

В. В. Даниленко (г. Киев)

**Оценка влияния на термостойкость
детонационных алмазов размера частиц
и степени их связности**

Для детонационных наноалмазов различных производителей оценена степень связности частиц наноалмазов, влияющая на их качество и зависящая от условий синтеза. В зависимости от масштабного фактора синтеза степень связности увеличивается в ряду: одиночные частицы — пористые поликристаллы — непористые абразивные поликристаллы. Рассчитаны кинетика графитизации и температура начала графитизации в зависимости от размера частиц наноалмазов и их связности.

Ключевые слова: детонационные наноалмазы, термостойкость, окисление, графитизация, связность.

Введение. Знание величины термостойкости детонационных наноалмазов (ДНА) важно как для анализа возможных потерь ДНА в результате различных окислительных и восстановительных термообработок, так и при использовании ДНА. Термостойкость ДНА характеризуется кинетикой их графитизации и окисления.

Основные результаты исследования графитизации алмазных микропорошков и ДНА следующие [1—5]:

— температура начала графитизации снижается с уменьшением размера частиц алмаза и наименьшая для ДНА;

— графитизация всегда начинается с поверхности алмаза, подчиняется закону Аррениуса, но имеет разную кинетику [3, 4]:

а) в области низких (1300—1900 К) температур энергия активации мала (45 ккал/моль) и поверхность алмаза трансформируется в графит без разрыва С—С связей алмаза; линейная скорость графитизации ДНА мала и при 1373 К равна 0,02 нм/ч;

б) в области высоких (больше температуры Дебая для алмаза равной 1910 К) температур энергия активации велика (252 ккал/моль), графитизация идет с разрывом С—С связей алмаза; резко увеличивается линейная скорость графитизации ДНА — при 1873 К она равна 1,62 нм/ч.

— на температуру и скорость графитизации огромное каталитическое влияние оказывает даже ничтожное содержание кислорода или водорода в атмосфере вокруг ДНА и на поверхности частиц.

Обычно результаты исследований относят к ДНА как к наноматериалу со средним размером частиц 4 нм. Диапазон экспериментально найденных значений температуры графитизации и окисления следующий: $T_{гр} = 720—1320$ К [1—4], $T_{ок} = 623—703$ К [1, 6]. В основном, такой разброс можно объяснить различным качеством исследуемых образцов ДНА, которое зависит от различий условий синтеза у разных производителей ДНА (состава, массы и формы заряда, объема взрывной камеры, способа охлаждения ДНА во взрывной

камере, способа очистки). Такая ситуация усложняет и без того непростую проблему применения наноалмазов в промышленности.

С другой стороны, для каждого конкретного применения ДНА нужен определенный оптимальный набор свойств ДНА, который может быть обеспечен условиями синтеза. Поэтому актуален анализ связи синтез—свойства. Здесь мы рассматриваем только термостойкость ДНА в зависимости от размера частиц и степени их связности.

О связности частиц ДНА. Очевидно, что в производстве ДНА должна быть использована оптимальная технология синтеза как в отношении количества, так и качества ДНА. Оптимальный синтез в количественном отношении — это получение максимального выхода ДНА, который обеспечивается так называемым “мокрым” синтезом (взрыв зарядов в водяной или ледяной оболочке) [6, 7].

Сложнее оценить оптимальность качества ДНА, которое определяется их конкретным применением и тоже зависит от условий синтеза, в частности, от влияния масштабного фактора [1, 8, 9]. Например, при взрыве заряда массой 10 кг в ледяной оболочке на границе продукты детонации (ПД)—лед давление 9 ГПа сохраняется ~ 60 мкс. За это время в процессе охлаждения нанокнопель с 4000 до 1600 К кристаллизуются частицы кубического алмаза, а при температурах ниже 1600 К образуются монокристаллы лонсдейлита размером до 10 мкм и трехфазные сростки алмаз—лонсдейлит—нанографит [1, 6, 7]. При взрыве в водяной оболочке заряда массой 140 кг образуются поликристаллы размером до 85 мкм [9]. Очевидно, ДНА такого качества нельзя использовать для смазки или суперфинишной полировки.

