

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.921.34:666.233.08374

Г. А. Петасюк*, Ю. В. Сирота**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*petasyuk@ukr.net

**yatoris@gmail.com

Порівняльний аналіз формоподібності проекції зерен шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу та їхньої однорідності за цією характеристикою

Виконано огляд публікацій з порівняльного дослідження морфометричних характеристик, технологічних і фізичних властивостей порошків синтетичного і природного технічного алмазу. Проаналізовано прикладні та методичні аспекти проекції зерна алмазних порошків як найбільш прийняттого і доступного для оцінювання якості таких порошків виразника 3D їхньої форми. За результатами огляду акцентовано, що характеристики формоподібності проекції зерен таких порошків, методи ідентифікації форми проекції їхніх зерен становлять велику прикладну значимість для абразивної обробки. Виконано порівняльний аналіз формоподібності проекції зерен шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу та їхньої однорідності за цією характеристикою як важливою ознакою якості. Подано результати визначення характеристик формоподібності, встановлено тенденцію їхньої зміни.

***Ключові слова:** алмаз синтетичний, алмаз природний, зерно, проекція, формоподібність, однорідність, ідентифікація, відносна похибка.*

ВСТУП

У виробництві абразивного інструменту для різання, шліфування, полірування і точної обробки виробів з металів, сплавів і мінералів використовують порошки природного, а частіше – синтетичного алмазу. Вражаючою є правильність кристалічної форми синтетичного алмазу. Серед природних алмазів правильні кристали з абсолютно чітко окресленими гранями зустрічаються рідко, частіше зустрічаються округлі кристали або кристали неправильної форми [1, 2]. Відзначимо, що практична автоматизована ідентифі-

кація фактичної 3D форми алмазних зерен є дуже складним завданням як в технічному, так і в методичному сенсі. Водночас у разі моделювання процесів шліфування (абразивної обробки) та опосередковано-аналітичного визначення технологічних властивостей як ознак якості таких та інших абразивних порошків вкрай важливо виходити з фактичної 3D форми зерен. Зазвичай у разі вирішення подібних та інших прикладних задач як 3D форму зерен використовують найбільш близьке до неї певне просторове тіло правильної форми.

Фактична 3D форма зерен значно впливає як на різальну здатність шліфувальних інструментів і ефективність їх застосування, так і на якість оброблених поверхонь. 3D форма зерен шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу також є визначальним фактором щодо формування їхніх розмірних, геометричних і морфологічних (сукупно морфометричних [3]) характеристик і технологічних властивостей. Однак за усталеною традицією, обумовленою зазначеними вище методичними труднощами, діагностування морфометричних характеристик алмазних та інших абразивних порошків здійснюють за проекцією їхніх зерен. Це рівнозначно тому, що фактичні 3D морфометричні характеристики таких порошків ототожнюються з аналогічними характеристиками 2D зображення зерен. У свою чергу 2D зображення зерна є по суті однією з можливих його проекцій, а саме тією, яка відповідає стійкому стану рівноваги зерна, яке знаходиться на предметному столі мікроскопа. Незважаючи на очевидну недосконалість такого підходу, він завоював право на життя і лежить в основі взаєморозуміння між виробниками абразивних порошків та їхніми споживачами в сфері абразивної обробки. Зазвичай форму проекції окремих зерен абразивних порошків оцінювали візуально на якісному рівні (округла, менш округла, овалоподібна, прямокутна і т. ін.). Однак останнім часом з'явилися більш точні методи і алгоритми автоматизованої ідентифікації та кількісного оцінювання формоподібності проекції зерен абразивних порошків [4, 5], а також метод визначення показника однорідності абразивних порошків за цією морфометричною характеристикою [6]. Це створює передумови використовувати формоподібність проекції зерен абразивних порошків як повноцінну морфометричну характеристику, а показник однорідності за нею – як ознаку їхньої якості.

