МЕЖПЛОСКОСТНЫЕ РАССТОЯНИЯ В ДЕФОРМИРОВАННОМ АЛМАЗЕ

Б.А. Кульницкий, Т.А. Гордеева, В.Д. Бланк

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

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 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*

В данной работе представлены результаты исследования структуры алмазных частиц, полученных в результате разрушения алмазной пластины, выращенной методом НРНТ (высокого давления и высокой температуры). Исследования проводились с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Было установлено, что в процессе разрушения алмаза происходит частичное превращение его кристаллической структуры в графит по традиционному пути, сопровождающееся увеличением межплоскостных расстояний d₁₁₁. При этом наблюдается широкий диапазон межплоскостных расстояний от 0,206 нм до 0,280 нм. Также выявлены мозаичные структуры, состоящие из фрагментов с разориентированными кристаллическими решетками, которые, видимо, формируются на поздних стадиях разрушения. На соответствующих дифракционных картинах обнаруживается размытие дифракционных рефлексов и образование тяжей. Результаты исследования показывают, что пластическая деформация алмаза сопровождается разрывом sp³-связей, возникновением внутренних трещин, а также частичной аморфизацией и развитием мозаичности. Аморфизация проявляется в виде полос с нарушенной структурой, а мозаичность связана с неоднородной деформацией и искажением плоскостей решетки. Важной особенностью разрушения алмаза является формирование мозаичных структур, не характерных для частии, подвергнутых механической обработке. Полученные данные позволяют глубже понять механизмы разрушения алмаза при экстремальных условиях, что имеет важное значение для создания новых химических технологий обработки алмазных материалов и прогнозирования их поведения в сложных внешних условиях. Результаты могут быть полезны для разработки технологий формирования алмазных материалов и анализа структурных изменений при экстремальных воздействиях.

Ключевые слова: алмаз, пластическая деформация, просвечивающая электронная микроскопии

INTERPLANAR DISTANCES IN DEFORMED DIAMOND

B.A. Kulnitskiy, T.A. Gordeeva, V.D. Blank

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

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials of National Research Centre «Kurchatov Institute», Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

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

This paper presents the findings of a study of the structure of diamond particles generated from the fracture of a diamond plate produced through the high-pressure high-temperature

(HPHT) method of growth. The studies were conducted using high-resolution transmission electron microscopy techniques. It was determined that during the process of diamond fracture, a partial transformation of its crystal structure into graphite occurs along the conventional path. This transformation is accompanied by an increase in the interplanar distances d_{111} . A broad spectrum of interplanar distances ranging from 0.206 nm to 0.280 nm has been observed. Additionally, the analysis revealed the presence of mosaic structures composed of fragments with disoriented crystal lattices. These structures are believed to be formed during the late stages of fracture. The diffraction patterns that correspond to these samples demonstrate the blurring of ideal diffraction reflexes and the formation of streaks. The results show that the plastic deformation of diamond is associated with the breakage of sp³-bonds, the appearance of internal cracks, as well as partial amorphisation and the formation of mosaic structures. Amorphisation manifests itself in the form of bands with a broken structure, while mosaicism is associated with inhomogeneous deformation and distortion of lattice planes. An important feature of diamond fracture is the formation of mosaic structures that are not characteristic of mechanically processed particles. The data obtained allow a deeper understanding of the mechanisms of diamond fracture under extreme conditions, which is important for creating new chemical technologies for processing diamond materials and predicting their behavior in complex external conditions. The results can be useful for the development of technologies for the formation of diamond materials and analyzing structural changes under extreme conditions.

Keywords: diamond, plastic deformation, transmission electron microscopy

Для цитирования:

Кульницкий Б.А., Гордеева Т.А., Бланк В.Д. Межплоскостные расстояния в деформированном алмазе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 14–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.4y.

For citation:

Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Blank V.D. Interplanar distances in deformed diamond. *ChemChemTech* [*Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.*]. 2025. V. 68. N 9. P. 14–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.4y.

