

**МЕЖПЛОСКОСТНЫЕ РАССТОЯНИЯ В АЛМАЗЕ, ДЕФОРМИРОВАННОМ
В РЕЗУЛЬТАТЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****Т.А. Гордеева, Б.А. Кульницкий, Д.А. Овсянников, М.Ю. Попов, В.Д. Бланк**

Татьяна Андреевна Гордеева (ORCID 0000-0002-8894-107X)*, Борис Арнольдович Кульницкий (ORCID 0000-0001-5482-3123), Владимир Давыдович Бланк (ORCID 0000-0002-6070-4080)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: gordeeva.ta@phystech.edu*

Михаил Юрьевич Попов (ORCID 0000-0001-9913-3062)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991

Данила Алексеевич Овсянников (ORCID 0000-0003-3668-1373)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Деформационные процессы в материалах влияют на их структуру и свойства, вследствие чего представляют интерес для исследователей. Методы высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского анализа используются для изучения деформаций в кристаллических материалах. В данной работе исследовались частицы алмаза размером от 2 до 15 нм, обработанные в планетарной мельнице. Анализ структуры показал изменение межплоскостных расстояний в частицах: характерное для алмаза $d_{111} = 0,206$ нм увеличивалось до 0,220 нм. Такое расширение решетки не характерно для точечных дефектов и может быть связано только с разрывом межатомных связей. Исследование направлено на изучение механизмов деформации алмаза при высоких механических нагрузках, что имеет значение для потенциальных применений. Углеродные материалы, такие как алмаз, обладают высокой прочностью и твердостью благодаря ковалентным связям. При температурах ниже температуры Дебая алмаз почти не подвержен дислокационной пластичности, что делает его одним из самых прочных материалов. Пластическая деформация алмаза может происходить как под воздействием циклической нагрузки, так и под воздействием сдвиговых напряжений, что открывает новые перспективы для его использования в различных областях науки и техники. При обработке наночастиц алмаза в планетарной мельнице наблюдается процесс перехода метастабильной фазы (какой является алмаз) в термодинамически устойчивое состояние – графит. Такой переход происходит путем накопления дефектов в структуре алмаза, образования двойников, онионов и деформационных полос. Все это свидетельствует о сложной природе пластической деформации в алмазе.

Ключевые слова: алмаз, пластическая деформация, просвечивающая электронная микроскопия, дефекты

Для цитирования:

Гордеева Т.А., Кульницкий Б.А., Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Бланк В.Д. Межплоскостные расстояния в алмазе, деформированном в результате механохимической обработки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 10. С. 49–54. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.2y.

For citation:

Gordeeva T.A., Kulnitskiy B.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., Blank V.D. Interplanar distances in diamond deformed as a result of mechanochemical treatment. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 10. P. 49–54. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.2y.

INTERPLANAR DISTANCES IN DIAMOND DEFORMED AS A RESULT OF MECHANOCHEMICAL TREATMENT

T.A. Gordeeva, B.A. Kulnitskiy, D.A. Ovsyannikov, M.Yu. Popov, V.D. Blank

Tatyana A. Gordeeva (ORCID 0000-0002-8894-107X)*, Boris A. Kulnitskiy (ORCID 0000-0001-5482-3123), Vladimir D. Blank (ORCID 0000-0002-6070-4080)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Reg., 141701, Russia
E-mail: gordeeva.ta@phystech.edu*

Mikhail Yu. Popov (ORCID 0000-0001-9913-3062)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Institute of General Physics named after. A.M. Prokhorov Russian Academy of Sciences, st. Vavilova, 38, Moscow, 119991, Russia

