

А. А. Шульженко (г. Киев)
Е. Е. Ашкинази* (г. Москва)
А. Н. Соколов, Г. А. Петасюк, Л. И. Александрова,**
В. Г. Гаргин (г. Киев)
В. Г. Ральченко, Д. Н. Сovyк, В. И. Конов (г. Москва)
В. Н. Ткач, Н. Н. Белявина, В. С. Шамраева (г. Киев)
**jane50@list.ru*
***kybor@ism.kiev.ua*

Строение и свойства импактных алмазов Попигайского месторождения и изготовленных на их основе поликристаллов

Исследованы свойства импактных алмазов Попигайского месторождения в свободном состоянии и в составе компакта. Получены спектры микро-КРС исходных микропорошков и поликристаллов, спеченных при НРНТ-условиях как в присутствии активирующих процесс спекания добавок, так и без них. Определена твердость HV спеченных поликристаллов, изучены структурные изменения в кристаллической решетке алмазов в зависимости от условий спекания.

Ключевые слова: *импактный алмаз, высокое давление, спекание, твердость, морфометрический параметр, комбинационное рассеяние света.*

ВВЕДЕНИЕ

Импактные алмазы крупнейшего в мире Попигайского месторождения в Сибири является продуктом преобразования графита исходных гнейсов при ударе астероида о поверхность Земли 35 миллионов лет назад, образовавшего кратер диаметром до 100 км [1]. Многочисленные экспериментальные исследования импактных алмазов указывают на уникальность их физических свойств [2–4], поэтому интерес к изучению этого типа алмаза, особенно после получения известности Попигайского месторождения, не ослабевает до настоящего времени [5–9], при этом большое внимание уделяется изучению оптических свойств, фазового состава и кристаллогенезиса [10–13]. Как было установлено [2, 3], импактный алмаз, будучи параморфозой¹, наследует крупность исходного графита при общем сокращении объема зерен в среднем в 1,6 раза в основном за счет большего уплощения. Помимо зерен, сохранивших облик исходных графитовых кристаллов, весьма многочисленными являются неправильные сростки и агрегаты, а также зерна, ограниченные природными поверхностями, но не обладающие унаследованной границей [2].

¹ Параморфоза – продукт замещения одного минерала другим путем перестройки кристаллической структуры без изменения химического состава.

Размер зерен импактных алмазов, извлеченных из коренных пород, как правило, находится в пределах от 0,05 до 1,5–2 мм. Алмазы характеризуются различными оттенками желтой окраски, встречаются также прозрачные неокрашенные зерна, серые, черно-серые и черные.

Рентгенографическими исследованиями было показано, что важнейшей особенностью импактных алмазов является их поликристаллическое строение и текстурированность, связанные с тем, что они образованы упорядоченно расположенными кристаллитами. По фазовому составу они подразделяются на алмазы, состоящие исключительно из кубической фазы, а также алмазы, содержащие, кроме того, гексагональную фазу – лонсдейлит (чаще всего до 40 % (по массе)) [4–7, 13], причем он закономерно сростается с кубической фазой [14]. И в тех, и в других нередко присутствует как первичный, так и новообразованный графит.

Поскольку импактные алмазы представляют собой поликристаллические агрегаты кубической и гексагональной фаз высокого давления углерода, обладая в то же время унаследованной формой кристаллов графита, они могут рассматриваться как паракристаллы, а их кристаллографические элементы как параграницы, параребра и т. д. [6].

Методы оптической спектроскопии позволяют эффективно аттестовать образцы импактного алмаза [13]. В частности, спектры комбинационного рассеяния света (КРС) образцов природного алмаза существенно различаются [15], а набор дефектов, проявляющихся в спектрах фотолюминесценции импактного алмаза не характерен для алмазов иного происхождения [3]. Из-за наноструктурного строения импактных алмазов и присутствия в них лонсдейлита можно ожидать особенностей в их механических свойствах, которые, однако, недостаточно изучены. В [3] отмечается, что по прочностным характеристикам импактные алмазы во многих случаях превосходят кимберлитовые, они обладают также повышенной термостойкостью. В [16] указывается, что в конце 1970-х годов учеными из Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины установлено, что абразивная способность порошков импактных алмазов из Попигайского месторождения существенно выше, чем у синтетических и природных алмазов, а в [17] на основании экспериментальных данных, полученных при исследовании технологических свойств импактных алмазов, сделан вывод о том, что порошки импактного алмаза по прочности зерен соответствуют высококачественным синтетическим, по абразивной способности превышают природные и синтетические в 1,5–2 раза, а полученный на их основе сверхтвердый материал и изделия из него – не менее чем в 2–2,5 раза.

