

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.762
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-521-528>

Поступило в редакцию 03.03.2025
Received 03.03.2025

Академик П. А. Витязь¹, М. Л. Хейфец², В. Т. Сеньют¹, Н. П. Похиленко³,
В. П. Афанасьев³, Д. Ю. Колодяжный⁴

¹Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Институт геологии и минералогии имени академика С. С. Соболева Сибирского отделения Российской
академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

⁴Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Российская Федерация

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И КРИСТАЛЛОХИМИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ УГЛЕРОДА

Аннотация. На основе кристаллохимического и физико-химического анализа образования алмаза проведена трансформация топологической модели диаграммы состояния углерода. Предложена фазовая диаграмма метастабильных превращений с учетом поглощаемой диссипативными структурами энергии, которая определяет положения линий, описывающих фазовые переходы, их число, возрастающее в результате формирования переходных структур, в зависимости от температуры, давления и количества поглощаемой энергии. Выделены новые области образования фаз при формировании природных минералов, включающие импактный алмаз с лонсдейлитом, переходные области выпадения из жидкости ультрадисперсных частиц алмаза и микрогруппировок графита и лонсдейлита. По диаграмме состояния углерода идентифицированы зерна высокобарических углеродных фаз Попигайского месторождения – импактных алмазов, сформированных при столкновении метеорита с графитсодержащими породами. Относительно прозрачные, крупные сверхтвердые зерна минерала представляют собой импактный алмазно-лонсдейлитовый абразив. Практически непрозрачные темные зерна минерала, образованные при ударе со сдвигом, представляют собой сростки ультрадисперсных частиц алмаза с микрогруппировками графита и лонсдейлита.

Ключевые слова: кристаллохимический анализ, физико-химический анализ, углеродные фазы, алмаз, графит, лонсдейлит, абразив

Для цитирования. Физико-химический анализ и кристаллохимия метастабильных превращений на диаграмме состояния углерода / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, В. Т. Сеньют [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 6. – С. 521–528. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-521-528>

Academician Petr A. Vityaz¹, Mikhail L. Kheifetz², Vladimir T. Senyut¹, Nikolay P. Pokhilenko³,
Valentin P. Afanasyev³, Dmitriy Yu. Kolodyazhny⁴

¹United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³S. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

⁴Moscow State Technological University “STANKIN”, Moscow, Russian Federation

PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS AND CRYSTAL CHEMISTRY OF METASTABLE TRANSFORMATIONS ON THE CARBON STATE DIAGRAM

Abstract. Based on crystal-chemical and physicochemical analysis of the diamond formation, topological transformation was carried out diagram models states carbon. A phase diagram of metastable transformations is proposed, with consideration given to the energy absorbed by dissipative structures. The diagram defines the positions of the lines describing phase transitions, their number, increasing as a result of the formation of transition structures, depending on the temperature, pressure and amount of absorbed energy. The diagram highlights new areas of phase formation during the formation of natural minerals, including impact diamonds with lonsdaleite, transition areas of precipitation from the liquid of ultra-dispersed diamond particles and microgroups of graphite and lonsdaleite. The carbon phase diagram identified grains of high-pressure carbon phases of the Popigai deposit – impact diamonds formed during the collision of a meteorite with graphite-containing rocks. Relatively transparent, large superhard grains of the mineral are impact diamond-lonsdaleite abrasive. Virtually opaque, dark grains of the mineral, formed during impact with shear, are sprouts of ultra-dispersed diamond particles with microgroups of graphite and lonsdaleite.

For citation. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Senyut V. T., Pokhilenko N. P., Afanasyev V. P., Kolodyazhny D. Yu. Physicochemical analysis and crystal chemistry of metastable transformations on the carbon state diagram. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 6, pp. 521–528. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-521-528>

Введение. Изучение минералов, обнаруженных в кратере Попигайского месторождения, показало присутствие в них разнообразных углеродных, в том числе и алмазоподобных, а также других переходных структур, сформированных в результате столкновения метеорита с графит-содержащими породами [1–3].

