

## ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ НАНОЧАСТИЦ С РЕШЕТКОЙ ТИПА СФАЛЕРИТА НА ПРИМЕРЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

Т.А. Гордеева, Б.А. Кульницкий, М.Ю. Попов, Д.А. Овсянников, В.Д. Бланк

Татьяна Андреевна Гордеева (ORCID 0000-0002-8894-107X)\*, Борис Арнольдович Кульницкий (ORCID 0000-0001-5482-3123), Михаил Юрьевич Попов (ORCID 0000-0001-9913-3062), Данила Алексеевич Овсянников (ORCID 0000-0003-3668-1373), Владимир Давыдович Бланк (ORCID 0000-0002-6070-4080)

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

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

*В настоящей работе методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения на приборе JEM-2010 исследовался порошок сульфида кадмия с размером частиц 3-12 нм после кратковременной (одноминутной) обработки в планетарной мельнице Fritsch Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line. Этот материал может быть применим в таких инновационных практических приложениях, как фотокатализ, новые источники излучения, биосенсоры, доставка лекарств, солнечные батареи. Электронные и оптические свойства наночастиц CdS, которые и определяют области применения вещества, прямо зависят от кристаллической структуры. Поэтому так важно определить структуру наночастиц сульфида кадмия. Анализ электронно-микроскопических изображений показывает, что механическое измельчение приводит к образованию гексагональной фазы в исходном кубическом CdS. Методами электронной микроскопии было установлено ориентационное соотношение между фазами сфалерита и вюрцита. Кроме этого в измельченном порошке встречаются фрагменты, содержащие краевые дислокации и деформационные полосы. Образование краевых дислокаций, являющихся линейными дефектами, лежит в основе процесса пластической деформации. Такие переориентированные области, как деформационные полосы, развернутые под разнообразными углами по отношению к соседним областям, широко встречаются в различных материалах: металлах, керамике, ионных кристаллах, полимерах, поликристаллических сплавах и фуллеренах. Возникновение деформационных полос приводит к изменениям в кристаллической решетке наночастиц сульфида кадмия. Таким образом, было показано, что пластическая деформация наночастиц сульфида кадмия может происходить не только из-за симметричной переориентации областей кристалла, но и в результате образования полос деформации.*

**Ключевые слова:** планетарная мельница, фазовые переходы, сульфид кадмия, просвечивающая электронная микроскопия

## ELECTRON MICROSCOPY OF NANOPARTICLES WITH A SPHALERITE-TYPE LATTICE ON THE EXAMPLE OF CADMIUM SULFIDE

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

Tatyana A. Gordeeva (ORCID 0000-0002-8894-107X)\*, Boris A. Kulnitskiy (ORCID 0000-0001-5482-3123), Mikhail Yu. Popov (ORCID 0000-0001-9913-3062), Danila A. Ovsyannikov (ORCID 0000-0003-3668-1373), Vladimir D. Blank (ORCID 0000-0002-6070-4080)

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

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

*In the present work by high resolution transmission electron microscopy on the device JEM-2010 cadmium sulfide powder with a particle size of 3-12 nm after short-term (one minute)*

*processing in the Fritsch Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line was studied. This material can be applied in such innovative practical applications as photocatalysis, new sources of radiation, biosensors, drug delivery, solar cells. The electronic and optical properties of CdS nanoparticles, which determine the application areas of the substance, directly depend on the crystal structure. Therefore, it is so important to determine the structure of cadmium sulfide nanoparticles. Analysis of electron microscopic images shows that mechanical milling leads to the formation of a hexagonal phase in the original cubic CdS. By electron microscopy methods the orientation relationship between sphalerite and wurtzite phases was established. In addition, fragments containing marginal dislocations and deformation bands were found in the milled powder. The formation of marginal dislocations, which are linear defects, underlies the process of plastic deformation. Such reoriented regions, as deformation bands deployed at various angles with respect to adjacent regions, are common in various materials: metals, ceramics, ionic crystals, polymers, polycrystalline alloys and fullerenes. The appearance of deformation bands leads to changes in the crystal lattice of cadmium sulfide nanoparticles. Thus, it was shown that the plastic deformation of cadmium sulfide nanoparticles can occur not only because of the symmetrical reorientation of the crystal regions, but also because of the formation of deformation bands.*

**Key words:** planetary mill, phase transformations, cadmium sulfide, transmission electron microscopy

**Для цитирования:**

Гордеева Т.А., Кульницкий Б.А., Попов М.Ю., Овсянников Д.А., Бланк В.Д. Электронная микроскопия наночастиц с решеткой типа сфалерита на примере сульфида кадмия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 71–75. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.1y.

