

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Б.П. Толочко, В.М. Титов, А.П. Чернышев,  
К.А. Тэн, Э.Р. Прууэл, И.Л. Жогин,  
П.И. Зубков, Н.З. Ляхов, Л.А. Лукьянчиков,  
М.А. Шеромов

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА  
НАНОАЛМАЗОВ

ИЯФ 2005-48

Новосибирск  
2005

**Физико-химическая модель  
детонационного синтеза наноалмазов**

Б.П. Толочко, В.М. Титов, А.П. Чернышев, К.А. Тэн,  
Э.Р. Прууэл, И.Л. Жогин, П.И. Зубков, Н.З. Ляхов,  
Л.А. Лукьянчиков, М.А. Шеромов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

---

## Введение

Методы получения алмазов можно условно разделить на две группы. К первой группе можно отнести методы, в которых для получения алмазов используется фазовый переход графит→алмаз. Превращение графита в алмаз происходит при высокой температуре и давлении. Ко второй группе относятся методы химического получения алмазных пленок. Алмазные пленки образуются на подложке в результате химических реакций, протекающих в плазме. При этом температура может быть ниже 1000 К, а давление от ~1 кПа до 0.1 МПа. До настоящего времени детонационный метод получения алмазов относили к первой группе методов, поскольку считалось, что образование ультрадисперсных алмазов (УДА) происходит непосредственно в детонационной волне (ДВ), т.е. при температуре 2000 – 3500 К и давлении 10 – 30 ГПа. Однако исследование кинетики формирования наноалмазов *in situ*, выполненное в работе [1], показало, что образование УДА происходит за ДВ через 500 нс после прохождения фронта УВ. Следовательно, ДВ лишь создает реакционную смесь (плазму) из которой затем в ходе химических реакций образуются наноалмазы. Поэтому детонационный синтез УДА следует отнести ко второй группе методов получения алмазов. В настоящее время отсутствует адекватная физико-химическая модель детонационного синтеза наноалмазов. Целью настоящей работы является построение модели физико-химических процессов, протекающих при детонационном синтезе алмазов.

### 1. Формирование плазмы в детонационной волне

В некоторых работах принимают, что взрывчатое вещество (ВВ) в детонационной волне разлагается до атомарного уровня, образование алмазов происходит в детонационной волне. Однако еще в работе [2] было показано, что энергии ударной волны (УВ) не достаточно для атомизации ВВ. Несложный расчет также показывает, что и энергии ДВ не хватит для полной атомизации ВВ. Т.о., точка зрения о полной атомизации вещества в детонационной волне является несостоятельной. В работе [3] было высказано предположение о том, что взрывчатое вещество не разлагается до атомарного уровня в ДВ, алмазы образуются из свободного углерода в ДВ, однако необходим защитный слой для их сохранения в агрессивной среде детонационной волны. Процесс формирования детонационных алмазов разбивали на три стадии [4]. Первая – образование алмазов в детонационной волне из свободного углеро-

да, вторая – быстрое охлаждение в волне разрежения до температуры, меньшей температуры графитизации. Третья стадия характеризуется интенсивным теплообменом между продуктами детонации (ПД) и окружающей средой. Наконец, работа [1] расставила все на свои места: алмазы образуются за детонационной волной. Излагаемая ниже физико-химическая модель основана на этом экспериментальном факте.

На зависимости удельной электрической проводимости,  $\sigma$ , от времени,  $\tau$ , после прохождения фронта УВ наблюдается в течение приблизительно 100 – 200 нс монотонный рост удельной электрической проводимости [1,5]. Участок ab на Рис.1 соответствует начальной стадии детонации: от образования очагов разложения ВВ – горячих точек (ГТ) сразу за фронтом УВ (точка a) до вовлечения в химическую реакцию большей части взрывчатого вещества (точка b).

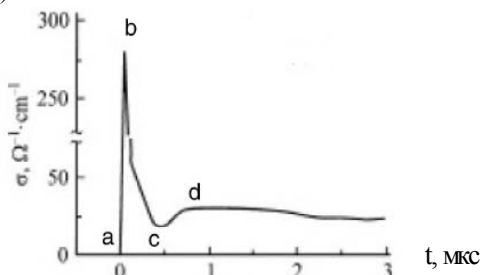


Рис. 1.

