

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДЕТОНАЦИОННЫХ АЛМАЗОВ МАРКИ ДАЛАН

В. Ф. Таций<sup>1</sup>, А. В. Бочко<sup>2</sup>, Г. С. Олейник<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, tatsy@icp.ac.ru

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 119911 Москва

<sup>3</sup>Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины, 03142 Киев

Представлены результаты исследования тонкой кристаллической структуры детонационных алмазов марки ДАЛАН, синтезированных из графита и сажи. Отмечен существенно различающийся фазовый состав порошков алмаза; изучены структурное и структурно-морфологическое состояние частиц алмаза. По данным просвечивающей электронной микроскопии охарактеризованы основные типы и подтипы детонационных алмазов. Сделаны предположения относительно их образования в процессе детонационного синтеза.

Ключевые слова: детонационный синтез, графит, сажа, порошок алмаза, фазовый состав, субструктура.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение процесса получения алмазных порошков методом детонационного синтеза (ДС) имеет научное и практическое значение. Первое определяется важностью знаний о физической природе формирования частиц алмаза в нанодисперсном состоянии, второе — направленностью проблемы на решение задачи получения однородных по размеру субмикронных и наноразмерных порошков алмаза. Такие порошки могут использоваться как в виде исходного продукта, так и для получения нанодисперсных сверхтвердых компактных и композиционных материалов.

Известно, что при детонационном синтезе алмаза применяют в основном два технологических подхода, отличающихся природой исходного неалмазного углерода. Первый базируется на использовании исходного углерода в виде графита или сажи [1–5] в смеси со взрывчатым веществом (ВВ), второй предполагает использование так называемого собственного углерода, образующегося в процессе разложения ВВ. Во втором случае чаще всего используют заряды из смеси тротила и гексогена (ТГ) [6–9]. Известен и третий подход к детонационному синтезу алмаза: в состав смесового заряда наряду с ВВ, графитом или сажой вводятся специальные углеродсодержащие вещества — добавки, повышающие детонационные параметры заряда. При этом в алмаз превращаются не только графит или сажа, но и углерод добавок [10, 11]. По данным [11] при использова-

нии третьего подхода была получена в значительных количествах аморфная алмазоподобная форма углерода. Алмазам, синтезированным авторами работ [1–5 и 10, 11] с использованием первого подхода, присвоены аббревиатуры ДАГ и ДАС, с использованием третьего — ДАП, расшифровка которых содержит информацию о природе исходного углерода и получаемого алмаза.

Алмаз, синтезированный с использованием второго подхода (из углерода молекул ВВ), называют в литературе ультрадисперсным (УДА). Сведения о процессах и структурных механизмах синтеза этого алмаза, а также его свойствах и областях применения обобщены и детально обсуждены в монографиях [12–14] и обзорных статьях [15–17].

Исследованию детонационного синтеза алмаза из графита и сажи, по сравнению с УДА, посвящено немного работ, но тем не менее получены основные сведения о природе этого процесса и структурных превращениях исходного неалмазного углерода в алмаз. В частности, определены параметры детонации, необходимые для синтеза алмаза, и зависимость этих параметров от типа используемого ВВ, концентрации превращаемого материала и плотности смесового заряда; показано влияние структуры исходного углерода, размера его частиц и вводимых в заряд добавок на степень превращения углерод → алмаз и физико-химические свойства алмаза. В результате газодинамических исследований установлено [18–20], что за-

висимость скорости детонации от плотности смесевых зарядов гексоген — графит характеризуется двумя изломами, соответствующими началу и завершению превращения графита в алмаз. Полученные результаты означают, что превращение происходит в зоне химической реакции детонационной волны. Установлено также, что при этом резко (за 0.5 мкс) изменяется электропроводность продуктов детонации [21]. Обнаружено, что давление детонации в точках изломов зависит от размеров частиц исходного графита [14]. Например, для коллоидного графита марки С1 ( $6 \div 25$  мкм, графит различной зернистости, полученный на основе природного сырья Завальевского месторождения) давления в точках излома составляют 11.6 и 16.2 ГПа соответственно, а для крупнокристаллического графита марки ГСМ-1 (размер частиц  $\approx 500$  мкм) — 12.3 и 13.4 ГПа соответственно. Зависимость скорости детонации от плотности заряда смеси гексоген/сажа линейна, и образование алмаза из сажи происходит при давлениях, существенно меньших давления образования алмаза из графита —  $6 \div 8$  ГПа.

В работах [22–26] установлено, что превращение графит  $\rightarrow$  алмаз происходит по мартенситному механизму, а переход сажи в алмаз не обнаруживает признаков мартенситного механизма и имеет диффузионный характер.

В целом из анализа результатов исследований [10, 11] и многих других работ, например [27, 28], можно заключить, что а) выход плотных форм углерода при детонационном синтезе сильно зависит от давления и температуры процесса, степени трехмерной упорядоченности и дисперсности превращаемого углеродного материала; б) алмазы, синтезированные из сажи и графита, существенно различаются по составу: алмазы из сажи однофазны (кубический алмаз), а из графита могут быть как однофазными, так и двухфазными (кубический и гексагональный (лонсдейлит) алмаз); в) особенностью субструктуры частиц алмаза, полученного из графита, является наличие в них пакетов параллельно расположенных пластинчатых, а также фрагментация единичных реек на дисперсные зерна, при этом размеры зерен в таких частицах алмаза, определенные методами рентгенографии и просвечивающей электронной микроскопии, в целом отличаются, но не превышают 100 нм; г) порошки алмаза, полученные из сажи, состоят из более мелких и

более однородных по форме и размеру частиц по сравнению с алмазом, полученным из графита.