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ПРОЕКЦІЇ ЗЕРЕН АБРАЗИВНИХ ПОРОШКІВ

Резюмуючи викладене вище, можемо виділити два прикладних аспекти проекції зерен абразивних порошків. Перший з них стосується проекції зерен як об'єкта метрологічних дій під час діагностування морфометричних характеристик абразивних порошків. Другий важливий прикладний аспект пов'язаний з екстраполюванням 3D форми зерна на підставі геометричних характеристик його проекції. Як приклад подібної можливості можемо вказати на зерна високоміцних шліфпорошків СА. Зерна таких шліфпорошків мають 3D форму переважно у вигляді октаедра [7] і похідних від нього кубооктаедра і усіченого октаедра, які є напівправильними многогранниками, відомими також як тіла Архімеда [8]. Проекцією таких просторових тіл на площину, паралельну одній з їхніх граней, є плоскі фігури у формі або квадрата, або правильного шестикутника, або напівправильних дванадцятикутника чи восьмикутника. За такої умови можна встановити аналітичне подання взаємозв'язку між геометричними параметрами 3D форми зерна і форми його проекції. Також можуть бути ідентифіковані аналоги морфометричних характеристик, які діагностуються сучасними технічними засобами, заснованими

на використанні ІМГ технологій, серед геометричних параметрів проекції зерна [9]. Тому наявність подібної інформації дозволяє вирішувати задачу екстраполяції (відновлення) 3D форми зерна за його проекцією. Однак такий прикладний аспект проекції зерен тут не розглядали. Предметом вивчення і порівняльного аналізу цієї роботи є формоподібність проекції зерен шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу як окремої нової морфометричної їхньої характеристики.

Порівняльний аналіз характеристик та властивостей шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу, їхньої морфології привертав увагу вчених і практиків з моменту освоєння промислового синтезу алмазу. Дослідження того часу стосувалися в основному порівняльного аналізу фізичних і механічних властивостей (атомної і кристалічної структури, твердості, міцності) синтетичного і природного алмазу в контексті їх подібності та відмінності [10, 11]. Велику увагу приділяли і продовжують приділяти також аналізу елементного та кількісного складу наявних в них домішок. Саме цей атрибут (характеристика) є основною відмінною ознакою природного і синтетичного алмазу.

Один з напрямків сучасного продовження досліджень такої тематичної спрямованості пов'язаний з синтезом [12] крупних алмазних кристалів. В [13] вказано, що поява на ринку синтетичних і обгороджених алмазів робить актуальною розробку науково-методичних засобів, спрямованих на виявлення ознак алмазу природного або синтетичного походження та слідів їх обгороджування. Для вирішення цього завдання в [14] запропоновано комплексний метод не деструктивної ідентифікації природного і синтетичного алмазу, який передбачає використання розміру і форми кристалів, характеру поверхні граней, зовнішнього вигляду включень, кольору, інтенсивності і розподілу люмінесценції, фосфоресценції, катодолюмінесценції, магнітних властивостей, а також вимірювань спектрів поглинання в УФ, видимій та ІЧ областях та спектрів люмінесценції в якості критеріїв ідентифікації.

Ще один прикладний аспект – це встановлення генетичної природи кристалів і відбраковування техногенного засмічення в зв'язку з прогнозуванням і пошуками алмазних родовищ. Випадково виявлено непрофільними фахівцями алмази в нетрадиційних об'єктах можуть видаватися за природні, що часто несе за собою ризик недостовірних відкриттів [13, 15, 16].

Серед останніх публікацій, які стосуються порівняльного аналізу характеристик та властивостей мікропорошків синтетичного і природного технічного алмазу відзначаємо роботи [17, 18]. Стосовно шліфпорошків, які є об'єктом вивчення цього дослідження, слід відзначити роботи [19, 20]. У цих роботах проводилися порівняльні дослідження абразивної здатності, морфометричних характеристик, характеристик різальних кромок, і деяких фізико-хімічних властивостей зазначених класів порошків синтетичного і природного технічного алмазу.

В [21] наведено результати порівняльні випробувань абразивної здатності імпактних, природних технічних і синтетичних алмазів. Відзначено, що абразивна здатність досліджених зразків імпактного алмазу перевищує абразивну здатність аналогічного класу порошків природного технічного алмазу кімберлітового походження і синтетичного алмазу в 1,8–2,4 рази. Водночас поряд з високою абразивною здатністю порошки імпактного алмазу одночасно забезпечують ще й полірувальний ефект завдяки сплюсненій формі частинок, тоді як частинки (зерна) порошків природного і синтетичного алмазу аналогічного класу мають переважно гострокутну форму і дряпають поверхню. З цього випливає, що 3D форма частинок алмазу, а з нею і формоподібність їх проекції, істотно впливають на абразивну здатність та інші технологічні властивос-

ті алмазних порошоків як виробів абразивного призначення. Але проведений авторами огляд відомих публікацій показав відсутність результатів подібного порівняльного вивчення. З огляду на це метою цієї роботи є порівняльне дослідження формоподібності проекції зерен шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу, як окремої морфометричної характеристики зі своїми кількісними показниками, і однорідності алмазних порошоків за цією характеристикою, як ознакою їхньої якості.