Цель настоящей работы – исследование свойств как исходного микропорошка алмаза Попигайского месторождения (далее в тексте – попигайский алмаз), так и изготовленных на их основе поликристаллов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования в данной работе являлся микропорошок попигайского алмаза, а для сравнительных исследований был выбран микропорошок синтетического алмаза НРНТ-синтеза, средний размер зерен которого сравним со средним размером зерен микропорошка попигайского алмаза.

Исследование состава и структуры проводили методом рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного анализов на дифрактометре ДРОН-3, используя линию возбуждения $\text{CuK}\alpha$ медного анода. Дифрактограммы образцов снимали в угловом интервале $2\theta = 22^\circ\text{--}120^\circ$ в дискретном режиме с шагом

сканирования $0,05^\circ$ и временем экспозиции в каждой точке 4 с. Фазовый анализ образцов и уточнение периодов кристаллической решетки выполнены с помощью аппаратно-программного комплекса, разработанного на физическом факультете Киевского национального университета им. Тараса Шевченко [18].

Спектры КРС были получены при помощи спектрометра T64000 (“Horiba-Jobin Yvon”, Франция), оснащенного конфокальным микроскопом BX41 (UV-Visible-NIR Olympus, Япония) с пространственным разрешением ~ 1 мкм. В качестве источника оптического возбуждения использовали линию излучения Ar-Kr-лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 514,5$ нм). Лазерный луч фокусировали на образце в точку диаметром ~ 1 мкм.

Пространственное спектральное картографирование исследованного образца проводили при перемещении автоматизированного столика с шагом $0,1$ мкм. Точность определения частоты спектральной линии составляла $\sim 0,15$ см^{-1} .

Электронно-микроскопические изображения алмазных порошков и отдельных частиц были получены с использованием растровых электронных микроскопов (РЭМ) Zeiss EVO 50 XVP, ULTRA Plus (“Carl Zeiss”, Германия) и JSM-65/10LV (JEOL Ltd., Япония).

Оценку морфометрических характеристик порошков проводили оригинальным компьютерно-аналитическим методом [19] на основе экспериментальных данных, полученных с использованием прибора DiaInspect.OSM (“Vollstadt Dimant GmbH”, Германия) [20], позволяющего в автоматическом режиме устанавливать значения (диагностировать) больше 20-ти характеристик абразивных порошков по результатам измерения пробы в количестве до 1999 (в новейшей версии – до 6000) зерен включительно. Кроме того, на основании полученных в результате диагностики данных проводили вычисление внешней удельной поверхности $F_{\text{уд}}$ порошков с использованием экстраполяционно-геометрического метода [21].

Абразивную способность микропорошков определяли на приборе УАС-2М [22] при обработке пластин корунда. Ее численное значение согласно применяемой методике [23] равно отношению массы сошлифованного корунда к массе затраченного алмазного микропорошка.

Спекание поликристаллов на основе алмазных порошков проводили в аппарате высокого давления типа “тороид” при давлении 8 ГПа и температуре 1450–1800 °С [24]. Для изготовления образцов были спрессованы нагреватели из графита с цилиндрическими гнездами, в которые помещали экран из ниобиевой фольги и заполняли шихтой, состоящей из алмазного микропорошка и активирующей процесс спекания добавки.

Твердость полученных поликристаллов определяли на микротвердомере ПМТ-3 с использованием в качестве индентора алмазной пирамиды Виккерса [25]. Величину твердости определяли по общепринятой формуле $HV =$

$$1,8544 \frac{P}{d^2},$$
 где P – нагрузка на индентор; d – среднее арифметическое двух

диагоналей отпечатка. Замеры твердости производили при нагрузке на индентор 4,9 Н. Размер диагоналей отпечатка замеряли с помощью оптического микроскопа Neophot (“Carl Zeiss”, Германия) при увеличении $\times 800$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый микропорошок попигайского алмаза преимущественно содержал зерна с черной и белой окраской. Изображения РЭМ кристаллов чер-

ного алмаза, приведенные на рис. 1, выявляют наличие субмикронной структуры, трещин и пор. Изредка встречаются бесцветные и серебристо-белые разновидности. Как показано в [6], зерна белого цвета практически не содержат графит, в отличие от зерен черного цвета, в которых содержание графита может достигать 50 %, а серебристо-белый цвет является следствием развития однонаправленной трещиноватости, обычно по границам двойников.