Основной высокобарический минерал углерода был назван «импактным алмазом». Этот минерал образуется путем мартенситного перехода графита в высокобарические фазы с sp^3 -гибридизацией электронных орбит и представляет собой импактный апографитовый нанополикристаллический материал, состоящий из трех основных фаз – кубической алмазной, гексагональной лонсдейлитовой и остаточным графитом в разных соотношениях. Предполагается присутствие в нем неупорядоченных структур с sp^3 -гибридизацией. Тем самым «импактный алмаз» мало соответствует обычному алмазу, в первую очередь по генезису, фазовому составу и нанополикристаллическому строению [3; 4]. Фактически «импактный алмаз» это абразивный материал с особыми технологическими свойствами, в первую очередь в среднем вдвое более высокой абразивной способностью, в сравнении с монокристалльными алмазами, как синтезированными, так и природными, что связано с его нанополикристаллическим строением.

В физико-химическом отношении этот минерал практически не изучен, поэтому заслуживает тщательного изучения с учетом его генезиса, *a priori* предусматривающего появление неупорядоченных и метастабильных промежуточных фаз.

Для изучения процессов образования алмазоподобных структур в минералах и породах целесообразно на основе кристаллохимических представлений, по диаграммам состояния углерода рассмотреть связь степеней свободы физико-химической системы с формирующимися фазами, определить рациональное число степеней свободы и структуру взаимосвязей метастабильных превращений в системе [5].

В основу физико-химии синтеза алмаза положена теория, разработанная О. И. Лейпунским [6] и зарегистрированная как открытие под формулой: «Теоретически установлена неизвестная ранее закономерность кристаллизации (синтеза) алмаза из углерода – образование алмаза в области его стабильности в жидкой среде, растворяющей углерод или вступающей с ним в нестойкие химические соединения, при давлении и температуре (большей 1400 K), отвечающим условию

$$P \geq 5,5 + 26,4 \cdot 10^{-3} T^{\circ} \text{K, тыс. атм.}».$$

О. И. Лейпунский впервые показал необходимость сочетания условий термодинамической устойчивости алмаза с кинетическими условиями его синтеза и наличием определенной среды, благодаря чему появилась возможность перейти к синтезу на основе определенных законов [6]. Сформулированное рациональное сочетание трех необходимых условий осуществления синтеза алмаза (значений температуры, давления и наличие определенной среды) лежит в основе современных представлений синтеза алмаза при высоких статических давлениях [5].

Рассматривать образование структур и фаз по диаграммам – геометрическим образам соотношений состав–свойство системы позволяет физико-химический анализ сложных систем [7]. Основными принципами анализа физико-химических диаграмм являются предложенные Н. С. Курнаковым принципы непрерывности и соответствия [8]. Согласно принципу соответствия, на диаграмме каждой фазе должен отвечать определенный геометрический образ, а в соответствии с принципом непрерывности, этот образ должен быть непрерывным [9].

Основные принципы физико-химического анализа для многокомпонентных систем дополнены Я. Г. Горощенко [10] принципом совместимости, согласно которому, любой набор компонентов системы, независимо от их числа и физико-химических свойств, трансляцией частных подсистем может составить систему. В общей системе элементы подсистем совмещаются на диаграмме с геометрическими образами и отображают процессы, протекающие с участием всех компонентов системы.

Анализ метастабильных превращений в открытых многокомпонентных физико-химических системах при их эволюции к стационарному состоянию предложено [11] дополнить принципом ограничения количества управляющих воздействий. Согласно положениям неравновесной термодинамики, в соответствии с фундаментальной теоремой Пригожина–Гленсдорфа [12], при образовании диссипативных структур стабилизация неравновесных процессов без перехода к хаотическому состоянию обеспечивается путем ограничения числа степеней свободы системы [13].

Физико-химический анализ в соответствии с основными и дополненными принципами для метастабильных процессов по диаграмме состояния углерода проводился для синтеза сверхтвердых ма-

териалов [14–16]. Однако при анализе не рассматривались многокомпонентные системы, а в быстропротекающих процессах не детализировались стадии кристаллизации диссипативных структур.

Цель работы – определить на основе кристаллохимических представлений, по диаграмме состояния физико-химической системы при образовании углеродных, в том числе алмазоподобных и других комплексных структур, положения линий, описывающих фазовые переходы, их количество, возрастающее в результате формирования промежуточных фаз и переходных структур; на основании физико-химического анализа и кристаллохимии метастабильных превращений на диаграмме состояния углерода идентифицировать минералы и породы, сформированные в природных условиях.