ВВЕДЕНИЕ

В результате многолетних исследований природных кристаллов алмаза было установлено, что большое их количество претерпело пластическую деформацию [1]. В то же время пластическая деформация алмазов может быть осуществлена и в лабораторных условиях. В [2] наблюдали появление линий скольжения на полированных поверхностях кристаллов алмаза под влиянием высокой температуры, возникающей при полировке. В [3] наблюдали развитие пластической деформации на полированных алмазных пластинках при давлении на них алмазной пирамидкой при температуре 1850 °С. Развитие того же явления в кристалле алмаза описано в [4]. Позднее было установлено, что пластическая деформация в кристаллах алмаза может происходить и при комнатной температуре в процессе их испытаний на твердомере [5]. Так, в [6, 7] было показано, что индентирование наконечником типа Кнупа в алмазе может быть рассмотрено исключительно в терминах пластического течения. В [8] было показано, что пластическая деформация возникает в камере высокого давления, состоящей из алмазных наковален в условиях экстремально высоких давлений. Пластическая деформация возникает также в частицах алмаза в результате их обработки в планетарной мельнице [9-11]. Целью настоящей работы было исследование особенностей разрушения алмаза при экстремальных условиях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе предпринята попытка исследования особенностей структуры алмазных частиц, полученных в результате разрушения алмазной пластины. Полученные данные могут представлять интерес, поскольку они позволяют анализировать механизмы пластической деформации алмаза при разрушении. Исследования проводили методами электронной микроскопии высокого разрешения.

В настоящей работе разрушению подвергали алмазную пластину, вырезанную из алмаза, выращенного методом НРНТ (высокого давления и температуры) [12]. В работе использовали копер с падающим грузом с энергией удара 20 Дж, разработанный в ФГБНУ ТИСНУМ. Электронно-микроскопические исследования проводили на высокоразрешающем приборе JEM-2010. Подготовка образцов для электронно-микроскопических исследований осуществлялась путем осаждения алмазного порошка на медную сетку, покрытую углеродной пленкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показан фрагмент частицы алмаза. Граница между левой и правой частями на рис. 1а представляет собой набор плоскостей {111} алмаза с измененными межплоскостными расстояниями. На вставке приведено быстрое Фурье преобразование. Кроме основного рефлекса с межплоскостным расстоянием d₁₁₁, равным 0,206 нм, отчетливо видны дополнительные рефлексы, показанные стрелками, межплоскостные расстояния для которых изменяются в диапазоне от 0,206 до 0,280 нм. Это свидетельствует о том, что в процессе превращения алмаза в графит по традиционному пути, когда плоскости (111) алмаза с d₁₁₁, равным 0,206 нм, превращаются в плоскости (002) графита с d₀₀₂, равным 0,335 нм, в результате деформации образовался набор дополнительных межплоскостных расстояний. Такой эффект может быть связан с образованием трещин в кристалле. Френкель показал, что такая трещина [13] образуется в участках с высокими внутренними напряжениями, вызванными дислокациями. Возникающая трещина имеет острую вершину. В случае решетки алмаза слева и справа от трещины находятся несколько искаженных плоскостей, а далее в большом количестве неискаженные плоскости, связанные между собой крепкими sp³-связями, что не дает решетке алмаза, содержащей трещину, распасться на куски. Примечательно, что решетка алмаза может выдержать удаление около 16% атомов и при этом сохранить общую кристалличность. Моделирование показывает, что деформация и образование вакансий являются эквивалентными эффектами, что позволяет интерпретировать экспериментальные результаты как с точки зрения образования вакансий при имплантации ионов, так и с точки зрения применения деформации, вызванной "pазбуханием" [14].

Разрывы связей в решетке алмаза могут носить как периодический (пример – промежуточная фаза в углероде [15]), так и непериодический характер. Во втором случае может быть получен набор межплоскостных расстояний, показанных на рис. 1а. Такая схема напоминает вакансионный диск. Вакансии могут объединяться sp²-связями в вакансионный диск, лежащий в плоскости (111). Было показано [16], что образование вакансионного диска энергетически выгодно. Подобные результаты приведены в [9], где было показано, что в алмазном порошке, обработанном в планетарной мельнице, методами рентгенофазового анализа были обнаружены дополнительные рефлексы с межплос-костными расстояниями, равными 0,23918 нм, 0,22317 нм и 0,22067 нм.



