

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО АЛМАЗА ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА ПО СПЕКТРАМ ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ

А. Я. Корец, Е. В. Миронов, Е. А. Петров\*

Красноярский государственный технический университет, 660074 Красноярск, prcom@kgtu.runnet.ru  
\*Федеральный научно-производственный центр «Алтай», 659322 Бийск

Исследованы ИК-спектры ультрадисперсных алмазов, полученных различными группами исследователей. Изучено влияние термической и радиационной обработки на свойства систем ультрадисперсных алмазов. На основе анализа ИК-спектров сделаны качественные предположения, касающиеся кинетики образования систем ультрадисперсных алмазов.

Ключевые слова: ультрадисперсный алмаз, детонационный синтез, ИК-спектр.

## ВВЕДЕНИЕ

Ультрадисперсный алмаз (УДА), полученный детонационным методом [1–4] из смеси тринитротолуола и гексогена (ТГ), представляет собой систему частиц со средним размером зерна  $3 \div 9$  нм и удельной площадью поверхности  $250 \text{ м}^2/\text{г}$  и более.

Анализ физико-химических свойств данного ультрадисперсного материала проводится специалистами с различных позиций. В этой неоднозначности заключается общая сложность понимания наноструктурных систем. С общих термодинамических позиций можно ожидать, что существенное значение отношения поверхностной энергии к объемной для данных частиц должно вызывать искажение зонной и кристаллической структур и, как следствие, может служить причиной изменения типа гибридизации электронных орбиталей и приводить к самопроизвольной графитизации. В теоретической работе [5] было показано, что алмазная частица размером менее 5 нм термодинамически более устойчива, чем аналогичная графитовая частица. Экспериментальные результаты позволяют рассматривать УДА как систему с двойным уровнем агрегирования — первичный взрывной кластер размером  $20 \div 60$  нм и вторичное агрегирование до 1000 нм и более [6]. И наконец, в большинстве химических экспериментальных работ сделан вывод о постоянном вкладе органических функциональных групп в состав УДА [7–10]. С химических позиций данное предположение достаточно логично. Так как доля углерода при детонационном разложении

взрывчатых веществ (ВВ) составляет примерно  $20 \div 30$  атомов на 100 атомов в зависимости от типа ВВ. Поэтому естественно ожидать, что формирующиеся в результате разложения ВВ органические молекулы и функциональные группы и химические реакции с их участием должны существенно влиять на процессы формирования УДА. Целью данной работы является изучение органической составляющей и того влияния, которое данная составляющая может оказывать на синтез УДА.

Так как агрегирование существенно влияет на физико-химические свойства УДА [6], в данной работе использовалась экспериментальная методика для оценки размеров агрегатов, предложенная в [11] и адаптированная для систем УДА в работе [12]. Выбор данной методики позволяет избежать осложнений с анализом рентгеноаморфной фазы детонационного алмаза [13]. Для идентификации и анализа молекулярных групп (органической составляющей) УДА использовалась инфракрасная (ИК) спектроскопия.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовались образцы, полученные в научных центрах Бийска, Красноярска, Челябинска:

- образец УДА-1 — ультрадисперсные алмазы, полученные детонационным методом из смеси тротила и гексогена в массовом отношении 40 : 60, выделенные из продуктов детонации окислением в присутствии борного ангидрида по методу [8],
- образец УДА-2 — ультрадисперсные ал-

мазы, полученные детонационным методом из смеси тротила и гексогена в массовом отношении 60 : 40, выделенные обработкой хромовой смесью,

- образец ГС, полученный ударно-волновым методом из смеси гексогена и сажи по методу [14] и выделенный из шихты серноазотной смесью,

- образец САА, полученный ударно-волновым синтезом из смеси гексогена и порошка искусственного алмаза марки АСМ,

- образцы, полученные детонационным методом из смеси тротила и гексогена в массовом отношении 60 : 40: УДА-Г — смесь алмаза и неалмазного углерода (шихта), очищенная от технологических примесей после взрывного процесса, УДА-О дополнительно очищен с помощью кислорода воздуха.

### 1.1. Определение средних интегральных размеров частиц УДА

Образец УДА-Г структурно представляет собой продукты детонации (сажу и собственно УДА), и в его рентгеновских спектрах имеются полосы, характерные для графита и алмаза. Рентгенограммы всех остальных образцов представлены линиями алмаза.