**For citation:**

Gordeeva T.A., Kulnitskiy B.A., Popov M.Yu., Ovsyannikov D.A., Blank V.D. Electron microscopy of nanoparticles with a sphalerite-type lattice on the example of cadmium sulfide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 71–75. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.1y.

## ВВЕДЕНИЕ

Сульфид кадмия является широкозонным полупроводником. Исследователи продолжают проявлять живой интерес к CdS из-за интереса к явлениям на наноуровне и к разработке материалов для многих практических применений. В частности, активно изучаются наночастицы, нанокристаллы, нановискеры, наностержни и нанопроволоки CdS, а также органические, неорганические и биологические материалы на основе CdS [1-5].

Этот материал активно используется в микро- и оптоэлектронике, а также обладает превосходными фотохимическими свойствами и фотокаталитическими характеристиками [6]. При переходе в наноструктурированное состояние ширина его запрещенной зоны увеличивается от 2,5 до 4,5 эВ [7]. В связи с этим, тонкие пленки CdS рассматриваются в качестве перспективных материалов для солнечных батарей [8], а наночастицы могут быть использованы как квантовые точки для медицинской визуализации биологических объектов [9]. При этом, хотя получение различных форм наноструктурированного сульфида кадмия не требует специального оборудования и может быть реализовано в обычных условиях, этот материал на данный момент не нашел широкого применения.

Для исследования физических свойств материала важно определить строение кристаллической решетки наночастиц сульфида кадмия.

Хорошо известно, что CdS может существовать как в кубической фазе (кристаллическая решетка типа сфалерита, 81925-ICSD, пространственная группа F4-3m,  $a = 5,818 \text{ \AA}$ ), так и в гексагональной фазе (кристаллическая решетка типа вюрцита, 60629-ICSD, пространственная группа R $\bar{3}m$ ,  $a = 4 1409 \text{ \AA}$ ,  $c = 6,7198 \text{ \AA}$ ). При получении наноструктур в материале могут встречаться оба типа кристаллических решеток. В настоящей работе интерес представляли особенности превращения сфалерита в вюрцит. В данной работе проводилось исследование методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения структуры сульфида кадмия после кратковременной (одноминутной) обработки в планетарной мельнице.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Порошок сульфида кадмия (с размером частиц от 3 до 12 нм) производства компании "Alfa Aesar" обрабатывался в планетарной мельнице Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line со стальным барабаном и стальными шарами. Время измельчения в экспериментах составляло 1 мин.

Далее порошок исследовался методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения на приборе JEOL JEM-2010 TEM.

В [10] было показано, что максимальная температура образца во время используемого нами режима обработки в планетарной мельнице не превышает 373 К. Механические напряжения, возникающие при столкновении стальных шаров во время обработки в планетарной мельнице, не превышают 6 ГПа [11].