МАТЕРІАЛИ, ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ І МЕТОДИЧНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Порівняльні дослідження формоподібності проекції зерен шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу та їхньої однорідності за цією характеристикою проводили на шліфпорошках, інформація щодо яких і прийняте їх умовне позначення подаються в табл. 1. Порошки відповідали вимогам стандартів [22, 23] відповідно і були підібрані таким чином, щоб вони мали одну і ту ж зернистість і були порівняними за статичною міцністю. Автоматизовану ідентифікацію та кількісне оцінювання формоподібності проекції зерен досліджуваних абразивних порошоків проводили пошуково-аналоговим методом [5]. Цим методом передбачено диференціальні й інтегральні показники формоподібності, а також відносна похибка ідентифікації. В якості можливих базових фігур-аналогів (БФА) фактичної проекції зерна передбачено сукупність плоских фігур, перелік і прийнята нумерація яких наведено в табл. 2.

Таблиця 1. Марка, зернистість і умовне позначення шліфпорошків природного технічного (ND) і синтетичного (SD) алмазу

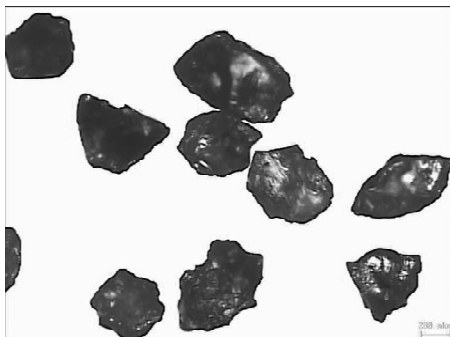
ND			SD		
Марка	Зернистість	Умовне позначення	Марка	Зернистість	Умовне позначення
A3K15	50/40	ND1	AC15	50/40	SD1
A5K32	50/40	ND2	AC32	50/40	SD2
A5K32	500/400	ND3	AC32	500/400	SD3
A4K50	400/315	ND4	AC50	400/315	SD4
A5K50	500/400	ND5	AC50	500/400	SD5
A8K100	250/200	ND6	AC100	250/200	SD6

Відзначимо, що в цій роботі визначали і аналізували тільки показники диференціальної формоподібності і відносну похибку ідентифікації. Цих двох показників цілком достатньо для досягнення поставленої мети дослідження. Початковими даними для визначення цих характеристик формоподібності слугували наступні геометричні параметри проекції зерна: максимальний і мінімальний діаметри Фере, їхнє відношення, яке називають Фере-подовженням, площа і периметр. Всі ці морфометричні характеристики досліджуваних шліфпорошків діагностували за допомогою приладу DiaInspect.OSM фірми Vollstädt Diamant GmbH (Німеччина) [24]. DiaInspect-фотографії зерен деяких із досліджуваних шліфпорошків представлено на рисунку.

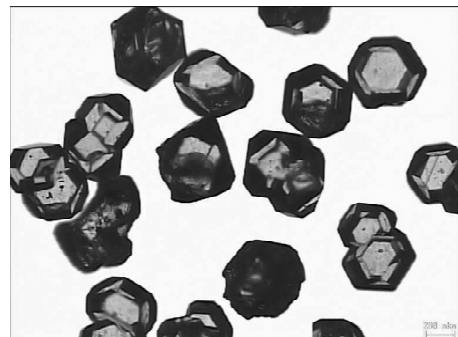
Результати розрахунків показників диференціальної формоподібності і відносної похибки ідентифікації за цими початковими даними представлено в табл. 3 (шліфпорошки природного технічного алмазу) і в табл. 4 (шліфпорошки синтетичного алмазу).