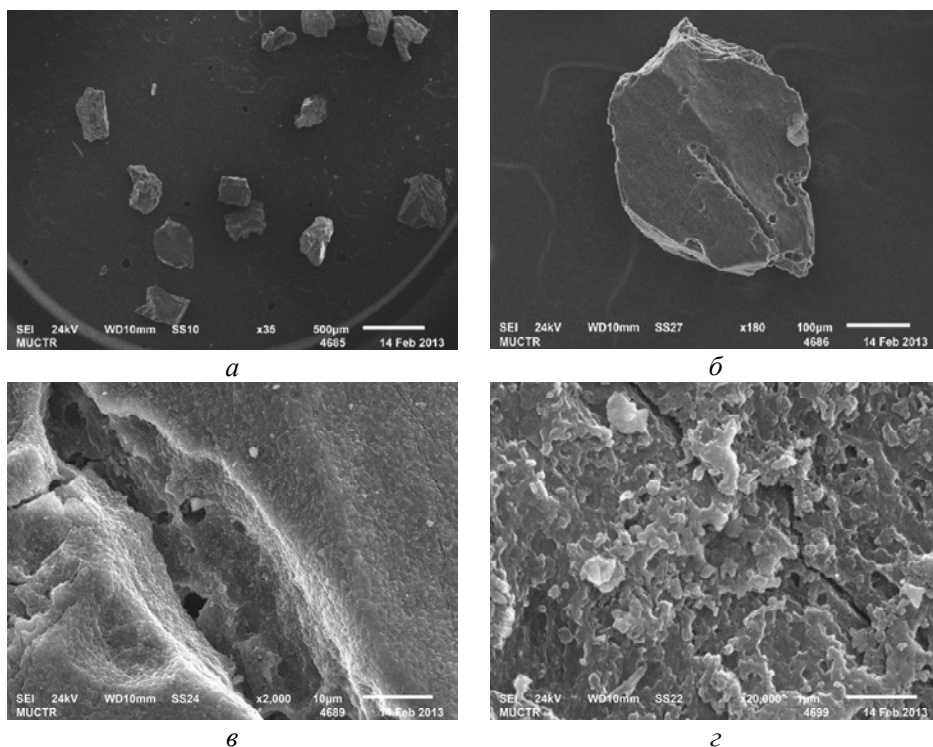


Рис. 1. РЭМ-изображения частиц попигайского алмаза (а) и отдельного черного зерна при различном увеличении (б–д).

Зерна попигайского алмаза имеют преимущественно пластинчатый габитус [8], в них прослеживается слоистая структура, т. е. имеет место наследование слоистой структуры исходного графита, что указывает на мартенситный тип перестройки решетки. По нашим данным рентгенофазового анализа основными фазами, из которых состоит зерно попигайского алмаза, являются кубический алмаз с размером кристаллической ячейки $a = 0,35543(72)$ нм и лонсдейлит – $a = 0,24893(0)$ нм, $c = 0,41147(0)$ нм.

Спектры КРС отдельного зерна попигайского алмаза (рис. 2), снятые в различных точках на его поверхности, указывают на присутствие лонсдейлита, однако пространственного разрешения КРС было недостаточно, чтобы выделить его в качестве чистой фазы, не смешанной с кубическим алмазом. Действительно, спектры КР лонсдейлита по литературным данным [12] содержат пик в области $1320\text{--}1327\text{ см}^{-1}$ с характерной компонентой в низкочастотном крыле. Мы наблюдаем похожий спектр с пиком в области 1331 см^{-1} , сдвинутым в сторону низких частот по отношению к характерному для алмаза положению $1332,5\text{ см}^{-1}$ за счет суперпозиций сигналов от алмаза и лонсдейлита. В спектрах присутствует также слабая полоса в области 1580 см^{-1} , связанная с графитом.

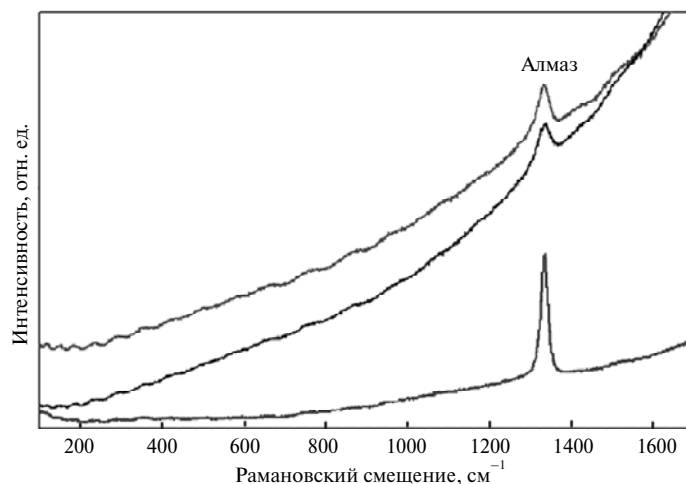


Рис. 2. Спектры микро-КРС от микропорошка попигайского алмаза, снятые на поверхности трех различных зерен микропорошка попигайского алмаза.