По технологии синтеза и свойствам, зависящим от множества вышеперечисленных факторов, в настоящее время можно выделить три основных типа алмазов, называемых ДАЛАН (их общая зарегистрированная торговая марка — Детонационный Алмаз Академии Наук). При этом возникла необходимость по-новому, в отличие от работ [25, 26], аттестовать порошки алмаза этих «новых» марок, исследовать структурные и структурно-морфологические особенности их частиц. В связи с этим были проведены рентгеновские исследования порошков алмаза на установке ДРОН-3 (в медном и кобальтовом излучении) и электронно-микроскопические исследования в сочетании с микродифракционными на микроскопе марки JEM-100CX, результаты которых представлены в настоящей работе.

Образцы ДАЛАН были получены при детонации смесевых зарядов, состоящих из углеродного (углеродсодержащего) материала и гексогена, которые смешивались с помощью деревянных кубиков в фарфоровой емкости, установленной на рольганг. Из смесей с различной массовой концентрацией превращаемого материала ( $5 \div 35$  %) в стальных прессформах формовались заряды диаметром 50 мм, высотой  $50 \div 60$  мм, плотностью  $1.34 \div 1.39$  г/см<sup>3</sup> (сажа),  $1.61 \div 1.67$  г/см<sup>3</sup> (графит) и  $1.67 \div 1.75$  г/см<sup>3</sup> (порох/углерод/гексоген). Измеренное динамическими методами давление детонации (в плоскости Чепмена — Жуге) при указанных концентрациях графита в зарядах составляло около  $27.5 \div 14.5$  ГПа.

Заряды подрывали на автоматизированной полупромышленной установке ДС «Алмаз-1» в среде газовых продуктов детонации. В каждой серии экспериментов использовалось не менее 50 зарядов.

Неалмазную форму углерода удаляли из продукта синтеза путем кислотно-щелочной обработки. Выделенный при этом ДАЛАН представлял собой порошки микро- и субмикронных размеров достаточно высокой чистоты — несгораемый остаток обычно не превышал 0.4 %.

Некоторые обобщенные характеристики алмазов ДАЛАН, полученных в различных условиях детонационного синтеза, представлены в таблице.

Характеристики порошков алмаза марки ДАЛАН и субструктура их единичных частиц

Наименование алмаза	Пикнометрическая плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Содержание лонсдейлита, (% по объему)	Основной диапазон размеров	
				частиц, мкм	монокристаллических зерен*, нм
ДАЛАН-1	3.0 ÷ 3.30	20 ÷ 60	10 ÷ 20	1 ÷ 3	10 ÷ 20 (наблюдаются также 40 ÷ 50)
ДАЛАН-2	3.45 ÷ 3.49	60 ÷ 200	0	0.05 ÷ 2	0.3 ÷ 1 (наблюдаются также 4 ÷ 6)
ДАЛАН-3	3.28	>100	0	—	—

Примечание. \*Данные электронно-микроскопических исследований. Общее содержание примесей в алмазе ДАЛАН-1 не превышает 0.4 %, в ДАЛАН-2 и ДАЛАН-3 — не более 0.2 %.

Ниже приведены данные электронно-микроскопического исследования структурного состояния алмазов марки ДАЛАН. Фазовый состав частиц идентифицирован методом микродифракции и интерпретирован на основе известных данных микродифракционных исследований [25–32]; субструктуру частиц изучали методом темнопольной электронной микроскопии.

#### ПОРОШОК АЛМАЗА ТИПА ДАГ (ДАЛАН-1)

Порошок ДАГ синтезирован из природного графита марки С-1 Завальевского месторождения (массовая концентрация графита в заряде 19 %). Удельная поверхность алмаза около 30 м<sup>2</sup>/г. Порошок состоит из частиц пластинчатой формы с диапазоном размеров в развитой поверхности 1 ÷ 3 мкм. Частицы имеют сильно разрыхленные приповерхностные зоны (рис. 1). Встречаются также плотные объемные агрегаты частиц размером 2 ÷ 3 мкм и фрагменты разрыхленных частиц в виде хлопьев. В целом частицы порошка алмаза по структурно-фазовому состоянию можно разделить на четыре подтипа. Количественную долю каждой из разновидностей определить трудно, однако можно заключить, что основной составляющей порошка являются частицы на основе кубического алмаза.