Таблиця 2. Перелік БФА фактичної проекції зерна, їхня нумерація і конкретизація

Нумерація	Назва БФА	Конкретизація БФА
1	овалоподібні фігури	круг еліпс
2	прямокутник	–
3	ромб	–
4	трапеція рівнобедрена	гармонічна сплощена видовжена
5	квадрат	–
6	правильний п'ятикутник	–
7	правильний шестикутник	–
8	правильний восьмикутник	–
9	трикутник	різносторонній рівносторонній рівнобедрений сплющений рівнобедрений видовжений
10	паралелограм	–



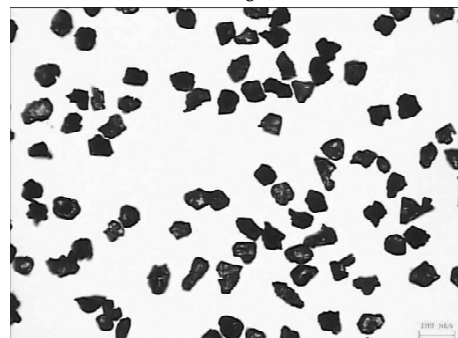
a



б

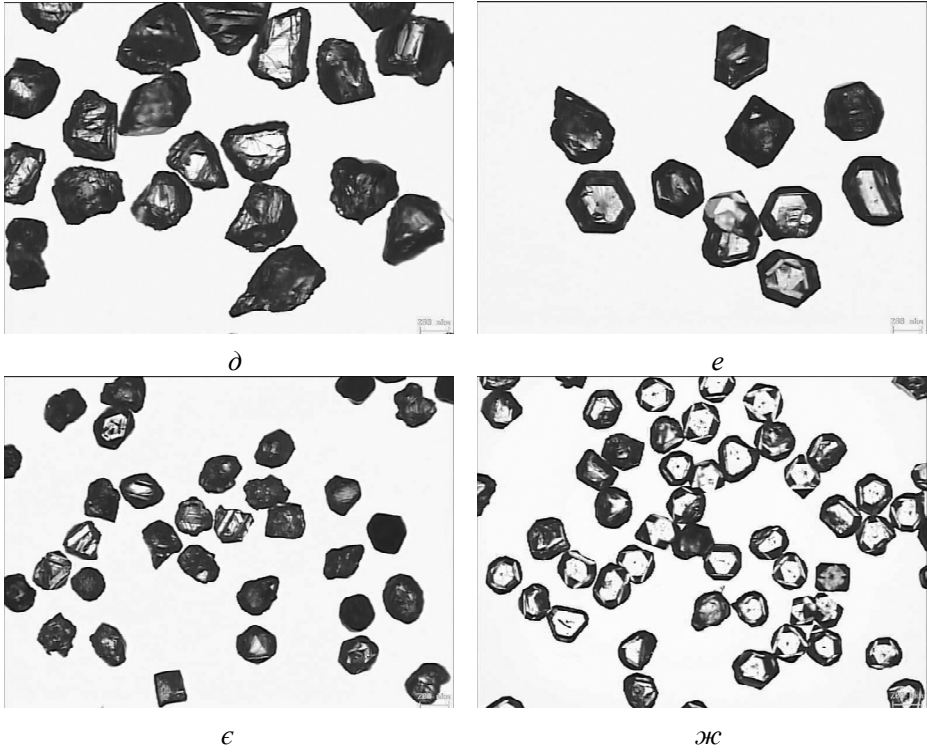


в



г

DiaInspect-знімки зерен деяких із досліджуваних шліфпорошків: A3K15 50/40 (*a*), AC15 50/40 (*б*), A5K32 500/400 (*в*), AC32 500/400 (*г*), A4K50 400/315 (*д*), AC50 400/315 (*е*), A8K100 250/200 (*ж*), AC100 250/200 (*з*).



(Продовження).