Как известно, примеси, содержащиеся в алмазе, дают важную информацию об условиях его формирования. В результате рентгенофазового анализа попигайского алмаза установлено, что как основная примесь присутствует соединение $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$, указывающее на образование алмаза в копткляститной породе² [6]. На дифрактограмме присутствовал также ряд пиков, которые идентифицировать не удалось.

Важной характеристикой алмаза, имеющей прямое отношение к условиям его образования является размер зерен. Как уже выше отмечалось, алмаз всегда наследует крупность зерен исходного графита. На изображении РЭМ участка зерна алмаза белого цвета (рис. 3), видны мелкие кристаллиты размером от 30 до 200 нм в поперечнике.

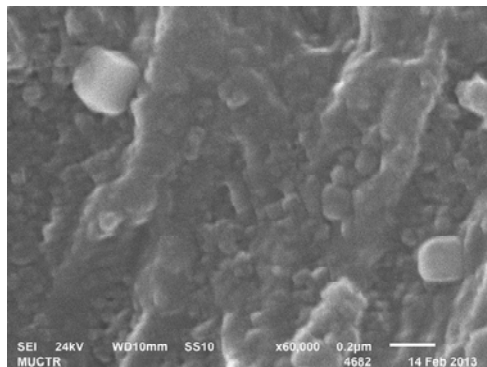


Рис. 3. РЭМ-изображение участка белого зерна попигайского алмаза, содержащего кристаллиты размером менее 200 нм.

Морфометрическая аттестация микропорошков алмазов НРНТ-синтеза и попигайского включала следующую совокупность параметров [26]: минимальный (F_{\min}) и максимальный (F_{\max}) диаметры Feret, мкм; компактность (форм-фактор округлости фактической проекции зерна) f_c ; эллиптичность El ; Feret-удлинение Fe (аналог коэффициента формы по ДСТУ 3292 и ГОСТ 9206–80); шероховатость зерен Rg ; эквивалентный диаметр зерна d_s , мкм; общая площадь проекции частицы A_r , мкм²; относительная доля светлой части в общей

площади проекции зерна A_{lg} ; периметр истинного изображения p , мкм; периметр выпуклого изображения p_c , мкм; удельный периметр $P_{уд}$, мкм⁻¹; средний размер зерна d_c , мкм; коэффициент уплощения зерен (Feret-

² Материал исходных горных пород, раздробленный в различной степени, перемешанный и перемещенный при ударе (разновидность взрывной аллохтонной брекчии) с размером отдельных обломков менее 2 мм.

уплощение зерен) $K_{упл}$; количество режущих кромок n , штук; угол заострения режущих кромок φ , град; число зерен в одном карате N , шт.; внешняя удельная поверхность $F_{уд}$, м²/кг. Результат сравнительной морфометрической аттестации исследуемых микропорошков попигайского алмаза и алмаза НРНТ-синтеза приведен в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические параметры исследуемых микропорошков, их средние значения и показатели адекватности средних значений по однородности и стабильности

Параметр	Попигайский алмаз			Алмаз НРНТ-синтеза		
	Среднее	Показатель адекватности		Среднее	Показатель адекватности	
		по стабильности	по однородности		по стабильности	по однородности
F_{max}	45,80	0,09605	0,3933	34,89	0,27055	0,6656
F_{min}	27,84	0,09877	0,3766	25,08	0,28592	0,6691
f_c	1,5331	0,27286	0,4750	1,3185	0,53932	0,7071
El	1,7289	0,15141	0,2931	1,3764	0,26089	0,4363
F_e	1,6807	0,21059	0,3569	1,4046	0,33802	0,5098
$K_{упл}$	0,8131	0,74909	0,8209	0,6655	0,65039	0,8499
Rg	1,0717	0,87598	0,6356	1,0539	0,92179	0,7483
d_c , мкм	36,82	0,10875	0,4244	29,98	0,28820	0,6494
d_s , мкм	32,90	0,11019	0,4268	28,02	0,29686	0,6272
A_r , мкм ²	1101	0,01382	0,2372	637,2	0,12450	0,5290
p , мкм	128,5	0,10214	0,3711	101,2	0,28509	0,6746
p_c , мкм	119,3	0,10749	0,3909	95,9	0,29291	0,6867
$P_{уд}$, 1/м	0,2103	0,12940	0,4213	0,1737	0,13041	0,5041
A_{lg}	0,2778	0,07970	0,3307	0,2395	0,11422	0,4017
$F_{уд}$, м ² /кг	299,56			198,83		
N , тыс. шт.	3417,8			7674,3		
n	6,8			9,0		
φ	84,80			103,09		