**Подтип 1.** Этот подтип характеризуется двухфазным (алмаз + лонсдейлит) состоянием частиц. На микроэлектронограммах частиц в большинстве случаев проявляется (с различной степенью выраженности) тройная текстура, соответствующая следующей ориентационной связи между алмазом и лонсдейлитом:

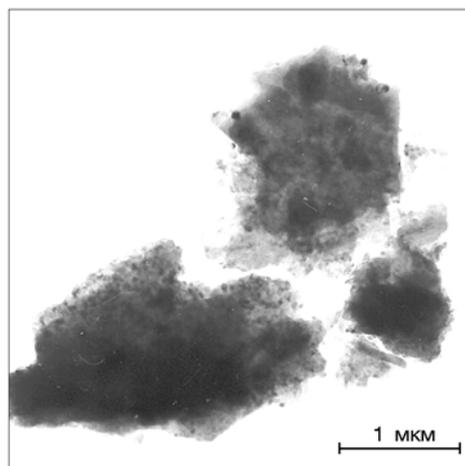


Рис. 1. Общий вид частиц алмаза ДАГ, образовавшихся из графита

[112]<sub>а</sub> || [1100]<sub>л</sub>, (111)<sub>а</sub> || (001)<sub>л</sub> (рис. 2, а, б). Редко встречаются частицы с тройной текстурой, соответствующей ориентации [110]<sub>а</sub> || [1120]<sub>л</sub>, (111)<sub>а</sub> || (001)<sub>л</sub>. В частицах алмаза этого подтипа наиболее отчетливо обнаруживается субструктура трех или четырех уровней. Это проявляется в том, что каждая частица содержит пакеты пластин одинаковой направленности и при этом каждая пластина фрагментирована на единичные зерна. Большинство частиц содержит один или два пакета реек. Частицы с тремя пакетами реек встречаются редко. Пакеты состоят из реек одинаковой направленности; рейки в пакетах и пакеты в целом разориентированы в частицах на углы 60°. Длина реек соответствует одному

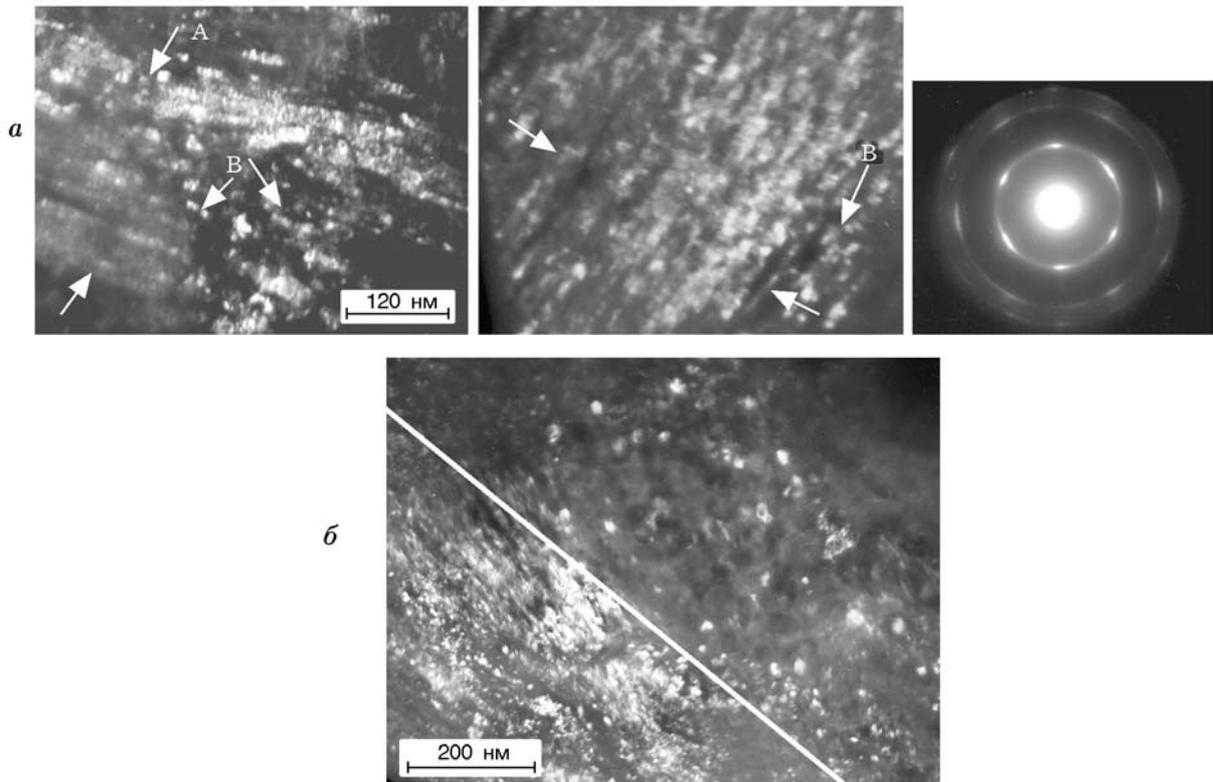


Рис. 2. Типичная субструктура (темнопольное изображение в отражении  $111_a + 002_{\text{л}}$ ) частиц ДАГ, характеризующихся тройной текстурой  $[112]_a \parallel [1100]_{\text{л}}, (111)_a \parallel (001)_{\text{л}}$ :

*a* — единичный пакет пластин с однородной зеренной структурой, стрелками А отмечены пластины-рейки, В — единичные зерна; *б* — частица, отличающаяся от представленной на части *a* разнородностью, вызванной неоднородностью фазового состава, слева — область состава алмаз + лонсдейлит, справа — монофазная область на основе кубического алмаза

