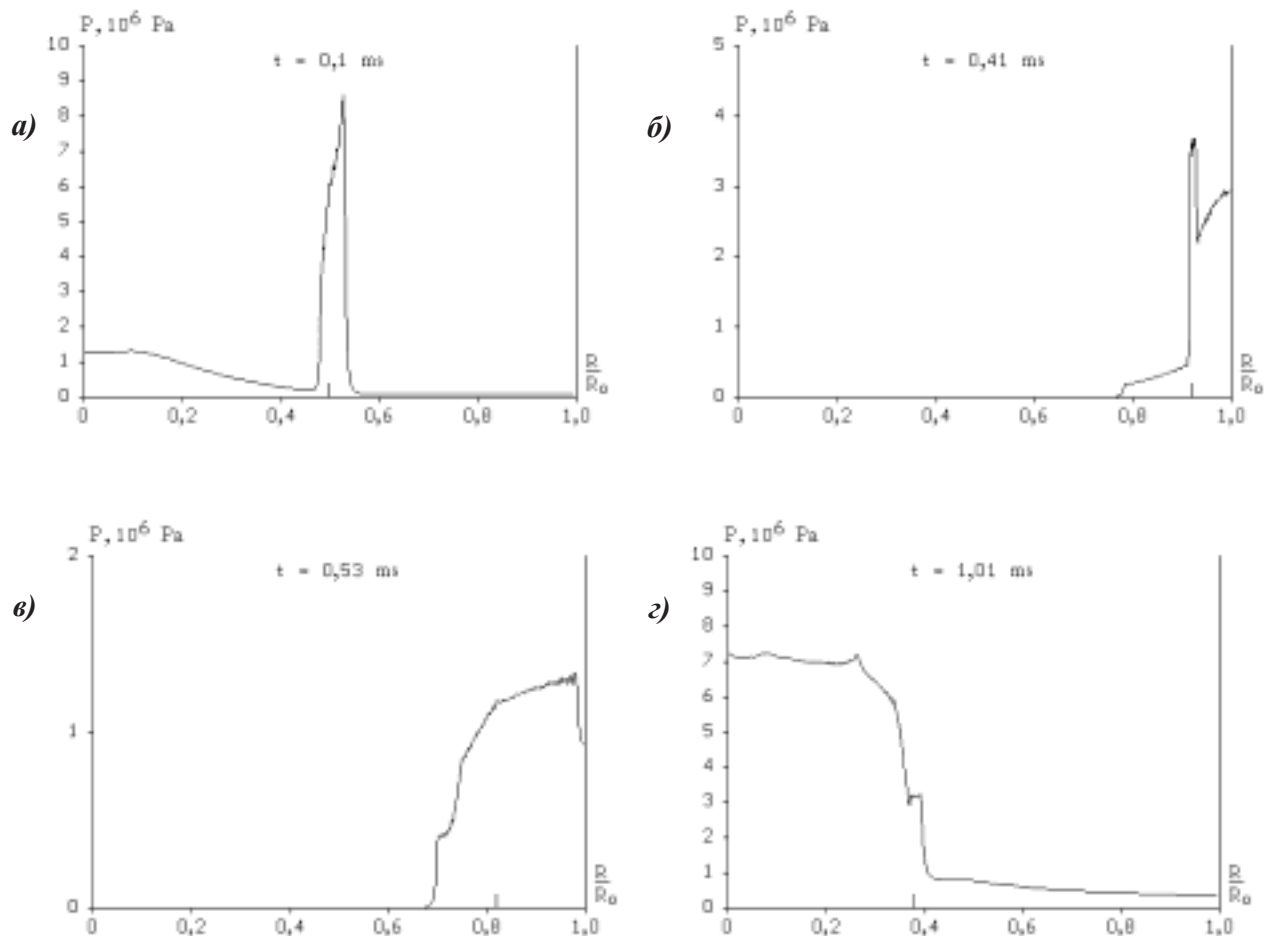


Рис. 4. Эпюры давления во взрывной камере (объем 2 м^3): ТГ 50/50 (1 кг), CO_2 (1 атм)

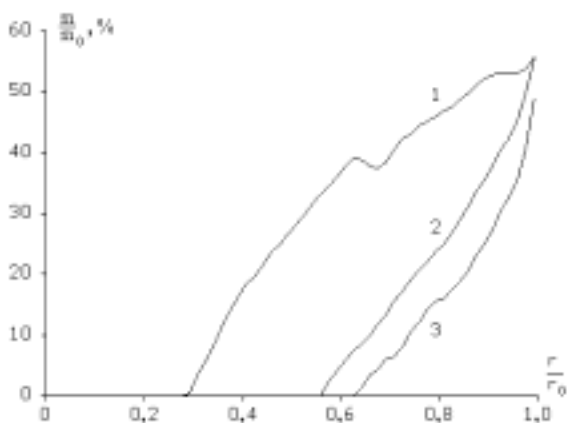


Рис. 5. Локальный выход алмаза m :
 m_0 – выход алмаза в плоскости Жуге;
 r – лагранжевая координата; r_0 – радиус заряда;
 ТГ 50/50, CO_2 , объем взрывной камеры 2 м^3 ;
 А. Давление газа 1 атм, масса заряда:
 1 – 250 г, 2 – 500 г, 3 – 1000 г;
 Б. Масса заряда 1000 г, давление газа:
 1 – 4 атм, 2 – 2 атм, 3 – 1 атм