Влияние масштабного фактора сказывается на двух процессах, идущих параллельно в продуктах детонации: формировании и укрупнении нанокнопель за счет коагуляции кластеров и взаимодействии нанокнопель с образованием агломератов нанокнопель, а после их кристаллизации — агломератов частиц ДНА с прочными ковалентными связями и с размерами 20—200 нм [7, 8]. Этот второй процесс образования прочных агломератов во многом определяет качество ДНА. Кроме увеличения времени их образования за счет массы заряда и массивной оболочки вокруг заряда, на эти процессы влияют также температура, давление и концентрация углерода в ПД. С увеличением этих величин идет последовательный переход от фрактальной структуры с 1—3 связями у частиц к пористым поликристаллам с 4—8 связями и в пределе — к ликвидации пористости с образованием поликристаллов с частицами, связанными по всей их поверхности (рис. 1). Такое прочное связывание частиц ДНА с появлением абразивных свойств можно рассматривать как разной степени спекание в плотной газовой среде продуктов детонации (впервые обнаружено автором в 1987 г. [1]). Поскольку в детонационной волне (в центре заряда и на его поверхности) условия неоднородны, то при одном взрыве может возникать вся гамма названных выше структур.

Синтез поликристаллических ДНА соответствует общим законам конденсации пара [10] и обсуждается в [11—13].

Отметим два факта, косвенно подтверждающих спекание частиц ДНА и образование ковалентных связей намного более прочных, чем связи при обычном агломерировании наночастиц. С одной стороны, агломераты ДНА с размерами менее 100 нм с трудом разрушаются (длительным размолотом микрошариками из оксида циркония) [12], а с другой стороны, после размола и высушивания суспензии получающиеся агломераты уже легко снова диспергируются до одиночных частиц [13].

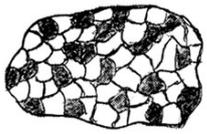
Время синтеза, с	Тип агрегатов	Тип связи частиц	Эскизы агрегатов
10^{-8} — 10^{-6}	фракталы	Одноточечная (1—4 связи)	
10^{-6} — 10^{-5}	пористые поликристаллы	многоточечная (6—8 связей)	
10^{-5} — 10^{-4}	непористые поликристаллы	связь по всей поверхности	

Рис. 1. Влияние условий детонации на качество ДНА.

Таким образом, по степени связности частиц качество ДНА можно характеризовать линейкой качества, на концах которой два предельных случая: ДНА с одиночными, не связанными частицами и ДНА с непористыми поликристаллами. В реальных условиях синтеза качество получаемых ДНА всегда лежит где-то посередине. Возможности движения вдоль линейки качества за счет вариации условий синтеза ограничены.

Для снижения связности частиц этот процесс надо ограничить во времени, например, используя заряды малой массы без оболочки (“сухой” синтез). Но при этом в два раза и более падает выход ДНА и растет содержание в шихте сажи. В первую очередь на связность влияет температура ПД, но ее можно варьировать только вместе с давлением и плотностью ПД. Снижение давления вместе с температурой уменьшает время коагуляции в области жидкого sp^3 -наноуглерода и также снижает выход ДНА [7, 8]. Поскольку процессы коагуляции и связывания идут параллельно, то синтез только одиночных частиц маловероятен.

Для повышения связности и получения абразивных поликристаллов надо использовать заряды и оболочки вокруг них большой массы. Такие заряды сложно изготавливать, а для их взрыва требуется дорогостоящая взрывная камера большого объема.

Вариация связности у различных ДНА следует из анализа имеющихся результатов исследования ДНА [1, 14].

В табл. 1 для порошков ДНА, полученных различными производителями, приведены измеренная средняя величина размера частиц $d_{экс}$, рассчитанная по ней величина удельной поверхности $S_d = 6/\rho_0 d_{экс}$, измеренная удельная поверхность $S_{экс}$ для данного порошка ДНА, полученного в данных условиях синтеза и очистки, и рассчитанная по $S_{экс}$ величина эквивалентного диаметра частиц $d_3 = 6/\rho_0 S_{экс}$ ($\rho_0 = 3,07 \text{ г/см}^3$ — плотность частиц ДНА [4]).