Кристаллохимический и физико-химический анализ образования алмаза. Кристаллизация алмаза производится в условиях высоких статических давлений, когда алмаз – термодинамически стабильная фаза углерода, а графит – термодинамически метастабильная [5].

Необходимым и достаточным условием равновесия фаз алмаза и графита является равенство их химических потенциалов, а пересыщение фаз характеризуется разностью химических потенциалов. Для выделения вещества из раствора необходимо сначала перевести его в метастабильное состояние и получить пересыщение, а затем реализовать переход в стабильное состояние путем зарождения и роста выделяемой фазы.

При кристаллизации алмаза имеют место три процесса: растворение углеродного вещества; транспортировка углерода; кристаллизация алмаза.

Транспортировка углерода к растущему кристаллу может осуществляться следующим образом [5]:

рост кристаллов алмаза происходит за счет притока атомов углерода к растущему кристаллу (такой механизм можно ожидать при высоких температурах вблизи линии равновесия графит–алмаз, так как в этих условиях графит должен раствориться до атомов);

смешанный механизм, включающий одновременный приток атомов и микрогруппировок углерода к растущему кристаллу (такой механизм можно ожидать при средних температурах синтеза);

рост кристаллов за счет притока микрогруппировок углерода (такой механизм можно ожидать при самых низких температурах синтеза).

При изучении механизма образования алмаза необходимо рассмотреть зародышеобразование. Кристаллиты графита являются источниками центров кристаллизации алмаза и представляют собой частицы графита с высокой степенью упорядоченности [17]. При растворении катализатором эти частицы достигают определенного размера и становятся центрами кристаллизации алмаза. Главное положение, лежащее в основе существующих теорий роста кристаллов, состоит в том, что их рост происходит путем присоединения к растущему кристаллу атомов или ионов углерода [5; 14–17].

На рис. 1, *a* представлена диаграмма состояния углерода [5; 14].

К линии равновесия гексагональных и сфалеритных фаз углерода примыкает заштрихованная область 1, соответствующая условиям каталитического превращения графита в алмаз. Пороговые значения прямых превращений графит–алмаз, т. е. протекающих непосредственно в однокомпонентной системе, на диаграмме соответствуют заштрихованной области 4. Между линией равновесия и областью 4 графит находится в метастабильном состоянии, превращаясь в соответ-

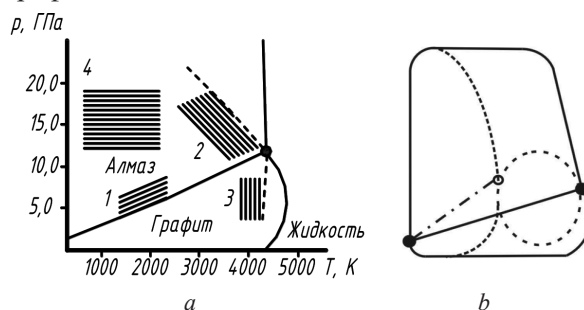


Рис. 1. Фазовая диаграмма состояния углерода (*a*) и соответствующая физико-химической системе топологическая модель (*b*): 1 – область каталитического синтеза алмаза из графита; 2 – область прямого перехода графита в алмаз; 3 – область прямого превращения алмаза в графит; 4 – область прямого превращения графита в лонсдейлит




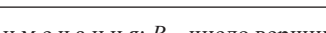
Fig. 1. Phase diagram of the state of carbon (*a*) and the topological model corresponding to the physicochemical system (*b*): 1 – region of catalytic synthesis of diamond from graphite; 2 – region of direct transition of graphite to diamond; 3 – region of direct transformation of diamond to graphite; 4 – region of direct transformation of graphite to lonsdaleite

ствующую стабильную модификацию алмаза только в присутствии катализаторов-растворителей в области 1. При достаточно высоких давлениях гексагональная структура в результате прямых фазовых переходов превращается в сфалеритную, причем в высокотемпературной области 2 образуется кубический алмаз, а в низкотемпературной области 4 – лонсдейлит. Лонсдейлит также образуется в высокотемпературной области 3, но при относительно низких давлениях. Резкой температурной границы между данными областями не существует, однако плавление углерода представляет собой четкую линию.

Трансформация топологической модели диаграммы состояния углерода. С позиций термодинамики открытых неравновесных систем на основании принципов самоорганизации [5; 14; 15] проанализируем синтез алмаза и других структур на топологической модели фазовой диаграммы состояния углерода (рис. 1, b).

