

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.2:549.211

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.001

ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЬНЫХ И ТЕРМОБАРИЧЕСКИ СПЕЧЕННЫХ АЛМАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Владимир Александрович Плотников^{1†}, Денис Григорьевич Богданов²,
Александр Сергеевич Богданов³, Алексей Анатольевич Чепуров⁴,
Сергей Викторович Макаров⁵, Виктор Генрихович Винс⁶, Егор Игоревич Жимулев⁷

^{1, 2, 3, 5} Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049, Барнаул, Россия

^{4, 7} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, 630090, Новосибирск, Россия

⁶ ООО «ВЕЛМАН», ул. Зеленая Горка, 1/3, 630060, Новосибирск, Россия

¹ plotnikov@phys.asu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>

² bogdanov.d.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5890-4393>

³ alexsandr-bogdanov@mail.ru

⁴ achepurov@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0778-2653>

⁵ makarov@phys.asu.ru

⁶ vgvins@gmail.com

⁷ ezhimulev@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3100-7195>

Аннотация. Проведено исследование теплопроводности металлоалмазных композитов на основе алмазных порошков размером частиц 30–300 мкм. Композиционные металлоалмазные материалы получены в ходе термобарического спекания на беспрессовом аппарате высокого давления БАРС при температуре 1300 °С и давлении 5 ГПа. Разработанная методика проведения экспериментов позволила получить образцы объемом более 250 мм³. Установлено, что в отличие от монокристаллов алмаза, теплопроводность которых может достигать 2100 Вт/мК, теплопроводность металлоалмазного композита ниже и может достигать 490 Вт/мК. Характерно, что температурная зависимость коэффициента теплопроводности монокристаллов алмаза монотонно возрастающая, что соответствует фоннному механизму теплопередачи. Теплопроводность металлоалмазных композитов является величиной эффективной и представляет собой комбинацию низкой теплопроводности металла связки и высокой теплопроводности микронных алмазных частиц с учетом весовых параметров. Очевидно, что теплопроводность зависит от наличия примесных атомов, особенно азота, в решетке алмазных монокристаллов, на которых осуществляется рассеяние фононов. Однако, существенное влияние на теплопроводность оказывают границы раздела, на которых также происходит рассеяние фононов. При наличии карбидообразующего элемента в исходной шихте теплопроводность композита возрастает в связи с образованием алмазного каркаса и хорошей смачиваемости карбида железа медью. Если в монокристаллах алмаза коэффициент теплопроводности растет при повышении температуры, то в металлоалмазном композите в интервале 50–300 °С он снижается. Такая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, очевидно, связана с конкурирующим вкладом фоннного и электронного механизмов теплопроводности. Фоннный механизм приводит к росту теплопроводности кристалла алмаза, напротив, электронный механизм теплопереноса при повышении температуры снижает теплопроводность в связи с увеличением сопротивления медной связки.

Ключевые слова: теплопроводность, алмазные материалы, термобарическое спекание, микротвердость.

Для цитирования: Плотников В.А., Богданов Д.Г., Богданов А.С., Чепуров А.А., Макаров С.В., Винс В.Г., Жимулев Е.И. Теплопроводящие свойства монокристалльных и термобарически спеченных алмазных материалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 3. С. 287–294. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.001.

Original article

HEAT-CONDUCTING PROPERTIES OF SINGLE-CRYSTAL AND THERMOBARIC SINTERED DIAMOND MATERIALS

Vladimir A. Plotnikov^{1†}, Denis G. Bogdanov², Alexander S. Bogdanov³, Alexey A. Chepurov⁴, Sergey V. Makarov⁵, Victor G. Vince⁶, Egor I. Zhimulev⁷^{1, 2, 3, 5} Altai State University, Lenin Pr., 61, Barnaul, 656049, Russia^{4, 7} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Koptyuga Str., 3, Novosibirsk, 630090, Russia⁶ LLC «VELMAN», Zelenaya Gorka Str., 1/3, Novosibirsk, 630060, Russia¹ plotnikov@phys.asu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>² bogdanov.d.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5890-4393>³ alexandr-bogdanov@mail.ru⁴ achepurov@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0778-2653>⁵ makarov@phys.asu.ru⁶ vgvins@gmail.com⁷ ezhimulev@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3100-7195>