Из табл. 1 видно, что у различных порошков ДНА размер частиц и удельная поверхность сильно отличаются, причем всегда рассчитанная удельная поверхность S_d значительно больше экспериментального значения $S_{экс}$. Соответственно, всегда $d_3 > d_{экс}$. Наибольшее отличие — для синтеза взрывом в ледяной оболочке (РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск, Россия) и фирма АЛИТ (г. Киев, Украина)). По мнению авторов, причина этого — в связности синте-

зируемых частиц, у которых поверхность уменьшена за счет их частичного объединения с образованием прочных ковалентных связей. Исходя из этого и используя экспериментальные значения $d_{\text{экс}}$ и $S_{\text{экс}}$, авторы рассчитали размеры a_c общих связующих участков на поверхности частиц и размеры пор $b_{\text{п}}$ между частицами (см. табл. 1). В расчетах принято, что упаковка частиц плотная и число ближайших соседей у каждой связанной частицы равно 8. Тогда значения a_c и $b_{\text{п}}$ находят из следующих выражений:

$$S_{\text{экс}}/S_d = 1 - 2(a_c/d_{\text{экс}})^2; \quad b_{\text{п}} = [2(d_3 - a_c)]^{0,5}.$$

Таблица 1. Параметры связанных частиц ДНА различных производителей

Производитель	$d_{\text{экс}}$, нм	S_d , м ² /г	$S_{\text{экс}}$, м ² /г	d_3 , нм	$S_{\text{экс}}/S_d$	a_c , нм	$b_{\text{п}}$, нм
РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск)*	3,1	616	350	5,0	0,57	1,44	3,88
РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск)**	4,7	407	284	6,2	0,70	1,82	6,13
Красноярский политех- нический ин-т (г. Красноярск)	4,4	434	337	5,2	0,78	1,46	5,87
ФГУП СКТЬ “Технолог” (г. Санкт-Петербург)	4,5	425	274	6,4	0,64	1,91	5,76
ЗАО “АЛИТ” (г. Киев)	6	318	187	9,4	0,59	2,72	7,56

* ДНА, дополнительно очищенные озонном.

** ДНА, очищенные только кислотной обработкой.

Такие пористые агломераты оптимальны, например, для применений ДНА с целью абсорбции в нанопорах различных веществ.

С увеличением масштабного фактора будет расти и содержание непористых абразивных поликристаллов и монокристаллов в ДНА.

О кинетике графитизации ДНА. Кинетика изотермической поверхностной графитизации может быть описана на основании модели уменьшающейся сферы [4], согласно которой граница алмаз—графит движется от поверхности сферических частиц по радиусу к их центру одновременно у всех частиц и с постоянной линейной скоростью $k_d(T)$, зависящей только от температуры. В рамках этой модели объем образовавшегося графита относительно исходного объема алмаза $V_{\text{гр}}/V_a$ можно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$V_{\text{гр}}/V_a = k_d(T)tS/V_a, \quad (1)$$

где t — время графитизации при данной температуре, S — удельная поверхность исходного ДНА.

Поскольку в ДНА имеется распределение частиц по их диаметру и практически все частицы в той или иной степени связаны, то можно оперировать в расчетах только эквивалентным диаметром частиц: $d_3 = 6/(\rho_0 S_{\text{экс}})$.

Удельный объем порошка ДНА $V_a = 1/\rho_{00}$, где $\rho_{00} = 0,4 \text{ г/см}^3$ — насыпная плотность сухого порошка ДНА [1]. Подставляя эти значения в (1), получим выражение для расчета степени графитизации в зависимости от температуры, времени и размера частиц ДНА:

$$V_{\text{гр}}/V_{\text{а}} = 6k_{\text{л}}(T)t\rho_{00}/(\rho_0d_3) = 0,78k_{\text{л}}(T)t/d_3. \quad (2)$$

Из (2) видно, что судить о величине температуры начала графитизации $T_{\text{гр}}$ можно, только задаваясь временем графитизации и минимальным содержанием sp^2 -углерода в ДНА, которое обнаруживают, например, рентгенодифракцией, спектроскопией, химическим растворением. Чем меньше время выдержки при каждой температуре и ниже чувствительность методики, тем выше получаемая величина $T_{\text{гр}}$.

Примем, что минимальное содержание sp^2 -углерода в ДНА, надежно определяемое современными методами, составляет 0,2 %. Тогда, согласно (2), время для получения степени графитизации $V_{\text{гр}}/V_{\text{а}} = 0,002$ можно рассчитать следующим образом:

$$t = 2,6 \cdot 10^{-3} d_3/k_{\text{л}}(T). \quad (3)$$

Используя данные [4], для расчета величины $k_{\text{л}}(T)$ до 1900 К автор получил следующую линейную зависимость:

$$\log k_{\text{л}}(T) = -0,985(10^4/T - 5,55). \quad (4)$$

Такая скорость графитизации определена в вакууме в опытах в интервале температуры 1420—1800 К, по-видимому, без заметного влияния кислорода, но для какой-то неизвестной степени связности частиц ДНА. Кроме того, предполагали, что величина $k_{\text{л}}(T)$ не зависит от размера частиц [4].

