



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.762:621.921.34

В.Т. СЕНЮТЬ, канд. техн. наук, доц.

ведущий научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: vsenyut@tut.by

П.А. ВИТЯЗЬ, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

главный научный сотрудник отделения технологий машиностроения и металлургии¹

E-mail: vitiazpresidium@bas-net.by

А.М. ПАРНИЦКИЙ, канд. техн. наук

старший научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: europacorp@tut.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 02.06.2023.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НЕАЛМАЗНЫМ УГЛЕРОДОМ (ЧАСТЬ 1)

Рассмотрено влияние размеров частиц углерода на параметры фазового превращения графит–алмаз. Показано, что поверхностная энергия углеродных наночастиц различной формы (сферической, столбчатой) вносит существенный вклад в их полный термодинамический потенциал, что приводит к смещению кривой равновесия алмаз–графит в область низких давлений и расширению области стабильности алмазной фазы. В то же время изменение химического потенциала (свободной энергии Гиббса) при прямом (не каталитическом) переходе тонкопленочных графитоподобных наноструктур в алмаз будет выше, чем для «массивного» графита, что приводит к росту давления фазового превращения в алмаз. Для снижения параметров образования алмаза и получения наноструктурных алмазных поликристаллов в качестве исходного материала предложено использовать частицы наноалмаза с нанометровым поверхностным слоем неалмазного (графитоподобного) углерода. В этом случае поверхность наноалмаза будет оказывать влияние на процесс перехода нанометрового слоя графита (графитоподобного углерода) в алмаз при более благоприятных термодинамических параметрах.

Ключевые слова: наноалмаз, неалмазные формы углерода, диаграмма состояния, фазовые превращения, химический потенциал, энергия Гиббса

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-60-65>

Введение. Создание новых нанополукристаллических сверхтвердых материалов (наноструктурных ПСТМ) на основе алмаза с повышенными физико-механическими и эксплуатационными параметрами является важной научно-технической и производственной задачей. За счет наноструктури-

рования в алмазном поликристалле возможна реализация уникального комплекса механических характеристик, например, сочетание высоких твердости и трещиностойкости, недостижимых для алмазных материалов, полученных методом термобарического спекания микронных алмазных порошков [1].

Возможны два основных направления создания наноструктурных ПСТМ — спекание нанопорошков алмаза и прямой синтез за счет фазового превращения графита в алмаз в условиях высоких давлений и температур. Однако для реализации указанных подходов на практике требуются высокие p , T -параметры спекания и синтеза, которые не позволяют реализовать процесс получения таких материалов в условиях промышленного производства [2–4].

Один из перспективных путей, сочетающих два вышеуказанных направления получения поликристаллических алмазных материалов без активирующих добавок, — термобарическое спекание алмазных порошков с тонким слоем неалмазного углерода (графита) на поверхности, при котором совмещаются процессы фазового превращения тонких поверхностных слоев неалмазного углерода в алмаз и спекания алмазного порошка [1, 2, 5–7].

Целью настоящей работы является термодинамический анализ условий перехода тонкого (нанометрового) графитового слоя на поверхности алмазной частицы сферической формы в алмаз при получении наноструктурного алмазно-ПСТМ.

Анализ влияния размеров частиц углерода на параметры фазового превращения графит–алмаз. На основе фазовой диаграммы состояния углерода, которая установлена для идеальных кристаллических структур (рисунок *a*) можно определить параметры взаимного превращения графита и алмаза [5, 8]. При нормальных условиях, соответствующих области стабильности графита, из-за низкой скорости процесса графитизации алмаз можно считать стабильной (метастабильной) фазой. Повышение температуры при низких давлениях способствует обратному фазовому превращению алмаза в графит. Высокое давление стимулирует прямое фазовое превращение графита в алмаз. Так, переход «массивного» графита в алмаз без участия катализаторов происходит с высокими скоростями при давлениях более 15–20 ГПа [9]. Уменьшение размеров кристаллов графита ведет к увеличению их поверхности и возрастанию свободной энергии системы за счет энергии граней, ребер и вершин. Для наночастиц вклад поверхностной энергии в общую энергию системы является определяющим [10], что оказывает влияние на параметры термодинамического равновесия алмаза и графита.