Как видим, микропорошок попигайского алмаза отличается бóльшим на 22 % коэффициентом уплощения зерен $K_{упл}$ (т. е. они имеют более уплощенную форму по сравнению с микропорошком синтетического алмаза), бóльшим на 21 % значением удельного периметра $P_{уд}$, меньшим на 2,2 единицы количеством режущих кромок n и меньшим на 18,29° углом их заострения φ , а также в 1,5 раза большей внешней удельной поверхностью $F_{уд}$. Такая совокупность морфометрических параметров обеспечивает высокую абразивную способность микропорошка попигайского алмаза, которая значительно выше (7,8 усл. ед.), чем у микропорошка НРНТ-алмаза (4,7 усл. ед.).

Для оценки твердости материала были изготовлены из микропорошка попигайского алмаза в условиях высокого давления и температуры ($p = 7,0$ ГПа, $T = 1450$ °С, $\tau = 60$ с) поликристаллические образцы. Исходная для спекания шихта состояла в одном случае из микропорошка алмаза без добавок, в другом – дополнительно содержала в качестве активирующей процесс спекания добавки кремний или кобальт. На рис. 4 показан внешний вид спеченного

образца, а на рис. 5 – его же изображение, полученное во вторичных электро-нах при разном увеличении.

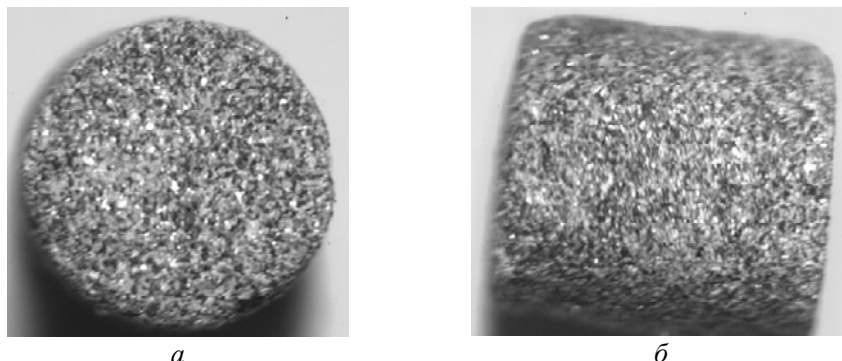


Рис. 4. Оптический снимок поликристалла с микропорошком попигайского алмаза, спеченного при высоком давлении и температуре: вид сверху (а), вид сбоку (б).

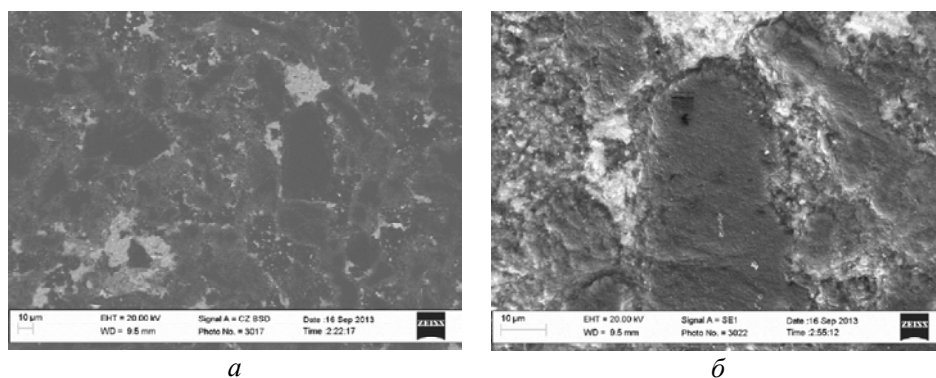


Рис. 5. РЭМ-изображение участка спеченного поликристалла: $\times 1000$ (а), $\times 3000$ (б); темная область – алмаз, светлая – активирующая добавка.

Изменение параметров решетки фазовых составляющих микропорошка попигайского алмаза в результате спекания при высоком давлении 7,0 ГПа и времени $\tau = 60$ с без и в присутствии активирующих процесс спекания добавок иллюстрирует табл. 2.

Как видно из результатов РФА микропорошка алмаза Попигайского месторождения, спекание в условиях НРНТ как с использованием активирующей добавки, так и без нее приводит к значительному увеличению постоянной решетки алмаза кубической сингонии и лонсдейлита. Можно предположить, что это является результатом внедрения (в условиях НРНТ) неконтролируемых примесей, приводящих к деформации кристаллической решетки и присутствия в ней большого количества дефектов [27]. Особое внимание обращает на себя результат, полученный при спекании в присутствии кобальта. В этом случае наблюдается аномально сильное изменение параметра с кристаллической решетки лонсдейлита. Эти изменения столь существенные, что возникает проблема идентификации зафиксированной после НРНТ-воздействия фазы как лонсдейлита.