Abstract. A study was made of the thermal conductivity of metal-diamond composites based on diamond powders with a particle size of 30-300 μm . Composite metal-diamond materials were obtained in the course of thermobaric sintering on a non-press high-pressure apparatus BARS at a temperature of 1300 $^{\circ}\text{C}$ and a pressure of 5 GPa. The developed technique for conducting experiments made it possible to obtain samples with a volume of more than 250 mm^3 . It has been established that, unlike diamond single crystals, whose thermal conductivity can reach 2100 W/mK, the thermal conductivity of a metal-diamond composite is lower and can reach 490 W/mK. Characteristically, the temperature dependence of the thermal conductivity coefficient of diamond single crystals is monotonically increasing, which corresponds to the phonon mechanism of heat transfer. The thermal conductivity of metal-diamond composites is an effective value and is a combination of the low thermal conductivity of the binder metal and the high thermal conductivity of micron-sized diamond particles, taking into account weight parameters. Obviously, the thermal conductivity depends on the presence of impurity atoms, especially nitrogen, in the lattice of diamond single crystals, on which phonons are scattered. However, the interfaces, on which phonon scattering also occurs, have a significant effect on the thermal conductivity. With the presence of a carbide-forming element in the initial charge, the thermal conductivity of the composite increases due to the formation of a diamond skeleton and good wettability of iron carbide by copper. If in single crystals of diamond the coefficient of thermal conductivity increases with an increase in temperature, then in a metal-diamond composite it decreases in the range of 50-300 $^{\circ}\text{C}$. This dependence of the thermal conductivity on temperature is obviously related to the competing contribution of the phonon and electronic mechanisms of thermal conductivity. The phonon mechanism leads to an increase in the thermal conductivity of the diamond crystal; on the contrary, the electronic mechanism of heat transfer reduces the thermal conductivity with increasing temperature due to an increase in the resistance of the copper bond.

Keywords: thermal conductivity, diamond materials, thermobaric sintering, microhardness.

For citation: Plotnikov, V. A., Bogdanov, D. G., Bogdanov, A. S., Chepurov, A. A., Makarov, S. V., Vince, V. G. & Zhimulev, E. I. (2022). Heat-conducting properties of single-crystal and thermobaric sintered diamond materials. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(19), 287–294. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.001.

Введение

Среди уникальных свойств алмазных материалов можно выделить высокую твердость, которая у некоторых типов алмазов может достигать 80-130 ГПа [1], и высокую теплопроводность, достигающей у монокристаллов алмаза 2200 Вт/(мК) [2]. Совокупность таких свойств позволяет рассматривать алмаз, как перспективный материал для получения высокопрочных композиционных материалов, а также эффективных теплоотводящих панелей, рабо-

тающих при повышенных тепловых и механических нагрузках. Проблема требует своего разрешения также в связи с увеличением плотности активных элементов интегральных микросхем, в которых происходит выделение большого количества тепла, локализованного в малых объемах. Для этого нужно создавать теплоотводящие материалы с теплопроводностью более 400 Вт/(мК) [3]. Известно, что промышленный выпуск высокотеплопроводных материалов освоил интервал теплопроводности 410-620 Вт/(мК) [4].

В настоящее время создание высокотеплопроводных алмазных подложек необходимых размеров проблематично. Использование детонационного наноалмаза для теплопроводящих подложек ограничено его чрезвычайно низкой теплопроводностью 5-7 Вт/(мК) [5]. Столь низкое значение коэффициента теплопроводности связывают с изменением механизма распространения тепла при переходе от микрочастиц алмаза к наночастицам в термобарически спеченном материале. Для композиционного материала на основе микроразмерных частиц алмаза теплопроводность обусловлена действием обычного механизма распространения фононов. В композитах из наночастиц алмаза фононы движутся квазибаллистически, а основной вклад в снижение теплопередачи вносит граница, точнее рассеяние фононов на границе [6]. Пока не решают эту проблему и композиционные подложки из нано- и микрокристаллов [7]. Решение проблемы высокотеплопроводных подложек возможно в виде мозаичных алмазных структур, где границы раздела уничтожаются в ходе последующего нанесения алмазной пленки с помощью CVD-технологии [8]. Однако в настоящее время это достаточно сложная техническая задача, заключающаяся в проблеме консолидации алмазных фрагментов в структурно однородную подложку, требующая к тому же больших затрат времени [8]. Следует все же отметить, что исследования в этой области, направленные на создание гибридных подложек из поли- и монокристаллов алмаза с последующим ростом алмазной пленки, привели к положительному эффекту [9].