из размеров пакета, а их ширина различается как в пределах частицы, так и от частицы к частице; средний диапазон ширины реек  $10 \div 30$  нм. Зерна в рейках возникли в результате фрагментации реек по длине и в плоскости их электронно-микроскопического изображения имеют профиль четырехугольника, поэтому одна его сторона соответствует ширине реек, а другая (по длине рейки) может изменяться как в пределах рейки или пакета, так и в пределах единичной частицы. В целом диапазон размеров зерен составляет  $10 \div 20$  нм. В основном частицы рассматриваемого подтипа по всему объему состоят из зерен в пределах указанных размеров. Однако наблюдаются также частицы с хорошо выраженной разнородностью (рис. 2, *б*). Они состоят из областей, в которых размеры зерен отличаются в два-три раза. Микродифракционные исследова-

ния показали, что области, состоящие из более крупных зерен, это кубический алмаз. Следует отметить также, что на рис. 2 видны зерна, разориентированные как в рейках, сохранивших сплошность, так и в их фрагментах. Видны также фрагменты, в которых зерна смещены друг относительно друга.

**Подтип 2.** Частицы этого подтипа имеют те же особенности зеренной структуры (рис. 3), что и частицы подтипа 1. В основном они состоят из алмазной фазы; также имеют трехуровневую субструктуру; текстура в них практически полностью нарушена. На микроэлектронограммах таких частиц проявляются лишь слабые усиления на первом дебаевском кольце, соответствующем отражению  $111_a$ . Для частиц этого подтипа характерно присутствие отдельных аномальных по размеру зерен, которые в  $3 \div 5$  раз превыша-

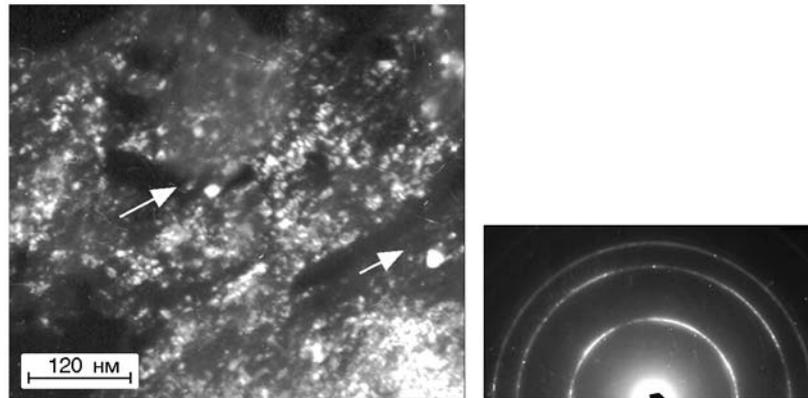


Рис. 3. Типичная субструктура частиц ДАГ с преимущественным содержанием кубического алмаза (крупные зерна правильной огранки указаны стрелками) и микроэлектронграмма типичной алмазной частицы

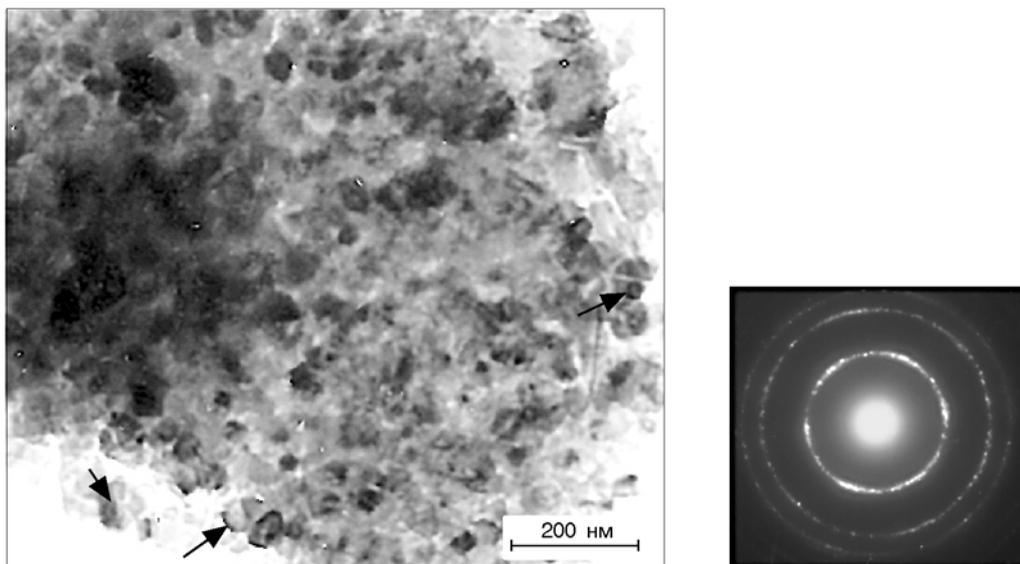


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение и микроэлектронграмма частицы, состоящей только из сросшихся зерен кубического алмаза:

стрелками указаны правильно ограненные частицы, имеющие внутренние границы раздела

ют средний размер зерен в частице, составляющий  $15 \div 20$  нм (рис. 3). Установлено, что такие аномальные зерна обычно имеют хорошо выраженную правильную полиэдрическую огранку и, по-видимому, образуются в результате срастания более мелких зерен, так как между ними существуют линейные границы сопряжения. На темнопольных электронно-микроскопических изображениях эти сrostки выявляются в виде аномальных зерен, что указывает на ориентированное (когерентное) срастание

мелких зерен непосредственно в процессе их образования из графита.