Выражения (2), (3) и (4) определяют зависимость $t = f(T, d_3)$. Эта зависимость в интервале $T = 1300—1700$ К показана на рис. 2. Как видно, время получения 0,2 %-ной графитизации ДНА резко увеличивается с уменьшением температуры, что определяется уменьшением в 60 раз линейной скорости графитизации в этом интервале температуры.

На рис. 2 также показана зависимость степени графитизации ДНА от температуры при условии часто используемой изотермической выдержки в 1 ч. При такой выдержке трудно заметить графитизацию (без влияния кислорода) при $T < 1300$ К. За 1 ч выдержки при 1400 К на поверхности ДНА формируется только 1—2 графитовых слоя, а за 1 ч при 1800 К графитизируется ~ 85 % ДНА [4], что плохо согласуется с расчетами автора (39 % для $d_3 = 2$ нм согласно (2)). По-видимому, когда в результате графитизации размеры частиц уменьшаются до 2 нм и меньше, начинается быстрая объемная аморфизация с другой кинетикой [7, 8, 10].

Большой разброс степени графитизации ДНА при незначительных изменениях условий опытов можно объяснить различным содержанием кислорода на поверхности частиц ДНА, который полностью удаляется в глубоком вакууме только при температуре начала графитизации. При низких (1000—1300 К) температурах кислород еще остается, поэтому его влияние на скорость графитизации больше, чем после высокотемпературного отжига в вакууме. Например, сравнение зависимости на рис. 2 с результатами опытов автора по графитизации ДНА в герметичной ампуле при 1173 К показывает, что кислород на поверхности ДНА ускоряет графитизацию примерно на порядок. Разные авторы появление в ДНА sp^2 -углерода фиксировали после нагрева до 943, 1003, 1173 К [4]. Обнаруженная автором 5 %-ная графитизация ДНА после 22-х лет хранения в нормальных условиях [1] показывает, что в сравнении с расчетом по (2) при 300 К кислород ускоряет графитизацию на три порядка.

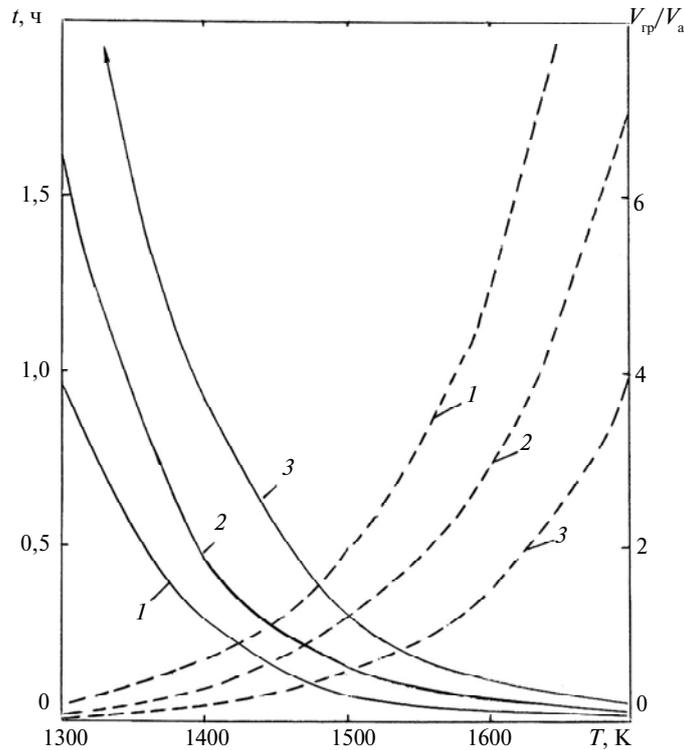


Рис. 2. Зависимость времени изотермической выдержки, необходимой для получения 0,2 %-ной графитизации ДНА (—) и степени графитизации при изотермической выдержке 1 ч (- - -) от температуры; 1, 2, 3 — расчетные данные для диаметров частиц ДНА равных 3, 5 и 10 нм соответственно.

Как видно из (2), уменьшение размера частиц ДНА в процессе графитизации приводит к ускорению графитизации. Из рис. 2 видно, что влияние размера частиц растет с уменьшением температуры.