Образцы детонационного синтеза, полученные в разных организациях, но из одного состава взрывчатого вещества, имеют близкие размеры агрегатов в диапазоне 100 ÷ 200 нм. Образцы, полученные ударно-волновым методом, характеризуются более крупным зерном, и несколько бóльшим интегральным размером агрегатов. Но в обоих случаях агрегаты находятся в области размеров вторичного агрегирования. Поэтому знание точного размера не принципиально.

### 1.2. Структура ИК-спектра

Реальное инфракрасное поглощение исследуемых таблеток КВг с добавлением УДА складывается:

- из поглощения собственно зерна, в данном случае — беспримесного алмаза с идеальной кристаллической решеткой (по правилам отбора в однофонной области решеточных колебаний такое поглощение отсутствует [15]);

- из поглощения, вызванного дефектами кристаллической решетки, нарушающими правила запрета однофонного поглощения; наи-

более распространенные дефекты кристаллической решетки алмаза имеют ИК-активность и их концентрация прямо пропорциональна оптической плотности этого поглощения;

- из поглощения собственно органической составляющей УДА, большая часть которой состоит из различных функциональных групп;

- из ослабления, связанного с рэлеевским рассеянием на неоднородностях.

Образцы детонационного синтеза на 10 ÷ 20 % (по массе) состоят из органических функциональных групп, сформированных из различных элементов, что и добавляет поглощение, связанное с функциональными группами. Доля углерода в элементном составе образцов ударно-волнового синтеза выше, чем в образцах детонационного синтеза, что усиливает поглощение — ослабление, связанное с рассеянием. Это объясняет некоторые качественные различия ИК-спектров ударно-волновых и детонационных образцов, имеющих, в целом, близкое физико-химическое происхождение [16].

Элементный состав УДА, полученных детонационным синтезом, как правило, следующий: С — 84 ÷ 90 %, Н — 0,8 ÷ 1,2 %, N — 1,5 ÷ 2,5 %, О — 8,0 ÷ 10,0 % [4, 7, 8, 17]. Это объясняется тем, что определенная часть углерода, а также значительная часть кислорода и водорода находятся на поверхности. Анализ полученных ИК-спектров позволил выделить следующие спектральные особенности образцов детонационного синтеза.

1. Наличие характерного ступенчатого поглощения с главным пиком 1260 см<sup>-1</sup> для УДА-1 (рис. 1) и 1250 см<sup>-1</sup> для УДА-Г, боковые плечевые полосы — 1205 и 1110 см<sup>-1</sup> соответственно. Данное поглощение связано с включением двух смежных атомов азота в кристаллическую решетку алмаза. Такое искажение называют А-дефектом [15]. В природных алмазах главный пик азотного А-дефекта 1280 см<sup>-1</sup>. Смещение полосы связано с влиянием конечного размера частиц УДА на структуру поглощения [18].

2. Поглощение в области 1110 ÷ 1140 см<sup>-1</sup> наиболее характерно для образцов УДА-2 (см. рис. 1) и для УДА-О. Скорее всего, оно связано с валентным колебанием С—О [8], так как, в целом, кислород составляет 8 ÷ 10 % массы частиц УДА.