**Подтип 3.** Частицы этого подтипа полностью состоят из кубического алмаза. Их объемное содержание в образце не превышает  $10 \div 15$  %. На электронно-микроскопических изображениях они видны как хлопья, а также как агрегаты плотных образований. Последние обычно отличаются большим средним размером зерен  $30 \div 40$  нм, т. е. вдвое больше характерного размера зерен в частицах алмаза

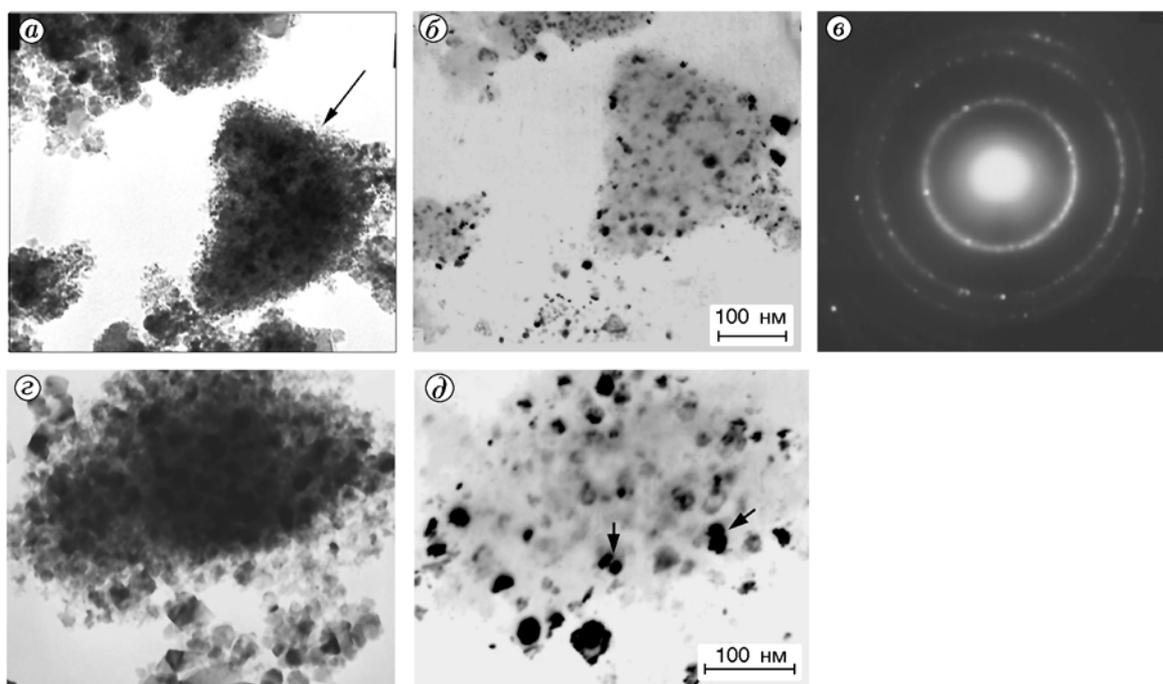


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения типичных частиц ДАС и их зеренная структура:

*a, c* — светлопольные изображения, *e* — микроэлектроннограмма частицы, указанной стрелкой на части *a*; *b, d* — темнопольные изображения в отражении 111<sub>a</sub> (*d* — стрелками указаны зерна, имеющие внутренние границы раздела)

подтипа 2. В плотных образованиях имеются правильно ограниченные сростки зерен (рис. 4). На изображении видны профили четырех- или трехугольников; между зернами наблюдаются тонкие границы, что, как и в случае частиц подтипа 2, свидетельствует о спекании наночастиц в процессе детонационного синтеза.

**Подтип 4.** Частицы этого подтипа характеризуются трехфазным составом: алмаз + лонсдейлит + неалмазный углерод. Такие частицы встречаются очень редко (объемная доля не более 3 ÷ 5 %). Для них характерны все особенности субструктуры, описанные для частиц подтипа 1. Неалмазный углерод расположен по границам зерен в пластинах. Судя по ширине кольца отражения 002 такого углерода на микроэлектроннограммах, он находится в сильно разупорядоченном нанодисперсном состоянии. Основываясь на субструктурных особенностях углерода, можно заключить, что частицы алмаза этого подтипа образуются в результате обратного превращения плотных форм углерода.