В качестве подтверждающего примера [11] рассмотрена поверхность фазового равновесия графит–алмаз, учитывающая размер частиц углерода столбчатой (цилиндрической) формы, с отношением высоты к диаметру основания в пределах 1:4, состоящие из одинакового числа атомов. Для частиц графита и алмаза $r \geq 100$ нм поверхностная энергия мала, поэтому диаграмма равновесия графит–алмаз не отличается от традиционно

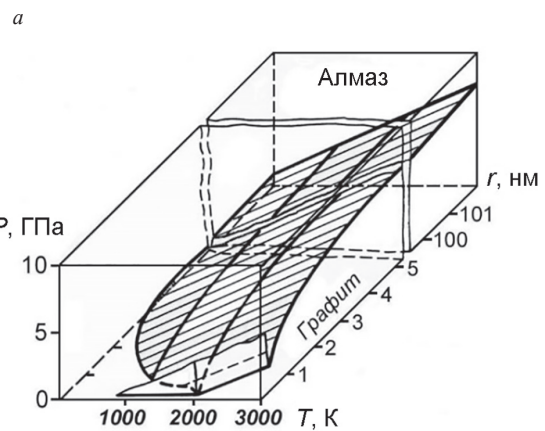
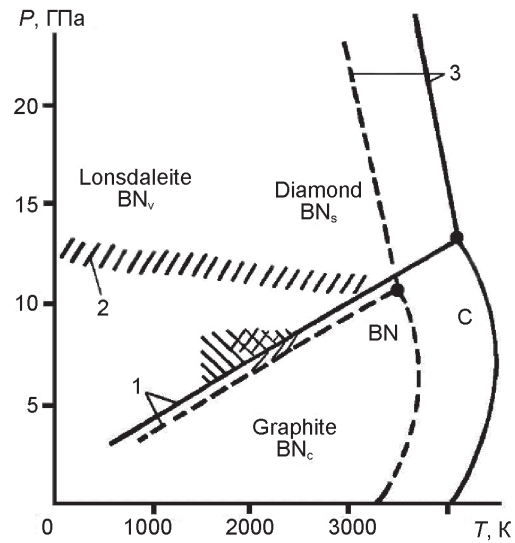


Рисунок — Диаграмма состояния графит–алмаз:
a — классическая диаграмма состояния для идеальных кристаллических структур углерода [5]; *b* — диаграмма с учетом размеров углеродных частиц для кристаллитов алмаза с $e = 2,5$ [11]
Figure — Graphite–diamond state diagram:
a — classical state diagram for ideal crystal structures of carbon [5]; *b* — diagram taking into account the size of carbon particles for diamond crystallites with “ e ” = 2.5 [11]

принятой для «массивных» частиц, и в пространстве (P , T , r) ей будет соответствовать плоскость $\alpha + \beta T - P\Delta V = 0$.

Для частиц фаз углерода размером $r < 100$ нм равновесное давление будет снижаться быстрее, чем в случае «массивных» частиц, и при r порядка 1 нм алмазная фаза будет стабильна без приложения внешнего давления до температуры 2000 К. На рисунке *b* представлен пример фазовой диаграммы для алмазных частиц с «эксцентриситетом» кристаллитов алмаза $e = 2,5$:

$$e = H/2r = nd/2r, \tag{1}$$

где H — высота алмазного цилиндра; d — расстояние между плоскостями типа (001); n — количество плоскостей (001), из которых состоит алмазный цилиндр.

На практике форма алмазных кристаллитов может отличаться от столбчатой. Например, части-

цы наноалмазов детонационного синтеза в первом приближении могут быть описаны сферой радиуса R [2, 12].

Химический потенциал частицы радиусом R можно представить как

$$\mu = \mu_0 + \frac{2\sigma V}{R}, \quad (2)$$

где μ_0 — химический потенциал объемной фазы; σ — поверхностная энергия; V — атомный (молярный) объем углеродной частицы; R — радиус частицы.