Особенно активно ведутся исследования в области создания алмазных композиционных материалов при воздействии высоких температур и давлений с участием металлической и неметаллической связок [3, 10, 11]. Как правило, спекание алмазных частиц при высоких давлениях и температурах ведет к увеличению теплопроводности. Характерно, что наблюдаемому повышению теплопроводности металлоалмазного композита медь-алмаз до 900 Вт/(мК) при повышении размера алмазных зерен до нескольких сотен микрон (200 мкм и более) сопутствует образование алмазного каркаса. Использование кремния в качестве компонента шихты наноалмаз-кремний позволяет получить высокопрочные алмазсодержащий материалы, микротвердость которого может достигать 70 ГПа [10]. Теплопроводность композитов, полученных спеканием алмазных час-

тиц размером 100-450 мкм с медной или серебряной связкой, содержащей карбидообразующие добавки бора, хрома или кремния, может достигать 640-970 Вт/(мК) [11].

В этой связи, исследование металлоалмазных композиционных материалов, содержащих в качестве матрицы металлы с высокой теплопроводностью [3] является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

Термобарическое спекание металлоалмазной шихты осуществлялось на беспрессовом аппарате «Разрезная сфера» (БАРС) [12] в Институте геологии и минералогии СО РАН. Спекание проводилось при давлении 4 ГПа и температуре 1300 °С. Время термобарического воздействия при достижении максимальных параметров спекания составляло 60 секунд. Режим спекания был следующим: подъем давления, нагрев исследуемого образца, выдержка при заданных P-T параметрах, и быстрое охлаждение. Время закалки составляло 2-3 сек., что обусловлено эффективным водяным охлаждением внутренней ступени пуансонов аппарата БАРС.

Для приготовления металлоалмазных композиций порошковый алмаз – металлическая связка использовали микрокристаллы природного и синтетического алмаза, а также порошковые химически чистые Cu, Fe. Природные алмазы были представлены обломками более крупных кристаллов размером около 300 мкм. Синтетические алмазы кубоктаэдрического габитуса марки ISD 30/40 размером 30-40 мкм представляли собой типичный продукт НРНТ синтеза. Микрокристаллы алмаза перед экспериментом были предварительно очищены в кислоте HCl для удаления посторонних частиц с поверхности. Далее, под микроскопом были отсортированы алмазы с минимальным количеством дефектов и включений.

Теплопроводность алмазных материалов измерялась на установке ИТ-λ-400, модернизированной с учетом фактора формы.

Экспериментальные результаты

В таблице 1. Приведены данные по измерению теплопроводности высококачественного монокристалла алмаза и синтезированного в каталитической среде Fe-Ni-C монокристалла в температурном интервале 50-250 °С.

Таблица 1. Теплопроводность алмазных материалов

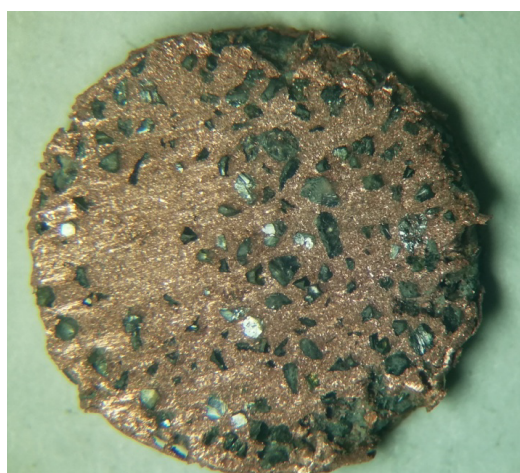
Table 1. Thermal conductivity of diamond materials

| Температура, °С | Монокристалл алмаза (система Fe-Al-C) | Монокристалл алмаза (система Fe-Ni-C) | Металлоалмазный композит Cu-C(Fe) |
|-----------------|---|--|--------------------------------------|
| | Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(мК) | | |
| 50 | 2089,0 | 606,7 | 468,0 |
| 75 | 1806,8 | 607,1 | 297,7 |
| 100 | 1739,6 | 584,0 | 265,7 |
| 125 | 2158,7 | 598,0 | 312,2 |
| 150 | 2334,1 | 681,9 | 322,5 |
| 175 | 2398,6 | 690,6 | 300,8 |
| 200 | 1956,2 | 717,4 | 249,7 |
| 225 | 2008,4 | 817,1 | 238,7 |
| 250 | 2271,3 | 744,7 | 237,84 |
| среднее | 2106,4 | 671,9 | 286,9 |