Таким образом, проделанный анализ показывает, что процесс графитизации ДНА многофункционален и не поддается простому описанию, в основном, благодаря неопределенному влиянию кислорода и связности частиц. Кроме того, фиксация начала графитизации усложняется тем, что при низких температурах образуется аморфный sp^2 -углерод, тесно связанный с алмазным ядром.

Термодинамическая оценка температуры начала графитизации ДНА.

Рассмотрим графитизацию ДНА с позиций термодинамики, без учета ее кинетики.

Как показано выше, начало графитизации определяется температурой алмаза или его энтальпией $E_0(T)$. Значения $E_0(T) = \int c_v dT$ для монокристалла алмаза рассчитывали в приближении Дебая с температурой Дебая равной 2000 К. Графитизация совершенного монокристалла алмаза начинается при $T_{гр} = 1800$ К или при расчетной величине $E_0(T_{гр}) = 32,3$ кДж/моль.

Энтальпия алмазных наночастиц $E_{ДНА}$ больше, чем у монокристалла алмаза, на величину поверхностной энергии E_S :

$$E_{ДНА}(T_{гр}, S) = E_0(T_{гр}) + E_S. \quad (5)$$

Оценим температуру $T_{гр}$ начала графитизации ДНА исходя из предположения, что она определяется только величиной энтальпии ДНА, которая в начале графитизации такая же, как у монокристалла, т. е. $E_{ДНА}(T_{гр}, S) = 32,3$ кДж/моль. Тогда температуру начала графитизации можно определить из следующего выражения [15]:

$$[E_0(T_{гр}) + E_S]_{ДНА} = 32,3 \text{ кДж/моль.} \quad (6)$$

Согласно [16], поверхностная энергия E_S в объеме одного моля зависит от числа атомов n в сферической частице ДНА следующим образом:

$$E_S = E_1 n^{-1/3}, \quad (7)$$

где $E_1 = 293$ кДж/моль — удельная поверхностная энергия алмаза в расчете на один атом.

Определив значения E_S по (8), из (7) находим соответствующие значения $E_0(T_{гр})$ и по ним — значения температуры начала графитизации $T_{гр}$ как функцию n или размера частиц ДНА. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Полученная зависимость $T_{гр}(d)$ показана на рис. 3. Как видно из табл. 2, с уменьшением размера частиц ДНА или с увеличением их удельной поверхности расчетная температура начала графитизации частиц уменьшается с 1800 К для монокристалла до 870 К для ДНА с частицами диаметром 3 нм.

Таблица 2. Результаты расчета температуры начала графитизации частиц ДНА

d , нм	S , м ² /г	n (атомов)	E_S , кДж/моль	$[E_0(T_{гр})]_{ДНА}$, кДж/моль	$T_{гр}$, К
2,01	950	969	29,6	2,7	250
3,01	635	2925	20,46	11,8	870
4,02	475	6545	15,7	16,6	1110
4,78	400	10660	13,3	19,0	1220
7,04	271	32509	9,2	23,1	1410
9,3	205	73150	7,0	25,3	1510
10,56	181	105995	6,2	26,1	1540

В [15] расчет E_S сделан для частиц ДНА, покрытых sp^2 -оболочкой, что дает меньшие значения $T_{гр}$ (см. рис. 3)

Согласно (1), степень графитизации ДНА при прочих равных условиях снижается пропорционально уменьшению удельной поверхности частиц за счет их размеров или связности. Полученная зависимость $T_{гр}(S)$ или $T_{гр}(d_s)$ и данные табл. 3 позволяют оценить влияние связности частиц ДНА на начало их графитизации. Результаты оценки приведены на рис. 3. Для средних размеров частиц равных 4 нм связность частиц повышает температуру начала графитизации с 1100 до 1300 К (см. табл. 1). С другой стороны, только разрушение связности до одиночных частиц может стать причиной начала графитизации или увеличения ее скорости при постоянной температуре.

На рис. 3 также показана температура начала окисления на воздухе алмазных порошков с различной удельной поверхностью [1]. Как видно, в условиях влияния кислорода значения температуры начала графитизации частиц ДНА диаметром 2—4 нм сравнимы с температурами окисления ДНА на воздухе, что позволяет по-новому анализировать и объяснять результаты опытов

по окислению ДНА при ~ 800 К [14] с учетом их графитизации, а также учитывая, что при $T < 850$ К графит окисляется быстрее алмаза [17].