Если частица наноалмаза радиусом R_α термодинамически более стабильна, чем частица графита радиусом R_β , то

$$\mu_\alpha < \mu_\beta, \quad (3)$$

где μ_α и μ_β — химические потенциалы алмаза и графита соответственно.

Влияние на фазовый переход сферических частиц графита и алмаза давления можно оценить из выражения [13]:

$$-\Delta\mu - \frac{2\sigma_\alpha V_\alpha}{R_\alpha} + \frac{2\sigma_\beta V_\beta}{R_\beta} \leq \int_0^{P_1} \Delta V(p, T) dP, \quad (4)$$

где ΔV — разность атомных (молярных) объемов алмаза и графита.

Если не учитывать зависимость сжимаемости графита и алмаза от давления и принять $-\Delta\mu/\Delta V = P_0$, то из уравнения (4) получим:

$$P_0 \leq \frac{2\sigma_\alpha}{R_\alpha \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} - 1 \right)} \left(\frac{\sigma_\beta V_\beta^{2/3}}{\sigma_\alpha V_\alpha^{2/3}} - 1 \right) + P_1. \quad (5)$$

Выражение (5) характеризует изменение давления фазового перехода относительно равновесного в зависимости от размера (поверхностной энергии) сферических частиц графита и алмаза, имеющих одинаковое количество атомов.

Таким образом, влияние поверхностной энергии на химический потенциал сферических частиц графита и алмаза также приводит к смещению кривой равновесия алмаз–графит в область более низких давлений и расширению области стабильности алмаза.

Как следствие, с увеличением размера частиц линия равновесия фаз приближается к линии равновесия для крупных частиц алмаза и графита.

В тонкопленочных графитоподобных структурах с малым отношением высоты пленки к площади основания H/S из-за анизотропности свойств поверхностная энергия оснований и призматических (боковых) граней будет различной. Скомпенсированность связей атомов базисных плоскостей графита будет определять их малую поверхностную энергию, а боковые грани графитовых частиц будут характеризоваться поверхностной энергией одного порядка с поверхностной энергией алмаза.

Различие поверхностной энергии у разных граней графитовой наночастицы будет влиять на параметры прямых переходов наночастиц графита в алмаз. Для пленочных структур графита в огранке преобладают базисные грани с малой энергией, а доля призматических (боковых) граней невелика, поэтому переход таких структур в алмаз сопровождается более значительным ростом поверхностной энергии, относительная величина которой в полной энергии увеличивается [13, 14]. Для наноструктурных пленок графита увеличение энергии поверхности приведет к существенному росту полной свободной энергии частицы. В этом случае давление перехода в алмаз может значительно превышать равновесное.

Условие, при котором термодинамически будет стабильна алмазная фаза, выражается следующим неравенством:

$$\Delta\mu = (\mu_\alpha - \mu_\beta) + (\sigma_{\alpha \text{ пов.}} - \sigma_{\beta \text{ пов.}}) \leq 0, \quad (6)$$

где $\Delta\mu$ — разность полных химических потенциалов алмаза и графита; μ_α и μ_β — объемные химические потенциалы алмаза и графита соответственно; $\sigma_{\alpha \text{ пов.}}$ и $\sigma_{\beta \text{ пов.}}$ — поверхностные энергии оснований алмаза и графита.

Так, для прямого перехода нанопленки графита в форме диска с площадью основания S и высотой h , разность химических потенциалов (изменение энергии Гиббса) алмаза и графита $\Delta\mu$ составит [14]:

$$\Delta\mu = m(\mu_\alpha - \mu_\beta) + 2S \left((\sigma_{\alpha \text{ пов.}} - \sigma_{\beta \text{ пов.}}) + (2\sqrt{\pi}h_\beta / 2\sqrt{S})(\rho_{\text{гр.}} / \rho_{\text{алм.}} \sigma_{\alpha \text{ бок.}} - \sigma_{\beta \text{ бок.}}) \right), \quad (7)$$