На этой стадии непрерывно увеличиваются температура и давление, достигая максимальных значений в окрестности точки b. Расстояние между ГТ можно оценить, используя формулу Михельсона:

$$\delta \sim \sqrt{\chi\tau}, \quad (1)$$

здесь  $\delta$  – характерное расстояние между ГТ,  $\chi$  – коэффициент температуропроводности ВВ. Для тринитротолуола возьмем значение  $\chi \approx 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  из [6]. При  $\tau \approx 100 \text{ нс}$  по формуле (1) получаем для характерного расстояния между ГТ оценку  $\delta \propto 10^{-7} \text{ м}$ . Для оценки скорости распространения волны горения из ГТ,  $W$ , разделим обе части уравнения (1) на характерное время  $\tau$ , тогда

$$W \sim \sqrt{\frac{\chi}{\tau}}. \quad (2)$$

После подстановки значений  $\chi$  и  $\tau$  имеем  $W \sim 1 \text{ м/с}$ . Характерный размер зерна прессованных ВВ около 10 – 100 мкм. Для ВВ, составленных из двух компонентов (например, толуол/гексоген), это приводит на начальных стадиях реакции к неполному перемешиванию продуктов разложения разных компонентов. Неполное перемешивание подтверждается данными по изотопному составу продуктов взрыва, полученными методом меченых атомов

[7]. Следует отметить, что перемешивание вещества происходит не только за счет диффузии, но и за счет массивного перемещения вещества, обусловленного локальными перепадами температуры и давления. Объем реагирующих веществ в этот промежуток времени не изменяется, потому что время разлета продуктов детонации много больше характерного времени реакции: по данным работы [1] относительное изменение удельного объема вещества в области детонации за первые 100 нс составляет менее 5%. Зона реакции постоянно расширяется, и в нее поступают все новые продукты разложения ВВ. Интенсивный разогрев продуктов разложения ВВ приводит к образованию низкотемпературной неидеальной плазмы [5].

Для подбора состава углеродсодержащей газовой смеси для получения алмазных пленок методом CVD очень удобной оказалась треугольная фазовая диаграмма O – C – H [8]. Было эмпирически установлено, что рост кристаллов алмаза происходит только при составах, соответствующих относительно узкой полосе вдоль линии CO – H. В методе CVD используются прочные реакторы, поэтому состав реагентов с течением времени не изменяется. Сам метод можно представить в виде схемы [9], представленной на Рис.2 для одной из реакционных смесей: H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>. Любая реакционная смесь подвергается непрерывной активации (термической, микроволновой и др.) для образования свободных радикалов. При детонации активация осуществляется детонационной волной в течение короткого времени, после чего состав реакционной смеси непрерывно изменяется.

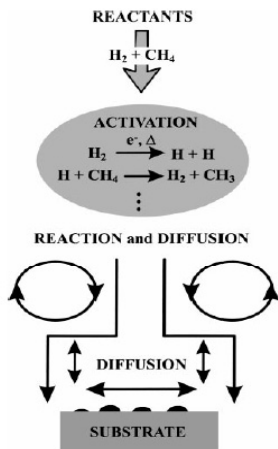


Рис. 2.

На участке bc (Рис.1) прекращается поступление в реакционный объем новых продуктов разложения ВВ и завершается «измельчение» молекул реагентов. Кислород частично покидает реакционную смесь в виде продуктов взрыва (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO и др.), поэтому растет отношение  $[C]/([C]+[O])$ . На тройной O – C – H-диаграмме этот процесс приводит к непрерывному сме-