Также измеряли спектры КРС на зернах микропорошка попигайского алмаза, на поликристаллах, спеченных из микропорошка при давлении $\sim 7,0$ Па и температуре 1450 °С, и на поликристаллах, спеченных в условиях НРНТ в присутствии активирующих добавок кремния ($p \approx 7,0$ ГПа, $T = 1450$ °С) и

кобальта ($p \approx 0,1$ ГПа, $T = 1800$ °С). Во всех случаях измерения проводили в трех различных произвольно выбранных точках. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 2. Параметры кристаллической решетки зерен попигайского алмаза в зависимости от условий спекания

Состав	Условия спекания	Параметры кристаллической решетки, нм		
		С _{алмаз}	С _{лонсдейлит}	
		<i>a</i>	<i>a</i>	<i>c</i>
Микропорошок алмаза	Исходный	0,35543(72)	0,24899(0)	0,41147(0)
Спеченный микропорошок алмаза	$T = 1450$ °С;	0,35705(4)	0,25215(32)	0,41439(199)
Спеченный микропорошок с добавкой Si	$T = 1450$ °С;	0,35716(30)	0,25162(56)	0,41525(172)
Спеченный микропорошок с добавкой кобальта	$T = 1800$ °С;	0,35656(0)	0,25221(0)	1,23560(0) (???)

Таблица 3. Спектральные положения и полуширины колебаний в спектрах КРС для исходных и спеченных импактных порошков

Образец	Точка	Частота, см ⁻¹	Полуширина, см ⁻¹
Микропорошок попигайского алмаза (исходный)	1	1329,8	31,7
	2	1331,8	20,6
	3	1331,5	35,0
После спекания микропорошка в условиях НРНТ	1	1328,2	25,1
	2	1331,9	27,4
	3	1330,3	38,1
После спекания в условиях НРНТ микропорошка с добавкой кремния	1	1316,3	95,2
	2	1328,6	40,2
	3	1323,3	91,4

Большее значение полуширины алмазной линии для поликристалла, спеченного с использованием кремния в качестве активирующей добавки, свидетельствует о сильном структурном разупорядочении решетки, а также о возможной пластической деформации зерен попигайского алмаза. В пользу такого вывода свидетельствуют данные, полученные в [28]. Обращает на себя внимание также низкочастотный сдвиг положения пика КРС после спекания с добавкой Si в область, характерную только для лонсдейлита.

Твердость спеченных образцов попигайского алмаза определяли при нагрузке на наконечник 4,9 Н на участке, где видны либо отдельные алмазные зерна, либо области мелкокристаллических агломератов. Как видно на рис. 5, *б*, на поверхности образца наблюдается крупное (~ 40 мкм) алмазное зерно. Его твердость *HV* составила 140–145 ГПа по замерам трех отпечатков (рис. 6, *а*) (размер диагонали отпечатка $d = 8,0$ – $8,2$ мкм).

В большинстве замеров отпечатков в областях кристаллической алмазной массы и отдельных зерен $d = 11,0\text{--}11,3$ мкм, что соответствует твердости 73–77 ГПа (см. рис. 6, б).

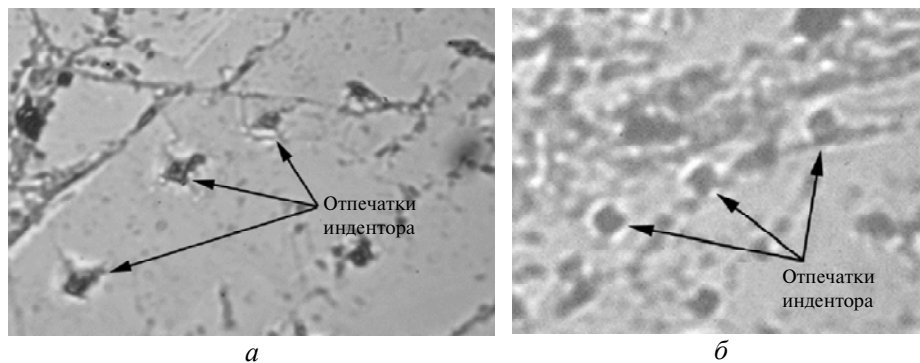


Рис. 6. Отпечатки индентора Виккерса на поверхности образца: *a* – на крупном зерне ($d \approx 8$ мкм); *б* – в области мелкокристаллических агломератов ($d \approx 11$ мкм).