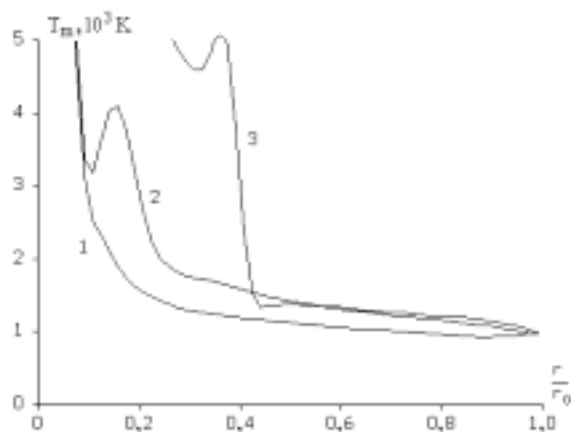


Рис. 6. Локальная пиковая температура T_m :
 r – лагранжевая координата; r_0 – радиус заряда;
 ТГ 50/50, CO_2 , объем взрывной камеры 2 м^3 ;
 А. Давление газа 1 атм, масса заряда:
 1 – 250 г, 2 – 500 г, 3 – 1000 г;
 Б. Масса заряда 1000 г, давление газа:
 1 – 4 атм, 2 – 2 атм, 3 – 1 атм

давлению газа (рис. 5, 6). Из этого следует, что интегральный выход алмаза при прочих неизменных условиях выражается зависимостью

$$m = M \cdot f(P/M),$$

где m – выход алмаза; M – масса ВВ; P – давление внешнего газа; f – некоторая функция. Зависимость такого рода, судя по данным [11], прослеживается в опыте.

Имеющиеся опытные данные по выходу алмаза разнородны и поэтому не поддаются сопоставлению с расчетом. Исключение составляет работа [12], где прослежено влияние давления азота в камере на его выход. На рис. 8 приведены данные [12] и результаты расчета для этих условий синтеза. Учитывая модельные упрощения, согласие с опытом можно признать удовлетворительным.

Результаты газодинамических расчетов и их сопоставление с опытом позволяют сделать вывод о незначительном влиянии на выход алмаза фазы перемешивания ПД с внешним газом, не реагирующим с КУ. По-видимому, при перемешивании происходит химическая адсорбция и, следовательно, закалка КУ, в том числе алмаза. Во всяком случае, это имеет место при обычных параметрах синтеза. Синтез алмаза можно осуществить и в воздухе, если заряд поместить внутрь массивной оболочки из льда или воды. При расширении в этих условиях ПД сильно охлаждаются, и поэтому при соприкосновении с воздухом алмаз не сгорает.

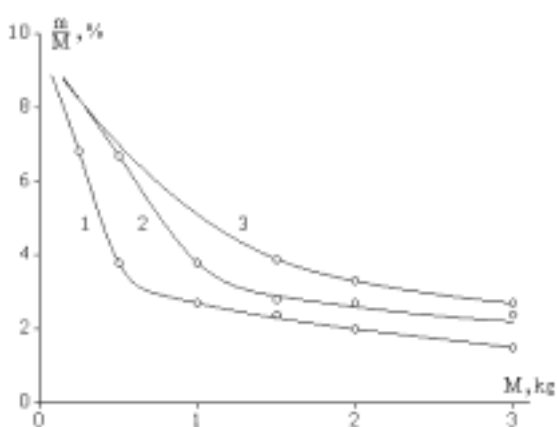


Рис. 7. Выход алмаза m от массы ТГ 50/50 (M).
 Взрывная камера 2 м^3 . Давление CO_2 :
 1 – 1 атм; 2 – 2 атм; 3 – 4 атм

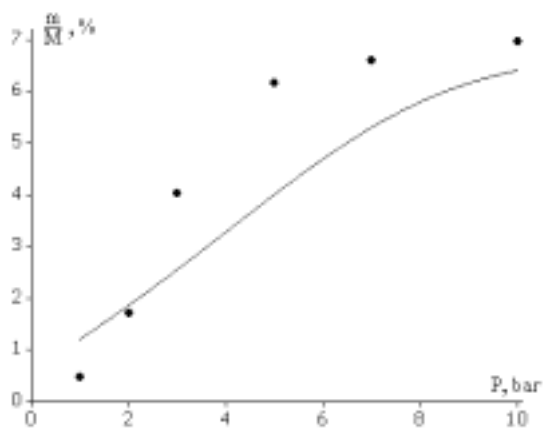


Рис. 8. Выход алмаза m в зависимости от давления азота (P) в камере. Масса ТГ 50/50 – 100 г (M). Объем взрывной камеры 0.175 м^3 .
 Сплошная линия – расчет, точки – опыт [12]

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детонационный синтез алмаза является сложным явлением, детальное исследование которого далеко от завершения. В данной работе был поставлен вопрос об основных, внутренних и внешних факторах, определяющих выход алмаза. По совокупности данных сделаны следующие заключения:

1. Образование алмаза в детонационной волне осуществляется через промежуточную аморфную фазу. Область синтеза на p - T плоскости характеризуется линией гистерезиса и переходным участком, в пределах которого превращение является неполным.