#### ПОРОШОК АЛМАЗА ТИПА ДАС (ДАЛАН-2)

Порошок ДАС получен из сажи марки ПМ15ТС (массовая концентрация сажи в заряде 12.5 %). Удельная поверхность алмаза около 70 м<sup>2</sup>/г. Порошок в основном представлен частицами размером 0.3 ÷ 1.0 мкм. Наиболее крупные из них обычно являются плотными и объемными, а мелкие — сильно разрыхленными (рис. 5). Все частицы поликристаллические. Размеры зерен сильно неоднородны как в отдельных независимых частицах, так и в частицах, различающихся по объему. На рис. 5, *a* приведено изображение группы частиц. Видно, что одна из частиц состоит преимущественно из зерен размером 2 ÷ 7 нм, но наряду с ними наблюдаются и зерна размером до 30 нм, имеющие хорошо выраженную полиэдрическую огранку. Разнозернистость частицы подтверждает и характер кольцевого отражения 111 алмаза на микроэлектроннограмме. Видно, что на фоне практически сплошного кольца проявляются единичные яркие рефлексы, вызванные присутствием крупных зе-

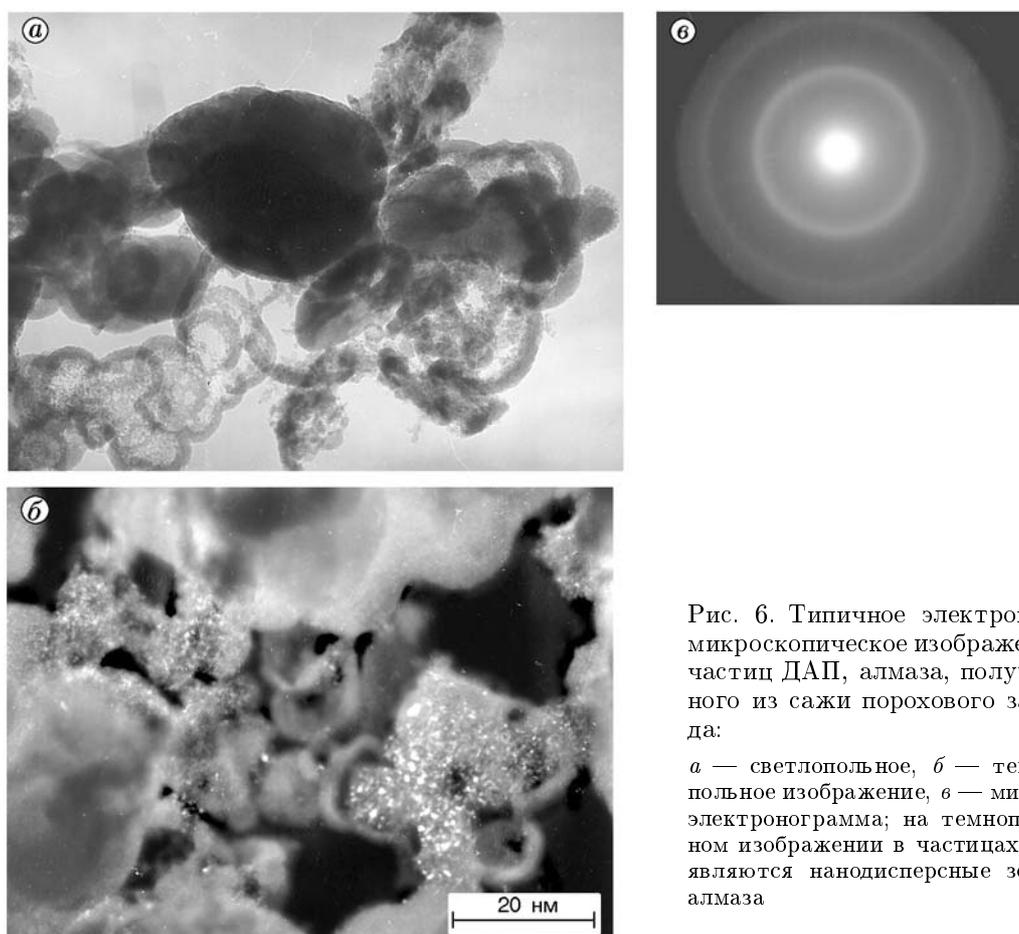


Рис. 6. Типичное электронно-микроскопическое изображение частиц ДАП, алмаза, полученного из сажи порохового заряда:

*a* — светлопольное, *б* — темнопольное изображение, *в* — микроэлектронограмма; на темнопольном изображении в частицах выявляются нанодисперсные зерна алмаза

рен. Такую же полиэдрическую огранку имеют зерна в частицах крупнозернистого строения (диапазон размеров  $10 \div 70$  нм, рис. 5, *б*). В крупных зернах существуют внутренние границы раздела, и это указывает на то, что спекание в системе зерен протекает также непосредственно в процессе синтеза.

### ПОРОШОК АЛМАЗА ТИПА ДАП (ДАЛАН-3)

Порошок ДАП выделен из углерода твердых продуктов детонации после подрыва смесевых зарядов, состоящих в основном из пороха. Превращаемый материал — сажа марки ПМ 75 (10 % по массе). Удельная поверхность алмазного порошка около  $150 \text{ м}^2/\text{г}$ . Порошок состоит из частиц, имеющих форму, характерную для структуры онионов (форма тора или типа «шапочки»), другими словами, из частиц луковичной субструктуры. Такие частицы алмаза

различаются диаметром ( $5 \div 200$  нм) и толщиной ободка (ободок может быть замкнут или иметь нарушения сплошности). Частицы образуют также рыхлые и плотные агрегаты. Все частицы имеют однородную зеренную структуру, диапазон размеров зерен  $1 \div 3$  нм. Только в отдельных частицах обнаружены области зерен размером  $4 \div 6$  нм (рис. 6).