Danila A. Ovsyannikov (ORCID 0000-0003-3668-1373)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Deformation processes in materials affect structure and properties, so they are of interest to researchers. High-resolution transmission electron microscopy and X-ray analysis techniques are used to study deformation in crystalline materials. In this work, diamond particles with sizes ranging from 2 to 15 nm processed in a planetary mill were studied. Analysis of the structure showed a change in the interplanar distances in the particles: the $d_{111} = 0.206$ nm characteristic of diamond increased to 0.220 nm. Such lattice expansion is not characteristic of point defects and can be associated only with the breaking of interatomic bonds. The study aims to investigate the deformation mechanisms of diamond under high mechanical stresses, which has implications for potential applications. Carbon-based materials such as diamond have high strength and hardness due to covalent bonds. At temperatures below the Debye temperature diamond is almost immune to dislocation plasticity, making it one of the strongest materials. Plastic deformation of diamond can occur both under the influence of cyclic loading and under the influence of shear stresses, which opens up new prospects for its use in various fields of science and technology. When diamond nanoparticles are processed in a planetary mill, a process of transition of a metastable phase (which diamond is) to a thermodynamically stable state - graphite - is observed. This transition occurs by accumulation of defects in the diamond structure, formation of twins, onions and deformation bands. All this testifies to the complex nature of plastic deformation in diamond.

Key words: diamond, plastic deformation, transmission electron microscopy, defects

ВВЕДЕНИЕ

В химии сформировалось целое научное направление, исследующее механохимические реакции и превращения, составной частью которых является воздействие сдвиговых напряжений. Термин «механохимия» чаще всего используется по отношению к твердофазным процессам и реакциям, инициируемым любым видом механической обработки.

Измельчение нанопорошков в планетарной мельнице представляет собой эффективный метод обработки, характеризующийся низкими затратами на оборудование и возможностью обработки

больших объемов различных материалов. Структурные особенности полученной продукции зависят от ряда параметров обработки, включая скорость, время, наличие добавок, материал шаров и прочие [1-4]. Частицы порошка подвергаются механической нагрузке в процессе измельчения, что приводит к структурным изменениям, которые можно обнаружить и изучить методами просвечивающей электронной микроскопии [5, 6]. Наличие дефектов в кристаллической решетке материала оказывает существенное влияние не только на его механические свойства, но и на особенности зонной структуры.

Структурные особенности деформированного алмазного порошка, полученного в условиях измельчения, представляют значительный интерес, поскольку они позволяют исследовать механизмы пластической деформации [5, 7, 8] и определять условия обработки алмаза [9-11]. В рамках настоящего исследования анализ структуры алмазного порошка с размером частиц приблизительно 2-15 нм после обработки в планетарной мельнице в присутствии NaCl проводился с использованием методов электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для предотвращения взаимодействия железа с алмазом исследуемый алмазный порошок было решено смешать с NaCl. Продолжительность обработки составила 60 мин в планетарной мельнице Micro Mill PULVERISETTE 7 (FRITSCH, Germany). Подробное описание процесса обработки в мельнице представлено в работах [5,6]. Одним из ключевых параметров обработки является то, что максимальные напряжения и температура в алмазе не превышают 6 ГПа и 420 К, соответственно.

Электронно-микроскопические исследования проводились на высокоразрешающем приборе JEM-2010, снабженном приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). Подготовка образцов для электронно-микроскопических исследований осуществлялась путем осаждения порошка на медную сетку, покрытую углеродной пленкой.

Дифрактограммы снимались на рентгеновском дифрактометре Empyrean (Нидерланды), оснащенный полупроводниковым двухкоординатным детектором PIXcel3D с размером пикселя 55×55 мкм. Для регистрации дифракционной картины в режиме полоскового детектора (1D), позволяющего одновременно фиксировать дифракцию в угловом диапазоне $3,3^\circ$ по углу 2θ , применялся рентгеновско-оптический модуль Bragg-BrentanoHD. В работе использовались следующие параметры генератора: $U = 40$ кВ, $I = 40$ мА (CuK α -излучение). Дифракционные карты записывались в диапазоне углов от 28° до 48° (2θ) с шагом 0,01310 в режиме непрерывного сканирования. Для исключения эффекта прозрачности применялся держатель образца с низким фоном, представляющий собой круглую кювету диаметром 32 мм и толщиной 2 мм из монокристаллического кремния.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При температурах ниже температуры Дебая дислокационная пластичность в алмазе практически отсутствует [12], что делает алмаз одним из немногих материалов с высокой прочностью, близкой к теоретическому пределу текучести 55 ГПа [13,14]. Интересно отметить, что пластическая деформация алмаза была впервые замечена при индентировании природных кристаллов [12]. Ранее такие явления наблюдались лишь при экстремальных условиях, таких как высокое давление (170 ГПа) и высокое содержание азота [15].