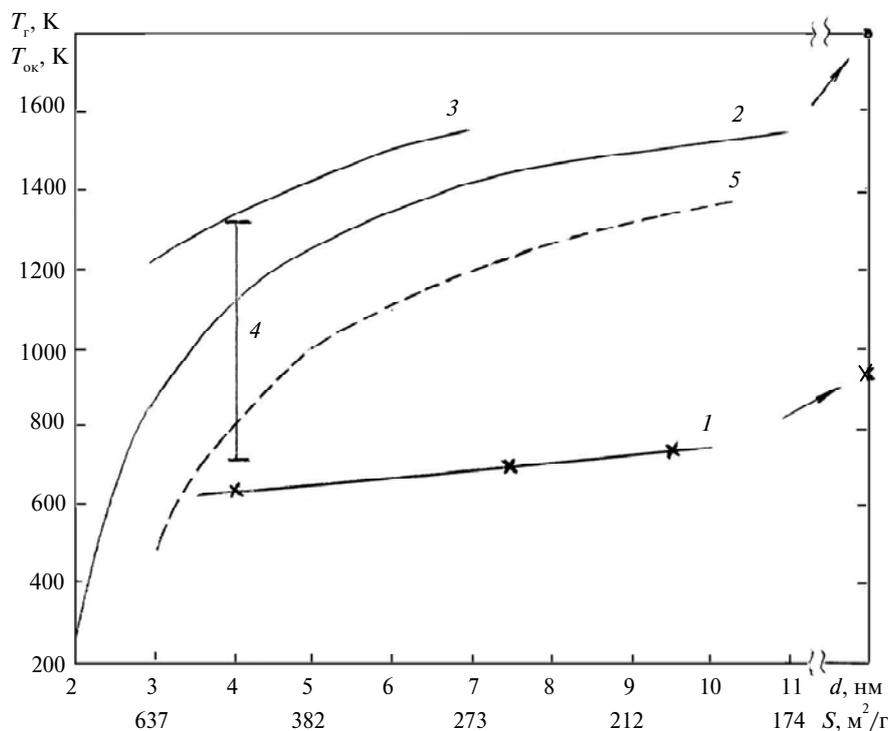


Рис. 3. Зависимость температуры начала окисления (1) [1] и начала графитизации для одиночных (2) и связанных частиц (3) от диаметра частиц ДНА и их удельной поверхности; диапазон результатов измерений температуры начала графитизации (отнесен к среднему размеру частиц 4 нм) (4); рассчитанная температура начала графитизации с учетом sp^2 -оболочки у частиц ДНА [15] (5).

Предлагаемый автором в [15] процесс окисления ДНА состоит в том, что окисляется не алмазное ядро частиц, а аморфная sp^2 -оболочка, которая по мере ее газификации непрерывно воспроизводится за счет поверхностной графитизации, ускоряемой кислородом воздуха. Скорость графитизации растет благодаря уменьшению размера алмазного ядра в процессе окисления и при размерах меньше 4 нм при 800 К наступает быстрая графитизация (или аморфизация) всей частицы.

Таблица 3. Минимальные размеры частиц ДНА после термообработки

Вид термообработки	Температура, °С	Минимальный d , нм
Очистка озоном	130—150	2,5
Кислотная очистка	220—260	3,0
Окисление на воздухе	480—530	3,0
Окисление водой	650	3,5
Обработка водородом	750—800	4,0

В результате расчетов для каждого вида окислительной или восстановительной термообработки ДНА определен минимальный размер частиц ДНА, меньше которого все частицы будут окислены (табл. 3).

Заключение

Для всех производителей ДНА измеренные значения удельной поверхности всегда меньше рассчитанной по диаметру частиц, что объясняется влиянием связности частиц, по-видимому, с ковалентными связями. Степень связности определяет качество ДНА и увеличивается под влиянием масштабного фактора в ряду: одиночные частицы — пористые поликристаллы — непористые абразивные поликристаллы.

Рассчитаны зависимости времени получения 0,2 %-ной графитизации ДНА и степени графитизации для изотермической выдержки 1 ч от температуры и размера частиц. Анализ кинетики графитизации усложняется влиянием кислорода, ускоряющим графитизацию, и влиянием связности частиц, снижающей степень графитизации за счет уменьшения их поверхности.