С учетом введения дополнительных компонентов и формирования новых связей системы при изменении числа степеней свободы, ее стабильности и равновесности рассмотрим диаграмму состояния углерода. Топологическая модель строилась по фазовой диаграмме состояния на основе анализа числа степеней свободы системы в уравнении фаз Гиббса при метастабильных состояниях с учетом устойчивости неравновесных процессов при эволюции системы к стационарному состоянию (табл. 1).

Таблица 1. Формирование связей на топологической модели диаграммы состояния углерода
Table 1. Formation of connections on the topological model of the carbon state diagram

Формирование связей топологической модели (рис. 1, b) Formation of connections of the topological model (Fig. 1, b)	Степени свободы физико-химической системы Degrees of freedom of a physicochemical system $B + \Gamma - P = C_g + 1 = C$
	$2 + 3 - 3 = 1 + 1 = 2$
	$2 + 5 - 4 = 2 + 1 = 3$
	$3 + 6 - 6 = 2 + 1 = 3$
	$3 + 7 - 8 = 1 + 1 = 2$

Примечания: B – число вершин, Γ – число граней, P – число ребер, C_g – число связанных кусков графа, C – число степеней свободы системы.

Notes: B is the number of vertices, Γ is the number of faces, P is the number of edges, C_g is the number of connected pieces of the graph, C is the number of degrees of freedom of the system.

Анализ формирования связей на топологической модели показывает, что дополнение к сингулярной точке (закрашенной, расположенной справа) только петли, охватывающей метастабильные состояния (штриховая линия), предоставляет системе три степени свободы ($C = 3$) и перспективу перехода к хаотическому состоянию без стабилизации неравновесных процессов.

Стабилизация в одной из точек (выколотов) предельного состояния (штрихпунктирная линия) при введении дополнительного компонента также невозможна, так как $C = 3$. Поэтому, рассматривая узел (выколотую точку) как формирование нового химического соединения с добавлением линий, отделяющих его из раствора (пунктирные линии), можно обеспечить устойчивость системы при ее эволюции к стационарному состоянию с $C = 2$.

В результате предложенную [14; 15] топологическую модель (рис. 1, b) можно рассматривать как проекцию трехмерной диаграммы на плоскость. В качестве третьей координаты трехмерной диаграммы, вследствие формирования химического соединения, может выступать концентрация металла растворителя [5].

Анализ быстропротекающих процессов образования разнообразных структур и фаз при высоких давлениях и температурах формирования алмаза и алмазоподобных структур для их идентификации потребовал изучения путей трансформации топологической модели диаграммы состояния углерода [14; 15] с учетом диссипации поглощаемой энергии [5].

Формирование новых связей на графе рассматривалось поэтапно (рис. 2), в соответствии со вторым принципом Н. С. Курнакова: соответствия топологической модели физико-химической системе. Степени свободы системы $C = C_g + 1$ определялись через число связанных кусков графа C_g . При этом следили за тем, чтобы добавление новых элементов (вершин, граней, ребер) не изменяло число степеней свободы (табл. 2).

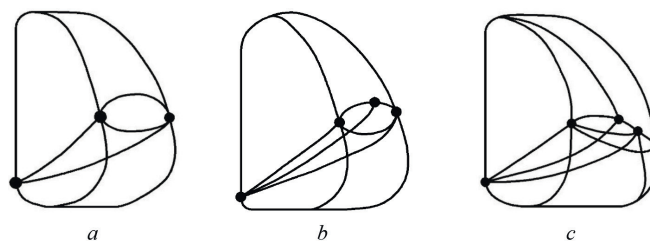


Рис. 2. Трансформация топологической модели, соответствующей фазовой диаграмме состояния углерода (а), с учетом появления дополнительной фазы (b), различной последовательности выделения твердых фаз и кинетики неравновесных процессов выделения фаз (с)

Fig. 2. Transformation of the topological model corresponding to the phase diagram of the state of carbon (a), taking into account the appearance of an additional phase (b), different sequences of separation of solid phases and the kinetics of nonequilibrium processes of phase separation (c)

Т а б л и ц а 2. Трансформация топологической модели диаграммы состояния углерода