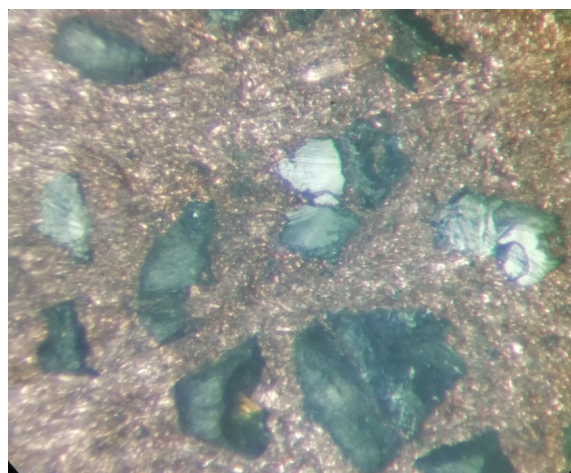
Как следует из данных табл.1, теплопроводность высококачественного монокристалла высока и при 50 °С составляет около 2089 Вт/(мК), в то время как теплопроводность синтетического кристалла значительно ниже – 606,7 Вт/(мК), а металлоалмазного композита заметно ниже – 486 Вт/мК. Характерна температурная зависимость коэффициента теплопроводности алмазных материалов. Если зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в монокристаллах примерно одинакова – при повышении температуры до 250 °С теплопроводность обеих монокристаллов монотонно растет, то температурная зависимость

коэффициента теплопроводности металлоалмазного композита снижается.

На рис.1 представлена структура термобарически спеченного при давлении 4 ГПа и температуре 1300 °С металлоалмазного композиционного материала. Исходная шихта представляла собой смесь порошка природного алмаза с размером частиц 200-300 мкм, порошка синтетического алмаза с размером частиц 30-40 мкм, карбидообразующего железа и порошка меди. Можно отметить, что крупные кристаллы алмаза отделены друг от друга промежутками меди, соизмеримыми с размерами алмазных частиц.



а)



б)

Рис.1. Структура термобарически спеченного металлоалмазного композита: а – внешний вид образца диаметром 8 мм, б – распределение алмазных частиц природного и синтетического алмаза в медной связке. Исходная шихта содержала карбидообразующий элемент – железо

Fig.1. Structure of thermobaric sintered metal-diamond composite: a – appearance of a sample with a diameter of 8 mm; b – distribution of diamond particles of natural and synthetic diamond in a copper bond. The initial mixture contained a carbide-forming element – iron

В табл.2 приведены данные измерения теплопроводности и микротвердости термобарически спеченных макроскопических алмазных порошков при температуре 1300 °С и давлении

4 ГПа. Размер частиц природного порошка алмаза составлял 200-300 мкм, а размер частиц синтетического алмаза – 30-40 мкм.

Таблица 2. Тепловые и прочностные характеристики термобарически спеченных синтетических и природных порошков алмаза (λ – коэффициент теплопроводности)

Table 2. Thermal and strength characteristics of thermobaric sintered synthetic and natural diamond powders (λ is the thermal conductivity coefficient)

