**Исследование свойств промышленных наноалмазов полученных при детонации взрывчатых веществ**

***Колесова Анастасия Андреевна***

*Аспирант*

***Петров Евгений Анатольевич***

*Преподаватель*

*Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Бийск*

E–mail: [kolesova\_aa2010@mail.ru](mailto:kolesova_aa2010@mail.ru) ; [htemi@bti.secna.ru](mailto:htemi@bti.secna.ru)

Искусственные алмазы во всем мире относятся к стратегическим материалам, так как играют важную роль в развитии промышленной индустрии. Принципиально новые возможности для реализации прогрессивных технологий появились после создания нового детонационного метода синтеза алмазов [1]. Синтез осуществляется при детонации взрывчатых веществ во взрывной камере, при этом в конденсированных продуктах детонации образуются наноуглерод и наноалмаз с высоким массовым выходом. Наноалмазы *(НА)* детонационного синтеза, это уникальный материал, сочетающий в себе свойства алмаза и преимущества наноструктур. В практике находят применение *НА* детонационного синтеза, полученные, как из углерода молекулы взрывчатого вещества *(ДНА),* так и из смеси *ВВ* с добавкой графита *(ДАЛАН).* Области применения *НА* определяются дисперсностью кристаллитов, реакционной способностью и агрегативным состоянием порошков *НА* в различных средах.

В связи с этим в работе исследовались основные физико-химические свойства промышленных *ДНА* и *ДАЛАН.* Оценивались: фазовый и элементный состав; кристаллическая структура; размеры кристаллитов и удельная поверхность; термическая стойкость; распределение частиц по размерам агрегатов в порошках и в водной среде. Результаты и методы исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные физико-химические свойства *ДНА* и *ДАЛАН*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показатели | *ДНА* | *ДАЛАН* | Методы исследования |
| Кристаллическая решетка | кубическая | кубическая | рентгенофазовый |
| Параметры решетки, [нм] | 0,3555 ±0,0003 | 0,3556 ±0,0004 | рентгеноструктурный |
| Микроискажение второго рода | (38-43)•10-3 | (45-66)•10-3 | рентгеноструктурный |
| Размер кристаллитов [нм] | 4,7-5,2 | 6,8-7,4 | рентгеноструктурный |
| Удельная поверхность [м2/г] | 220-246 | 21-32 | адсорбционный, метод БЭТ |
| Размеры частиц (зернистость) [нм] | 7,6-8,5 | 58-89 | расчет по данным БЭТ |
| Элементный состав [%]: углерод  водород  азот  кислород  зольность | 86-88  0,8-1,2  1,7-2,1  9,7-10,3  0,1-0,3 | 93-95  0,3-0,9  0,0  3,7-4,6  0,1-0,3 | элементный анализатор Thermo Quest при сжигании 900˚С |
| Плотность: насыпная  пикнометрическая | 0,21-0,31  3,05-3,21 | 0,78-0,85  3,35-3,48 | гелиевая пикнометрия |
| Температура окисления [˚С]: начальная  максимальная | 540-580  590-614 | 630-650  693-714 | дифференциально-термический термогравиметрический |
| Теплота сгорания [кДж/г] | 35,7-45,6 | 30,2-35,15 | дифференциально-термический |
| Диаметр агрегатов в порошке [мкм]:  среднемассовый  медианный | 2,5-3,3  2,2-5,6 | 2,6-3,2  2,5-3,2 | видеопроцессор OLYNPUS OMEC DC130 |
| Диаметр агрегатов в суспензии [мкм]:  средний  медианный | 35,2-63,4  21,3-48,3 | 14,1-21,2  9,1-11,3 | лазерный анализатор  Horiba LA 950 |
| Диаметр агрегатов в суспензии после обработки ультразвуком [мкм]: средний  медианный | 2,3-4,7  1,8-5,6 | 3,4-6,1  3,0-6,1 | лазерный анализатор  Horiba LA 950 |

