

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ИСХОДНОГО АЛМАЗНОГО СЫРЬЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.А. Перфилов, М.В. Воробьева, И.А. Евдокимов, Р.Л. Ломакин, И.В. Пахомов, А.А. Поздняков

Сергей Алексеевич Перфилов *, Мария Вячеславовна Воробьева, Иван Андреевич Евдокимов, Роман Леонидович Ломакин, Илья Владимирович Пахомов, Андрей Анатольевич Поздняков
Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840
E-mail: nhoots@mail.ru *, vorobjeva@yandex.ru, ivan_911@mail.ru, jart@list.ru, pahomov-i@mail.ru, pozdnjkov@yandex.ru

Алмазные поликристаллы (ПКА) получены из различных алмазных микропорошков пропиткой эвтектикой кобальт - карбид вольфрама в условиях высоких давлений и температур. Спекание проводили в камере высокого давления (КВД) типа «тороид» с диаметром лунки 39 мм при следующих параметрах: давление 5,5-6 ГПа, температура ~1450 °С, на установке одноосного сжатия на базе пресса усилием 25000 кН. В качестве исходного алмазного сырья использованы алмазные микропорошки с размером зерна 20/14 мкм по ГОСТ 9206-80, полученные дроблением из различного алмазного сырья с последующим разделением по зернистостям. Первая партия порошков была получена из среднечерных марок АС 15 – АС 50, вторая из низкопрочных марок АС 4 – АС 6, а третья из природных алмазных порошков. Приведены результаты металлографических исследований шлифов и сколов ПКА, позволяющие определить особенности их микроструктуры, проведены рентгенофазовые исследования. В пропитанном алмазном слое обнаружено образование карбида вольфрама W_2C , возможно образующегося при распаде исходного карбида вольфрама WC с преимущественным образованием из него алмаза в условиях эксперимента. Исследованы износостойкость, микротвердость, плотность полученных алмазных поликристаллов. Установлено, что свойства исходного алмазного сырья оказывают наибольшее влияние на износостойкость получаемых поликристаллических алмазных материалов. Данный факт необходимо учитывать при разработке поликристаллических алмазов инструментального назначения. Обнаруженная относительно невысокая износостойкость ПКА из порошков природных алмазов может быть объяснена как морфологией исходных частиц, так и меньшей их способностью к перекристаллизации в условиях высоких давлений и температур.

Ключевые слова: алмаз, поликристаллический алмаз, композиционные материалы, высокое давление

STUDYING THE INFLUENCE OF THE INITIAL DIAMOND RAW MATERIALS PROPERTIES ON THE POLYCRYSTALLINE DIAMOND MATERIALS PROPERTIES

S.A. Perfilov, M.V. Vorobyova, I.A. Evdokimov, R.L. Lomakin, I.V. Pakhomov, A.A. Pozdnyakov

Sergey A. Perfilov *, Maria V. Vorobieva, Ivan A. Evdokimov, Roman L. Lomakin, Ilya V. Pakhomov, Andrei A. Pozdnyakov
Technological Institute for Superhard and New Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia
E-mail: nhoots@mail.ru *, vorobjeva@yandex.ru, ivan_911@mail.ru, jart@list.ru, pahomov-i@mail.ru, pozdnjkov@yandex.ru

Diamond polycrystals (PCD) are obtained from various diamond micropowders by impregnation with cobalt - tungsten carbide eutectic at high pressures and temperatures. Sintering was carried out in a high-pressure chamber (HPC) of the "toroid" type with a hole diameter of 39 mm with the following parameters: pressure 5.5-6 GPa, temperature ~1450 °C on a uniaxial compression plant based on a press with a force of 25000 kN. Diamond micro powders with a grain size of 20/14 microns were used as the initial rough diamonds according to GOST 9206-80, obtained by crushing from various rough diamonds with subsequent separation by grain size. The first batch of powders was obtained from medium-strength grades AC 15 – AC 50, the second from low-strength grades AC 4 - AC 6, and the third from natural diamond powders. The results of metallographic studies of thin sections and chips of PCD, which make it possible to determine the features of their microstructure, are given, X-ray phase studies are carried out. In the impregnated diamond layer, the formation of tungsten carbide W_2C was found, possibly formed during the decomposition of the initial tungsten carbide WC with the predominant formation of diamond from it under experimental conditions. The wear resistance, microhardness, and density of the obtained diamond poly crystals have been investigated. It has been established that the properties of the initial rough diamonds have the greatest effect on the wear resistance of the obtained polycrystalline diamond materials. This fact must be taken into account when developing polycrystalline diamonds for instrumental purposes. The observed relatively low wear resistance of PCD made from natural diamond powders can be explained both by the morphology of the initial particles and their lower ability to recrystallize at high pressures and temperatures.