Образцы ударно-волнового синтеза ГС и САА имеют подобный по структуре и значени-

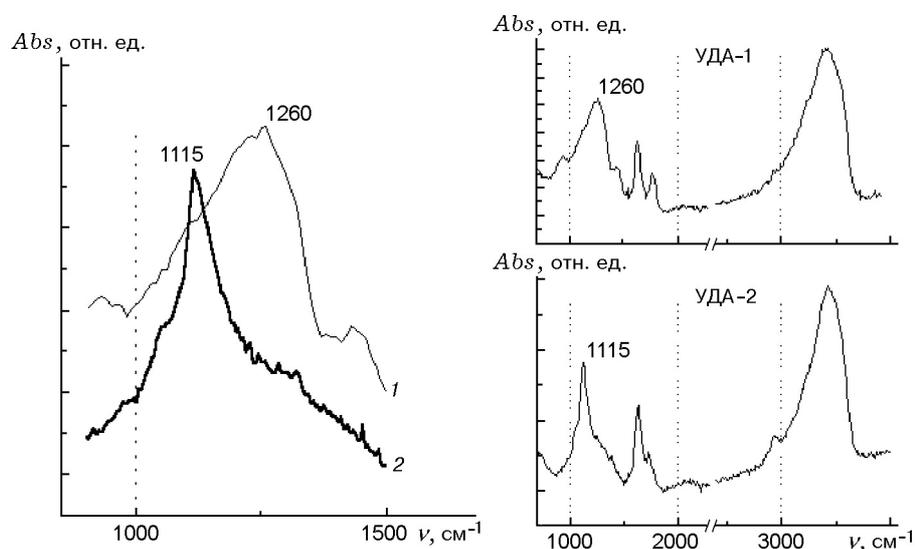


Рис. 1. Сравнение ИК-спектров образцов УДА-1 (кривая 1) и УДА-2 (кривая 2):  
*Abs* — поглощение,  $\nu$  — волновое число

ям полос поглощения ИК-спектр, что подчеркивает близость физико-химических процессов, приведших к формированию данных образцов. В их спектрах наблюдаются полосы в областях  $3440 \div 3450$  и  $1620 \div 1640 \text{ см}^{-1}$ , что обусловлено наличием гидроксильных групп. Полосы поглощения в спектральных областях  $2920 \div 2945$  и  $2830 \div 2850 \text{ см}^{-1}$  соответствуют валентным колебаниям С—Н (асимметричным и симметричным соответственно) в составе предельных углеводородных групп. Природа полосы поглощения  $1100 \text{ см}^{-1}$  менее ясна, а полоса поглощения  $450 \div 600 \text{ см}^{-1}$  обусловлена, в том числе, и наличием нитро- или нитрозогрупп. В целом, эти спектральные особенности характерны и для образцов детонационного синтеза.

Следует заметить, что на поверхности алмазных частиц обоих типов, кроме кислородсодержащих функциональных групп находится большое количество предельных углеводородных радикалов (рис. 2). Отсюда возникает предположение, что предельные группы в большей степени способны обеспечивать стабильность поверхности алмазных частиц.

### 1.3. Влияние термической обработки на свойства УДА

Образцы УДА-1, УДА-2 подвергались термической обработке, их нагревали до температур 373, 673 и 973 К в воздухе в течение 1 ч. До температуры 373 К размер агрегатов практи-

чески не менялся. При увеличении температуры до 673 К начиналось окисление, при этом агрегаты разрушались и, как следствие, интегральные размеры уменьшались на  $\approx 30 \%$ . Дальнейшее увеличение температуры усиливало окисление, и в первую очередь окислялись наиболее мелкие агрегаты. Интегральная информация дает увеличение размеров агрегатов примерно на  $38 \div 40 \%$ .

Отметим, что, в целом, взаимодействие с кислородом воздуха уменьшает размер агрегатов и, следовательно, устойчивость частицы УДА. Вполне возможно, что такая же тенденция будет присутствовать и в процессах формирования системы УДА.

### 1.4. Влияние радиационной обработки на свойства УДА

Были проведены предварительные исследования образцов УДА-Г и УДА-1, подвергнутых высокоэнергетическому реакторному облучению (облучение быстрыми нейтронами и гамма-облучение). В результате облучения образца УДА-Г характерных изменений в ИК-спектре не выявлено. Во втором образце, облученном быстрыми нейтронами ( $E > 1 \text{ МэВ}$ ) с потоком  $\Phi = (1,30 \pm 0,19) \cdot 10^{17}$  нейтрон/ $\text{см}^2$ , также не обнаружено существенных изменений в характере ИК-спектра. В образце, подвергнутом  $\gamma$ -обработке дозой  $(0,5 \pm 0,17) \text{ Мрад}$ , наблюдалось изменение поглощения после облу-