щению точки, изображающей состав реакционной смеси, в область диаграммы с все большим относительным количеством углерода в зоне реакции. Для ВВ, имеющих химическую формулу вида  $C_aH_bN_cO_d$ , количественный состав плазмы определяется химическим составом ВВ, однако качественный состав плазмы изменяется, если коэффициент  $b$  или  $d$  равен нулю, в остальных случаях он практически одинаков. Было показано [11], что независимо от состава смеси газов, поступающих в реакционную зону, конструкции реактора, рост алмазных частиц возможен, если состав плазмы соответствует на  $O - C - H$ -диаграмме узкому участку над линией  $H - CO$  (см. Рис.3). Таким образом, формирование алмазов не зависит от природы поступающих в реакционный объем компонентов, поскольку в ходе химических реакций они быстро и эффективно разбиваются на небольшие молекулы, радикалы или ионы. При отрицательном кислородном балансе (КБ) кислород в плазме находится в связанном состоянии в виде  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NO$  и соответствующих ионов. Другими компонентами плазмы являются: водород ( $H_2$ ,  $H$ ,  $H^+$  и  $H^-$ ), предельные и непредельные углеводороды, углеводородные радикалы и ионы. Поскольку углеводородные компоненты с длинными цепями в плазме разрушаются, то остаются  $CH_4$ ,  $CH_3$ ,  $C_2H_2$  и т.п. Свободный углерод присутствует в реакционном объеме в виде  $C$ ,  $C_2$  и соответствующих ионов.

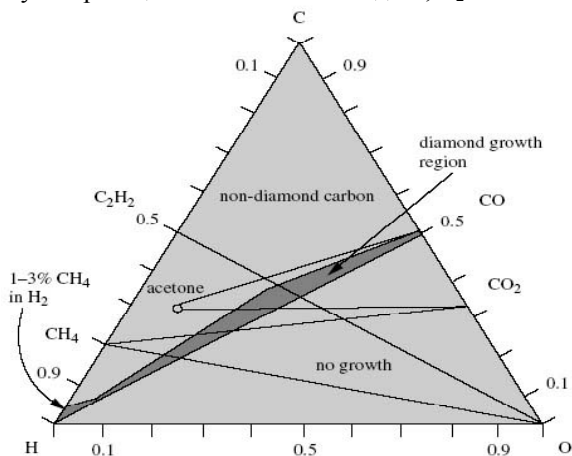


Рис. 3.

Химический состав большинства ВВ, используемых для детонационного синтеза наноалмазов [6, 10], имеет отношение концентраций  $[C]/[O] < 1$  и изображается на  $O - C - H$ -диаграмме точками, находящимися ниже линии  $H - CO$  в области, где алмазы не образуются. Для тринитротолуола (ТНТ) имеем:  $[C]/([C]+[O]) \approx 0.54$  и  $[H]/([H]+[C]) \approx 0.42$ . Соответствующая точка на тройной диаграмме лежит в алмазной области вблизи от границ с областью образования конденсированного углерода в виде его не алмазных форм. В ходе реакции относительное содержание углерода увеличивается, и реакци-

онный состав быстро смещается в область формирования не алмазных форм углерода. Поэтому относительное содержание (здесь и ниже данные по содержанию УДА и КУ взяты из [10]) наноалмазов в конденсированном углероде (КУ) –  $m_1 = 15.7\%$  почти в 5 раз меньше, чем после взрыва ВВ состава тротил – 60%, гексоген – 40% ( $m_1 = 72.7\%$ ). Для данного состава ВВ имеем  $[C]/([C]+[O]) \approx 0.47$  и  $[H]/([H]+[C]) \approx 0.5$ . Эта точка находится ниже зоны образования алмазов, поэтому количество образовавшегося КУ не самое большое, а относительное содержание УДА равно 72.7%. Последнее обусловлено тем, что линия, вычерчиваемая составом реакционной смеси проходит через алмазную область в ее самой широкой части. В системе тринитрорезорцин/гексоген (с составом 20/80%) [3] в исходном составе низкое относительное содержание углерода по отношению к кислороду:  $[C]/([C]+[O]) \approx 0.36$ , поэтому по мере движения, точка, изображающая состояние реакционной смеси, проходит большей «путь» в области ниже линии O – C. Здесь теряется (превращается в CO и CO<sub>2</sub>) большая часть углерода, поэтому в продуктах взрыва остается мало КУ (1.91%), затем часть КУ выделяется в алмазной области в виде УДА ( $m_1=58\%$ ). Таким образом, движение точки, изображающей состав реакционной смеси, в области ниже линии H – CO происходит за счет образования продуктов взрыва в виде CO, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, что приводит к уменьшению количества КУ. Относительное количество алмазной фазы определяется шириной участка области образования алмазов, проходящего изображающей точкой.