где m — масса частицы графита (алмаза), г; $\Delta\mu$ — разность химических потенциалов алмаза и графита, Дж/г; μ_α и μ_β — объемные химические потенциалы алмаза и графита; $\sigma_{\alpha \text{ пов.}}$ и $\sigma_{\beta \text{ пов.}}$ — поверхностные энергии оснований алмаза и графита, Дж/м²; $\sigma_{\alpha \text{ бок.}}$ и $\sigma_{\beta \text{ бок.}}$ — поверхностные энергии боковых поверхностей алмаза и графита, Дж/м²; h_β — толщина пленки графита, м; S — площадь основания кристаллита графита, м²; $\rho_{\text{алм.}}$ и $\rho_{\text{гр.}}$ — плотности алмаза и графита, г/м³.

Так как $\sigma_{\alpha \text{ пов.}}$ алмаза (поверхностная энергия основания алмазной структуры) существенно превосходит $\sigma_{\beta \text{ пов.}}$ (поверхностную энергию основания графитовой структуры), а величины энергии боковых поверхностей $\sigma_{\alpha \text{ бок.}}$ и $\sigma_{\beta \text{ бок.}}$ сравнимы, то изменение химического потенциала (свободной энергии Гиббса) для прямого перехода тонкопленочной графитовой структуры в алмаз будет значительно выше, чем для «массивных» графита и алмаза. Для наноструктурных графитовых пленок с большим отношением S/h более значительно возрастает $\Delta\mu$, что повышает давление фазового перехода.

Снизить параметры фазового превращения возможно за счет формирования покрытия из неалмазного (графитоподобного) углерода на поверх-

ности алмаза. В этом случае поверхность алмазной подложки будет оказывать влияние на процесс перехода тонкого слоя графита (графитоподобного углерода) в алмаз при более благоприятных термодинамических условиях [2, 7, 13].

Термодинамический анализ процесса фазового превращения в системе «наноалмаз сферической формы — графитовая нанопленка». Проведем оценку равновесного давления превращения тонкой (нанометровой) графитовой пленки, сформированной на поверхности сферической алмазной частицы, в алмазную структуру.

Для расчета предположим, что при переходе пленки графита в алмаз образующаяся алмазная пленка будет когерентно связана с исходным наноалмазом. Также введем допущение, что взаимодействие на границе «наноалмаз — графитовая пленка» будет физическим (Ван-дер-Ваальсовым) и равным энергии взаимодействия между графитовыми плоскостями [14]. Тогда поверхностная энергия границы раздела алмаз–графит примет вид:

$$\sigma_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\text{ пов.}} + \sigma_{\beta\text{ пов.}} - 2\sigma_{\beta\text{ пов.}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\alpha\text{ пов.}}$ и $\sigma_{\beta\text{ пов.}}$ — поверхностные энергии оснований частиц алмаза и графита.

При отношении молярных объемов графита и алмаза $V_{\beta}/V_{\alpha} = 1,5$ выражение для радиуса сферической частицы алмаза будет равно:

$$R_{\alpha} = \frac{R_{\beta}}{\sqrt[3]{1,5}}. \quad (9)$$

Отсюда влияние поверхностной энергии, исходя из (4) и с учетом (8), (9), можно определить следующим образом:

$$-\Delta\mu - \frac{2\sigma_{\alpha}V_{\alpha}}{R_{\alpha} + R'_{\alpha}} - S_{\text{пов.}}(\sigma_{\beta} - \sigma_{\alpha}) + \frac{2\sigma_{\beta}V_{\beta}}{R_{\beta}} + S_{\text{пов.}}(\sigma_{\alpha} - \sigma_{\beta}) \leq \int_0^{P_1} \Delta V(p, T) dP, \quad (10)$$

где R_{α} — размер (радиус) наноалмаза; R'_{α} — толщина алмазной пленки, образовавшейся в ходе синтеза; R_{β} — радиус частицы алмаза с графитовой пленкой; $S_{\text{пов.}}$ — площадь межфазной поверхности контакта алмазной частицы и графитовой пленки.