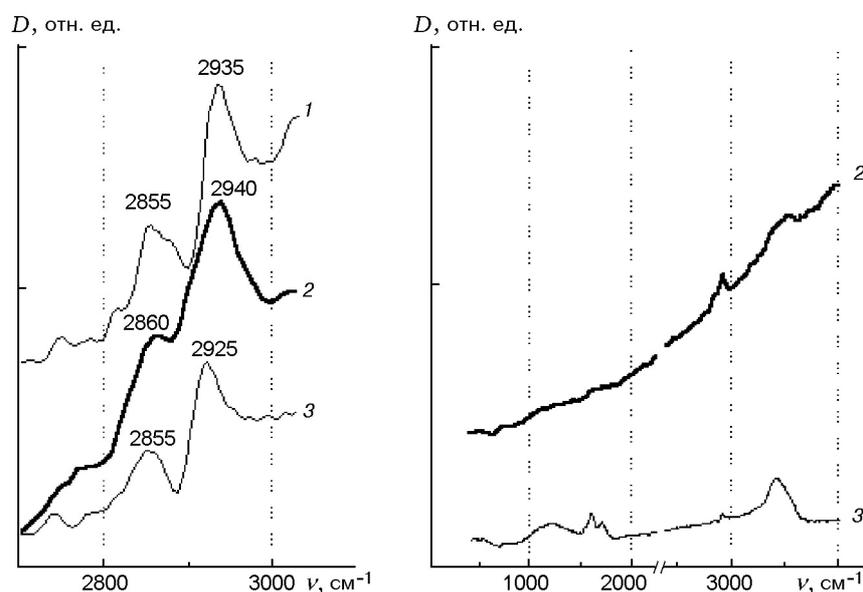


Рис. 2. Сравнение общей структуры ИК-спектра образцов детонационного и ударно-волнового синтеза:

$D$  — оптическая плотность,  $\nu$  — волновое число; характеристическое поглощение предельных углеводородных групп для образцов обоих типов в спектральной области  $2800 \div 3000 \text{ см}^{-1}$ ; 1 — УДА-1, 2 — образец ГС, 3 — УДА-Г

чения, связанного с колебаниями углеводородных групп ( $1439, 2859, 2930$  и  $2970 \text{ см}^{-1}$ ) [19].

В данной работе использовалось только высокоэнергетическое  $\gamma$ -облучение ( $(183 \pm 24)$  Мрад с энергией до 2,4 МэВ).

В результате облучения образцов детонационного синтеза в ИК-спектрах не проявилось значительных изменений, кроме образца УДА-О, спектр которого приведен на рис. 3. В образце УДА-О зафиксировано смещение полосы поглощения с  $1315$  до  $1275 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о наличии центров А-типа. Среднее значение агрегатов в результате облучения уменьшилось с  $191$  до  $130 \text{ нм}$ , что также подтверждает данный вывод.

Образцы ударно-волнового синтеза характеризовались аналогичными ИК-спектрами. Для образца САА отчетливо наблюдалось смещение полосы с  $2945$  до  $2920 \text{ см}^{-1}$  (см. рис. 3). Сдвиг объясняется влиянием облучения на углеводородные группы, что приводит к изменению характеристических частот валентных колебаний С—Н. Подобное смещение наблюдалось и для образца ГС.

В целом, радиационная обработка не внесла значительных изменений в структуру исследуемых образцов. Наблюдалось лишь уменьшение размеров агрегатов УДА-О на 30 %, ГС —

на 15 %, САА — на 3 %, для УДА-Г изменений нет.

## 2. СВЯЗЬ ИК-СПЕКТРОВ С ПРОЦЕССАМИ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ АЛМАЗА

Устойчивость спектров ИК-поглощения ряда функциональных групп (гидроксильных, метильных и др.) в образцах, подвергнутых различным физико-химическим воздействиям (окисление, радиационное облучение), согласуется со сделанным предположением о связи формирования данных органических групп с синтезом ультрадисперсного алмаза.

Очевидно, что формирующиеся в неравновесных условиях молекулярные группы и дефекты ультрадисперсной фазы алмаза должны быть связаны с синтезом прямо или косвенно и нести информацию о процессах, влияющих на синтез.

### 2.1. Реакция образования оксида азота

Для большинства ИК-спектров УДА характерно поглощение в области  $450 \div 600 \text{ см}^{-1}$  (см. рис. 3). За это поглощение ответственно колебание азот — кислород в нитро( $\text{R}-\text{NO}_2$ )- и