В рамках наших предыдущих исследований было обнаружено, что одним из механизмов пластической деформации в алмазе является фазовый переход. Он наблюдается как при циклическом нагружении вблизи линии равновесия графит-алмаз при температурах ниже температуры Дебая (максимальные напряжения и температура в алмазе не превышают 6 ГПа и 420 К соответственно) [7], так и при сдвиговых напряжениях 55 ГПа, соответствующих теоретическому сдвиговому напряжению в алмазе [16].

В ходе обработки в течение 120 мин наблюдается первый этап пластической деформации алмаза путем механического двойникования [5, 17]. При дальнейшей обработке происходит потеря стабильности решетки алмаза и наблюдается мартенситный фазовый переход в промежуточную углеродную фазу (ICP), состоящую из графеновых плоскостей, частично соединенных sp³-гибридизованными связями. Модель ICP, основанная на дефектах Френкеля и сшивке графитовых слоев (001), была предложена в работе [7, 18]. Увеличение времени обработки ведет к деформации кристалла, порождая как низкоугловые, так и высокоугловые границы. Этот переход сопровождается образованием онионов.

На рис. 1а показано изображение частицы после обработки в планетарной мельнице, а на вставке – изображение дифракционных рефлексов, полученное с помощью Фурье-преобразования. Как видно на вставке, рефлекс, соответствующий межплоскостному расстоянию d_{111} расщепляется на два: яркий соответствует расстоянию в 0,206 нм, тогда как слабый соответствует примерно 0,220 нм.

Изображение, полученное с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (обратное БПФ-изображение) от центральной части частицы показано на рис. 1б. Видны два прямоугольника, содержащие по 7 плоскостей, причем правый прямоугольник параллельно перенесен со своего ме-

ста и наложен на левую часть рисунка так, что правые крайние плоскости совпадают. Как видим, левые крайние плоскости (показанные стрелками), не совпали. Это свидетельствует о том, что межплоскостные расстояния внутри этой частицы алмаза не всегда одинаковы. Некоторые межплоскостные расстояния отличаются от традиционного 0,206 нм в сторону увеличения. Это согласуется с данными, представленными в [3, 4]: механическое воздействие может разрушать или растягивать химические связи.

На рис. 2 представлена часть рентгеновской дифрактограммы в угловом диапазоне $2\theta = 38^\circ - 44^\circ$ алмазного образца после обработки в планетарной мельнице.

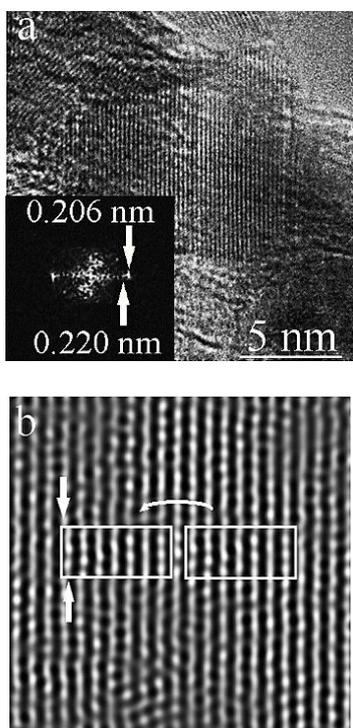


Рис. 1. (а) ПЭМ изображение частиц после обработки в мельнице, на вставке показано БПФ-изображение. Рефлекс, соответствующий межплоскостному расстоянию d_{111} , расщепляется на два: яркий соответствует расстоянию в 0,206 нм, тогда как слабый соответствует примерно 0,220 нм. (б) показано обратное БПФ-изображение от центральной части частицы. Правый прямоугольник параллельно перенесен со своего места и наложен на левую часть рисунка так, что правые крайние плоскости совпадают. Левые крайние плоскости (показанные стрелками), не совпадают