## 2. Кинетика и термодинамика образования ультрадисперсных алмазов

Традиционными катализаторами, используемыми при производстве алмазов методом НРНТ, являются металлы восьмой группы: Fe, Co, Ni. В рамках теории активированного комплекса необходимость применения катализаторов объясняется следующим образом. Термодинамическое равновесие между аллотропическими фазами графит – алмаз наступает при равенстве химических потенциалов:

$$\mu_1(p, T) = \mu_2(p, T), \quad (3)$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – химические потенциалы атома углерода в графите и алмазе соответственно. При постоянной температуре

$$d\mu = v dp \quad (4)$$

Из (4) получим

$$\mu = \mu^0 + \int_{p^0}^p v dp \quad (5)$$

или для разности химических потенциалов

$$\mu_2 - \mu_1 = \mu_2^0 - \mu_1^0 + \int_{p^0}^p (v_2 - v_1) dp. \quad (6)$$

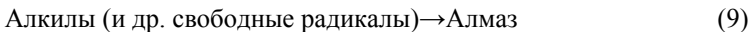
Поскольку  $v_2 < v_1$ , то увеличение давления смещает термодинамическое равновесие в сторону образования алмазной фазы, что графически отражено на  $p - T$  - диаграмме состояния углерода. Однако экспериментально и теоретически было показано, что с увеличением давления уменьшается скорость образования алмазов из графита. Действительно, зависимость логарифма скорости химической реакции от давления имеет вид:

$$\ln r = \text{const} - \frac{\Delta v^\# \cdot p}{kT}, \quad (7)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, а разность объемов  $\Delta v^\#$  определяется выражением

$$\Delta v^\# = v^\# - v_1, \quad (8)$$

здесь  $v^\#$  – объем, приходящийся на одну молекулу или атом в активированном комплексе. Объем активированного комплекса  $v^\# \approx 23 \text{ \AA}^3$ , а объем, приходящийся на атом углерода в графите  $v_1 \approx 9 \text{ \AA}^3$ , поэтому  $\Delta v^\# > 0$  и с ростом давления скорость образования алмазов уменьшается. С одной стороны, для смещения термодинамического равновесия в сторону образования алмазов, необходимо повышать температуру и давление, с другой стороны, увеличение давления приводит к уменьшению скорости образования алмазов. Причем скорость реакции уменьшается настолько, что получить алмазы непосредственно из графита за практически значимое время не удается. В методе НРНТ это противоречие решается с помощью катализаторов. Для успешного синтеза алмазов необходимо разобрать графит на атомы и затем собрать их в алмазную решетку. Этот процесс возможен в растворах. Поэтому используются жидкие катализаторы. В методе CVD формирование алмазных пленок происходит при температурах  $1000 \div 2000 \text{ K}$ , давлении меньше  $100 \text{ кПа}$ , т.е. в области метастабильного термодинамического состояния алмазной фазы. Фактически осуществляется химический синтез алмазов по схеме



Для стационарной плазмы, т.е. плазмы с установившимся составом в проточном реакторе, определяющую роль играет атомарный водород. Хотя в объеме алмаза все связи имеют  $sp^3$ -гибридизацию, поверхностные атомы углерода имеют свободные связи, которые могут объединяться между собой, переходя в состояние с  $sp^2$ -гибридизацией и образуя не алмазные соединения (напр. графит). Поэтому необходим механизм, исключаяющий возникновение соединений с  $sp^2$ -гибридизацией. В реакционной смеси, содержащей углево-