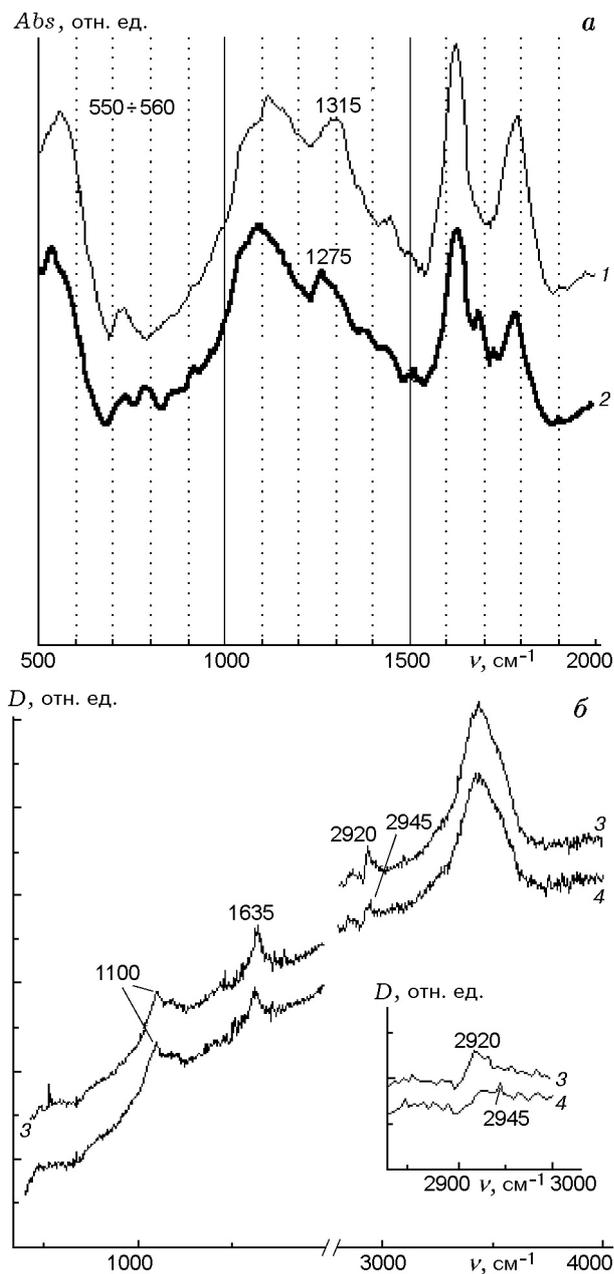


Рис. 3. ИК-спектры облученных и необлученных образцов УДА:

*a* — спектры поглощения, *б* — оптическая плотность; 1, 4 — необлученные образцы УДА-О и САА соответственно, 2, 3 — облученные образцы УДА-О и САА соответственно

нитрозо(R-NO)-группах. Для образца УДА-1, синтезированного в углекислом газе (и, скорее всего, для всех образцов), источником этой полосы должен быть оксид NO. Его можно получить из простых веществ при температурах  $3000 \div 4000$  °C [20]. Образование оксидов NO, NO<sub>2</sub> экспериментально подтверждено в работе [21].

Формирование данного оксида в состоянии влиять на процесс нуклеации алмазной фазы, увеличивая долю углерода в зоне образования системы УДА. И полученная в работе [22] зависимость выхода УДА от температуры для ВВ с большим содержанием кислорода и азота может быть объяснена простым температурным ускорением данной реакции.

### 2.2. Азотное включение А-типа

Азотное включение А-типа представляет собой дефект, определяемый в природном алмазе. Функцию, которую может выполнять данный дефект, геологические работы не определяют [15].

На внешней валентной оболочке азота имеются пять электронов, и азот в состоянии проявлять восемь различных степеней окисления. В случае нитрогруппы, характерной для многих ВВ, все пять электронов азота идут на формирование химической связи. Азот А-дефекта, так же как и внутрициклический азот гексогена, дает на формирование химической связи три *p*-электрона. Оставшиеся два электрона представляют собой неподеленную пару *s*-электронов. Действительно, экспериментальные данные свидетельствуют, что азот А-дефекта находится не на поверхности частицы УДА, время формирования УДА мало и время существования высокотемпературной зоны [23] относительно невелико для значительных физико-химических перестроек, связанных с азотом. Поэтому логично предположить, что два азотных фрагмента гексогена не успевают изменить свою химическую конфигурацию и в дальнейшем формируют А-дефект.

Полученный результат можно связать с различной скоростью образования алмазных частиц из фрагментов распада в детонационной волне молекул тротила и гексогена. Именно такой вывод сделан в экспериментальной работе [24].