Fig. 1. (a) TEM image of particles after processing in the mill, the inset shows the FFT image. The reflex corresponding to the interplanar distance d_{111} splits into two: the bright one corresponds to a distance of 0.206 nm, while the weak one corresponds to about 0.220 nm. (b) The inverse FFT image from the central part of the particle is shown. The right rectangle is parallelized from its position and superimposed on the left side of the figure so that the rightmost planes coincide. The left extreme planes (shown by arrows), do not coincide

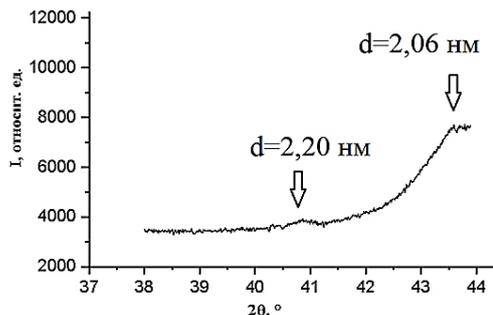


Рис. 2. Рентгеновская дифракционная картина (2θ -сканирование) образца алмаза после обработки

Fig. 2. X-ray diffraction pattern (2θ -scan) of the of the diamond sample after the treatment

На дифрактограмме (рис. 2) обнаружен рефлекс, соответствующий межплоскостному расстоянию $d = 0,220$ нм, в окрестности сильного (111)-рефлекса алмаза $d = 0,206$ нм.

Ранее увеличение параметра решетки алмаза, связанное с ростом числа точечных дефектов, было оценено для облученных алмазных частиц [19, 20], оно составляет примерно 0,4%. Результат облучения можно интерпретировать как появление большого количества точечных дефектов в кристаллической решетке алмаза. В работе [21] было показано, что облучение нейтронным потоком $5,5 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см² приводит к увеличению периода решетки на 0,9%.

Обнаруженные увеличенные межплоскостные расстояния (0,220 нм) значительно превышают исходное значение 0,206 нм, характерное для d_{111} алмаза. Это сильно превосходит расширение решетки, характерное для точечных дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обработке наночастиц алмаза в планетарной мельнице наблюдается процесс перехода метастабильной фазы – алмаза в термодинамически устойчивое состояние – графит. Такой переход происходит путем накопления дефектов в структуре алмаза при ударном воздействии, что приводит к образованию промежуточных структур.

Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского анализа было установлено, что внутри алмазных частиц иногда присутствуют $\{111\}$ -плоскости с увеличенным межплоскостным расстоянием до примерно 0,220 нм. Наблюдается образование двойников, аморфных деформационных полос и реализация фазового перехода алмаз-лонсдейлит, что указывает на процессы как упругой, так и пластической деформации.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП в ФГБНУ ТИСНУМ (электронный

микроскоп JEOL JEM 2010, планетарная мельница Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was performed using the equipment