Таким образом, обобщая всю совокупность полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод о перспективности применения микропорошка алмаза Попигайского месторождения в различных видах инструмента.

ВЫВОДЫ

Пластинчатые зерна попигайского алмаза состоят из мелких кристаллитов размером 30–200 нм. Фазовые составляющие зерна – алмаз кубической сингонии с параметром кристаллической ячейки $a = 0,35543(72)$ нм и алмаз гексагональной сингонии (лонсдейлит) с параметрами кристаллической ячейки $a = 0,24893(0)$ нм, $c = 0,41147(0)$ нм). В зернах явно прослеживается слоистая структура, т. е. имеет место наследование слоистой структуры исходного графита.

В результате морфометрической аттестации установлено, что микропорошок попигайского алмаза отличается большим коэффициентом уплотнения, максимальным значением удельного периметра, наименьшим углом заострения режущих кромок и минимальным их количеством и имеет в 1,5 раза большую внешнюю удельную поверхность по сравнению с синтетическим алмазом, что в конечном итоге обеспечивает его высокую абразивную способность.

Из сравнительного анализа спектров рентгеновской дифракции и спектров микро-КРС, полученных от исходных микропорошков и поликристаллов попигайского алмаза, спеченных при НРНТ-условиях как в присутствии активирующих процесс спекания добавок, так и без них, следует, что при спекании в условиях НРНТ имеет место сильное структурное разупорядочение материала, а также пластическая деформация, что проявляется в уширении линий КРС и изменении параметров кристаллической решетки. Подобное явление ранее наблюдали в алмазе различного генезиса (природного, синтетического статического и CVD-синтеза), подвергнутого баротермической обработке [28–31].

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины докт. физ.-мат. наук В. В. Стрельчуку и канд. физ.-мат. наук А. С. Николенко за предоставленные результаты исследований образцов методом КРС.

Досліджено властивості імпактних алмазів Попігайського родовища у вільному стані і в складі компакта. Отримано спектри мікро-КРС вихідних мікропорошків і полікристалів, спечених при НРHT-умовах як у присутності активуючих процес спікання добавок, так і без них. Визначено твердість HV спечених полікристалів, вивчені структурні зміни у кристалічній решітці алмазів в залежності від умов спікання.

Ключові слова: імпактний алмаз, високий тиск, спікання, твердість, морфометричний параметр, комбінаційне розсіювання світла.

The properties of impact diamond of Popigai field in the free state and as part of the compact. The spectra of the micro-Raman source micropowders and polycrystalline sintered at НРHT conditions in the presence of activating the sintering additives, and without them. Defined Hardness HV sintered polycrystalline studied structural changes in the lattice of diamond, depending on the sintering conditions.

Keywords: impact diamond, high pressure sintering, hardness, morphometric parameters, Raman scattering.

1. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попігайський метеоритний кратер // Сов. геология. – 1971. – № 6. – С. 143–147.
2. Масайтис В. Л., Шафрановский Г. И., Езерский В. А., Решетняк Н. Б. Импактные алмазы в уреилитах и импактитах // Метеоритика. – 1990. – № 49. – С. 180–196.
3. Вальтер А. А., Еременко Г. К., Квасница В. Н., Полканов Ю. А. Ударно-метаморфогенные минералы углерода. – К.: Наук. думка, 1992. – 172 с.
4. Вишневицкий С. А., Фирсов Л. В. Импактные алмазы: их особенности, происхождение и значение. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1997. – 106 с.
5. Каминский Ф. В., Блинова К. К., Галимов Э. М. и др. Поликристаллические агрегаты алмаза с лонсдейлитом из россыпей Якутии // Минерал. журнал. – 1985. – 7, № 1. – С. 27–36.
6. Алмазоносные импактиты Попігайской астроблемы / Под ред. В. Л. Масайтиса. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. – 179 с.
7. Koeberl C., Masaitis V. L., Shafranovsky G. I. et al. Diamonds from the Popigai impact structure, Russia // Geology. – 1997. – 25, N 11. – P. 967–970.
8. Kvasnytsya V., Wirth R. Micromorphology and internal structure of apographitic impact diamonds: SEM and TEM study // Diamond Relat. Mater. – 2013. – 32. – P. 7–16
9. El Goresy A., Gillet Ph., Mostefaoui S. et al. A transparent, very hard, dense and unusually disordered form of carbon in heavily shocked gneisses from Popigai, Russia: petrographic settings and comparison with a similar phase in shocked gneisses from the Ries // Lunar and Planetary Sci. Conf., 33th, Houston, TX, 11–15 Mar., 2002, Abstracts, #1031 (CD-ROM).
10. Phelps A. W. Raman spectroscopic analysis of microdiamonds from the Popigai crater // Lunar and Planetary Sci. Conf., 28th, Houston, TX, 17–21 Mar., 1997, Abstracts. – www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1772.pdf
11. Pratesi G., Lo Giudice A., Vishnevsky S. et al. Cathodoluminescence investigations on the Popigai, Ries, and Lappajärvi impact diamonds // Am. Mineral. – 2003. – 88. – P. 1778–1787.
12. Smith D. C., Godard G. UV and VIS Raman spectra of natural lonsdaleites: Towards a recognised standard // Spectrochim. Acta, Part A: Mol. and Biomol. Spectrosc. 2009. – 73. – P. 428–435.
13. Yelissejev A., Meng G. S., Afanasyev V. Optical properties of impact diamonds from the Popigai astrobleme // Diamond Relat. Mater. – 2013. – 37. – P. 8–16.
14. Горгоцкая Л. И., Квасница В. Н., Надеждина-Бондаренко Е. Д. Ориентационные соотношения графит–лонсдейлит–алмаз при природных превращениях в ударных волнах // Минерал. журнал. – 1989. – 11, № 1. – С. 26–33.
15. Решетняк Н. Б., Езерский В. А. Комбинационное рассеяние света в природных алмазах // Там же. – 1990. – 12, № 5. – С. 3–9.
16. Афанасьев В. П., Похиленко Н. П. Попігайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий // Инноватика и экспертиза. Науч. тр. Федер. гос. бюджет. науч. учреждения “Науч.-исслед. ин-т – Респ. исслед. науч.-консульт. центр экспертизы” (ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ). – М.: ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2013. – Вып. 1(10). – С. 9–15.