Key words: diamond, polycrystalline diamond, composite materials, high pressure

Для цитирования:

Перфилов С.А., Воробьева М.В., Евдокимов И.А., Ломакин Р.Л., Пахомов И.В., Поздняков А.А. Изучение влияния свойств исходного алмазного сырья на свойства поликристаллических алмазных материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 48–54

For citation:

Perfilov S.A., Vorobyova M.V., Evdokimov I.A., Lomakin R.L., Pakhomov I.V., Pozdnyakov A.A. Studying the influence of the initial diamond raw materials properties on the polycrystalline diamond materials properties. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 48–54

ВВЕДЕНИЕ

Поликристаллические алмазы находят широкое применение при изготовлении эффективного инструмента для бурения и обработки твердых материалов. В настоящее время происходит непрерывное совершенствование технологий поликристаллических алмазных материалов (ПКА).

В отличие от композиционных материалов, содержащих отдельные алмазные включения в металлической или керамической матрице, ПКА имеют жесткий каркас из сросшихся алмазных частиц. Спекание ПКА осуществляется в области термодинамической стабильности алмаза, характерные параметры получения – давление 6,0 ГПа, температура 1400 °C [1-3]. Обычно спекание поликристаллических композиционных материалов, осуществляют в присутствии активирующих процесс спекания добавок (никель, марганец, железо, кобальт или кремний). Составляющие каркас зерна – это, в сущности, монокристаллы алмаза, обладающие рядом уникальных физико-механических и теплофизических свойств. Насколько эти свойства

реализуются в поликристалле, зависит от степени их взаимосвязи [4-9].

Значительную часть поликристаллов ПКА для использования в буровом инструменте получают инфльтрацией (пропиткой) алмазного порошка эвтектикой Co – WC в условиях высоких давлений и температур. Важную роль при этом играют свойства исходного алмазного порошка: чистота, морфология и свойства его поверхности. Использование метода инфльтрации открывает широкие возможности получения ПКА с управляемыми характеристиками как за счет управления P–T параметрами синтеза, так и путем варьирования свойств исходных алмазных компонентов. Важным условием образования высококачественного слоя ПКА является интенсивное протекание процессов рекристаллизации алмаза путем переноса углерода через металлический расплав. Это приводит к сращиванию исходных отдельных зерен алмазного порошка и образованию алмазного каркаса и собственно алмазного поликристалла. Для этого обычно используют микропорошки синтетических алмазов размером от 10 до 30 мкм. [10-14].

Настоящая работа направлена на создание современных поликристаллических материалов на основе алмаза с использованием различных типов природного и синтетического алмазного сырья. В настоящей работе исследована зависимость свойств получаемых поликристаллов алмаза от природы исходных микропорошков.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В ФГБНУ ТИСНУМ разработана технология получения ПКА инфильтрацией алмазных прессовок при умеренных давлениях (от 5,0 ГПа), позволяющая получать поликристаллические алмазные материалы с заданными свойствами. Спекание образцов ПКА проводили в камере высокого давления (КВД) типа «тороид» с диаметром лунки 39 мм при следующих параметрах: давление 5,5-6 ГПа, температура ~1450 °С, время изотермической выдержки 5 мин. Нагружение камеры осуществляли одноосным прессом ДО-044 усилием 25000 кН [15-18].

Для оценки давления в КВД применяли метод калибровки при комнатной температуре, основанный на сопоставлении усилия пресса и давления полиморфного превращения в реперном веществе. В качестве реперов при давлении до 6 ГПа используются химически чистые Vi , Tl , Va и Yb , для которых значения давления превращений составляют $Vi I - II = 2,55$ ГПа; $Vi II - III = 2,69$ ГПа; $Tl II - III = 3,67$ ГПа; $Yb I - II = 4$ ГПа; $Va I - II = 5,5$ ГПа. Полиморфные превращения в данных веществах фиксируются по изменению их электропроводности [19].