of the Center for Collective Use at the FSBI TISNCM (JEOL JEM 2010 electron microscope, Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Martinez V., Stolar T., Karadeniz B., Brekalo I., Užarević K.** Advancing mechanochemical synthesis by combining milling with different energy sources. *Nat. Rev. Chem.* 2023. V. 7. P. 51–65. DOI: 10.1038/s41570-022-00442-1.
2. **Baláz P., Achimovičová M., Baláz M., Billik P., Cherkezova-Zheleva Z., Criado J.M., Delogu F., Dutková E., Gaffet E., Gotor F.J., Kumar R., Mitov I., Rojac T., Senna M., Streletskii A., Wieczorek-Ciurowa K.** Hallmarks of mechanochemistry: from nanoparticles to technology. *Chem. Soc. Rev.* 2013. V. 42. P. 7571–637. DOI: 10.1039/c3cs35468g.
3. **Boldyreva E.** Mechanochemistry of inorganic and organic systems: what is similar, what is different? *Chem. Soc. Rev.* 2013. V. 42. P. 7719–7738. DOI: 10.1039/c3cs60052a.
4. **Лапшин О.В., Болдырева Е.В., Болдырев В.В.** Роль смешения и диспергирования в механохимическом синтезе (обзор). *Журн. неорган. химии.* 2021. Т. 66. Вып. 3. С. 402–424. DOI: 10.31857/S0044457X21030119.
5. **Gordeeva T., Kulnitskiy B., Ovsyannikov D., Popov M., Blank V.** Plastic deformation of diamond by mechanical twinning at temperatures significantly lower than Debye temperature. *Chem. Phys. Lett.* 2019. V. 730. P. 138–140. DOI: 10.1016/j.cplett.2019.05.057.
6. **Gordeeva T., Kulnitskiy B., Popov M., Ovsyannikov D., Blank V.** High-Pressure Si Phases and the Mutual Orientation of Their Structures. HRTEM Studies. *Phys. Solid State.* 2021. V. 63. P. 844–849. DOI: 10.1134/S106378342106010X.
7. **Ovsyannikov D., Zhukov V., Gordeeva T., Antipina L., Sorokin P., Kulnitskiy B., Popov M., Blank V.** Intermediate carbon phase. New experimental data and atomic model. *Diam. Rel. Mater.* 2022. V. 123. P. 108825. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.108825.
8. **Smith E.M.** Plastic Deformation: How and Why Are Most Diamonds Slightly Distorted? *Gems Gemol.* 2023. V. 59. P. 94–100.
9. **Tong K., Zhang X., Li Z., Wang Y., Luo K., Li C., Jin T., Chang Y., Zhao S., Wu Y., Gao Y., Li B., Gao G., Zhao Z., Wang L., Nie A., Yu D., Liu Z., Soldatov A.V., Hu W., Xu B., Tian Y.** Structural transition and migration of incoherent twin boundary in diamond. *Nature.* 2024. V. 626. P. 79–85. DOI: 10.1038/s41586-023-06908-6.
10. **Popov M., Bondarenko M., Kulnitskiy B., Zholudev S., Blank V., Terentyev S.** Impulse laser cutting of diamond accompanied by phase transitions to fullerene-type onions. *Diam. Relat. Mater.* 2021. V. 113. P. 108281. DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108281.
11. **Tian B., Ma W., Chen S., Sun F., Wang X.** Effects of pulsed laser processing on structural evolution of diamonds - A molecular dynamics and experimental study. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2024. V. 119. P. 106560. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106560.