2. Потери алмаза в постдетонационных процессах обусловлены вторичными химическими реакциями, протекающими в ПД при расширении. Их величина определяется внешними условиями синтеза: массой заряда, сортом окружающего газа и его давлением. Максимальный выход алмаза для данного ВВ достигается в условиях, обеспечивающих изоэнтропический характер расширения ПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов В.М. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах// В.М. Титов, В.Ф. Анисичкин, И.Ю. Мальков// ФГВ.– 1989.– Т.25.– №3.– С.117–126.
2. Дремин А.Н. Об изломе зависимости скорости детонации от начальной плотности ТНТ// А.Н. Дремин, С.В. Першин, С.В. Пятернев, Д.Н. Цаплин// ФГВ.– 1989.– Т.25.– №5.– С.141–144.
3. Губин С.А. Влияние формы и размера кристаллов графита и алмаза на фазовое равновесие углерода и параметры детонации ВВ// С.А. Губин, В.В. Одинцов// Химическая физика.– 1990.– Т.9.– №3.– С.401–417.
4. Макгайр Р. Химия детонационных процессов: диффузионные явления в неидеальных взрывчатых веществах/ Р. Макгайр, Д. Орнелъянс, И. Акст// Детонация и взрывчатые вещества.– М.: Мир, 1981.– С.160–169.
5. Анисичкин В.Ф. Исследование процесса детонации конденсированных ВВ изотопным методом// В.Ф. Анисичкин, Б.Г. Дерендяев// ДАН СССР.– 1990.– Т.314.– №4.– С.879–881.
6. Козырев Н.В. Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов// Н.В. Козырев, П.М. Брыляков// ДАН СССР.– 1990.– Т.314.– №4.– С.889–891.
7. Козырев Н.В. Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов: 5-е Всесоюзное совещание по детонации// Н.В. Козырев, Г.В. Сакович: Сб. докладов. – Красноярск, 1991.– Т.1.– С.176–179.
8. Пятернев С.В. Зависимость давления ударно-инициированного превращения графит-алмаз от начальной плотности графита и линия гистерезиса данного превращения// С.В. Пятернев, С.В. Першин, А.Н. Дремин// ФГВ.– 1986.– Т.22.– №6.– С.125–130.
9. Аксененков В.В. Получение монокристаллов алмаза в пластически деформируемом графите// В.В. Аксененков, В.Д. Бланк, Н.Ф. Боровиков, В.Г. Данилов, К.И. Козорезов// ДАН СССР.– 1994.– Т.338.– №4.– С.472–476.
10. Bundy F.P. Melting of graphite at very high pressure. J. Chem. Phys., 1963, v.38, №3, p.618–630.
11. Петров Е.А. Условия сохранения алмазов в процессе детонационного превращения// Е.А. Петров, Г.В. Сакович, П.В. Брыляков// ДАН СССР.– 1990.– Т.313.– №4.– С.862–864.
12. Мальков И.Ю. Сохранение углерода во взрывных камерах// И.Ю. Мальков// ФГВ.– 1993.– Т.29.– № 5.– С.93–96.
13. Козырев Н.В. Исследование процесса синтеза УДА из смесей тротила с гексогеном, октогеном и теном// Н.В. Козырев, Е.С. Голубева// ФГВ.– 1992.– Т.28.– №5.– С.119–123.
14. Bundy F.P. Direct conversion of graphite at very high pressure. J. Chem. Phys., 1963, v.38, №3, p.631–643.
15. van Thiel M., Ree F.H. Properties of carbon clusters in TNT detonation products: the graphite-diamond transition. J. Appl. Phys., 1987, v.62, №5, p.1761–1767.

ABOUT THE DIAMOND FORMATION IN DETONATION SYNTHESIS

A.Y.Babushkin, A.I. Lyamkin

The work under consideration concerns with the mechanism of the diamond formation in a detonation wave and the factors accounting for its yield. The regularities of the synthesis fit the following scheme: carbon clusters→amorphous carbon→diamond. The region of the diamond synthesis determines the second chain of the given sequence of transformation; in a p - T plane it is characterized by the line of hysteresis and the intermediate area of the incomplete transformation of the amorphous carbon. The postdetonation diamond losses are associated with the secondary chemical reactions. The diamond yield was shown to be greatly conditioned by the external factors, such as: the charge mass, the kind and the parameters of the gas filling the explosion chamber; the maximal yield by this is reached under the conditions of the isoentropic expansion of the detonation products.