Функционально данный фрагмент может решать задачу укрупнения углеродного зародыша. Вследствие этого должна повышаться

ся физико-химическая устойчивость системы УДА. Согласно [9] алмазоподобный углерод детонационного синтеза можно охарактеризовать как твердый раствор азота в углероде кубической структуры. Значительную роль в устойчивости данной фазы играют внедренные атомы азота [9]. Но все же более правдоподобной представляется химическая функция А-дефекта. Кроме образования оксида азота в таких условиях должна проходить реакция образования молекулярного азота. Для данного соединения температура синтеза невысока. Строение молекулярного азота таково, что используется азот с неподеленной парой  $s$ -электронов. Появление химически активного углерода в зоне реакции приводит к возникновению А-дефекта алмаза.

Сам молекулярный азот прямо не влияет на формирование алмазной фазы, но эта молекула состоит из тройных связей, для формирования которых требуется значительная энергия ( $\approx 945$  кДж/моль). Концентрация азотного А-дефекта в природном алмазе составляет, как правило,  $10^{16} \div 10^{19}$  центр/см<sup>3</sup> [15], а для УДА — примерно  $10^{18}$  центр/см<sup>3</sup> [25]. Локальное понижение температуры может быть определяющим для устойчивости частиц УДА. Образование молекулярного азота в процессе детонационного синтеза УДА в системе ТГ экспериментально подтверждено в работе [21].

### 2.3. О химической стабилизации

Последний важный этап в формировании частицы УДА заключается в стабилизации поверхности. В работе [26] при использовании в качестве охлаждающей среды пропанбутановой смеси и этилена был получен аномально высокий выход УДА и особенно конденсированного углерода. Добавление предельных углеводородов к ВВ не увеличивает выхода УДА [27, 28]. Таким образом, определенный вклад в образование конденсированной фазы вносит углеводородная среда в процессе детонационного синтеза УДА в системе ТГ.

Сравнение энергии ударной волны с суммарной энергией связей в молекуле тринитротолуола показывает, что ее недостаточно для полного разрыва всех связей [23]. Наиболее устойчивой функциональной группой в молекуле тринитротолуола является метильная группа. И, следовательно, вероятность неполного разрушения метильной группы представляет-

ся реальной. Для образования А-дефекта требуется некоторое время, за которое предельные группы будут с большой вероятностью перемешаны. В термодинамических условиях, соответствующих химическому пику детонационной волны, образование алмазных зародышей является наиболее вероятным, но для их сохранения необходима химическая стабилизация и, как следует из вышеизложенного, вполне вероятно, что в системе ТГ эту функцию выполняют метильные группы [23, 29].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе названы некоторые химические реакции (реакция образования оксида азота, молекулярного азота), которые проходят при высоких температурах и влияют на процесс формирования системы УДА. Показано, что основным источником молекулярного азота может быть гексоген или октоген.

Формирование УДА происходит в условиях высокой химической активности. Находящиеся на поверхности системы УДА метильные группы в состоянии уменьшить влияние окислительных или других агрессивных химических процессов. Поскольку время формирования УДА невелико, полностью разрушенные метильные группы молекул тринитротолуола с большей вероятностью могут быть источником поверхностных метильных групп ультрадисперсного алмаза. Это простое допущение объясняет причину повышенного содержания метильной метки в экспериментальных работах с использованием меченых атомов [23, 24, 29].

Авторы благодарят Г. А. Чиганову и В. П. Малого за помощь при подготовке данной работы и обсуждение полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 3. С. 611–613.
2. Greiner Roy N., Phillips D. S., Johnson J. D., and Volk F. Diamonds in detonation soot // Nature. 1988. V. 333. P. 440–442.
3. Ставер А. М., Губарева Н. В., Лямкин А. И., Петров Е. А. Ультрадисперсные алмазные порошки, полученные с использованием энергии взрыва // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5. С. 100–104.
4. Vereschagin A. L., Sakovich G. V., Komarov V. F., and Petrov E. A. Properties