дородные соединения, заполняя вакантную связь, эту роль выполняет атомарный водород. В процессе роста алмазов водород десорбируется, уступая свое место содержащему углерод соединению. Водород быстрее присоединяется к углероду с  $sp^2$ -гибридизацией, чем с  $sp^3$ -гибридизацией. Тем самым прекращается графитизация поверхности, и кластеры графита удаляются с поверхности алмаза в объем реакционной смеси. Таким образом, рост алмазов это сложный многоступенчатый процесс. Атомарный водород разрушает длинные углеводородные молекулы на менее длинные фрагменты. Это позволяет предотвратить полимеризацию и образование в реакционной смеси циклических соединений, которые, осаждааясь на поверхности алмазов, препятствовали бы их дальнейшему росту. Водород, взаимодействуя с нейтральными молекулами, например, с метаном:



приводит к образованию свободных радикалов, обеспечивающих рост алмазных частиц. В настоящее время принято, что основную роль в формировании алмазных пленок из реакционной смеси играет метильный радикал. Присоединяясь к поверхности алмаза, он переходит в  $sp^3$ -гибридизованное состояние. Три водорода, входящие в состав метильной группы, представляют собой теперь три потенциальных места присоединения следующих метильных радикалов или их объединение с образованием элементов кристаллической решетки алмаза. В ходе этой радикальной реакции растущий наноалмаз имеет поверхностный слой, состоящий из углеводородных радикалов. Это основной механизм роста алмазных пленок. Основным принципом химического синтеза наноалмазов является необходимость построения химического процесса, поддерживающего  $sp^3$ -гибридизацию. Процесс может быть построен и без участия метильного радикала. Так в работе [12] была получена алмазная пленка в процессе с катализатором



Где  $CCl_4$  был использован в качестве химического соединения, поддерживающего  $sp^3$ -гибридизацию. В силу метастабильности образование зародышей алмазной фазы затруднено (низкие температура и давление) и на поверхность подложки наносят «затравочный» слой алмазов, или наносят царапины другими алмазами (или используют аналогичные методики). Повышение давления газовой смеси ускоряет рост алмазных пленок вследствие повышения концентрации свободных алкильных радикалов и в силу смещения метастабильного термодинамического равновесия в сторону алмазной фазы по принципу Ле Шателье. Однако с увеличением давления возрастает роль рекомбинации свободных радикалов. Скорость рекомбинации  $r_{rec}$  имеет второй порядок по концентрации радикалов  $[R]$ :

$$r_{rec} = k_{rec} \cdot [R]^2, \quad (12)$$

а скорость взаимодействия радикалов с поверхностью  $r_{surf}$  имеет первый порядок:

$$r_{surf} = k_{surf} \cdot [R]. \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) следует, что, начиная с некоторого давления, скорость рекомбинации радикалов становится выше скорости их присоединения к поверхности. Поэтому существует оптимальное для скорости роста алмазных пленок давление, обычно не превышающее 50 – 100 мм рт.ст.

При детонационном синтезе алмазов детонационной волной формируется реакционная смесь, подобная используемой в методе CVD. Синтез проводится при высоких давлениях и температурах в области существования стабильной алмазной фазы. Поэтому быстрое зарождение и рост новой фазы происходят за доли микросекунды. Роль катализаторов при детонационном синтезе отличается от их роли в процессе НРНТ. Эксперименты с использованием атомов изотопов показали, что УДА характеризуются повышенным содержанием углерода метильной группы молекулы ТНТ. На поверхности алмазных частиц (в том числе полученных из смеси гексогена и сажи ударно-волновым методом), кроме функциональных кислородсодержащих групп, было обнаружено большое количество предельных углеводородных радикалов [3]. Следовательно, химический механизм формирования тонких пленок алмазов и УДА одинаков. В ходе радикальной реакции растущий наноалмаз имеет поверхностный слой, состоящий из углеводородных радикалов. На поверхность растущего алмазного кластера кроме углеводородов и атомарного водорода, адсорбируются и другие свободные радикалы и молекулы, присутствующие в объеме реакционной смеси: CO, NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и др. Их наличие в составе УДА подтверждается данными элементного анализа и ИК-спектроскопии [3]. Таким образом, детонационный алмаз образуется в ходе химических реакций, протекающих за плоскостью Чепмена-Жуге.

