Листи до редакції

УДК 620.3(075.8):621.9.02

С. А. Клименко¹, М. О. Бондаренко^{2, *}, С. О. Івахненко^{1, **},

В. В. Лисаковський¹, М. Ю. Копєйкіна¹, Т. В. Коваленко¹, О. О. Заневський¹

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна ²Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна *m.bondarenko@chdtu.edu.ua **sioz@ismv13.kiev.ua

Шорсткість поверхні та латеральні сили на гранях монокристалів алмазу типу *lb* та *lla*

Представлено результати досліджень висотних параметрів шорсткості й латеральних сил на гранях куба та октаедра монокристалів алмазу і побудовано карти їхнього розподілу. Дослідження проводили методами атомно-силової та латерально-силової мікроскопії на зразках монокристалів алмазу типу Ib та IIa, отриманих з використанням HTHP-методу вирощування. Встановлено, що для монокристалів алмазу типу Ib шорсткість поверхні (за параметром Ra) граней куба в 3,3 рази, а граней октаедра в 1,5 рази менше ніж для монокристалів алмазу типу IIa; для монокристалів алмазу типу Ib значення латеральних сил на гранях куба у середньому в 3,5 рази менші, а на гранях октаедра у середньому в 9,5 рази більші ніж для монокристалів алмазу типу IIa. Отримані результати свідчать, що рівень латеральних сил на гранях монокристалів алмазу зумовлений шорсткістю їхніх поверхонь.

Ключові слова: типи монокристалів алмазу, грані куба та октаедра, шорсткість поверхні, латеральні сили.

Гоніометричними вимірами на крупних монокристалах синтетичного алмазу встановлено декілька простих форм, які найчастіше зустрічаються – це куб та октаедр. Розвиток граней різних форм на монокристалах зумовлений термодинамічними умовами синтезу, тому і стан різних граней – їхні шорсткість та триботехнічні властивості, наприклад, рівень та розподіл латеральних сил, суттєво різняться.

В сучасній технічній літературі практично відсутні результати досліджень шорсткості та триботехнічних властивостей різних граней монокристала алмазу безпосередньо після його формування, тобто без будь-якого механічно-

© С. А. КЛИМЕНКО, М. О. БОНДАРЕНКО, С. О. ІВАХНЕНКО, В. В. ЛИСАКОВСЬКИЙ, М. Ю. КОПЄЙКІНА, Т. В. КОВАЛЕНКО, О. О. ЗАНЕВСЬКИЙ, 2025 го оброблення. Водночас ця інформація дуже корисна для визначення умов наступного виготовлення з такого монокристалу потрібного виробу – рівень мікронерівностей на поверхнях впливає на призначення припуску на оброблення, а рівень та розподіл латеральних сил тісно корелює з коефіцієнтом тертя на досліджуваній поверхні та характеризує енерговитрати (температуру) на процес оброблення.

Метою цієї роботи було експериментальне дослідження висоти нерівностей, рівня та розподілу латеральних сил на гранях куба і октаедра монокристалів алмазу типу Ib та IIa.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили на зразках монокристалів алмазу типів Ib та IIa розміром 1,5–3 мм, виготовлених в розчин-розплавних системах Fe–Ni–C і Fe–Al–C відповідно, з використанням НТНР-методу вирощування (рис. 1).



Рис. 1. Монокристали алмазу типу Іb (a) і Па (в) та схеми їхніх граней (б і с відповідно) з ділянками, на яких вимірювали висотні параметри шорсткості та латеральні сили.

Шорсткість поверхні та рівень латеральних сил на розвинутих та структурно-досконалих гранях куба та октаедра монокристалів алмазу, а також їхній розподіл на цих гранях було досліджено з використанням атомносилового мікроскопу (ACM) NT-206V, який працював у режимі контактної ACM в комбінації з режимом латерально-силової мікроскопії [1–3].

Дослідження проводили за нормальних умов (p = 1 атм, T = 18 °C, вологість – 54 %). Об'єкти, що досліджували, розміщали на предметному столику АСМ, де проводили їхнє сканування в статичному режимі. Були використані кремнієві зонди Ultrasharp CSC37 ("Mikromasch", Німеччина), модифіковані кремнієвим покриттям, які призначені для дослідження надтвердих матеріалів [4], що розташовані на пружному кантилевері. Вибір необхідної ділянки на поверхні проводили системою мікропозиціонування за допомогою вбудованого оптичного довгофокусного мікроскопа Logitech ("Logitech Inc.", США), максимальний розмір досліджуваної ділянки – 13×13 мкм. Дослі-

дження проводили по трьох ділянках у центральній частині кожної грані та на ділянках біля ребер монокристалів.

За ступенем вигину кантилеверу у вертикальній площині визначали шорсткість досліджуваної поверхні, а за значенням його бічного вигину – латеральні силі тертя. Водночас сукупність ординат та значень латеральної сили у кожної точці досліджуваної поверхні дозволяють сформувати просторовий розподіл цих показників. Абсолютна похибка вимірювань мікронерівностей складає ±0,5 нм (~ 6 %), а для латеральних сил ±5 нм (~ 2%) для обох типів монокристалів алмазу.