После преобразования получим:

$$-\Delta\mu - \frac{2\sigma_{\alpha} 4/3\pi(R_{\beta}/1,14 + R'_{\alpha})^3}{R_{\beta}/1,14 + R'_{\alpha}} + \frac{2\sigma_{\beta}V_{\beta}}{R_{\beta}} - 2S(\sigma_{\beta} - \sigma_{\alpha}) \leq \int_0^{P_1} \Delta V(p, T) dP$$

или

$$-\Delta\mu - 2\sigma_{\alpha} 4/3\pi(R_{\beta}/1,14 + R'_{\alpha})^2 + \frac{2\sigma_{\beta}V_{\beta}}{R_{\beta}} - 2S(\sigma_{\beta} - \sigma_{\alpha}) \leq \int_0^{P_1} \Delta V(p, T) dP. \quad (11)$$

Из анализа выражения (11) можно сделать следующие выводы:

- равновесное давление фазового перехода в зависимости от величины произведения $\sigma_{\beta}V_{\beta}$ (или отношения $\sigma_{\beta}V_{\beta}/\sigma_{\alpha}V_{\alpha}$) может быть выше (в случае более низких по сравнению с $\sigma_{\alpha}V_{\alpha}$ значений $\sigma_{\beta}V_{\beta}$) или ниже (в случае значений $\sigma_{\beta}V_{\beta}$, сравнимых либо превышающих $\sigma_{\alpha}V_{\alpha}$);
- учет изменения межфазной энергии при переходе приведет к снижению равновесного давления, т. к. $\sigma_{\beta} - \sigma_{\alpha}$ — величина отрицательная;
- уменьшение толщины графитовой пленки на поверхности алмазной частицы повышает давление фазового перехода графит–алмаз;
- для углеродной пленки с неупорядоченной структурой (аморфный углерод, сажа) значение σ_{β} будет ниже, чем для пленки графита [15], поэтому давление перехода пленок аморфного углерода в алмаз превысит как равновесное давление, так и давление перехода для упорядоченной графитовой структуры в алмаз.

Заключение. 1. На основании анализа литературных источников показано, что положение линии фазового равновесия графит–алмаз зависит от размера частиц графита и алмаза. Для частиц нанометрового диапазона различной формы (сферической, столбчатой) вклад поверхностной энергии в общую энергию системы приводит к смещению кривой равновесия алмаз–графит в область низких давлений и расширению области стабильности алмаза.

2. Давление фазового перехода в алмаз для тонкопленочных графитоподобных структурах с малым отношением высоты пленки к площади основания H/S и преобладанием базисных граней с низкой энергией может значительно превышать равновесное давление из-за более значительного роста поверхностной энергии при образовании алмазной структуры.

3. Снижение параметров фазового превращения графит–алмаз возможно за счет формирования покрытия из неалмазного (графитоподобного) углерода на поверхности алмаза. В этом случае поверхность алмазной подложки будет оказывать влияние на процесс перехода тонкого слоя графита (графитоподобного углерода) в алмаз при более благоприятных термодинамических условиях.

4. Перспективный подход получения наноструктурных поликристаллических алмазных материалов заключается в формировании тонких пленок графитоподобного углерода на подложке, в качестве которой можно использовать наноалмазы.

5. Показано, что равновесное давление фазового перехода в зависимости от отношения $\sigma_{\beta}V_{\beta}/\sigma_{\alpha}V_{\alpha}$ может быть как выше линии равновесия (при более низких значениях $\sigma_{\beta}V_{\beta}$), так и ниже ее (для значений $\sigma_{\beta}V_{\beta}$, сравнимых либо превышающих $\sigma_{\alpha}V_{\alpha}$). При этом уменьшение толщины графитовой пленки на поверхности сферической алмазной частицы приводит к повышению давления фазового перехода графит–алмаз.

6. Для углеродной пленки с неупорядоченной структурой (аморфный углерод, сажа) на поверхности наноалмаза сферической формы значение σ_{β} будет ниже, чем для поверхностной пленки с упорядоченной структурой графита, поэтому давление перехода такой пленки в алмаз превысит давление перехода в алмаз графитовой пленки.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ по договору № T23КИТГ-001.

Окончание следует.