Состав продуктов детонации бензотрифуроксана (C<sub>6</sub>N<sub>6</sub>O<sub>6</sub>, БТФ) изображается точкой на линии O – C с отношением [C]/([C]+[O]) = 0,5, т.е. в области образования алмазов. В продуктах детонации этого соединения также обнаружены УДА [10]. БТФ имеет высокотемпературные продукты детонации (ПД)  $T_n \sim 5000$  К и находится в самой узкой части области образования алмазов. Поэтому вместо алмазов за ДВ формируются кластеры КУ с адсорбированными на их поверхности соединениями азота и кислорода. Затем происходит скачок конденсации, в ходе которого образуются крупные капли углерода. Углерод в ходе дальнейшего расширения ПД кристаллизуется в алмазы. При этом растворенные в углероде вещества могут выделяться в виде газов, образуя поры в алмазных конгломератах. Следует отметить, что наличие примесей в углероде делает некорректным применение диаграммы со-

стояния углерода для анализа свойств ПД. Роль примесей в образовании алмазов из ПД бензотрифуроксана требует дальнейшего изучения.

Скорость роста детонационных алмазов по порядку величины можно оценить как отношение среднего диаметра наноалмаза ( $d$ ) к времени вылета наноалмазов из реакционного объема ( $t_r$ ):

$$G = d / t_r, \quad (14)$$

Средний диаметр алмазных частиц по данным работы [1] равен  $50 \text{ \AA}$ , а  $t_r$  равно  $0.5$  мкс. Отсюда получаем  $G = 0.01 \text{ м/с}$ . Скорость роста алмазной пленки при давлении  $100 \text{ мм рт.ст.}$  около  $10^{-8} \text{ м/с}$ . Увеличение скорости роста алмазных частиц в  $\sim 10^6$  раз обусловлен тем, что давление в зоне образования УДА также примерно в  $10^6$  раз больше. Скорость роста УДА, как и скорость роста алмазной пленки, должна иметь первый порядок по концентрации углеводородных радикалов в области, непосредственно прилегающей к поверхности растущего кластера. Соответственно плотность реакционной смеси при детонационном синтезе алмазов также в  $10^6$  раз больше, чем при получении алмазных пленок на подложках из различных материалов. Рассмотрим диффузионный механизм образования алмазов. Для этого оценим величину коэффициента диффузии, необходимого для скорости роста (14). Используем формулу Эйнштейна

$$\langle x^2 \rangle = 6Dt, \quad (15)$$

откуда непосредственно следует оценка

$$D \sim \frac{d^2}{t_r} \sim 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (16)$$

Характерные порядки величин коэффициентов диффузии в газах  $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , в жидкостях  $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  (причем и те, и другие слабо зависят от температуры), а в твердых телах  $\sim 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре, близкой к плавлению, и гораздо меньше – при более низких температурах. Таким образом, рост УДА может происходить по диффузионному механизму в жидкой и газообразной фазах. Свойства среды, в которой формируются детонационные УДА, характерны для жидкого состояния вещества. Рост УДА происходит по диффузионному механизму. Несмотря на высокую концентрацию радикалов, скорость их рекомбинации существенно меньше скорости их присоединения к алмазным кластерам. Вследствие малых размеров алмазных частиц ( $\sim 50 \text{ \AA}$ ) и относительно большой массе (до  $10\%$  от массы ВВ) их концентрация составляет около  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Среднее расстояние между кластерами около  $100 \text{ \AA}$ . Наночастицы имеют большую удельную поверхность  $S \sim 10^7 \text{ м}^{-1}$ , что также способствует захвату ими радикалов. Поэтому формула (13) должна быть заменена формулой, учитывающей концентрацию алмазных кластеров [*Cluster*]:

$$r_{surf} = k_s \cdot [R] \cdot [Cluster] = k_{sc} \cdot [R] \cdot S, \quad (17)$$

откуда непосредственно следует, что

$$r_{surf} \gg r_{rec}. \quad (18)$$

Увеличение среднего размера кластеров приводит к уменьшению  $r_{surf}$  за счет сокращения  $S$  и, в конечном счете, к преобладанию процессов рекомбинации (прекращению роста алмазных частиц). Это, возможно, и обуславливает небольшой размер детонационных алмазов.