REFERENCES

1. **Martinez V., Stolar T., Karadeniz B., Brekalo I., Užarević K.** Advancing mechanochemical synthesis by combining milling with different energy sources. *Nat. Rev. Chem.* 2023. V. 7. P. 51–65. DOI: 10.1038/s41570-022-00442-1.
2. **Baláz P., Achimovičová M., Baláz M., Billik P., Cherkezova-Zheleva Z., Criado J.M., Delogu F., Dutková E., Gaffet E., Gotor F.J., Kumar R., Mitov I., Rojac T., Senna M., Streletskii A., Wieczorek-Ciurowa K.** Hallmarks of mechanochemistry: from nanoparticles to technology. *Chem. Soc. Rev.* 2013. V. 42. P. 7571–637. DOI: 10.1039/c3cs35468g.
3. **Boldyreva E.** Mechanochemistry of inorganic and organic systems: what is similar, what is different? *Chem. Soc. Rev.* 2013. V. 42. P. 7719–7738. DOI: 10.1039/c3cs60052a.
4. **Lapshin O.V., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V.** Role of mixing and milling in mechanochemical synthesis (review). *Russ. Zhurn. Neorg. Khim.* 2021. V. 66. N 3. P. 402–424 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044457X21030119.
5. **Gordeeva T., Kulnitskiy B., Ovsyannikov D., Popov M., Blank V.** Plastic deformation of diamond by mechanical twinning at temperatures significantly lower than Debye temperature. *Chem. Phys. Lett.* 2019. V. 730. P. 138–140. DOI: 10.1016/j.cplett.2019.05.057.
6. **Gordeeva T., Kulnitskiy B., Popov M., Ovsyannikov D., Blank V.** High-Pressure Si Phases and the Mutual Orientation of Their Structures. HRTEM Studies. *Phys. Solid State.* 2021. V. 63. P. 844–849. DOI: 10.1134/S106378342106010X.
7. **Ovsyannikov D., Zhukov V., Gordeeva T., Antipina L., Sorokin P., Kulnitskiy B., Popov M., Blank V.** Intermediate carbon phase. New experimental data and atomic model. *Diam. Rel. Mater.* 2022. V. 123. P. 108825. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.108825.
8. **Smith E.M.** Plastic Deformation: How and Why Are Most Diamonds Slightly Distorted? *Gems Gemol.* 2023. V. 59. P. 94–100.
9. **Tong K., Zhang X., Li Z., Wang Y., Luo K., Li C., Jin T., Chang Y., Zhao S., Wu Y., Gao Y., Li B., Gao G., Zhao Z., Wang L., Nie A., Yu D., Liu Z., Soldatov A.V., Hu W., Xu B., Tian Y.** Structural transition and migration of incoherent twin boundary in diamond. *Nature.* 2024. V. 626. P. 79–85. DOI: 10.1038/s41586-023-06908-6.
10. **Popov M., Bondarenko M., Kulnitskiy B., Zholudev S., Blank V., Terentyev S.** Impulse laser cutting of diamond accompanied by phase transitions to fullerene-type onions. *Diam. Relat. Mater.* 2021. V. 113. P. 108281. DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108281.
11. **Tian B., Ma W., Chen S., Sun F., Wang X.** Effects of pulsed laser processing on structural evolution of diamonds - A molecular dynamics and experimental study. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2024. V. 119. P. 106560. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106560.