| № п/п | Образец | Время спекания, минуты | Температура измерения, °С | λ , Вт/(мК) | Параметры термобарического спекания | Микротвердость, ГПа |
|-------|-------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---|---------------------|
| 1 | Cu-D(Fe) | 10 | 50 | 468,0 | P = 4 ГПа T = 1300 °С природные микроалмазы ~ 100% – железо | ~ 10-12 |
| 2 | Cu-D(Fe) | 10 | 50 | 477,5 | P = 4 ГПа T = 1300 °С природный алмазный порошок | ~ 10-12 |
| 3 | Cu-D(Cu,Fe) | 10 | 50 | 309,5 | P = 4 ГПа T = 1300 °С синтетический алмазный порошок | ~ 9-11 |
| 4 | Cu-D(Cu,Fe) | 10 | 50 | 340,6 | P = 4 ГПа T = 1300 °С природный – синтетический порошки алмаза (смесь 1:1) | ~ 9-11 |
| 5 | Cu-D(Cu) | 3 | 50 | 452,5 | P = 4 ГПа T = 1300 °С природный – синтетический порошки алмаза (смесь 1:1) | ~ 7-9 |
| 6 | Cu-D(Cu) | 1 | 50 | 485,6 | P = 4 ГПа T = 1300 °С природный – синтетический порошки алмаза (смесь 1:1) | ~ 7-9 |
| 7 | Cu-D(Cu) | 2 | 50 | 490,0 | P = 4 ГПа T = 1100 °С синтетический алмазный порошок | ~ 7-9 |

Как следует из приведенных в табл.2 данных, коэффициент теплопроводности термобарически спеченных металлоалмазных образцов (T = 1300 °С, давление – 4 ГПа) может достигать величины 485,6 Вт/(мК), что заметно выше теплопроводности как чистой меди, равной 390 Вт/(мК), так и тем боле теплопроводности железа, равной примерно 45 Вт/(мК).

Обсуждение экспериментальных данных

Высокое значение коэффициента теплопроводности высококачественного кристалла

алмаза и одинаково монотонный характер зависимости коэффициента теплопроводности от температуры свидетельствует о классическом фонном механизме теплопроводности в обоих монокристаллах. Снижение величины теплопроводности в монокристалле, синтезированном в Fe-Ni среде, очевидно, обусловлено влиянием примесных атомов на рассеяние фононов. Обобщенные данные по коэффициенту теплопроводности наших материалов, приведенные в табл.3, позволяют хорошо проследить особенности переноса тепла в зависимости от

размеров слагающих композиционный материал алмазных частиц. То есть в последовательности значений теплопроводности монокристалла алмаза, синтезированного кристалла алмаза, термобарически спеченного металлоал-

мазного композиционного материала, термобарически спеченного детонационного алмаза отчетливо проявляется влияние границ раздела на рассеяние фононов.

Таблица 3. Теплопроводность алмазных материалов

Table 3. Thermal conductivity of diamond materials

| Монокристалл алмаза (система Fe-Al-C) | Монокристалл алмаза (система Fe-Ni-C) | Металлоалмазный композит | Композит на основе детонационного алмаза |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--|
| 2089 Вт/мК | 606,7 Вт/мК | 485,6 Вт/мК | 9 -18 Вт/мК |

Характерно снижение теплопроводности при повышении температуры в металлоалмазных композитах. Согласно рис.1, алмазные частицы разделены друг от друга металлической (медной) средой, причем медные промежутки соизмеримы с размером алмазных частиц. В этой связи нельзя исключать влияние электронной подсистемы меди на эффективную теплопроводность металлоалмазного композита [11]. Согласно такому подходу теплопроводность композита при увеличении температуры должна увеличиваться, но при увеличении температуры растет электрическое сопротивление металлической связки, что приводит к снижению теплопроводности.

В табл.2 показано, что теплопроводность термобарически спеченные медь-алмазных композиционных материалов может достигать 490 Вт/мК, что значительно выше теплопроводности меди. Можно отметить, что на теплопроводность металлоалмазного композита оказывает влияние не только размер алмазных частиц [3], который в наших материалах варьировался в интервале 30-300 мкм, но и карбидообразующая добавка железа, позволившая достигнуть увеличения коэффициента теплопроводности до 460-480 Вт/мК. В цитируемой статье в качестве карбидообразующего металла использовался титан. Исходный гранулометрический состав синтетических кристаллов алмаза составлял – 30-40 мкм, а кристаллов природного алмаза – 200-300 мкм. Таким образом, как и в [3] максимальное значение теплопроводности металлоалмазных композитов Si-C можно получить при использовании монокристаллических алмазных порошков с размером алмазной частицы более 200 мкм. Очевидно, теплопроводность металлоалмазного композита является эффективной теплопроводностью, зависящей как от теплопроводности алмазной компоненты, так и от металла матрицы [3, 11, 13]. При

наличии карбидообразующего элемента в исходной шихте толщина карбидной оболочки не должна превышать 100 нм. В то же время карбидообразующая добавка в шихте способствует образованию алмазного каркаса, что приводит к повышению теплопроводности композита. Согласно модели дифференциальной эффективной среды [11] доля металлической составляющей в композите должно быть минимальной, а доля алмазной фазы в композите может достигать 90-95 % [3]. В отличие от композитов с изолированными алмазными частицами наиболее высокие значения теплопроводности получены в условиях формирования алмазного каркаса.