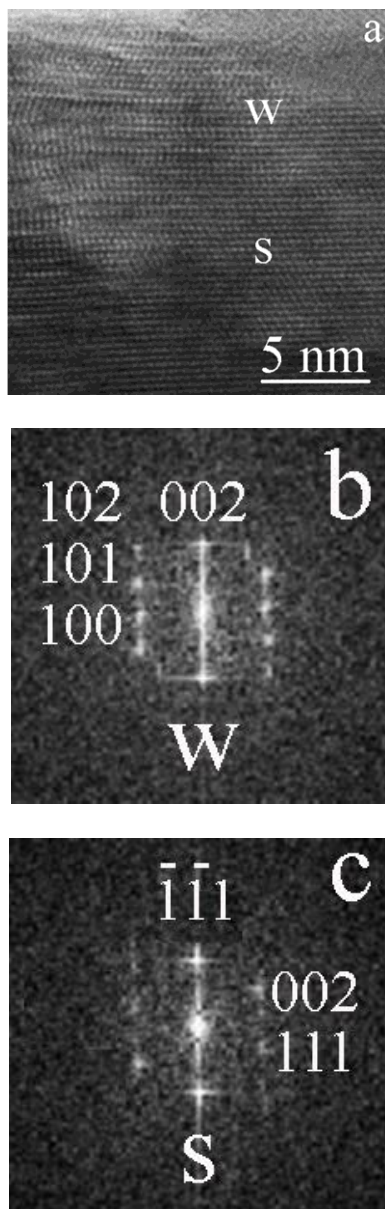


Рис. 1. а) Фрагмент CdS после деформации содержит вюрцитную (w) и сфалеритную (s) фазы. Выполняется традиционное для этих решеток ориентационное соотношение (OC) :  $(111)_s \parallel (002)_w$ . б), в) Быстрое Фурье преобразование от а)

Fig. 1. a) The CdS fragment after deformation contains wurtzite (w) and sphalerite (s) phases. The orientation relation (OR), traditional for these lattices, is fulfilled:  $(111)_s \parallel (002)_w$ . б), в) Fast Fourier transform from а)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кубическую элементарную ячейку типа сфалерита с тетраэдрической координацией атомов можно представить с помощью двух идентичных плотнейших упаковок, одна из которых смещена на  $c/4$  относительно другой. В структуре вюрцита основания тетраэдров в слоях повернуты относительно друг друга на  $60^\circ$ . При этом в случае структуры сфалерита наблюдается периодическая последовательность слоев ABCABC, а в случае структуры вюрцита – последовательность ABABAB.

На рис. 1 показаны отдельные области сфалеритной (s) и вюрцитной (w) фаз. Одновременное присутствие этих двух фаз на одном ПЭМ изображении наблюдали ранее в углероде (алмаз  $\rightarrow$  лондейлит) [12], в кремнии (SiII  $\rightarrow$  SiIV) [13] и германии (GeI  $\rightarrow$  GeIV) [14]. В таких случаях выполняется следующее ориентационное соотношение:

$$(111)_s \parallel (002)_w.$$

Однако в некоторых случаях перестройка кристаллической решетки в результате механического двойникования может приводить к появлению прослоек с упаковкой слоев АВА в структуре типа сфалерита.

ПЭМ исследования показывают, что кратковременная обработка в планетарной мельнице позволяет наблюдать образование многочисленных дефектов, возникающих в материале при измельчении. Так на рис. 2 показан фрагмент с искаженной структурой сульфида кадмия, содержащий локальное искажение кристаллической решетки. Стрелкой показан дополнительный атомный слой в краевой дислокации.

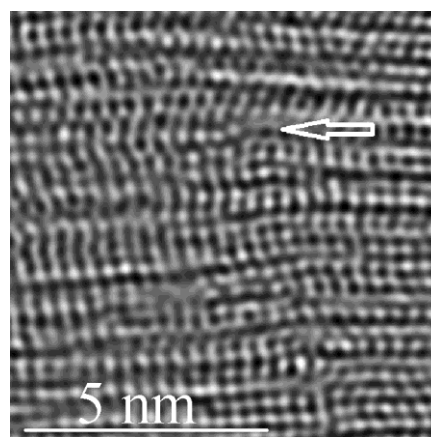


Рис. 2. Искраженная кристаллическая структура CdS содержит краевую дислокацию (стрелкой указан участок с дополнительным атомным слоем)

Fig. 2. The distorted crystal structure of CdS contains an edge dislocation (the arrow indicates an area with an additional atomic layer)

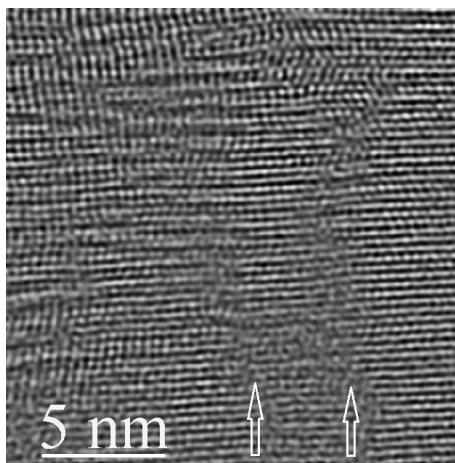


Рис. 3. Деформационные полосы в CdS  
Fig. 3. Deformation bands in CdS

Кроме этого, при измельчении в материале присутствуют деформационные полосы, показанные на рис. 3. Такие перемещения атомов с очень малым смещением часто предшествуют фазовым трансформациям [15].