Температуру в реакционной зоне КВД оценивали при помощи калибровки по температуре. Измерения с помощью термопар позволяют получить зависимость температуры в реакционном объеме от подводимой электрической мощности и использовать ее как калибровку КВД по температуре [20].

Плотность ПКА определяли методом гидростатического взвешивания.

Микротвердость по Кнупу определяли на приборе DuraScan.

В качестве исходного алмазного сырья использованы партии алмазных микропорошков с размером зерна 20/14 мкм по ГОСТ 9206-80 [21], полученные дроблением из различного алмазного сырья с последующим разделением по зернистостям:

1. Производства ООО «ПО Карат» (г. Ярославль) из среднепрочных марок АС15-АС50;
2. Производства ОАО «ВеАл» (г. Венев),

изготовленные из сырья низкопрочных марок АС4 – АС6;

3. Производства – ООО «Инреал» (г. Сестрорецк), полученные из природных алмазов.

В табл. 1 приведены абразивная способность и коэффициент формы используемых исходных алмазных порошков.

Таблица 1

Абразивная способность по ГОСТ 9206-80 и коэффициент формы используемых исходных алмазных порошков

Table 1. Abrasive ability according to GOST 9206-80 and form factor of the initial diamond powders used

№ партии	Производитель алмазных порошков	Марка	Абразивная способность не менее	Коэффициент формы
1	ООО «ПО Карат»	АСН	7,0	1,45
2	ОАО «ВеАл»	АСН	6,4	1,40
3	ООО «Инреал»	АН	6,0	1,60

Следует отметить, что выбранные микропорошки по основным характеристикам достаточно близки.

На рис.1 приведены фотографии зерен исходных порошков.

Порошки партии 2 (рис. 1б) содержат большее по сравнению с партией 1 (рис. 1а) количество видимых дефектов, границ блоков и даже границы зерен. В порошках партии 3 (рис. 1в) преобладают зерна пластинчатые, вытянутые, неправильной формы. При этом отсутствие в них существенных примесей металлов рассматривалось как возможность для повышения термостойкости получаемых на их основе ПКА.

Исходные порошки отмывали от возможных загрязнений в ацетоне с последующим отжигом при 600 °С в атмосфере водорода.

Спеки полученных поликристаллов разрезали для приготовления шлифов, а также механически обрабатывали в размер для проведения испытаний. Определяли микротвердость, плотность, износостойкость, исследовали структуру и фазовый состав.

Сущность испытания износостойкости ПКА заключается в резании заготовки из гранита полученной пластиной поликристаллического алмаза, установленной в резцедержателе токарно-винторезного станка с дальнейшим определением соотношения убыли объема срезанной части заготовки из гранита к площади площадки износа образца ПКА.

Условия определения износостойкости: глубина резания заготовки 1,0 мм, угол наклона режущей пластины – 20 градусов, скорость вращения заготовки – 50 об./мин (линейная скорость вращения ≈ 30 м/мин), продольная передача – 0,1 мм/оборот.

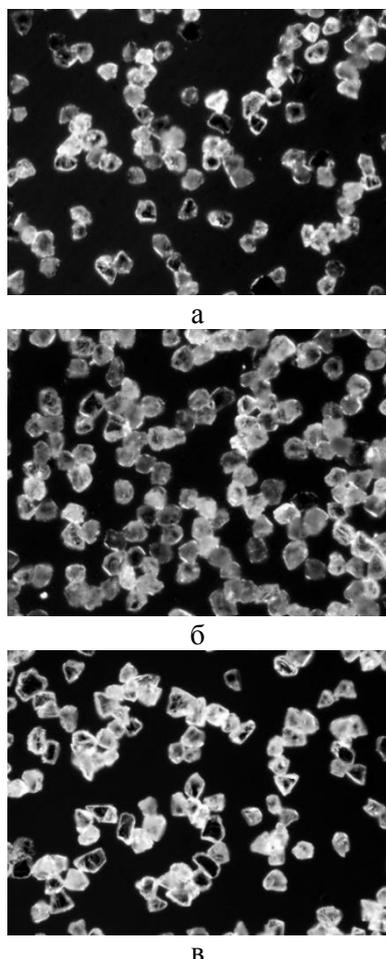


Рис. 1. Оптические фотографии исходных алмазных микропорошков, изготовленных из партий различного сырья. а – партия 1; б – партия 2; в – партия 3