- of ultrafine diamond clusters from detonation synthesis // *Diamond and Related Materials*. 1993. N 3. P. 160–162.
5. **Badziag P., Verwoerd W. S., Ellis W. P., and Greiner N. R.** Nanometer diamonds are more stable than graphite // *Nature*. 1990. V. 343. P. 244–245.
  6. **Сакович Г. В., Губаревич В. Д., Бадаев Ф. З. и др.** Агрегация алмазов, полученных из взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310, № 2. С. 402–404.
  7. **Губаревич Т. М., Кулагина Л. С., Ларионова И. С.** Особенности элементного состава углеродных продуктов детонационного синтеза // V Всесоюз. совещание по детонации: Сб. докл. Красноярск, 1991. Т. 1. С. 130–134.
  8. **Чиганова Г. А., Чиганов А. С.** Структура и свойства ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза // *Неорганические материалы*. 1999. Т. 35, № 5. С. 581–586.
  9. **Верещагин А. Л., Сакович Г. В., Брыляков П. М. и др.** Строение алмазоподобной фазы углерода детонационного синтеза // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314. С. 866–867.
  10. **Петрова Л. А., Верещагин А. Л., Новоселов В. В. и др.** Исследование состава поверхностных групп алмазоподобной фазы углерода // *Сверхтвердые материалы*. 1989. № 4. С. 3–5.
  11. **Юинг Г.** Инструментальные методы химического анализа. М.: Мир, 1989.
  12. **Миронов Е. В., Корец А. Я.** Уточнение формулы для определения размеров реальных частиц по рассеянию света // Решетневские чтения. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 1997. С. 32–33.
  13. **Петров Е. А., Пурлис Р. П. и др.** Структура алмазоподобных порошков, полученных в процессе взрыва // *Литовский физ. сб.* 1988. Т. 2, № 4. С. 519–521.
  14. **Дробышев В. М.** Детонационный синтез сверхтвердых материалов // *Физика горения и взрыва*. 1983. Т. 19, № 5. С. 158–160.
  15. **Орлов Ю. Л.** Минералогия алмаза. М.: Наука, 1985. С. 219.
  16. **Петров Е. А.** О механизме детонационного синтеза алмаза // *Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры: Материалы межрегион. конф. с международным участием*. Красноярск, 1996. С. 11–12.
  17. **Петров Е. А.** Физико-химические аспекты детонационного получения ультрадисперсных алмазов из углерода взрывчатых веществ: Дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 1987. С. 160.
  18. **Namba Y., Heidarpour E., Nakayama M.** Size effects appearing in the Raman spectra of polycrystalline diamonds // *J. Appl. Phys.* 1992. V. 72, N 5. P. 1748–1751.
  19. **Корец А. Я., Миронов Е. В., Малый В. П. и др.** Исследование реакторно облученных порошков ультрадисперсных алмазов по их ИК-спектрам // *Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры: Материалы межрегион. конф. с международным участием*. Красноярск, 1996. С. 60.
  20. **Глинка Н. Л.** Общая химия. Л., 1984.
  21. **Мейдер Ч.** Численное моделирование детонации. М.: Мир, 1985.
  22. **Мальков И. Ю.** Анализ факторов, определяющих эффективность образования алмаза в условиях детонации // *Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры: Материалы межрегион. конф. с международным участием*. Красноярск, 1996. С. 47–48.
  23. **Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // *Физика горения и взрыва*. 1989. Т. 25, № 3. С. 117–126.
  24. **Козырев Н. В., Брыляков П. М., Сен Чел Су, Штейн М. А.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 5. С. 889–891.
  25. **Корец А. Я., Миронов Е. В., Лямкин А. И.** Исследование состава примесей алмазоподобной фазы углерода с помощью инфракрасной спектроскопии // *Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры: Материалы межрегион. конф. с международным участием*. Красноярск, 1996. С. 61–62.
  26. **Петров Е. А.** Детонационный синтез алмазов в углеводородной охлаждающей среде // Там же. С. 13–14.
  27. **Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Титов В. М.** Синтез алмаза при динамическом нагружении органических веществ // Докл. АН СССР. 1988. Т. 303, № 3. С. 625–627.
  28. **Мальков И. Ю.** Образование ультрадисперсной алмазной фазы углерода в условиях детонации гетерогенных смесевых составов // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, № 5. С. 136–140.
  29. **Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Мальков И. Ю. и др.** Исследование процесса детонации конденсированных ВВ изотопным методом // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 879.

*Поступила в редакцию 9/VI 2001 г.,  
в окончательном варианте — 4/IV 2002 г.*