Деформационные полосы (области, в которых неупругие сдвиговые деформации локализованы и превосходят деформацию в окружающих областях) широко распространены во многих типах материалов: металлах, керамике, горных породах, ионных кристаллах, полимерах, поликристаллических сплавах и металлических стеклах и в фуллеренах [16-22]. Возникновение полос - следствие неупругой реакции материала на механическую нагрузку. Полосы наблюдаются при статиче-

ских и динамических нагрузках, а также при однократных монотонных и циклических испытаниях на усталость.

В нашем случае деформация решетки сфалерита приводит к изменению симметрии решетки.

### ВЫВОДЫ

Методами электронной микроскопии был исследован порошок сульфида кадмия, обработанный в планетарной мельнице в течение 1 мин. Было показано частичное превращение сфалерита (s) в вюрцит (w). Кроме этого были обнаружены большие скопления дислокаций и деформационные полосы. В дальнейшем мы планируем продолжить исследование структуры сульфида кадмия при других параметрах обработки.

### БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП в ФГБНУ ТИСУМ (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. Singaevsky A.F., Piryatinski Y.P., Grynko D.O., Dimitriev O.P. Asymmetric effect of (0001) and (0001) facets on surface and interface properties of CdS single crystal. *Appl Phys A*. 2011. V. 104. P. 493–502. DOI: 10.1007/s00339-011-6299-y.
2. Rodríguez- Martínez Y., Alba-Cabañas J., Cruzata O., Vailant-Roca L., Bianco S., Tresso E., Rossi F. In-situ pulsed laser induced growth of CdS nanoparticles on ZnO nanorods surfaces. *Mater. Res. Bull.* 2020. V. 125. P. 110790. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.110790.
3. Nasir J.A., Rehman Z., Shah S.N., Khan A., Butler I.S., Catlow C.R.A. Recent developments and perspectives in CdS-based photocatalysts for water splitting. *J. Mater. Chem. A*. 2020. V. 8. P. 20752-20780. DOI: 10.1039/D0TA05834C.
4. Zhai T., Fang X., Li L., Bando Y., Golberg D. One-dimensional CdS nanostructures: synthesis, properties, and applications. *Nanoscale*. 2010. V. 2. N 2. P. 168-187. DOI: 10.1039/B9NR00415G.
5. Pei Y., Pei R., Liang X., Wang Y., Liu L., Chen H., Liang J. CdS-Nanowires Flexible Photo-detector with Ag-Nanowires Electrode Based on Non-transfer Process. *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 21551. DOI: 10.1038/srep21551.
6. Qin Li, Xin Li, Jiaguo Yu. Chapter 10 - Surface and interface modification strategies of CdS-based photocatalysts. *Interface Sci. Technol.* 2020. V. 31 P. 313-348. DOI: 10.1016/B978-0-08-102890-2.00010-5.

### REFERENCES

1. Singaevsky A.F., Piryatinski Y.P., Grynko D.O., Dimitriev O.P. Asymmetric effect of (0001) and (0001) facets on surface and interface properties of CdS single crystal. *Appl Phys A*. 2011. V. 104. P. 493–502. DOI: 10.1007/s00339-011-6299-y.
2. Rodríguez- Martínez Y., Alba-Cabañas J., Cruzata O., Vailant-Roca L., Bianco S., Tresso E., Rossi F. In-situ pulsed laser induced growth of CdS nanoparticles on ZnO nanorods surfaces. *Mater. Res. Bull.* 2020. V. 125. P. 110790. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.110790.
3. Nasir J.A., Rehman Z., Shah S.N., Khan A., Butler I.S., Catlow C.R.A. Recent developments and perspectives in CdS-based photocatalysts for water splitting. *J. Mater. Chem. A*. 2020. V. 8. P. 20752-20780. DOI: 10.1039/D0TA05834C.
4. Zhai T., Fang X., Li L., Bando Y., Golberg D. One-dimensional CdS nanostructures: synthesis, properties, and applications. *Nanoscale*. 2010. V. 2. N 2. P. 168-187. DOI: 10.1039/B9NR00415G.
5. Pei Y., Pei R., Liang X., Wang Y., Liu L., Chen H., Liang J. CdS-Nanowires Flexible Photo-detector with Ag-Nanowires Electrode Based on Non-transfer Process. *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 21551. DOI: 10.1038/srep21551.
6. Qin Li, Xin Li, Jiaguo Yu. Chapter 10 - Surface and interface modification strategies of CdS-based photocatalysts. *Interface Sci. Technol.* 2020. V. 31 P. 313-348. DOI: 10.1016/B978-0-08-102890-2.00010-5.