Fig. 1. Optical photographs of initial diamond micropowders made from batches of various raw materials. а – batch 1; б – batch 2; в – batch 3

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные характеристики алмазных поликристаллов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства полученных ПКА
Table 2. Properties of the obtained PCD

№ партии	Износостойкость, 10^5 мм ³ /мм ²	Микротвердость, ГПа	Плотность слоя ПКА, г/см ³
1	8,4±0,3	86±7	3,56±2
2	7,5±0,3	82±7	3,57±2
3	4,0±0,3	80±7	3,68±2

Типичная дифрактограмма образца ПКА представлена на рис. 2. На ней присутствуют пики алмаза, исходного карбида вольфрама и кобальта с несколько увеличенным параметром решетки.

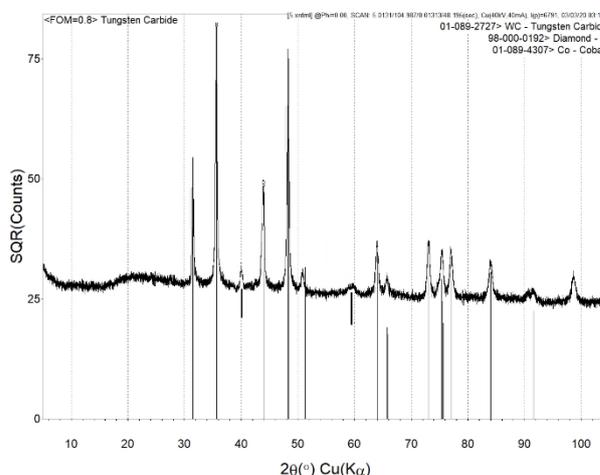
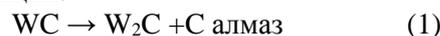


Рис. 2. Типичная дифрактограмма слоя ПКА, выделены пики W₂C

Fig. 2. Typical diffraction pattern of the PCD layer, the W₂C peaks are highlighted

На дифрактограмме также присутствуют пики при 2θ около 40 и 58 град, характерные для карбида вольфрама W₂C, отсутствующие на исходных дифрактограммах твердого сплава. Его образование в процессе получения ПКА может свидетельствовать о распаде исходного карбида вольфрама, содержащегося в составе эвтектического расплава по реакции:



Различия в износостойкости могут быть объяснены из анализа шлифов ПКА (рис. 3). Микроструктура образца, полученного из партии 1 (рис. 1а), представляет собой равноосные, сросшиеся зерна, образующие каркас поликристалла. Промежутки между ними равномерно заполнены затвердевшим расплавом.

В зернах образцов из партии 2 (рис. 1б), также сросшихся друг с другом, присутствует заметное количество дефектов, часть зерен разрушается в процессе пропитки. Это приводит к заметному уменьшению относительной износостойкости материала.

Износостойкость ПКА, полученного из порошков природного алмаза, снижается еще сильнее. На шлифе (рис. 1в) выявляется сильное дробление исходных зерен неправильной, неравноосной формы. При этом металл не всегда проникает во вновь образовавшиеся границы – рис. 4. Это приводит к неравномерному заполнению металлом промежутков между зернами.