T a b l e 2. Transformation of the topological model of the carbon phase diagram

Стадия трансформации топологической модели (рис. 2) Stage of transformation of the topological model (Fig. 2)	Степени свободы физико-химической системы Degrees of freedom of a physicochemical system $B + \Gamma - P = C_g + 1 = C$
a	$3 + 7 - 8 = 1 + 1 = 2$
b	$4 + 8 - 10 = 1 + 1 = 2$
c	$5 + 11 - 14 = 1 + 1 = 2$

Трансформация (рис. 2, а–с) топологической модели проводилась на принятой за основу [6], соответствующей (табл. 2, первая строка) фазовой диаграмме состояния углерода (рис. 2, а). С учетом образования дополнительной фазы (рис. 2, b) появляется вершина графа, а следовательно, соответствующая грань и два ребра, ее отделяющие (табл. 2, вторая строка).

Так как образуется новая фаза, то кристаллизация фаз имеет разные варианты и происходит в общем случае не одновременно, поэтому за солидусом выделяются переходные зоны для различной последовательности выпадения твердых фаз из расплава.

С учетом кинетики переходного процесса выделения фаз, сходного с перитектическим (рис. 2, c), на топологической модели появляются три новые грани, четыре ребра и вершина (табл. 2, третья строка).

Фазовая диаграмма состояния углерода с учетом поглощаемой структурами энергии.

Построение диаграммы состояния углерода проводилось по трансформированной топологической модели (рис. 2), в соответствии с первым принципом Н. С. Курнакова: непрерывности свойств физико-химической системы.

Диаграмма (рис. 3), сформированная в соответствии с третьим принципом совместимости, отображает состояния углерода в зависимости от температуры T и давления P , с учетом количества поглощаемой энергии E при возрастающей скорости синтеза диссипативных структур, в соответствии с четвертым принципом ограничения воздействий.

Фазовая диаграмма состояния углерода, в зависимости от температуры T и давления P , с учетом количества поглощаемой энергии E (рис. 3), при возрастающей скорости синтеза диссипативных структур имеет область, включающую импактный алмаз с лонсдейлитом 1, а также переходные области выпадения из жидкости ультрадисперсных частиц алмаза 2 и микрогруппировок графита и лонсдейлита 3.

Анализ процессов образования комплексных углеродных алмазоподобных структур. Изображения поверхностей зерен минералов Попигайского месторождения показаны на рис. 4 и 5 [1; 2].

Крупные, относительно прозрачные зерна импактного алмаза (рис. 4, а, b) образованы при прямом векторе удара по отношению к плоскости базиса графита. Практически непрозрачные темные зерна минерала (рис. 4, с, d) образованы при ударе со сдвигом. В этих зернах, помимо графита, формируется лонсдейлит. Сканирующая электронная микроскопия (рис. 5, а) и просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (HRTEM – High-Resolution Transmission Electron Microscopy) поверхности зерен (рис. 5, b), а также методы рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии позволяют это установить.

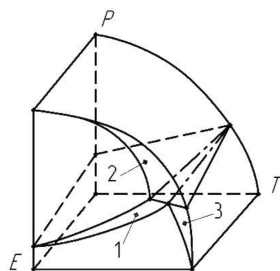


Рис. 3. Фазовая диаграмма состояния углерода, в зависимости от температуры T и давления P , с учетом поглощаемой энергии E : 1 – область, включающая импактный алмаз с лонсдейлитом; 2 – область выпадения из жидкости ультрадисперсных частиц алмаза; 3 – область выпадения микрогруппировок графита и лонсдейлита

Fig. 3. Phase diagram of the state of carbon, depending on temperature T and pressure P , taking into account the absorbed energy E : 1 – region including impact diamond with lonsdaleite; 2 – region of precipitation of ultra-dispersed diamond particles from the liquid; 3 – region of precipitation of microgroups of graphite and lonsdaleite