7. **Malik M.A.** 4.09 - Compound Semiconductors: Chalcogenides. In: *Comprehensive Inorganic Chemistry*. Ed by J. Reedijk, K. Poeppelmeie. Elsevier. 2013. Ch. 4.09. P. 177-210. DOI: 10.1016/B978-0-08-097774-4.00411-3.
8. **Hullavarad N.V., Hullavarad S.S., Karulkar P.C.** Cadmium sulphide (CdS) nanotechnology: synthesis and applications. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2008. V. 8. N 7. P. 3272–3299. DOI: 10.1166/jnn.2008.145.
9. **Gill R., Zayats M., Willner I.** Semiconductor quantum dots for bioanalysis. *Angew. Chemie Internat. Ed.* 2008. V. 47. N 40. P. 7602–7625. DOI: 10.1002/anie.200800169.
10. **Schmidt R., Scholze H.M., Stolle A.** Temperature progression in a mixer ball mill. *Int. J. Ind. Chem.* 2016. V. 7. P. 181-186. DOI: 10.1007/s40090-016-0078-8.
11. **El-Eskandarany M.S.** Mechanical alloying: For fabrication of advanced engineering materials. NY: Noyes Publ. 2013. 242 p.
12. **Gordeeva T., Kulnitskiy B., Ovsyannikov D., Popov M., Blank V.** Twinning formation in nanodiamonds after treatment in a planetary mill: HRTEM studies. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* 2019. V. 693. P. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/693/1/012022.
13. **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.
14. **Гордеева Т.А., Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Кульницкий Б.А., Бланк В.Д.** Особенности структуры германия, обработанного в планетарной мельнице. *Физика твердого тела.* 2020. Т. 62. № 10. С. 1765-1768. DOI: 10.21883/FTT.2020.10.49902.080.
15. **Остриков О.М.** Методика прогнозирования распределения полей напряжений в реальных кристаллах с остаточными некогерентными двойниками. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого. 2019. 278 с.
16. **Kulnitskiy B.A., Blank V.D., Levitas V.I., Kirichenko A.N., Tyukalova E.V.** Transformation-deformation bands in C60 after the treatment in a shear diamond anvil cell. *Mater. Res. Express.* 2016. V. 3. N 4. P. 045601. DOI: 10.1088/2053-1591/3/4/045601.
17. **Yaroslavzev A.A., Evdokimov I.A., Kulnitskiy B.A., Pakhomov I.V., Denisov V.V.** Phase transformations in Zr under high-pressure and shear deformation treatment. *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 4. P. 046506. DOI: 10.1088/2053-1591/aaf999.
18. **Levitas V.I., Nesterenko V.F., Meyers M.A.** Strain-induced structural changes and chemical reactions-II. Modelling of reactions in shear band. *Acta Mater.* 1998. V. 46. P. 5947–5963. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00214-6.
19. **Levitas V.I., Zarechnyy O.M.** Modeling and simulation of strain-induced phase transformations under compression in a diamond anvil cell. *Phys. Rev. B.* 2010. V. 82. P. 174123. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.174123.
20. **Li J.C.M.** The behavior and properties of shear bands in polymers are reviewed with 60 refs. *Polym. Eng. Sci.* 1984. V. 24. P. 750–760. DOI: 10.1002/pen.760241005.
21. **Lewandowski J.J., Greer A.L.** Temperature Rise at Shear Bands in Metallic Glasses. *Nat. Mater.* 2006. V. 5. P. 15-18. DOI: 10.1038/nmat1536.
22. **Kulnitskiy B.A., Blank V.D., Levitas V.I., Perezhogin I.A., Popov M.Yu., Kirichenko A.N., Tyukalova E.V.** Transformation-deformation bands in C60 after the treatment in a shear diamond anvil cell. *Mater. Res. Express.* 2016. V. 3. P. 045601. DOI: 10.1088/2053-1591/3/4/045601.