## Заключение

В данной работе предложена физико-химическая модель формирования детонационных алмазов, в соответствии с которой наноалмазы формируются химическим путем, а не при фазовом превращении графит→алмаз. Формирование УДА происходит за плоскостью Чепмена-Жуге в реакционной смеси, подобной смесям, используемым для получения алмазных пленок. Алмазный кластер имеет сложный химический состав. Свойства среды, в которой формируются детонационные УДА, характерны для жидкого состояния вещества. Рост кластера происходит по диффузионному механизму за счет химических реакций, протекающих на его поверхности при адсорбции свободных углеводородных радикалов. В процессе роста алмазной частицы её поверхность постоянно покрыта углеводородными радикалами и другими соединениями, находящимися в реакционном объеме. Предложен способ графического изображения состояния реакционной смеси в ходе образования КУ и УДА. Показано, что количество КУ в ПД уменьшается с увеличением пути, проходимого изображающей точкой в области ниже линии Н – СО, а относительное количество УДА определяется длиной пути, проходимого в области образования алмазов. Предложенная модель дает простую и адекватную интерпретацию имеющихся литературных данных по детонационному синтезу алмазов.

## Литература

1. *Titov V.M., Tolochko B.P., Ten K.A., Lukyanchikov L.A., Zubkov P.I.* The formation kinetics of detonation nanodiamonds. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Synthesis, Properties and Applications of Ultrananocrystalline Diamond, St. Petersburg, Russia, 7-10 June 2004. Published by Springer, 2005.
2. *Титов В.М., Анисичкин В.Ф., Мальков И.Ю.* Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах. ФГВ, 1989, т.35, №3, с.117 – 126.
3. *Мионов Е.В., Петров Е.А., Корец А.Я.* От анализа структуры ультрадисперсного алмаза к вопросу о кинетике его формирования. ФГВ, т.40, №4, с.112-116, 2004.
4. *Долматов В.Ю., Веретенникова М.В., Марчуков В.А., Суцев В.Г.* Современные промышленные возможности синтеза наноалмазов. ФТТ, 2004, т.46, вып.4, с.596-600.
5. *Гилев С.Д., Трубачев А.М.* Высокая электропроводность продуктов детонации тротила. ЖТФ, 2001, т.71, вып.9, с.123-127.
6. Физика взрыва/Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – (В 2 т.) т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
7. *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.
8. *Petherbridge J.R., May P.W., Pearce S.R.J., Rosser K.N., Ashfold M.N.R.* Low temperature diamond growth using CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> plasmas: Molecular beam mass spectrometry and computer simulation investigations J. Appl. Phys., v.89, N2, 2001, p.1484-1492.
9. *Ashfold M. N. R., May P. W., Petherbridge J. R., Rosser K. N. et al.* Unraveling aspects of the gas phase chemistry involved in diamond chemical vapour deposition. Phys. Chem. Chem. Phys., 2001, 3, p.3471-3485.
10. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – (В 2 т.) т.2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
11. *May P.W.* Diamond thin films: a 21st-century material. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2000) **358**, 473-495.
12. *Li Y., Qian Y., Liao H., Ding Y., Yang L. et al.* A Reduction-Pyrolysis-Catalysis Synthesis of Diamond. Science, v.281 (1998) p.246-247.

*Б.П. Толочко, В.М. Титов, А.П. Чернышев, К.А. Тэн,  
Э.Р. Прууэл, И.Л. Жогин, П.И. Зубков, Н.З. Ляхов,  
Л.А. Лукьянчиков, М.А. Шеромов*

**Физико-химическая модель  
детонационного синтеза наноалмазов**

*B.P. Tolochko, V.M. Titov, A.P. Chernyshev, K.A. Ten,  
E.R. Prowel, I.L. Zhogin, P.I. Zubkov, N.Z. Lyakhov,  
L.A. Luk'yanchenkov, M.A. Sheromov*

**Physical-chemical model  
of the detonation nanodiamonds synthesis**

ИЯФ 2005-48

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 1.12.2005

---

Сдано в набор 2.12.2005

Подписано в печать 2.12.2005

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 135 экз. Бесплатно. Заказ № 48

---

*Обработано на IBM PC и отпечатано*

*на ротативе ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН*

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*