В предположении, что начало графитизации определяет только величина энтальпии алмаза (для ДНА — с учетом поверхностной энергии частиц), выполнен термодинамический расчет температуры начала графитизации $T_{гр}$ в зависимости от размера частиц ДНА или от их удельной поверхности. Расчетная величина $T_{гр}$ уменьшается от 1800 К для монокристалла алмаза до 870 К для с частиц ДНА диаметром 3 нм.

Близость температур начала окисления и графитизации частиц ДНА диаметром 2—4 нм дает основания предположить, что окисление ДНА на воздухе при 800 К должно проходить с непрерывной ускоряющейся графитизацией, причем всегда окисляется не алмаз, а аморфная sp^2 -оболочка частиц, возникающая в результате графитизации.

Для каждого вида термообработки ДНА определен диаметр частиц, меньше которого все частицы будут окислены.

1. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 272 с.
2. Алексенский А. Е., Байдакова М. В., Вуль А. Я. и др. Фазовый переход алмаз—графит в кластерах ультрадисперсного алмаза // Физика твердого тела. — 1997. — № 6. — С. 1125—1134.
3. Kuznetsov V. I., Butenko Yu. V. Nanodiamond graphitization and properties onion-like carbon // Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Synthesis, Properties and Applications of Ultrananocrystalline Diamond, St. Petersburg, Russia, 7—10 June, 2004. — Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2005. — P. 199—216.
4. Kuznetsov V. I., Butenko Yu. V. Diamond phase transition at nanoscale // Ultrananocrystalline diamond, synthesis, properties, and applications / Ed. O. L. Shenderova and D. M. Gruen. — Norwich, New York: W. Andrew Publishing, 2006. — P. 405—475.
5. Zhao D. S., Zhao M., Jiang Q. Size and temperature dependence of nanodiamond—nanographite transition related with surface stress // Diamond Relat. Mater. — 2002. — 11, N 2. — P. 234—236.
6. Даниленко В. В., Мельникова В. А., Минаков В. Н. Исследование ультрадисперсного алмаза // Механика и физика разрушения хрупких материалов: Сб. тр. — Киев: Ин-т проблем материаловедения АН Украины, 1992. — С. 186—189.
7. Даниленко В. В. Особенности синтеза детонационных наноалмазов // Физика горения и взрыва. — 2005. — 41, № 5. — С. 104—116.
8. Даниленко В. В. Особенности конденсации углерода в детонационной волне и условия оптимального синтеза наноалмазов // Сверхтв. материалы. — 2006. — № 5. — С. 9—24.
9. Выскубенко Б. А., Даниленко В. В., Лин Э. Э. и др. Влияние масштабных факторов на размеры и выход алмазов при детонационном синтезе // Физика горения и взрыва. — 1992. — 28. — № 2. — С. 108—110.

10. *Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижиж С. П.* Ультрадисперсные металлические среды. — М.: Атомиздат, 1977. — 264 с.
11. *Bursil L. A., Peng J. L., Praver S.* Plasmonresponse and structure of nanocrystalline diamond powder // *Phil. Mag. A.* — 1997. — **74**. — P. 769—781.
12. *Kruger A., Kataoka F., Osawa M. et al.* Unusually tightaggregation in detonation nanodiamond: identification and disintegration // *Carbon.* — 2005. — **4**. — P. 1722—1730.
13. *Osawa E.* Recent developments in the application of dispersed single-nano diamond particles // 3th Int. Symp. “Detonation Nanodiamonds: Technology, Properties and Applications”, St.-Petersburg, Russia, 01–04 July, 2008: Program. & Abstr. — St. Petersburg, Russia, 2008. — P. 5.
14. *Гордеев С. К., Корчагина С. Б.* Бывают ли наноалмазы “маленькими”? // *Сверхтв. материалы.* — 2004. — № 6. — С. 34—40.
15. *Даниленко В. В.* Энергетика частиц детонационных наноалмазов // Там же. — 2006. — № 6. — С. 3—11.
16. *Vieselli J. A., Bastea S., Glosli J. N., Ree F. H.* Phase transformations of nanometer size carbonparticles in shocked hydrocarbons and explosives // *J. Chem. Phys.* — 2001. — **115**. — N 6. — P. 2730—2736.
17. *Физические свойства алмаза: Справ. / Под ред. Н. В. Новикова.* — Киев: Наук. думка, 1987. — 188 с.

Ин-т проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича НАН Украины

Поступила 23.03.09