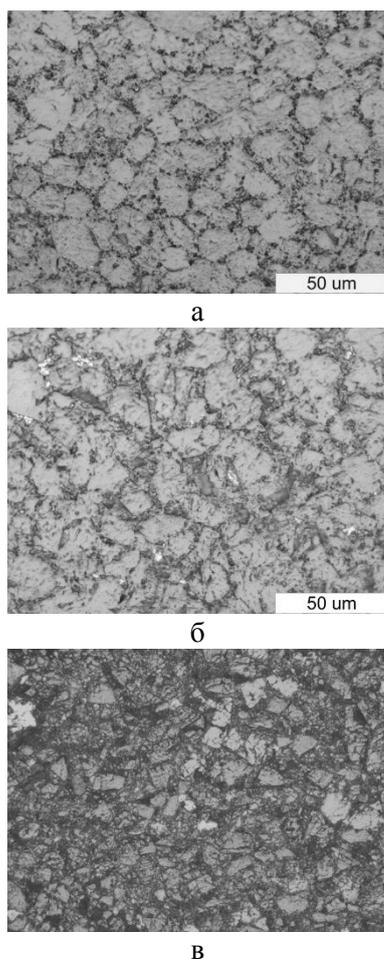


Рис. 3. Оптические фото шлифов ПКА из партий микропорошков. а – партия 1; б – партия 2; в – партия 3
Fig. 3. Optical photos of PCD thin sections from batches of micro-powders. а – batch 1; б – batch 2; в – batch 3

Судя по заметному повышению плотности материала, концентрация металла в этих образцах также повышена, а алмаза соответственно снижена.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить, что в процессе получения алмазного поликристалла пропиткой расплавом эвтектики карбид

ЛИТЕРАТУРА

1. Qian J., McMurray C.E., Mukhopadhyay D.K., Wiggins J.K., Vail M.A., Bertagnolli K.E. Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press. *Internat. J. Refract. Metals Hard Mater.* 2012. 31. 71-75. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2011.09.008.
2. Yahiaoui M., Gerbaud L., Paris J-Y. A study on PDC drill bits quality. *Wear.* 2013. V. 298-299. P. 32-41. DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.026.
3. Bellin F., Dourfaye A., King W., et al. Issues in Polycrystalline Diamond Compact Cutter-Rock Interaction From a Metal Machining Point of View-Part I: Temperature, Stresses, and Forces. *World Oil.* 2010. N 10. P. 53. DOI: 10.1115/1.4007468.

вольфрама-кобальт происходит транспорт углерода от карбида вольфрама WC в алмаз с образованием карбида вольфрама W₂C.

Установлено, что существенное влияние на износостойкость алмазного поликристалла оказывает морфология и дефектность исходных алмазных микропорошков.

Для использования в качестве алмазного сырья природных микропорошков необходима дополнительная предварительная их обработка, возможно оваллизация.

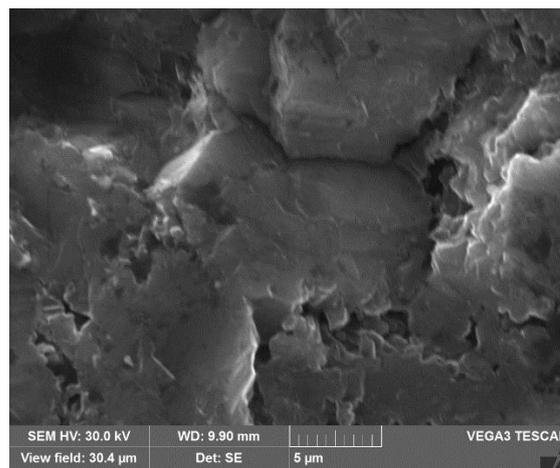


Рис. 4. Фотография СЭМ участка скола ПКА из партии 3
Fig. 4. SEM photo of the PCD cleavage section from batch 3

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСЧУМ.

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

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was done using the Shared Research Facilities of FSBI TISNCM.

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

REFERENCES

1. Qian J., McMurray C.E., Mukhopadhyay D.K., Wiggins J.K., Vail M.A., Bertagnolli K.E. Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press. *Internat. J. Refract. Metals Hard Mater.* 2012. 31. 71-75. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2011.09.008.
2. Yahiaoui M., Gerbaud L., Paris J-Y., et al. A study on PDC drill bits quality. *Wear.* 2013. V. 298-299. P. 32-41. DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.026.
3. Bellin F., Dourfaye A., King W., et al. Issues in Polycrystalline Diamond Compact Cutter-Rock Interaction From a Metal Machining Point of View-Part I: Temperature, Stresses, and Forces. *World Oil.* 2010. N 10. P. 53. DOI: 10.1115/1.4007468.