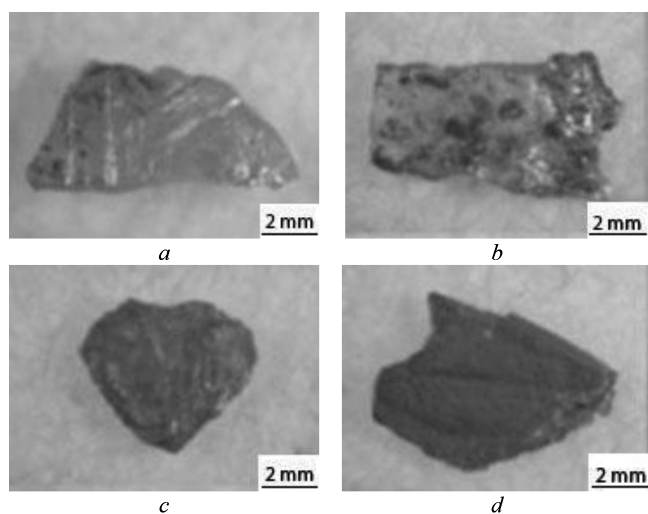


Рис. 4. Типичные формы крупных зерен импактных алмазов с содержанием графитовой фазы в зернах (a, b) ниже, чем в зернах (c, d) минералов Попигайского месторождения [1], сформированные: в 1-й области диаграммы (a, b) и во 2-й области (c, d)

Fig. 4. Typical shapes of large grains of impact diamonds with a graphite phase content in grains (a, b) lower than in grains (c, d) of minerals of the Popigai deposit [1], formed: in the 1st region (a, b), and in the 2nd region (c, d)

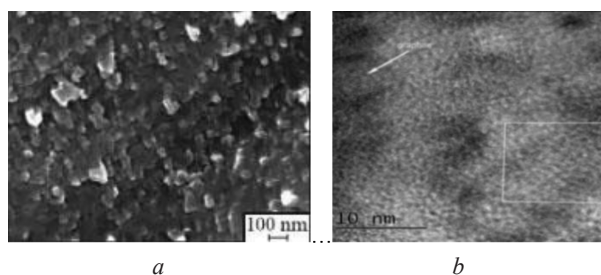


Рис. 5. Изображение поверхности алмазно-лонсдейлитового абразива, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (a), и участков алмазно-лонсдейлитового абразива, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (b), с графитовой (показано стрелкой) и лонсдейлитовой (выделено рамкой) структурами [2]

Fig. 5. Image of the surface of diamond-lonsdaleite abrasive obtained by scanning electron microscopy (a) and areas of diamond-lonsdaleite abrasive obtained by high-resolution transmission electron microscopy (b), with graphite (shown by arrow) and lonsdaleite (highlighted by frame) structures [2]

Важное значение имеет повышенная плотность импактного алмаза, которая не может быть объяснена за счет присутствия в нем лонсдейлитовой фазы и микропримесей графита. Причина, возможно, в том, что образование импактного алмаза происходило путем удара с уплотнением на границах когерентных блоков внутри зерен. Тогда импактный алмаз, по предположению В. П. Афанасьева, должен состоять не только из кристаллических фрагментов зерен агрегата

с кубической и гексагональной структурой, но содержать и аморфизированные фрагменты с сокращенными межатомными расстояниями в результате sp^3 -гибридизации.

Это показывает то, что межфазные границы предложенной диаграммы состояния углерода (рис. 3) с ростом плотности импульса поглощаемой энергии могут и дальше выделять новые (переходные, в том числе аморфизированные) фазы при образовании комплексных структур.

Выводы

1. Кристаллохимический и физико-химический анализ образования алмаза позволили провести трансформацию топологической модели диаграммы состояния углерода и в результате предложить новую фазовую диаграмму метастабильных превращений с учетом поглощаемой диссипативными структурами энергии. Диаграмма состояния углерода определяет положения линий, описывающих фазовые переходы, их число, возрастающее в результате формирования переходных структур и фаз, в зависимости от температуры, давления и количества поглощаемой энергии, при возрастающей скорости синтеза комплексных структур. Диаграмма выделяет новые области образования фаз при формировании природных минералов, включающие импактный алмаз с лонсдейлитом, а также переходные области выпадения из жидкости ультрадисперсных частиц алмаза и микрогруппировок графита и лонсдейлита.

2. На основании физико-химического анализа и кристаллохимии метастабильных превращений на диаграмме состояния углерода идентифицированы зерна минералов Попигайского месторождения, сформированных при столкновении метеорита с графитсодержащими породами. Относительно прозрачные, крупные сверхтвердые зерна минерала, образованные при прямом векторе удара метеорита по плоскости базиса графита, представляют собой импактный алмазно-лонсдейлитовый абразив, почти без графитовых включений. Практически непрозрачные темные зерна минерала, образованные при ударе со сдвигом, представляют собой сростки ультрадисперсных частиц алмаза с микрогруппировками графита и лонсдейлита.