Список литературы

1. Obtaining nanocrystalline superhard materials from surface-modified nanodiamond powder / P.A. Vityaz [et al.] // *Advanced Materials & Technologies*. — 2022. — Vol. 7, no. 4. — Pp. 256–269. <http://doi.org/10.17277/jamt.2022.04.pp.256-269>.
2. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение. / Витязь П.А. [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 381 с.
3. Nanolayered diamond sintered compact obtained by direct conversion from highly oriented graphite under high pressure and high temperature / F. Isobe // *Journal of Nanomaterials*. — 2013. — 6 p. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/380165>.
4. Microstructure features of polycrystalline diamond synthesized directly from graphite under static high pressure / H. Sumiya [et al.] // *Journal of Materials Science*. — 2004. — Vol. 39. — Pp. 445–450. — DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000011496.15996.44>.
5. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструмента / Н.П. Беженар [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя, В.З. Туркевича. — Минск: Беларус. навука, 2021. — 337 с.
6. Синтез алмазных наноструктурных материалов на основе наноалмазов / П.А. Витязь [и др.] // Докл. НАН Беларуси. — 2012. — Т. 56, № 6. — С. 87–91.
7. Новый поликристаллический сверхтвердый материал карбонит / Герасименко В.К. [и др.] // *Сверхтвердые материалы*. — 1981. — № 6. — С. 11–12.
8. Сверхтвердые материалы: получение и применение: моногр.: в 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. — Киев: АЛКОН, 2003. — Т. 1: Синтез алмазов и подобных материалов. — 320 с.
9. Курдюмов, А.В. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора / А.В. Курдюмов. — Киев: Наук. думка, 1979. — 188 с.
10. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. — М.: Физматлит, 2005. — 416 с.
11. Чайковский, Э.Ф. Фазовая диаграмма углерода и возможность получения алмаза при низких давлениях / Э.Ф. Чайковский, Г.Х. Розенберг // Докл. АН СССР. — 1984. — Т. 279, № 6. — С. 1372–1375.
12. Долматов, В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / В.Ю. Долматов. — СПб.: Профес-сионал, 2011. — 536 с.
13. Нуклеация алмаза при высоких давлениях // Кристаллизация алмаза / Д.В. Федосеев [и др.]; отв. ред. Р.К. Чужко. — М.: Наука, 1984. — 27 с.
14. Кристаллизация алмаза / Д.В. Федосеев [и др.]; отв. ред. Р.К. Чужко. — М.: Наука, 1984. — 136 с.
15. Ножкина, А.В. Поверхностная энергия алмаза и графита / А.В. Ножкина, В.И. Костиков // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. / ИСМ им. В.Н. Бакуля. — Киев, 2017. — Вып. 20. — С. 161–167.

SENYUT Vladimir T., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

E-mail: vsenyut@tut.by

VITYAZ Petr A., Academician of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher of the Department of Technologies of Mechanical Engineering and Metallurgy¹

E-mail: vityazpresidium@bas-net.by

PARNITSKY Alexander M., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

E-mail: europacorp@tut.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 02 June 2023.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE FORMATION OF A NANOSTRUCTURAL POLYCRYSTALLINE MATERIAL BASED ON NANODIAMONDS MODIFIED WITH NON-DIAMOND CARBON (PART 1)

The influence of the size of carbon particles on the parameters of the graphite–diamond phase transformation is considered. It is shown that the surface energy of carbon nanoparticles of various shapes (spherical, columnar) makes a significant contribution to their total thermodynamic potential, which leads to a shift in the diamond–graphite equilibrium curve to the low pressure region and an expansion of the diamond phase stability region. At the same time, the change in the chemical potential (Gibbs free energy) during the direct (not catalytic) transition of thin-film graphite-like nanostructures into diamond will be higher than for “massive” graphite, which leads to an increase in the pressure of phase transformation into

diamond. To reduce the parameters of diamond formation and obtain nanostructured diamond polycrystals, it is proposed to use nanodiamond particles with a nanometer surface layer of non-diamond (graphite-like) carbon as the starting material. In this case, the nanodiamond surface will influence the transition of a nanometer layer of graphite (graphite-like carbon) into diamond under more favorable thermodynamic parameters.