Таблиця 3. Показники диференціальної ($f_k^{(л)}$, %) формоподібності, відносна похибка ($\Delta_k^{(л)}$, %) ідентифікації проекції зерен порошоків і однорідність ($U_{фпз}$, %) шліфпорошків природного технічного алмазу за диференціальною формоподібністю проекції зерен

БФА	A3K20 50/40		A5K32 50/40		A5K32 500/400		A4K50 400/315		A5K50 500/400		A8K100 250/200	
	ND1		ND2		ND3		ND4		ND5		ND6	
	$f_k^{(л)}$	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	$\Delta_k^{(л)}$
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	16,89	09,49	18,62	11,81	3,43	10,96	2,69	10,13	1,90	9,63	1,22	13,39
3	0,15	47,51	0,25	57,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	62,80	26,05	57,56	38,33	23,87	52,09	21,94	47,67	15,76	44,61	4,08	53,45
5	0,05	83,77	0,00	0,00	39,48	6,14	39,30	8,63	44,73	4,96	48,25	29,26
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	9,48	11,96	12,26	11,46	31,27	7,67	35,40	7,54	37,61	6,93	45,91	4,89
8	0,00	0,00	0,11	19,40	0,00	0,00	0,13	13,54	0,00	0,00	0,54	10,01
9	8,71	45,37	7,87	37,43	1,23	27,12	0,27	29,17	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,92	47,48	3,33	48,30	0,72	60,95	0,27	56,62	0,00	0,00	0,00	0,00
$U_{фпз}$	55,21		48,96		27,06		25,93		25,23		50,88	

Таблиця 4. Показники диференціальної ($f_k^{(п)}$, %) формоподібності, відносна похибка ($\Delta_k^{(п)}$, %) ідентифікації проекції зерен порошків і однорідність ($U_{фпз}$, %) шліфпорошків синтетичного алмазу за диференціальною формоподібністю проекції зерен

БФА	AC15 50/40		AC32 50/40		AC32 500/400		AC50 400/315		AC50 500/400		AC100 250/200	
	SD1		SD2		SD3		SD4		SD5		SD6	
	$f_k^{(п)}$	$\Delta_k^{(п)}$	$f_k^{(п)}$	$\Delta_k^{(п)}$	$f_k^{(п)}$	$\Delta_k^{(п)}$	$f_k^{(п)}$	$\Delta_k^{(п)}$	$f_k^{(п)}$	$\Delta_k^{(п)}$	$f_k^{(п)}$	$\Delta_k^{(п)}$
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	11,15	14,10	9,93	7,49	1,79	8,01	2,00	11,35	1,50	9,29	0,30	11,17
3	2,20	43,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	46,33	33,51	42,19	26,05	4,46	6,87	2,48	12,07	1,88	23,39	1,96	19,48
5	22,77	10,70	26,64	8,77	41,73	9,00	26,84	3,83	27,22	07,59	28,23	5,73
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	8,30	20,00	10,80	9,96	52,00	4,51	68,60	3,44	69,36	4,47	68,89	4,15
8	0,00	0,00	0,14	0,00	0,02	8,54	0,08	12,24	0,04	10,17	0,02	7,95
9	6,10	19,48	8,10	15,37	0,00	16,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	16,32
10	3,15	49,56	2,20	42,48	0,00	31,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	25,91
$U_{фпз}$	36,23		63,89		37,29		59,09		59,96		61,60	

Однорідність досліджуваних шліфпорошків за диференціальною формоподібністю проекції зерен визначали за методом, викладеним в [6]. Початковими даними для цього слугували показники диференціальної формоподібності шліфпорошків як їхньої морфометричної характеристики. Результати розрахунків представлено в останньому рядку табл. 3, 4.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Показники диференціальної формоподібності

Для низькоміцних дрібнозернистих шліфпорошків природного технічного алмазу АЗК15 50/40 і А5К32 50/40 домінуючими серед ідентифікованих форм проекції виявилися трапеція, прямокутник, правильний шестикутник і трикутник (див. рисунок, поз. а, в). Показник диференціальної формоподібності до базового аналогу в формі трапеції дорівнює 57,56 та 62,80 % відповідно. Таку проекцію зазвичай мають зерна неправильної (осколкової) 3D форми і вона характерна саме для низькоміцних дрібнозернистих шліфпорошків природного технічного алмазу. Зі збільшенням зернистості й індексу статичної міцності частка зерен з такою формою проекції істотно зменшується. Наприклад, якщо для шліфпорошку А5К50 500/400 вона дорівнює 15,76 %, то для шліфпорошку А8К100 250/200 (див. рисунок, поз. е) зменшується до 4,08 %. Водночас сумарна відносна кількість зерен, які мають проекцію у формі квадрата і правильного шестикутника, для цього шліфпорошку в 9,88 рази більша в порівнянні з шліфпорошком АЗК15 50/40.