Також було визначено відношення площі досліджуваної поверхні граней азмазу з врахуванням наявності мікронерівностей до її номінального значення.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Типові приклади профілограм поверхонь, що досліджували, та розподілу латеральних сил на гранях куба і октаедра монокристалів алмазу наведено на рис. 2.



Рис. 2. Приклад профілограм (*a*, *б*) та розподілу латеральних сил (*b*, *c*) на гранях монокристала алмазу типу *Ib*: *a*, *b* – грань куба; *б*, *c* – грань октаедра.

Значення шорсткості (за параметром *Ra*, нм) досліджених ділянок поверхні граней монокристалів алмазу наведено в табл. 1.

Отримані значення латеральних сил (в умовних одиницях) на гранях монокристалів алмазу наведено в табл. 2.

n	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

	<i>Ra</i> , нм, монокристала				
Ділянка грані	типу I <i>b</i>	типу II <i>a</i>	типу I <i>b</i>	типу II <i>a</i>	
	грань – куб		грань – октаедр		
1	3,70	22,90	21,50	33,20	
2	18,00	42,80	1,20	25,60	
3	4,50	17,40	23,50	12,20	
Біля ребра	7,70	25,90	18,70	-	
Середнє значення	8,50	28,00	16,22	23,67	
$S_{\rm pean.}/S_{\rm HOM.}$	600	500	650	355	

S_{pean}/S_{ном} – відношення реальної площі досліджуваної поверхні до її номінального значення.

	Латеральні сили, ум. од., на гранях монокристала алмазу				
Ділянка грані	типу I <i>b</i>	типу II <i>a</i>	типу I <i>b</i>	типу II <i>a</i>	
	грань – куб		грань – октаедр		
1	740-800	550-1000	1600–1900	700-840	
2	120-280	195–215	185-205	140-250	
3	140-240	600–930	1280-1850	130–160	
Біля ребра	300-600	940–960	360-540	_	
Середнє	100-300	500-900	1440–1875	135-205	
значення					

Таблиця 2. Латеральні сили на гранях монокристала алмазу

ВИСНОВКИ

Для монокристалів алмазу типу Ib шорсткість поверхні (за параметром R_a) граней куба в 3,3 рази, а граней октаедра в 1,5 рази менше ніж для монокристалів алмазу типу IIa.

Для монокристалів алмазу типу Іb і ІІа наявність нерівностей на гранях призводить до збільшення реальної площі поверхні граней по відношенню до її номінального значення в 500–600 та 355–650 разів відповідно. Для грані октаедр монокристала алмазу типу Іb таке відношення має найбільше значення, що свідчить про наявність більш розвиненої системи нерівностей.

Для монокристалів алмазу типу *Ib* значення латеральних сил на гранях куба у середньому в 3,5 рази менші, на гранях октаедра у середньому в 9,5 рази більші ніж для монокристалів алмазу типу *IIa*. Останнє пов'язано з більш розвиненою системою нерівностей на гранях октаедра монокристала алмазу типу *Ib*.

Отже, можна зробити висновок, що рівень латеральних сил на гранях монокристалів алмазу значною мірою зумовлений шорсткістю їхніх поверхонь.

> S. A. Klymenko¹, M. O. Bondarenko², S. O. Ivakhnenko¹, V. V. Lysakovskyi¹, M. Yu. Kopieikina¹, T. V. Kovalenko¹, O. O. Zanevskyy¹ ¹Bakul Institute of Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine ²Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine Surface roughness and lateral forces on the fronts of diamond monocrests of type *Ib* and *IIa*

The paper presents the results of studies of the height parameters of roughness and lateral forces on the faces of a cube and an octahedron of diamond single crystals and constructs maps of their distribution. The studies were carried out by atomic force and lateral force microscopy on samples of diamond single crystals of type Ib and IIa with a size of 1.5–3 mm, using the HTHP-method of growth. It has been established that: – for single crystals of diamond type Ib, the surface roughness (according to the Ra parameter) of the cube faces and the octahedron faces is 3.3 times less than for single crystals of diamond type IIa, respectively; – for single crystals of diamond type Ib, the octahedron faces they are on average 9.5 times greater than for single crystals of diamond type IIa, respectively. The results obtained indicate that the level of lateral forces on the faces of diamond single crystals is due to the roughness of their surfaces.

Keywords: types of diamond single crystals, cube and octahedral faces, surface roughness, lateral forces.

- Антонюк В.С., Тимчик Г.С., Верцанова О.В., Бондаренко Ю.Ю., Білокінь С.О., Бондаренко М.О. Мікроскопія в нанотехнологіях. Київ: НТУУ "КПІ", 2014. 300 с.
- Іванців Р.Д., Дупак Б.П. Методи дослідження поверхні зразка за допомогою атомносилового мікроскопу на основі кантелівера механічного типу. Наук. вісник Нац. лісоmex. ун-ту України. 2013. Т. 23, № 16. С. 144–148.
- Sanders W.C. Atomic Force Microscopy: Fundamental Concepts and Laboratory Investigation. Boca Raton, 2019. 153 p.
- Antonyuk V.S., Bilokin' S.O., Bondarenko M.O., Bondarenko Yu.Yu., Kovalenko Yu.I. Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 2. P. 112–119.

Надійшов до редакції 19.09.24

Після доопрацювання 19.09.24

Прийнятий до опублікування 25.09.24