Заключение

Показано, что теплопроводность алмазных материалов при переходе от монокристаллов к металлоалмазным композитам значительно снижается, что обусловлено сменой преимущественного вклада в тепловое сопротивление рассеяния фононов на внутренних дефектах на преимущественное рассеяние на границе алмазный микроструктурный – металлическая связка. На примере металлоалмазных композитов продемонстрировано влияние на эффективную теплопроводность размера алмазных частиц, карбидообразующего элемента и медной матрицы.

Список литературы

1. Sumiya H., Toda N., Satoh S. Mechanical Properties of Synthetic Type IIa Diamond Crystal // *Diamond & Related Materials*. 1997. V. 6, N 12. P. 1841–1846.
2. Olson J.R., Pohl R.O., Vandersande J.W., Zoltan A., Anthony T.R., Banholzer W.F. Thermal conductivity of diamond between 170 and 1200 K

and the isotope effect // *Phys. Rev. B*. 1993. V. 47, N 22. P. 14850–14856.

3. Екимов Е.А., Суетин Н.В., Попович А.Ф. и др. Влияние микроструктуры и размера зерна на теплопроводность алмазных композитов, полученных при высоких давлениях // *Неорганические материалы*. 2008. Т. 44, № 3. С. 275–281.

4. Burgemeister E.A. Syndite-Its Thermal Conductivity above Room Temperature // *Ind. Diamond Rev.* 1980. P. 87–89.

5. Kidalov S.V., Shakhov F.M., Vul' A.Ya., Ozerin A.N. Grain-boundary heat conductance in nanodiamond composites // *Diamond & Related Materials*. 2010. 19. P. 976–980.

6. Шахов Ф.М., Мейлахс А.П., Эйдельман Е.Д. Изменение механизма распространения тепла при переходе от микро- к наночастицам // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42, № 5. С. 57–63.

7. Kidalov S.V., Shakhov F.M., Vul A.Ya. Thermal conductivity of sintered nanodiamonds and microdiamonds // *Diamond & Related Materials*. 2008. 17. P. 844–847.

8. Хмельницкий Р.А. Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера // *УФН*. 2015. Т. 185, № 2. С. 143–159.

9. Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Духновский М.П., Мучников А.Б., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Комбинированные подложки из поли- и монокристаллического CVD-алмаза для алмазной электроники // *Физика и техника полупроводников*. 2012. Т. 46, № 2. С. 274–277.

10. Екимов Е.А., Громницкая Е.Л., Мазалов Д.А. и др. Микроструктура и механические свойства компактов наноалмаз-SiC // *ФТТ*. 2004. Т. 46, № 4. С. 734–736.

11. Абызов А.М., Кидалов С.В., Шахов Ф.М. Термическое сопротивление границы раздела фаз композита алмаз-медь с высокой теплопроводностью // *Физика твердого тела*. 2012. Т. 54, Вып. 1. С. 196–201.

12. Chepurov A.I., Tomilenko A.A., Zhimulev E.I., Sonin V.M., Chepurov A.A., Kovyazin S.V., Timina T.Yu., Surkov N.V. The conservation of an aqueous fluid in inclusions in minerals and their interstices at high pressures and temperatures during the decomposition of antigorite // *Russ. Geol. Geophys.* 2012. 53(3). P. 234–246.

13. Bogdanov D., Plotnikov V., Bogdanov A., Makarov S., Vins V., Yelisseyev A., Lin V., Chepurov A. Consolidation of nanocrystals of detonation diamonds at high-pressure high-temperature sintering // *International Journal of*

Refractory Metals & Hard Materials. 2018. 71. P. 101–105.