4. **Mukhopadhyay D.K., Bertagnolli K.E.** Understanding Sources of Residual Stress in PDC by X-Ray Diffraction. *Superabr. Ind. Rev. Finer Points*. Winter 2019/2020. P. 28.
5. **Башарин А.Ю., Лысенко И.Ю., Спицын Б.В.** Переход переохлажденного жидкого углерода в метастабильный твердый углерод: эксперимент, термодинамика и механизмы, применение для получения алмаза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 5. С. 4 – 8.
6. **Ермолаев А.А., Лаптев А.И.** Алмазные поликристаллические материалы. Механизм и кинетика синтеза поликристаллического алмаза. М.: МИСиС. 2008. 63 с.
7. **Лебедев Л.В., Закиров А.Я.** Производство и испытание первых российских поликристаллических алмазных резцов для буровых долот. *Пронефть*. 2017. № 4 (6). С. 32-35.
8. **Prokhorov V., Pozdnyakov A., Kravchuk K., Morokov E.** Development and research of characteristics of two-layer diamond plates for drilling tools. *Machines. Technologies. Materials*. 2019. XIII. 7. P. 294-297.
9. **Абатуров В.Г.** Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент. Тюмень: Нефтегаз. ун-т. 2007 С.238.
10. **Воробьева М.В., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Lomakin R.L., Blank V.D.** Новые возможности породоразрушающего инструмента, оснащенного алмазно-твердосплавными режущими элементами. *Вопр. материаловед.* 2020. № 1(101). С. 74-85. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-74-84.
11. **Кuffyrev P.Yu., Kotelnikova O.S., Laptev A.I., Sorokin M.N.** Методика испытаний алмазно-твердосплавных PCD-композиатов, применяемых для оснащения PDC буровых долот. *Цветные металлы*. 2017. № 11. С. 123-125. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-745-751.
12. **Zacny K.** Fracture and fatigue of polycrystalline-diamond compacts. *Soc. Petrol. Eng.* 2012. V. 27 (1). P. 145–157. DOI: 10.2118/150001-PA.
13. **García-Marro F., Mestra A., Kanyanta V., Maweja K., Ozbayrak tar S., Llanes L.** Contact damage and residual strength in polycrystalline diamond (PCD). *Diamond Related Mater.* 2016. N 65. P. 131–136. DOI: 10.1016/J.DIAMOND.2016.03.004.
14. **Витязь П.А., Хейфец М.Л., Сеньют В.Т., Колмаков А.Г.** Синтез поликристаллических алмазных материалов на основе детонационных алмазов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 7. С. 105 – 109.
15. **Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л., Чижик С.А., Солнцев Л.А., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Баринов С.М.** Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий. Минск: Белорус. наука. 2011. 283 с.
16. **Сеньют В.Т., Витязь П.А., Валькович И.В., Парницкий А.М., Ржецкий В.А.** Синтез композиатов на основе модифицированных кремнием детонационных наноалмазов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 4 – 9. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.13y.
17. **Жарченкова М.И., Perfilov S.A., Blank V.D.** Влияние углерода на физико-механические свойства композиционного материала на основе вольфрама с мартенситно-старееющей связкой. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 62 – 66. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.6y.
4. **Mukhopadhyay D.K., Bertagnolli K.E.** Understanding Sources of Residual Stress in PDC by X-Ray Diffraction. *Superabr. Ind. Rev. Finer Points*. Winter 2019/2020. P. 28.
5. **Basharin A.Yu., Lysenko I.Yu., Spitsyn B.V.** Transition of supercooled liquid carbon to metastable solid carbon: experiment, thermodynamics and mechanisms, application for diamond production. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2013. V. 56. N 5. P. 4-8 (in Russian).
6. **Ermolaev A.A., Laptev A.I.** Diamond polycrystalline materials. Mechanism and kinetics of polycrystalline diamond synthesis. М.: МИСиС. 2008. 63 p. (in Russian).
7. **Lebedev L.V., Zakirov A.Ya.** Production and testing of the first Russian polycrystalline diamond cutters for drill bits. *Proneft'*. 2017. N 4 (6). P. 32-35 (in Russian).
8. **Prokhorov V., Pozdnyakov A., Kravchuk K., Morokov E.** Development and research of characteristics of two-layer diamond plates for drilling tools. *Machines. Technologies. Materials*. 2019. XIII. 7. P. 294-297.
9. **Abaturov V.G.** Physical and mechanical properties of rocks and rock-breaking drilling tools. Tyumen: Neftgaz. Un-t. 2007. P. 238 (in Russian).
10. **Vorobyeva M.V., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Lomakin R.L., Blank V.D.** New possibilities of rock-breaking tools equipped with diamond-carbide cutting elements. *Vopr. Materialoved.* 2020. N 1(101). P. 74-85 (in Russian). DOI:10.22349/1994-6716-2020-101-1-74-84.
11. **Kuffyrev R.Yu., Kotelnikova O.S., Laptev A.I., Sorokin M.N.** Testing methods of diamond-carbide PCD composites used to equip PDC drill bits. *Tsvetn. Met-ly.* 2017. N 11. P. 123-125 (in Russian). DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-745-751.
12. **Zacny K.** Fracture and fatigue of polycrystalline-diamond compacts. *Soc. Petrol. Eng.* 2012. V. 27 (1). P. 145–157. DOI: 10.2118/150001-PA.
13. **García-Marro F., Mestra A., Kanyanta V., Maweja K., Ozbayrak tar S., Llanes L.** Contact damage and residual strength in polycrystalline diamond (PCD). *Diamond Rel. Mater.* 2016. N 65. P. 131–136. DOI: 10.1016/J.DIAMOND.2016.03.004.
14. **Vityaz P.A., Kheiyfetz M.L., Senyut V.T., Kolmakov A.G.** Synthesis of polycrystalline diamond materials based on detonation diamonds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2013. V. 56. N 7. P. 105 – 109 (in Russian).
15. **Vityaz P.A., Pyushchenko A.F., Kheiyfetz M.L., Chizhik S.A., Solntsev K.A., Kolmakov A.G., Alymov M.I., Barinov S.M.** Technologies of Constructional Nanostructured Materials and Coatings. Minsk: Belarus. Nauka. 2011. 283 p. (in Russian).
16. **Senyut V.T., Vityaz P.A., Val'kovich I.V., Parnitsky A.M., Rzhetsky V.A.** Synthesis of composites based on silicon-modified detonation nanodiamonds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 11. P. 4 – 9 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.13y.
17. **Zharchenkova M.I., Perfilov S.A., Blank V.D.** Carbon content influence on physico-mechanical properties of tungsten-based composites with maraging-based binder. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 11. P. 62 – 66 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.6y.