Все частицы алмаза этого типа однофазны. Микродифракционные исследования более 50 частиц ДАП не обнаружили в них признаков структур графита. Типичная микроэлектронограмма представлена на рис. 6, *в*. Детальный анализ отдельных микроэлектронограмм позволяет предположить присутствие лонсдейлита в частицах ДАП, что также подтвердил анализ рентгеновских дифрактограмм ( $\approx 5$  % по объему).

Частицы алмаза в форме онионов также были обнаружены при синтезе алмаза из гра-

фита в среде продуктов разложения ВВ. В продуктах синтеза содержались две группы частиц только кубического алмаза, характеризующиеся разнотельностью: первая группа — это частицы с размером зерен  $2 \div 15$  нм, вторая —  $1 \div 2$  нм. По мнению авторов, частицы последнего типа представляют собой аморфную форму углерода, т. е. алмазоподобный аморфный углерод [33].

Представленные экспериментальные результаты изучения структурного состояния алмазов марок ДАЛАН, полученных из графита и сажи, и данные по изучению алмазов марок ДАГ и ДАС [26] служат еще одним подтверждением радикального влияния условий детонационного синтеза на фазовый состав, кристалломорфологию и дисперсность алмаза, получаемого из исходного углерода. В отличие от данных [26], согласно которым алмаз, образовавшийся из сажи, содержит крупные частицы (до 50 нм), исследованный в данной работе алмаз марки ДАЛАН отличается однородной нанозеренной ( $1 \div 3$  нм) структурой. Имеются также значительные различия в зеренной структуре частиц алмаза, получаемого из графита. Это, прежде всего, присутствие лонсдейлитной формы алмаза только в сочетании с его кубической фазой; основная составляющая — монофазные (кубический алмаз) частицы, в которых наблюдаются правильно ограниченные сростки нанодисперсных зерен, величина которых в целом меньше среднего размера зерен. Выявленные экспериментальные данные о возможном присутствии лонсдейлита в алмазной фазе, синтезированной из сажи, требуют дальнейшего подтверждения. Полученный результат не представляется неожиданным, поскольку в алмазе, выделенном из продуктов разложения ВВ, также обнаружен лонсдейлит (см., например, [13]).

## ВЫВОДЫ

По результатам проделанной работы можно отметить следующее:

- порошки алмаза, синтезированные из графита, состоят из частиц размером  $1 \div 3$  мкм пластинчатой формы, которые по структурно-фазовому состоянию можно разделить на четыре подтипа, отличающиеся фазовым составом, размерами частиц и составляющих их зерен;

- частицы порошка алмаза, синтезированного из сажи, агрегированы, однофазны и со-

стоят из зерен округлой или полиэдрической формы размером  $20 \div 80$  нм;

- порошки алмаза, выделенные из твердых продуктов детонации смеси порох/сажа/гексоген, однофазны и состоят из частиц, форма которых характерна для структурного состояния онионов; частицы обладают однородной зеренной структурой с основным размером зерен  $1 \div 3$  нм; частицы различаются размером и образуют рыхлые и плотные агрегаты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ададунов Г. А., Балуев А. В., Бреусов О. Н. и др. Некоторые свойства алмазов, полученных взрывным методом // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы. 1977. Т. 13, № 4. С. 649–653.
2. Ададунов Г. А., Бреусов О. Н., Дробышев В. Н. и др. Алмазы, получаемые взрывом // Физика импульсных воздействий: Сб. трудов. М.: ВНИИФТРИ, 1979. Т. 44(74). С. 157–161.
3. Ададунов Г. А., Гольданский В. И. Превращение конденсированных веществ при их ударно-волновом сжатии в регулируемых термодинамических условиях // Успехи химии. 1981. Т. 50, № 10. С. 1810–1827.
4. Дробышев В. Н. Детонационный синтез сверхтвердых материалов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 158–160.
5. Дробышев В. Н., Ананьин А. В., Дремин А. Н., Першин С. В., Тацкий В. Ф., Рогачева А. И. Исследование процесса синтеза алмаза в детонационной волне // Физика импульсной обработки материалов / Под ред. В. В. Соболева. Днепропетровск: АРТ-Пресс, 2003.
6. Трефилов В. И., Саввакин Г. И., Скороход В. В. Особенности структуры ультрадисперсных алмазов, полученных высокотемпературным синтезом в условиях взрыва // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239, № 4. С. 838–841.
7. Курдюмов А. В., Островская Н. Ф., Пиллякевич А. Н. и др. Особенности кристаллической структуры алмаза, образующегося при высокотемпературном ударном сжатии // Сверхтвердые материалы. 1981. № 3. С. 19–22.
8. А. с. 1165007 СССР (приоритет от 01.07.1982). Способ получения алмаза / А. М. Ставер, А. И. Лямкин, Н. В. Губарева, Е. А. Петров.
9. Ставер А. М., Губарева Н. В., Лямкин А. И., Петров Е. А. Ультродисперсные алмазные порошки, полученные с использованием энергии взрыва // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5. С. 100–104.
10. Breusov O. N., Abrosimova G. N., Ananin A. V., Aronin A. S., Drobyshev V. N., Tatsy V. Ph., Ponytovskiy E. G. Diamond — Like