12. **Zhang S.J., To S., Zhang G.Q.** Diamond tool wear in ultra-precision machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. V. 88. P. 613–641. DOI: 10.1007/s00170-016-8751-9.
13. **Popov M., Kulnitskiy B., Blank V.** Superhard materials based on fullerenes and nanotubes. In: *Comprehensive Hard Materials*. Ed. by V.K. Sarin. Oxford: Elsevier. 2014. P. 515–538. DOI: 10.1016/B978-0-08-096527-7.00057-X.
14. **Gilman J.J.** Chemistry and Physics of Mechanical Hardness. John Wiley & Sons. 2009. DOI: 10.1002/9780470446836.
15. **Nie A., Bu Y., Li P., Zhang Y., Jin T., Liu J., Su Z., Wang Y., He J., Liu Z., Wang H., Tian Y., Yang W.** Approaching diamond's theoretical elasticity and strength limits. *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 5533. DOI: 10.1038/s41467-019-13378-w.
16. **Popov M. Yu., Churkin V. D., Kulnitskiy B. A., Kirichenko A. N., Bulatov K. M., Bykov A. A., Zinin P. V., Blank V.** Transformation of diamond to fullerene-type onions at pressure 70 GPa and temperature 2400 K. *Nanotechnology*. 2020. V. 31. P. 315602. DOI: 10.1088/1361-6528/ab8b8f.
17. **Кульницкий Б.А., Гордеева Т.А., Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Бланк В.Д.** Фазовые превращения элементов IV группы: углерод, кремний, германий при воздействии циклических напряжений до 6 ГПа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 10-15. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.
18. **Гордеева Т.А., Кульницкий Б.А., Попов М.Ю., Овсянников Д.А., Бланк В.Д.** Структурные особенности кремния, германия и алмаза после обработки в планетарной мельнице. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 60-65. DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6y.
19. **Николаенко В.А., Красиков Е.А.** Влияние интенсивности реакторного облучения на расширение кристаллической решетки алмаза. *Атомная энергия*. 2013. Т. 115. С. 223–239. DOI: 10.1007/s10512-014-9782-7.
20. **Николаенко В. А., Красиков Е. А., Амаев А. Д.** Влияние повторного облучения на радиационные повреждения в алмазе. *Атомная энергия*. 2013. Т. 114. С. 103-104. DOI: 10.1007/s10512-013-9681-3.
21. **Конобеевский С.Т., Бутра Ф.П.** Диффузное рассеяние рентгеновых лучей в облученных кристаллах алмаза, корунда, кремния и германия. *Атомная энергия*. 1958. Т. 5. С. 572-573. DOI: 10.1007/BF01498498.
12. **Zhang S.J., To S., Zhang G.Q.** Diamond tool wear in ultra-precision machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. V. 88. P. 613–641. DOI: 10.1007/s00170-016-8751-9.
13. **Popov M., Kulnitskiy B., Blank V.** Superhard materials based on fullerenes and nanotubes. In: *Comprehensive Hard Materials*. Ed. by V.K. Sarin. Oxford: Elsevier. 2014. P. 515–538. DOI: 10.1016/B978-0-08-096527-7.00057-X.
14. **Gilman J.J.** Chemistry and Physics of Mechanical Hardness. John Wiley & Sons. 2009. DOI: 10.1002/9780470446836.
15. **Nie A., Bu Y., Li P., Zhang Y., Jin T., Liu J., Su Z., Wang Y., He J., Liu Z., Wang H., Tian Y., Yang W.** Approaching diamond's theoretical elasticity and strength limits. *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 5533. DOI: 10.1038/s41467-019-13378-w.
16. **Popov M. Yu., Churkin V. D., Kulnitskiy B. A., Kirichenko A. N., Bulatov K. M., Bykov A. A., Zinin P. V., Blank V.** Transformation of diamond to fullerene-type onions at pressure 70 GPa and temperature 2400 K. *Nanotechnology*. 2020. V. 31. P. 315602. DOI: 10.1088/1361-6528/ab8b8f.
17. **Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., V.D. Blank.** Phase transformations of group IV elements: carbon, silicon, germanium after treatment under cyclic stresses up to 6 GPa. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 10-15. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.
18. **Gordeeva T.A., Kulnitskiy B.A., Popov M.Yu., Ovsyannikov D.A., Blank V.D.** Structural features of silicon, germanium and diamond after processing in a planetary mill. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 60-65. DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6y.
19. **Nikolaenko V.A., Krasikov E.A.** Influence of intensity of reactor irradiation on expansion of diamond crystal lattice. *Atomnaya Energiya*. 2013. V. 115. P. 223-239 (in Russian). DOI: 10.1007/s10512-014-9782-7.
20. **Nikolaenko V.A., Krasikov E.A., Amayev A.D.** Effect of repeated irradiation on radiation damage in diamond. *Atomnaya Energiya*. 2013. V. 114. P. 103-104 (in Russian). DOI: 10.1007/s10512-013-9681-3.
21. **Konobeevsky S.T., Butra F.P.** Diffuse scattering of X-rays in irradiated crystals of diamond, corundum, silicon and germanium. *Atomnaya Energiya*. 1958. V. 5. P. 572-573 (in Russian). DOI: 10.1007/BF01498498.

Поступила в редакцию 24.04.2024

Принята к опубликованию 05.06.2024

Received 24.04.2024

Accepted 05.06.2024