7. **Malik M.A.** 4.09 - Compound Semiconductors: Chalcogenides. In: *Comprehensive Inorganic Chemistry*. Ed by J. Reedijk, K. Poeppelmeie. Elsevier. 2013. Ch. 4.09. P. 177-210. DOI: 10.1016/B978-0-08-097774-4.00411-3.
8. **Hullavarad N.V., Hullavarad S.S., Karulkar P.C.** Cadmium sulphide (CdS) nanotechnology: synthesis and applications. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2008. V. 8. N 7. P. 3272–3299. DOI: 10.1166/jnn.2008.145.
9. **Gill R., Zayats M., Willner I.** Semiconductor quantum dots for bioanalysis. *Angew. Chemie Internat. Ed.* 2008. V. 47. N 40. P. 7602–7625. DOI: 10.1002/anie.200800169.
10. **Schmidt R., Scholze H.M., Stolle A.** Temperature progression in a mixer ball mill. *Int. J. Ind. Chem.* 2016. V. 7. P. 181-186. DOI: 10.1007/s40090-016-0078-8.
11. **El-Eskandarany M.S.** Mechanical alloying: For fabrication of advanced engineering materials. NY: Noyes Publ. 2013. 242 p.
12. **Gordeeva T., Kulnitskiy B., Ovsyannikov D., Popov M., Blank V.** Twinning formation in nanodiamonds after treatment in a planetary mill: HRTEM studies. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* 2019. V. 693. P. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/693/1/012022.
13. **Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., Blank V.D.** 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 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.
14. **Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Y., Kulnitskiy B.A., Blank V.D.** Structure of germanium treated in a planetary mill. *Phys. Solid State.* 2020. V. 62. N 10. P. 1765-1768. DOI: 10.21883/FTT.2020.10.49902.080.
15. **Ostrikov O.M.** Methods for predicting the distribution of stress fields in real crystals with residual incoherent twins. Gomel: GGTU im. P.O. Sukhoi. 2019. 278 p. (in Russian).
16. **Kulnitskiy B.A., Blank V.D., Levitas V.I., Kirichenko A.N., Tyukalova E.V.** Transformation-deformation bands in C60 after the treatment in a shear diamond anvil cell. *Mater. Res. Express.* 2016. V. 3. N 4. P. 045601. DOI: 10.1088/2053-1591/3/4/045601.
17. **Yaroslavzev A.A., Evdokimov I.A., Kulnitskiy B.A., Pakhomov I.V., Denisov V.V.** Phase transformations in Zr under high-pressure and shear deformation treatment. *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 4. P. 046506. DOI: 10.1088/2053-1591/aaf999.
18. **Levitas V.I., Nesterenko V.F., Meyers M.A.** Strain-induced structural changes and chemical reactions-II. Modelling of reactions in shear band. *Acta Mater.* 1998. V. 46. P. 5947–5963. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00214-6.
19. **Levitas V.I., Zarechnyy O.M.** Modeling and simulation of strain-induced phase transformations under compression in a diamond anvil cell. *Phys. Rev. B.* 2010. V. 82. P. 174123. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.174123.
20. **Li J.C.M.** The behavior and properties of shear bands in polymers are reviewed with 60 refs. *Polym. Eng. Sci.* 1984. V. 24. P. 750–760. DOI: 10.1002/pen.760241005.
21. **Lewandowski J.J., Greer A.L.** Temperature Rise at Shear Bands in Metallic Glasses. *Nat. Mater.* 2006. V. 5. P. 15-18. DOI: 10.1038/nmat1536.
22. **Kulnitskiy B.A., Blank V.D., Levitas V.I., Perezhogin I.A., Popov M.Yu., Kirichenko A.N., Tyukalova E.V.** Transformation-deformation bands in C60 after the treatment in a shear diamond anvil cell. *Mater. Res. Express.* 2016. V. 3. P. 045601. DOI: 10.1088/2053-1591/3/4/045601.

Поступила в редакцию (Received) 30.06.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 17.08.2022