- Amorphous Carbon Nanocrystalline Diamond Obtained by Detonation Method // High Pressure Research. 1996. N 15. P. 191–197.
11. **Ананьин А. В., Бреусов О. Н., Дремин А. Н., Дробышев В. Н., Тацкий В. Ф., Рогачева А. И.** Детонационный синтез алмазоподобного аморфного углерода // Высокоэнергетическая обработка материалов: Сб. трудов, НГА Украины. Днепропетровск: Арт-Пресс, 1997. С. 3–7.
  12. **Верещагин А. Л.** Детонационные алмазы. Барнаул: АлГТУ, 2001.
  13. **Даниленко В. В.** Синтез и спекание алмаза взрывом. М.: Энергоатомиздат, 2003.
  14. **Долматов В. Ю.** Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003.
  15. **Сакович Г. В., Брыляков П. М., Верещагин А. Л. и др.** Получение алмазных кластеров взрывом и их применение // Журн. ВХО им. Д. И. Менделеева. 1990. Т. 35, № 5. С. 600–602.
  16. **Сакович Г. В., Комаров В. Ф., Петров Е. А.** Синтез, свойства, применение и производство наноразмерных синтетических алмазов. Ч. 1. Синтез и свойства // Сверхтвердые материалы. 2002. № 3. С. 3–18.
  17. **Сакович Г. В., Комаров В. Ф., Петров Е. А.** Синтез, свойства, применение и производство наноразмерных синтетических алмазов. Ч. 2. Применение и производство // Сверхтвердые материалы. 2002. № 4. С. 8–23.
  18. **Першин С. В., Цаплин Д. А.** Динамические исследования детонационного синтеза плотных фаз вещества // V Всесоюзное совещание по детонации (Красноярск, 5–12 августа 1991). Черногоровка: ИХФЧ РАН, 1991. Т. 2. С. 237–244.
  19. **Цаплин Д. А., Першин С. В.** Полиморфное превращение графита в зоне химической реакции детонационной волны // Там же. С. 322–326.
  20. **Першин С. В., Цаплин Д. Н., Дремин А. Н., Ананьин А. В.** Влияние размера и структуры частиц углерода на пороговое давление образования алмаза в детонационной волне // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 6. С. 113–120.
  21. **Антипенко А. Г., Дремин А. Н., Якушев В. В.** О зоне электропроводности при детонации конденсированных ВВ // Докл. АН СССР. 1975. Т. 225, № 5. С. 1086–1088.
  22. **Балан Т. Р., Боримчук Н. И., Бочко А. В. и др.** Структурные исследования продуктов ударного сжатия графита // Сверхтвердые материалы. 1983. № 3. С. 19–23.
  23. **Балан Т. Р., Боримчук Н. И., Бочко А. В. и др.** Структурный аспект образования алмаза и лонсдейлита при ударном сжатии различных углеграфитовых материалов // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация и ударные волны. Черногоровка: ИХФЧ РАН, 1986. С. 237–244.
  24. **Тацкий В. Ф., Ананьин А. В., Бреусов О. Н., Дробышев В. Н. и др.** Сравнительное исследование свойств детонационных алмазов, синтезированных из сажи и графита // V Всесоюзное совещание по детонации (Красноярск, 5–12 августа 1991). Черногоровка: ИХФЧ РАН, 1991. Т. 2. С. 306–310.
  25. **Курдюмов А. В., Бритун В. Ф., Боримчук Н. И., Ярош В. В.** Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии. Киев: Куприянова О. О., 2005.
  26. **Курдюмов А. В., Бреусов О. Н., Дробышев В. Н., Мельникова В. А., Тацкий В. Ф.** О кристаллической структуре алмазов детонационного синтеза // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 26, № 3. С. 126–129.
  27. **Тацкий В. Ф., Ананьин А. В., Дремин А. Н., Жуков А. Н., Рогачева А. И.** Исследование свойств порошков детонационных алмазов, синтезированных из различных графитов // 7-ая междунар. конф. «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника, технология его изготовления и применение», п. Морское, Крым, Украина, 19–24 сентября 2004: Сб. науч. тр. С. 151–156.
  28. **Тацкий В. Ф., Ананьин А. В., Дремин А. Н., Жуков А. Н., Рогачева А. И.** Влияние условий детонационного синтеза на степень перехода графита в алмаз и физико-химические свойства получаемого алмаза // Импульсная обработка материалов: Сб. трудов, НГА Украины. Днепропетровск: Арт-Пресс, 2005. С. 127–134.
  29. **Trueb L. F.** An electron-microscope study of shock-synthesized diamond // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N 10. P. 4707–4716.
  30. **Trueb L. F.** Microstructural study of diamond synthesized under conditions of high temperature and moderate explosive shock pressure // J. Appl. Phys. 1971. V. 42, N 2. P. 503–510.
  31. **Wheeler P., Lewis D.** The structure of shock-quenched diamond // Mater. Res. Bull. 1975. V. 10, N 7. P. 686–694.
  32. **Курдюмов А. В., Островская Н. Ф., Пиллянкевич А. Н.** Реальная структура алмазов динамического синтеза // Порошковая металлургия. 1988. № 1. С. 34–40.
  33. **Kenjiro Yamada, Akira B. Sawaoka.** Nucleation and growth of diamond in detonation products // J. Amer. Ceram. Soc. 1994. V. 77, N 4. P. 1104–1106.

Поступила в редакцию 5/II 2008 г.