Рис. 1. Фрагменты деформированных частиц алмаза: а) граница между левой и правой частями представляет собой набор плоскостей {111} алмаза с измененными межплоскостными расстояниями; на вставке – соответствующее быстрое Фурье преобразование; b) разориентированные фрагменты, на вставке – быстрое Фурье преобразование

Fig. 1. Fragments of deformed diamond particles: (a) The boundary between the left and right parts is a set of {111} diamond planes with modified interplanar distances. The inset illustrates the corresponding fast Fourier transform; (b) disoriented fragments. The inset shows the fast Fourier transform

На рис. 1b показана частица алмаза с искаженной структурой. Видны разориентированные участки алмаза. На вставке показано соответствующее быстрое Фурье преобразование. Стрелками показаны четыре рефлекса {111}, свидетельствующие о четырех по-разному ориентированных фрагментах, которые образовались в монокристаллической частице алмаза.

Разбиение алмаза на фрагменты и разориентировка этих фрагментов, представленные на рис. 1b, наблюдаются также в случае, если алмаз подвергается неоднородной деформации. Это приводит к искажению плоскостей кристаллической решетки. При этом происходит размытие идеальных дифракционных рефлексов в тяжи [17]. Такую

структуру называют мозаичной [18]. Подобные результаты: появление рефлексов с тяжами и астеризм на дифрактограммах, полученных методом Дебая-Шерера, были обнаружены после проведения ударных экспериментов с различными минералами. Эти особенности были интерпретированы как вызванные деформационной мозаичностью неидеальной кристаллической решетки, которая возникает из-за неоднородной деформации [19]. На лауэграммах, полученных с кристаллов, в которых присутствовали разориентированные области [1], пятна имели тонкую структуру в виде системы полос. Очевидно, такое неравномерное распределение интенсивности отражения связано с этими областями, появление которых при деформации скольжения обусловливается явлением полигонизации, происходящей в связи с тем, что под влиянием высокой температуры дислокации в плоскостях скольжения перераспределяются из горизонтальных рядов в вертикальные стенки – границы блоков полигонизации.

На рис. 2а показана сильно искаженная решетка алмаза. На рис. 2b приведено обратное Фурье преобразование в увеличенном виде. Видно, что левая и правая части рис. 2b слегка развернуты. При этом внутри выделенного прямоугольника можно увидеть различие в количестве вертикальные плоскостей: 7 (в верхней части) и 6 (в нижней части), соответственно. Границу между левой и правой частями можно считать аморфной полосой. Аморфизация является одним из механизмов реализации пластической деформации. Предполагается, что этот механизм формируется в процессе твердофазной аморфизации [20]. Подобные полосы в алмазе наблюдали после обработки в планетарной мельнице [9].

Считается, что хрупкий материал становится пластичным при температурах, равных половине температуры плавления (в градусах Кельвина), для алмаза эта температура примерна равна 2000 К. Хотя алмаз – хрупкий материал при комнатной температуре, он становится пластичным, когда тепловая энергия позволяет дислокациям становиться подвижными [21]. В алмазе эти процессы могут происходить при определенных условиях. Пластическая деформация в кристаллах алмаза осуществляется путем скольжения по плоскостям {111} в направлении <110>, осью поворота решетки являлось направление <112>. В результате пластической деформации появляются разного рода дефекты: дислокации, двойники, изменения параметров решетки, внутренние трещины. В настоящей работе мы исследовали структуру частиц, образовавшихся в процессе разрушения алмаза. Разрушение представляет собой процесс, состоящий из ряда последовательных стадий, которые включают зарождение трещин, их развитие и, наконец, разделение образца на отдельные части.



Рис. 2. Искаженная структура решетки алмаза (a); (b) увеличенное изображение, полученное с помощью обратного быстрого Фурье преобразования. Вверху 7 плоскостей. Внизу - 6 Fig. 2. The distorted lattice structure of diamond (a); (b) magnified image obtained using the inverse fast Fourier transform. A total of seven planes are visible at the top. At the lowest point, there are six

Увеличенные межплоскостные расстояния между {111}-плоскостями алмаза, наблюдавшиеся в настоящей работе, мы связываем с разрывом sp³связей и появлением трещин. Трещины наблюдали и ранее в природных алмазах. Их образование связано с пластической деформацией, произошедшей на последней стадии роста. Трещины обнаружены и в допированных бором алмазах. Они также образовались во время роста [22]. Трещины могут образоваться и при деформации. Трещины наряду с двойниками, аморфными и деформационными полосами наблюдали в исследовании [11]. В работе [12] рассматривается два рода трещин. В первом случае нарушение сплошности кристалла происходит вследствие объединения цепочек вакансий. Во втором случае трещины образуются в участках с высокими внутренними напряжениями, вызванными дислокациями.