Информация об авторах

В. А. Плотников – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.

Д. Г. Богданов – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Алтайского государственного университета.

А. С. Богданов – аспирант Алтайского государственного университета.

А. А. Чепуров – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

С. В. Макаров – доктор физико-математических наук, декан Алтайского государственного университета.

В. Г. Винс – доктор физико-математических наук, директор ООО "ВЕЛ-МАН".

Е. И. Жимулев – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

References

1. Sumiya, H., Toda, N. & Satoh, S. (1997). Mechanical Properties of Synthetic Type IIa Diamond Crystal. *Diamond & Related Materials*, 12(6), 1841–1846.

2. Olson, J. R., Pohl, R. O., Vandersande, J. W., Zoltan, A., Anthony, T. R. & Banholzer, W. F. (1993). Thermal conductivity of diamond between 170 and 1200 K and the isotope effect. *Phys. Rev. B*, 22(47), 14850–14856.

3. Ekimov, E. A., Suetin, N. V. & Popovich, A. F., et. al. (2008). Influence of microstructure and grain size on the thermal conductivity of diamond composites obtained at high pressures. *Neorganicheskiye materialy*, 3(44), 275–281. (In Russ.).

4. Burgemeister, E. A. (1980). Syndite-Its Thermal Conductivity above Room Temperature. *Ind. Diamond Rev.*, 87–89.

5. Kidalov, S. V., Shakhov, F. M., Vul', A. Ya. & Ozerin, A. N. (2010). Grain-boundary heat conductance in nanodiamond composites. *Diamond & Related Materials*, 19, 976–980.

6. Shakhov, F. M., Meilakhs, A. P. & Eidelman, E. D. (2016). Change in the mechanism of heat propagation during the transition from micro- to nanoparticles. *Pis'ma v ZhTF*, 5(42), 57–63. (In Russ.).
7. Kidalov, S. V., Shakhov, F. M. & Vul, A. Ya. (2008). Thermal conductivity of sintered nanodiamonds and microdiamonds. *Diamond & Related Materials*, 17, 844–847.
8. Khmel'nitsky, R. A. (2015). Prospects for Growing single-crystal large size diamond. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2(185), 143–159. (In Russ.).
9. Vikharev, A. L., Gorbachev, A. M., Dukhnovskiy, M. P., Muchnikov, A. B., Ratnikova, A. K. & Fedorov Yu.Yu. (2012). Combined poly- and single-crystal CVD diamond substrates for diamond electronics. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2(46), 274–277. (In Russ.).
10. Ekimov, E. A., Gromnitskaya, E. L. & Mazalov, D. A., et. al. (2004). Microstructure and mechanical properties of nanodiamond-SiC compacts, *Fizika tverdogo tela*, 4(46), 734–736. (In Russ.).
11. Abyzov, A. M., Kidalov, S. V. & Shakhov, F. M. (2012). Thermal resistance of the interface of a diamond-copper composite with high thermal conductivity, *Fizika tverdogo tela*, 1(54), 196–201. (In Russ.).
12. Chepurov, A. I., Tomilenko, A. A., Zhimulev, E. I., Sonin, V. M., Chepurov, A. A., Kovyazin, S. V., Timina, T. Yu. & Surkov, N. V. (2012). The conservation of an aqueous fluid in inclusions in minerals and their interstices at high pressures and temperatures during the decomposition of antigorite. *Russ. Geol. Geophys*, 53(3), 234–246.
13. Bogdanov, D., Plotnikov, V., Bogdanov, A., Makarov, S., Vins V., Yelisseyev A., Lin V. & Chepurov A. (2018). Consolidation of nanocrystals of detonation diamonds at high-pressure high-temperature sintering. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 71, 101–105.

Information about the authors

V. A. Plotnikov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University.

D. G. Bogdanov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, Altai State University.

A. S. Bogdanov – Graduate Student, Altai State University.

A. A. Chepurov – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

S. V. Makarov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean, Altai State University.

V. G. Vince – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the LLC «VELMAN».

E. I. Zhimulev – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.07.2022; одобрена после рецензирования 13.07.2022; принята к публикации 22.07.2022.

The article was received by the editorial board on 06 July 22; approved after reviewing on 13 July 22; accepted for publication on 22 July 22.