Список использованных источников

1. Афанасьев, В. П. Попигайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий / В. П. Афанасьев, Н. П. Похиленко // Инноватика и экспертиза. – 2013. – № 1. – С. 8–15.
2. Рентгеновский анализ якутитов и оценка содержания в них примеси лонсдейлита / В. А. Петровский, В. П. Филоненко, В. И. Силаев [и др.] // Вестник Пермского университета. Геология. – 2013. – № 3. – С. 43–60.
3. Raman identification of lonsdaleite in Popigai impactites / S. V. Goryainov, A. Y. Likhacheva, S. V. Rashchenko [et al.] // Journal of Raman Spectroscopy. – 2014. – Vol. 45, N 4. – P. 305–313. <https://doi.org/10.1002/jrs.4457>
4. Natural occurrence of pure nano-polycrystalline diamond from impact crater / H. Ohfuji, T. Irifune, K. D. Litasov [et al.] // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – Art. 14702. <https://doi.org/10.1038/srep14702>
5. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструмента / Н. П. Беженар, А. А. Бочечка, Г. Д. Ильницкая [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя и В. З. Туркевича. – Мн., 2021. – 337 с.
6. Лейпунский, О. И. Об искусственных алмазах / О. И. Лейпунский // Успехи химии. – 1939. – Вып. 8. – С. 1519–1534.
7. Аносов, В. Я. Основы физико-химического анализа / В. Я. Аносов, М. И. Озерова, Ю. Я. Фиалков. – М., 1976. – 504 с.
8. Курнаков, Н. С. Введение в физико-химический анализ / Н. С. Курнаков. – М.; Л., 1940. – 562 с.
9. Ильин, К. К. Топология фазовых диаграмм тройных систем соль – два растворителя с всаливанием – высаливанием / К. К. Ильин, Д. Г. Черкасов. – Саратов, 2020. – 212 с.
10. Горощенко, Я. Г. Физико-химический анализ гомогенных и гетерогенных систем / Я. Г. Горощенко. – Киев, 1978. – 490 с.
11. Хейфец, М. Л. Анализ процессов самоорганизации при обработке металлов по диаграммам состояний физико-химических систем / М. Л. Хейфец // Доклады Академии наук Беларуси. – 1995. – Т. 39, № 6. – С. 109–113.
12. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – М., 1973. – 280 с.
13. Хейфец, М. Л. Развитие принципов физико-химического анализа для неравновесных процессов синтеза и применения материалов / М. Л. Хейфец // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 4. – С. 100–105.
14. Витязь, П. А. Анализ метастабильных и неравновесных процессов по диаграммам состояния при синтезе сверхтвердых материалов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 2. – С. 95–99.
15. Синтез алмазных наноструктурных материалов на основе наноалмазов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, В. Т. Сенют [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 6. – С. 87–91.
16. Methods of physicochemical analysis and multifractal parametrization in the process of diamond nanostructured composites formation at high pressures and temperatures / P. A. Vityaz, M. L. Kheifetz, V. T. Senyut [et al.] // Advanced Materials and Technologies. – 2019. – N 3. – P. 26–40. <https://doi.org/10.17277/amt.2019.03.pp.026-040>
17. Прихна, А. И. К вопросу о роли кристаллитов в процессе синтеза алмазов / А. И. Прихна, А. А. Шульженко, М. Я. Кацай // Синтетические алмазы. – 1974. – № 4. – С. 3–8.