Б.А. Кульницкий, Т.А. Гордеева, В.Д. Бланк

Возникающая трещина имеет острую вершину. Согласно работе [18], очаги разрушений (трещины) возникают в кристалле вследствие неоднородного протекания пластической деформации. В случае решетки алмаза, к образованию трещин приводит частичный и несимметричный разрыв sp³-связей.

Можно утверждать, что разрыв связей и увеличение межплоскостных расстояний между {111} плоскостями наблюдались и для деформированного алмаза, и для разрушенного. В первом случае диапазон межплоскостных расстояний находился в пределах 0,206-0,255 нм [9-11]. Во втором случае (рис. 1) максимальное межплоскостное расстояние увеличено до 0,280 нм. Таким образом, важным отличием структуры алмазных частиц, полученных в результате разрушения алмазной пластины по сравнению с частицами, подвергнутыми деформации в планетарной мельнице, является более широкий диапазон межплоскостных расстояний, который появляется в частице в преддверии разрушения.

Второй существенной особенностью является мозаичность, которая предшествует разрушению. В алмазных порошках, обработанных в планетарной мельнице [11], мозаичности не обнаружено, в то время как мозаичность, обнаруженная в природных алмазах, является следствием пластической деформации в природных условиях. Монокристаллы алмаза после пластической деформации в

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука. 1984. 264 с.
- Hird J.R. Chap. 3. Polishing and Shaping of Monocrystalline Diamond. In: Optical Engineering of Diamond. Ed. by R.P. Mildren, J.R. Rabeau. 2013. Materials Science, Engineering. DOI: 10.1002/9783527648603.ch3.
- Howell D. Strain-induced birefringence in natural diamond: a review. *Eur. J. Mineral.* 2012. V. 24. P. 575–585. DOI: 10.1127/0935-1221/2012/0024-2205.
- Васильев Е.А. Дефекты кристаллической структуры в алмазе как индикатор кристаллогенеза. Записки Горн. инma. 2021. Т. 250. С. 481-491. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.1.
- Gane N., Cox J.M. Microdeformation of diamond in the electron microscope. *Phil. Mag.* 1971. V. 23. N 181. P. 229-233. DOI: 10.1080/14786437108216376.
- Xiao J., Wen B., Xu B., Zhang X., Wang Y., Tian Y. Intersectional nanotwinned diamond-the hardest polycrystalline diamond by design. *npj Comput Mater*. 2020. V. 6. P. 119. DOI: 10.1038/s41524-020-00387-3.
- Guignard J., Prakasam M., Largeteau A. A review of binderless polycrystalline diamonds: focus on the high-pressure-high-temperature sintering process. *Materials*. 2022. V. 15. N 6. P. 2198. DOI: 10.3390/ma15062198.
- Mao H.K., Bell P.M. High-Pressure Physics Sustained Static Generation of 1.36 to 1.72 Megabars. *Science*. 1978. V. 200. P. 1145-1147. DOI: 10.1126/science.200.4346.1145.

лабораторных условиях при температуре до 1800 °C приобретают мозаичное строение с малоугловыми дислокационными границами между блоками мозаики [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе разрушения алмаза происходит частичное превращения алмаза в графит по традиционному пути, когда плоскости (111) алмаза с d₁₁₁, равным 0,206 нм, превращаются в плоскости (002) графита с d₀₀₂, равным 0,335 нм. Установлено, что при этом существует набор дополнительных межплоскостных расстояний от 0,206 до 0,280 нм. Обнаружено, что монокристаллическая частица алмаза в результате разрушения может содержать разориентированные фрагменты.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НИЦ «Курчатовский институт» -ТИСНУМ (электронный микроскоп JEOL JEM 2010).

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

The work was performed using the equipment of the Center for Collective Use of National Research Centre «Kurchatov Institute» - TISNCM (JEOL JEM 2010 electron microscope).