В связи с тем, что *НА* образуются за доли микросекунд в сильно неравновесных условиях, они обладают рядом свойств, специфичных для наноматериалов. Для наноразмерных частиц поверхность по отношению к их объему существенно больше, чем для крупных кристаллов, поэтому проявляются физико-химические свойства поверхностных слоев. По данным ИК-спектроскопии и полярографии, поверхность *НА* содержат гидроксильные, карбоксильные и карбонильные группы, в следствии чего содержание углерода в продуктах снижается. Порошки *НА* содержат 86-95% основного вещества, а также азот, водород, кислород. Содержание углерода для *ДНА* заметно ниже, чем для *ДАЛАН*, выше содержание водорода, азота и кислорода. В *ДАЛАН* отсутствует азот, и это может быть связано с разными кинетическими условиями зарождения и роста кристаллитов *НА* в детонационной волне [2]. Исследования фазового состава показали [3], что в порошках, на диаграммах которых нет посторонних линий, все отражения соответствуют линиям алмаза кубической модификации. В зависимости от условий синтеза иногда присутствует аморфная фаза в количестве от 30 до 70% со свойствами, более близкими к алмазу. Параметры кристаллической решетки *ДНА* и *ДАЛАН* отличаются от природного алмаза. Решетка сжата и деформирована, о чем свидетельствуют данные по микроискажениям второго рода. Размеры кристаллитов для *ДАЛАН* больше, чем для *ДНА* примерно в 1,5 раза, а по удельной площади поверхности отличаются на порядок. Сравнение размеров кристаллитов с зернистостью показывают, что *ДНА* – монокристаллические образования, а *ДАЛАН* – поликристаллические, собранные на стадии синтеза из кристаллитов размером 6,8-7,4 нм в частицы с размером 58-89 нм.

Развитая поверхность и дефектность структуры приводит к появлению «запасенной энергии», повышению реакционной способности. Судя по термической стойкости на воздухе, реакционная способность для *ДНА* выше, чем для *ДАЛАН*, в целом выше и теплота сгорания. Ненасыщенные поверхностные связи и поверхностные энергии приводят к агрегации *НА,* образуя последовательную иерархическую систему первичных, вторичных и т.д. агрегатов. Рыхлость агрегатов по мере их укрупнения растет, а плотность падает. В порошках *ДНА* и *ДАЛАН* размеры агрегатов примерно равны, в водных суспензиях образуются более крупные агрегаты.

Исследования показали, что главное отличие *ДНА* и *ДАЛАН* заключается в кристаллической структуре и размерах частиц. Этим объясняются и другие отличия: по содержанию углерода; реакционной способности; энергонасыщенности и склонности к образованию агрегатов. Элементный и фазовый состав *НА* воспроизводим и стабилен. Размерами кристаллитов, зернистостью и энергоемкостью в рамках детонационного метода получения можно управлять. Как промышленные наноматериалы *ДНА* и *ДАЛАН* перспективны для применения в материаловедении и наноиндустрии.

Исследование выполнено при финансовой поддержки РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19070 МК.

**Литература**

1. Сакович Г.В. Результаты исследований физико-химических процессов детонационного синтеза наноалмазов / Г.В. Сакович. А.С. Жарков, Е.А. Петров // Российские нанотехнологии, 2013. Т. 8. №9-10. С. 11-20.
2. Петров Е.А. Физико-химические свойства наноалмазов детонационного синтеза / Е.А. Петров, А.А. Колесова, А.В. Балахнина, Н.В. Кузнецова, Н.В. Аверьянова, А.Б. Прибавкин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 3. – с. 121-125.
3. Соловьева К.Н. Текстура поверхности и субструктура промышленных детонационных наноалмазов / К.Н. Соловьева, А.А. Колесова, Е.А. Петров, М.А. Химич // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 6. – с. 22-30.