Keywords: nanodiamond, non-diamond forms of carbon, state diagram, phase transformations, chemical potential, Gibbs energy

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-60-65>

References

- Vityaz P.A., Senyut V.T., Kheifetz M.L., Kolmakov A.G. Obtaining nanocrystalline superhard materials from surface-modified nanodiamond powder. *Journal of advanced materials and technologies*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 256–269. <http://doi.org/10.17277/jamt.2022.04.pp.256-269>.
- Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Zhornik V.I. *Nanoalmazny detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primeneniye* [Detonation synthesis nanodiamonds: preparation and application]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2013. 381 p. (in Russ.).
- Isobe F., Ohfuji H., Sumiya H., Irifune T. Nanolayered diamond sintered compact obtained by direct conversion from highly oriented graphite under high pressure and high temperature. *Journal of nanomaterials*, 2013, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/380165>.
- Sumiya H., Irifune T., Kurio A., Sakamoto S., Inoue T. Microstructure features of polycrystalline diamond synthesized directly from graphite under static high pressure. *Journal of materials science*, 2004, vol. 39, iss. 2, pp. 445–450. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000011496.15996.44>.
- Bezhenar N.P., et al. *Sintez i spekanie sverkhтвердых материалов для производства инструмента* [Synthesis and sintering of superhard materials for tool production]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2021. 337 p. (in Russ.).
- Vityaz P.A., Senyut V.T., Kheifetz M.L., Kolmakov A.G., Klimenko S.A. Sintez almaznykh nanostrukturnykh materialov na osnove nanoalmazov [Synthesis of diamond nanostructured materials on the basis of nanodiamonds]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, vol. 56, no. 6, pp. 87–91 (in Russ.).
- Gerasimenko V.K., Bespalko O.P., Bondarenko V.P., Bezhenar N.P. Novyy polikristallicheskiy sverkhтвердый material karbonit [New polycrystalline superhard material carbonite]. *Sverkhтвердые материалы*, 1981, no. 6, pp. 11–12 (in Russ.).
- Sverkhтвердые материалы: poluchenie i primeneniye. Tom 1. Sintez almazov i podobnykh materialov* [Superhard materials: production and application. Volume 1. Synthesis of diamonds and similar materials]. Kiev, ALKON Publ., 2003. 320 p. (in Russ.).
- Kurdyumov A.V. *Fazovyye prevrashcheniya v uglerode i nitride bora* [Phase transformations in carbon and boron nitride]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1979. 188 p. (in Russ.).
- Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 416 p. (in Russ.).
- Chaykovskiy E.F., Rozenberg G.Kh. Fazovaya diagramma ugleroda i vozmozhnost polucheniya almaza pri nizkikh davleniyakh [Carbon phase diagram and the possibility of obtaining diamond at low pressures]. *Doklady Akademii nauk*, 1984, vol. 279, no. 6, pp. 1372–1375 (in Russ.).
- Dolmatov V.Yu. *Detonatsionnye nanoalmazы. Poluchenie, svoystva, primeneniye* [Detonation nanodiamonds. Getting, properties, application]. Saint Petersburg, Professional Publ., 2011. 536 p. (in Russ.).
- Fedoseev D.V., Deryagin B.V., Varshavskaya I.G., Semenova-Tyan-Shanskaya A.S. Nukleatsiya almaza pri vysokikh davleniyakh [Diamond nucleation at high pressures]. *Kristallizatsiya almaza*, 1984, p. 27 (in Russ.).
- Fedoseev D.V., Deryagin B.V., Varshavskaya I.G., Semenova-Tyan-Shanskaya A.S. *Kristallizatsiya almaza* [Diamond crystallization]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 136 p. (in Russ.).
- Nozhkina A.V., Kostikov V.I. Poverkhnostnaya energiya almaza i grafita [Surface energy of diamond and graphite]. *Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatvayushchiy instrument – tekhnika, tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya*, 2017, iss. 20, pp. 161–167 (in Russ.).