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

REFERENCES

- 1. **Orlov Y.L.** The mineralogy of the diamond. M.: Nauka. 1984. 264 p. (in Russian).
- Hird J.R. Chap. 3. Polishing and Shaping of Monocrystalline Diamond. In: Optical Engineering of Diamond. Ed. by R.P. Mildren, J.R. Rabeau. 2013. Materials Science, Engineering. DOI: 10.1002/9783527648603.ch3.
- 3. **Howell D.** Strain-induced birefringence in natural diamond: a review. *Eur. J. Mineral.* 2012. V. 24. P. 575–585. DOI: 10.1127/0935-1221/2012/0024-2205.
- Vasilev E.A. Defects of diamond crystal structure as an indicator of crystallogenesis. *Zapiski Gorn. Inrt.* 2021. V. 250. P. 481-491 (in Russian). DOI: 10.31897/PMI.2021.4.1.
- Gane N., Cox J.M. Microdeformation of diamond in the electron microscope. *Phil. Mag.* 1971. V. 23. N 181. P. 229-233. DOI: 10.1080/14786437108216376.
- Xiao J., Wen B., Xu B., Zhang X., Wang Y., Tian Y. Intersectional nanotwinned diamond-the hardest polycrystalline diamond by design. *npj Comput Mater*. 2020. V. 6. P. 119. DOI: 10.1038/s41524-020-00387-3.
- Guignard J., Prakasam M., Largeteau A. A review of binderless polycrystalline diamonds: focus on the high-pressure-high-temperature sintering process. *Materials*. 2022. V. 15. N 6. P. 2198. DOI: 10.3390/ma15062198.
- Mao H.K., Bell P.M. High-Pressure Physics Sustained Static Generation of 1.36 to 1.72 Megabars. *Science*. 1978. V. 200. P. 1145-1147. DOI: 10.1126/science.200.4346.1145.

- Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., Blank V.D. Increase in interplanar distances and formation of amorphous shear bands in deformed diamond. *Diam. Relat Mater*. 2024. V. 146. P. 111157. DOI: 10.1016/j.diamond.2024.111157.
- 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
- 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.
- Pavlov S.G., Tarelkin S.A., Bormashov V.S., Stavrias N., Saeedi K., van der Meer A.F.G., Bekin N.A., Zhukavin R.Kh., Shastin V.N., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Nosukhinb S.A., Prikhodko D.D., Blank V.D., Wienold M., Hübers H.-W. Dynamics of infrared excitations in boron doped diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2019. V. 92. P. 259-265. DOI: 10.1016/j.diamond.2019.01.013.
- Маркочев В.М., Алымов М.И. О теории хрупкого разрушения Я. Френкеля и А. Гриффитса. Чебышевский сб. 2017. Т. 18. № 3. С. 381–393. DOI: 10.22405/2226-8383-2017-18-3-381-393.
- Fairchild B. A., Rubanov S., Lau D. W. M., Robinson M., Suarez-Martinez I., Marks N., Greentree A. D., McCulloch D., Prawer S. Mechanism for the amorphisation of diamond. *Adv. Mater.* 2012. V. 24. N 15. P. 2024-2029. DOI: 10.1002/adma.201104511.
- 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. Relat. Mater.* 2022. V. 123. P. 108825. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.108825.
- Hounsome L.S., Jones R., Martineau P.M., Fisher D., Shaw M.J., Briddon P.R., Oberg S. Role of extended defects in brown colouration of diamond. *Phys. Stat. Sol.* 2007. V. 4. N 8. P. 2950–2957. DOI: 10.1002/pssc.200675443.
- Эгертон Р.Ф. Физические принципы электронной микроскопии. М.: Техносфера. 2010. 299 с.
- Jia Y.J., Shi M. X., Zhao Y., Liu B. A Better Estimation of Piastic Zone Size at the Crack Tip Beyond Irwin's Model. J. Appl. Mechanics. 2013. V. 80. 051014. DOI: 10.1115/1.4023642.
- Xie T., Osinski G.R. Shock Metamorphism. In: Encyclopedia of Lunar Science. Ed. by B. Cudnik. Springer, Cham. 2022. DOI: 10.1007/978-3-319-05546-6_189-1.
- Yang N., Zong W.J., Li Z.Q., Sun T. Amorphization anisotropy and the internal of amorphous layer in diamond nanoscale friction. *Comput. Mater. Sci.* 2014. V. 95. P. 551-556. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.08.040.
- Xu C., Liu C., Wang H. Incipient plasticity of diamond during nanoindentation. *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 57. P. 36093-36100. DOI: 10.1039/C7RA05721K.
- Kulnitskiy B.A., Blank V.D., Kuznetsov M.S., Nosukhin S.A., Terentiev S.A. The effect of boron on the structure and lattice parameters of diamond single crystals. *Diam. Relat. Mater.* 2024. V. 144. P. 111015. DOI: 10.1016/j.diamond.2024.111015.
- 23. **Dishler B.** Handbook of spectral lines in diamond. Springer. 2012. 467 p. DOI: 10.1007/978-3-642-22215-3.

- Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., Blank V.D. Increase in interplanar distances and formation of amorphous shear bands in deformed diamond. *Diam. Relat Mater.* 2024. V. 146. P. 111157. DOI: 10.1016/j.diamond.2024.111157.
- 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. J.* 2021. V. 64. N 12. P. 60-65 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6y.
- 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. J. 2024 V. 67. N 10. P. 49-54 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.2y.
- Pavlov S.G., Tarelkin S.A., Bormashov V.S., Stavrias N., Saeedi K., van der Meer A.F.G., Bekin N.A., Zhukavin R.Kh., Shastin V.N., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Nosukhinb S.A., Prikhodko D.D., Blank V.D., Wienold M., Hübers H.-W. Dynamics of infrared excitations in boron doped diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2019. V. 92. P. 259-265. DOI: 10.1016/j.diamond.2019.01.013.
- Markochev V.M., Alymov M.I. On the brittle fracture theory by ya. frenkel and a. griffith. *Chebyshevskiy Sbornik*. 2017. V. 18. N 3. P. 377-389 (in Russian). DOI: 10.22405/2226-8383-2017-18-3-377-389.
- Fairchild B. A., Rubanov S., Lau D. W. M., Robinson M., Suarez-Martinez I., Marks N., Greentree A. D., McCulloch D., Prawer S. Mechanism for the amorphisation of diamond. *Adv. Mater.* 2012. V. 24. N 15. P. 2024-2029. DOI: 10.1002/adma.201104511.
- 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. Relat. Mater.* 2022. V. 123. P. 108825. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.108825.
- Hounsome L.S., Jones R., Martineau P.M., Fisher D., Shaw M.J., Briddon P.R., Oberg S. Role of extended defects in brown colouration of diamond. *Phys. Stat. Sol.* 2007. V. 4. N 8. P. 2950–2957. DOI: 10.1002/pssc.200675443.
- Egerton R.F. Physical Principles of Electron Microscopy. M.: Tekhnosfera. 2010. 299 p. (in Russian).
- Jia Y.J., Shi M. X., Zhao Y., Liu B. A Better Estimation of Piastic Zone Size at the Crack Tip Beyond Irwin's Model. J. Appl. Mechanics. 2013. V. 80. 051014. DOI: 10.1115/1.4023642.
- 19. Xie T., Osinski G.R. Shock Metamorphism. In: Encyclopedia of Lunar Science. Ed. by B. Cudnik. Springer, Cham. 2022. DOI: 10.1007/978-3-319-05546-6_189-1.
- Yang N., Zong W.J., Li Z.Q., Sun T. Amorphization anisotropy and the internal of amorphous layer in diamond nanoscale friction. *Comput. Mater. Sci.* 2014. V. 95. P. 551-556. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.08.040.
- Xu C., Liu C., Wang H. Incipient plasticity of diamond during nanoindentation. *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 57. P. 36093-36100. DOI: 10.1039/C7RA05721K.
- Kulnitskiy B.A., Blank V.D., Kuznetsov M.S., Nosukhin S.A., Terentiev S.A. The effect of boron on the structure and lattice parameters of diamond single crystals. *Diam. Relat. Mater.* 2024. V. 144. P. 111015. DOI: 10.1016/j.diamond.2024.111015.
- 23. **Dishler B.** Handbook of spectral lines in diamond. Springer. 2012. 467 p. DOI: 10.1007/978-3-642-22215-3.

Поступила в редакцию (Received) 09.01.2025 Принята к опубликованию (Accepted) 14.05.2025

ChemChemTech. 2025. V. 68. N 9