17. Бочко А. В., Вальтер А. А., Гурский Д. С., Еременко Г. К. Технологические свойства импактных алмазов // Минерал. журн. – 1999. – 21, № 2/3. – С. 8–12.
18. Марків В. Я., Белявіна Н. М. Апаратно-програмний комплекс для дослідження полікристалічних речовин за їх дифракційними спектрами // Тез. доп. II міжнар. конф. “КФМ 97”. – Львів, 1997. – С. 260–261.
19. Петасюк Г. А. Діагностика морфометричних характеристик порошків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень // Відбір і обробка інформації. – 2009. – Вип. 30 (106). – С. 138–145.
20. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Ind. Diamond Rev. – 2006. – N 1. – P. 42–47.
21. Петасюк Г. А. Экстраполяционно геометрический метод измерения внешней удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Измерительная техника. – 2008. – № 1. – С. 59–64.
22. Никитин Ю. И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1984. – 264 с.
23. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. ДСТУ 3292–95. – К.: Держстандарт України, 1995. – 71 с.
24. Аишкина Е. Е., Шульженко А. А., Гаргин В. Г. и др. Алмазный поликристаллический композиционный материал с дисперсно-упрочненной добавкой на основе никеля // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 95–98.
25. Глазов В. М., Вигдорович В. Н. Микротвердость металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
26. Богатырева Г. П., Петасюк Г. А., Базалий Г. А., Шамраева В. С. К вопросу однородности алмазных микропорошков по морфологическим характеристикам // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 2. – С. 71–81.
27. Шульженко А. А., Товстоган В. М., Шишкин В. А. и др. Физико-механические свойства и субструктура поликристаллических алмазов // Влияние высоких давлений на структуру и свойства сверхтвердых материалов. Сб. науч. тр. – К.: ИСМ АН УССР, 1985. – С. 8–12.
28. Соколов А. Н., Шульженко А. А., Гаргин В. Г. и др. Структура и физико-механические свойства CVD-алмаза различного кристаллического совершенства в материале гибридайт // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 2. – С. 29–40.
29. Yan C., Mao H., Li W. Ultrahard diamond single crystals from chemical vapor deposition // Phys. Status Solidi (a). – 2004. – 201, N 4. – P. R25–R27.
30. Соколов А. Н., Шульженко А. А., Гаргин В. Г. и др. Структура и твердость монокристаллов природного алмаза октаэдрического габитуса в зависимости от условий баротермической обработки // Сверхтв. материалы. – 2012. – № 3. – С. 26–33.
31. Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Шишкин В. А., Бочечка А. А. Поликристаллические материалы на основе алмаза / Отв. ред. Н. В. Новиков; АН СССР. Ин-т сверхтвердых материалов. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.

Ин-т сверхтвердых материалов

Поступила 18.02.14

им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Ин-т общей физики

им. А. М. Прохорова РАН

Российский химико-технологический ун-т

им. Д. И. Менделеева

Киевский национальный ун-т

им. Тараса Шевченко