18. Шульженко А.А., Jaworska L., Соколов А.Н., Гаргин В.Г., Петасюк Г.А., Белявина Н.Н., Закора А.П., Супрун М.В., Коновал С.М., Капитанчук Л.М. Свойства алмазного поликристаллического композиционного материала, полученного в системе алмаз – графен – кремний. Сб. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Киев: Изд. ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. 2009. Т. 12. С. 167 – 175.
19. **Belnap J.D.** Sintering of Advanced Materials. UK: Woodhead Publishing. 2010. С. 389-414. DOI: 10.1533/9781845699949.3.389.
20. **Scott T.A.** The influence of microstructure on the mechanical properties of polycrystalline diamond: a literature review. *Adv. Appl. Ceram.* 2018. 117(3). P. 161–176. DOI: 10.1080/17436753.2017.1389462.
21. ГОСТ 9206-80. Государственный стандарт Союза ССР. Порошки алмазные. Технические условия.
18. **Shulzhenko A.A., Jaworska L., Sokolov A.N., Gargin V.G., Petasyuk G.A., Belyavina N.N., Zakora A.P., Suprun M.V., Konoval S.M., Kapitanchuk L.M.** Properties of diamond polycrystalline composite material obtained in the diamond – graphene – silicon system. Sb. Rock-breaking and metalworking tools - technique and technology of its manufacture and application. Kiev: Izd. ISM named after V.N. Bakul of the NAS of Ukraine. 2009. V. 12. P. 167-175 (in Russian).
19. **Belnap J.D.** Sintering of Advanced Materials. UK: Woodhead Publishing. 2010. P. 389–414. DOI: 10.1533/9781845699949.3.389.
20. **Scott T.A.** The influence of microstructure on the mechanical properties of polycrystalline diamond: a literature review. *Adv. Appl. Ceram.* 2018. 117(3). P. 161–176. DOI: 10.1080/17436753.2017.1389462.
21. GOST 9206-80 State standard of the USSR. Diamond powders. Specifications (in Russian).

*Поступила в редакцию 04.10.2021
Принята к опубликованию 13.10.2021*

*Received 04.10.2021
Accepted 13.10.2021*