Reference

1. Afanasyev V. P., Pokhilenko N. P. Popigaisky impact diamonds: new russian raw materials for existing and future technologies. *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expertise], 2013, no. 1, pp. 8–15 (in Russian).
2. Petrovsky V. A., Filonenko V. P., Silaev V. I., Zibrov I. P., Sukharev A. E., Zemnukhov A. L., Pomazansky B. S. Yakutit X-ray analysis and evaluation of content of lonsdaleite impurities. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*, 2013, no. 3, pp. 43–60 (in Russian).
3. Goryainov S. V., Likhacheva A. Y., Rashchenko S. V., Shubin A. S., Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P. Raman identification of lonsdaleite in Popigai impactites. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2014, vol. 45, no. 4, pp. 305–313. <https://doi.org/10.1002/jrs.4457>
4. Ohfuji H., Irifune T., Litasov K. D., Yamashita T., Isobe F., Afanasiev V. P., Pokhilenko N. P. Natural occurrence of pure nano-polycrystalline diamond from impact crater. *Scientific Reports*, 2012, vol. 5, art. 14702. <https://doi.org/10.1038/srep14702>
5. Bezhenar N. P., Bochechka A. A., Ilnitskaya G. D., Klimenko S. A., Lavrinenko V. I., Turkevich V. Z., Vitiaz P. A., Senyut V. T., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. *Synthesis and Sintering of Superhard Materials for Tool Production*. Minsk, 2021. 337 p. (in Russian).
6. Leipunsky O. I. On artificial diamonds. *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*, 1939, no. 8, pp. 1519–1534 (in Russian).
7. Anosov V. Ya., Ozerova M. I., Fialkov Yu. Ya. *Fundamentals of Physical and Chemical Analysis*. Moscow, 1976. 504 p. (in Russian).
8. Kurnakov N. S. *Introduction to Physical and Chemical Analysis*. Moscow, Leningrad, 1940. 562 p. (in Russian).
9. Ilyin K. K., Cherkasov D. G. *Topology of Phase Diagrams of Ternary Systems Salt – Two Solvents with Salting-in – Salting-out*. Saratov, 2020. 212 p. (in Russian).
10. Goroshchenko Ya. G. *Physicochemical Analysis of Homogeneous and Heterogeneous Systems*. Kiev, 1978. 490 p. (in Russian).
11. Kheifetz M. L. Analysis of self-organization processes during metal processing using state diagrams of physical and chemical systems. *Doklady Akademii nauk Belarusi = Doklady of the Academy of Sciences of Belarus*, 1995, vol. 39, no. 6, pp. 109–113 (in Russian).
12. Glensdorf P., Prigogine I. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*. New York, 1971. 305 p.
13. Kheifetz M. L. Development of principles of physicochemical analysis for nonequilibrium processes of synthesis and application of materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2011, vol. 55, no. 4, pp. 100–105 (in Russian).
14. Vityaz P. A., Kheifetz M. L. Analysis of metastable and nonequilibrium processes according to state diagrams during the synthesis of superhard materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2007, vol. 51, no. 2, pp. 95–99 (in Russian).
15. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Senyut V. T., Kolmakov A. G., Klimenko S. A. Synthesis of diamond nanostructured materials based on nanodiamonds. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, vol. 56, no. 6, pp. 87–91 (in Russian).
16. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Senyut V. T., Kolmakov A. G., Klimenko S. A. Methods of physicochemical analysis and multifractal parametrization in the process of diamond nanostructured composites formation at high pressures and temperatures. *Advanced Materials and Technologies*, 2019, no. 3, pp. 26–40. <https://doi.org/10.17277/amt.2019.03.pp.026-040>
17. Prikhna A. I., Shulzhenko A. A., Katsay M. Ya. On the role of crystallites in the process of diamond synthesis. *Sinteticheskie almazы = Synthetic Diamonds*, 1974, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

Хейфец Михаил Львович – д-р техн. наук, профессор, директор. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

Сенют Владимир Тадеушевич – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vsenyut@tut.by.

Похиленко Николай Петрович – академик РАН, д-р геол.-минер. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт геологии и минералогии им. акад. С. С. Соболева СО РАН (пр. Коптюга, 3, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: chief@igm.nsc.ru.

Афанасьев Валентин Петрович – д-р геол.-минер. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт геологии и минералогии им. акад. С. С. Соболева СО РАН (пр. Коптюга, 3, 630090, Новосибирск, Российская Федерация).

Колодяжный Дмитрий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе. Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (Вадковский пер., 1, 127065, Москва, Российская Федерация).

Information about the authors

Vityaz Petr A. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher. United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

Kheifetz Mikhail L. – D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.

Senyut Vladimir T. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vsenyut@tut.by.

Pokhilenko Nikolay P. – Academician of the RAN, D. Sc. (Geology), Professor, Chief Researcher. S. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (3, Koptug Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: chief@igm.nsc.ru.

Afanasyev Valentin P. – D. Sc. (Geology), Professor, Chief Researcher. S. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (3, Koptug Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

Kolodyazhny Dmitriy Yu. – D. Sc. (Engineering), Professor, Vice-rector. Moscow State Technological University “STANKIN” (1, Vadkovsky Lane, 127065, Moscow, Russian Federation).