Що стосується проекції в формі правильного шестикутника і квадрата, то вона характерна для зерен, що мають 3D форму октаедра і кубооктаедра. Показники диференціальної формоподібності до базових аналогів зазначеної вище форми проекції знаходяться в інтервалах 9,48–45,91 % (правильний шестикутник) та 0,05–48,25 % (квадрат). Причому більші показники характерні

для високоміцних крупнозернистих шліфпорошків природного технічного алмазу. Наприклад, в разі шліфпорошка А5К50 500/400 показник диференціальної формоподібності до базового аналогу в формі правильного шестикутника становить 37,61 %, а для шліфпорошка А8К100 250/200 збільшується до 45,91 %. Для проекції в формі квадрата для зазначених вище шліфпорошків показники диференціальної формоподібності дорівнюють 44,73 і 48,25 % відповідно. Отже, можна констатувати наявність тенденції до збільшення показника диференціальної формоподібності до таких БФА зі зростанням зернистості та індексу статичної міцності шліфпорошків.

Для дрібнозернистих шліфпорошків характерною є присутність ще й зерен з проекцією у формі трикутника, прямокутника і паралелограма, але в меншій кількості. Таку проекцію зазвичай мають зерна осколкового типу. Наприклад, для шліфпорошку зернистістю 50/40 сумарний показник диференціальної формоподібності до цієї групи проекцій дорівнює 27,52–29,82 %. Зі збільшенням зернистості цей показник зменшується. Наприклад, для шліфпорошків зернистістю 415/315–500/400 він змінюється в інтервалі 1,9–5,38 %, причому менші значення показника формоподібності характерні для шліфпорошків із більшим індексом міцності.

Для досліджуваних шліфпорошків синтетичного алмазу домінуючими формами проекції виявилися правильний шестикутник і квадрат (в більшій мірі) та трапеція (в меншій мірі). Проекції у формі правильного шестикутника і квадрата доцільно об'єднати в одну групу, оскільки їх дають кристалоподібні зерна у вигляді октаедра та похідного від нього кубооктаедра. Сумарна частка зерен з проекцією такої об'єднаної форми змінюється в інтервалі 31,07–37,44 % (для дрібнозернистих шліфпорошків) і 93,73–97,24 % (для крупнозернистих шліфпорошків). Аналіз показує, що розподіл показників формоподібності проекції зерен до відзначених БФА в разі шліфпорошків синтетичного алмазу відрізняється в порівнянні з шліфпорошками природного технічного алмазу. Показники диференціальної формоподібності до БФА в формі правильного шестикутника знаходяться в інтервалі 8,3–69,36 %, а в формі квадрата – в інтервалі 22,77–41,73 %. Відзначимо також, що подібна тенденція для шліфпорошків синтетичного алмазу, але в більш широкому неперервному діапазоні їх марок та зернистостей, відмічалась і в [25].

Для дрібнозернистих шліфпорошків синтетичного алмазу характерною є присутність ще й зерен з проекцією у формі трапеції, трикутника, прямокутника і паралелограма (0,36–20,23 %). Таку проекцію зазвичай мають зерна неправильної 3D форми. Показник диференціальної формоподібності до базового аналогу в формі трапеції змінюється в інтервалі 1,88–46,33 %. Зі збільшенням зернистості цей показник зменшується. Наприклад, якщо для шліфпорошків зернистістю 50/40 середнє його значення дорівнює 44,26 %, то для зернистості 500/400 середнє його значення зменшується до 3,17 %.

Однорідність за диференціальною формоподібністю

Однорідність за диференціальною формоподібністю для шліфпорошків природного технічного алмазу знаходиться в інтервалі від 25,23 до 55,21 %. Водночас великі і близькі за значенням показники однорідності характерні для низько- і високоміцних шліфпорошків цього класу. Основний внесок в показник однорідності в першому випадку вносить високий рівень диференціальної формоподібності до проекції в формі трапеції, а в другому випадку – до проекцій в формі квадрата і правильного шестикутника. У свою чергу зменшення показника однорідності обумовлено підвищенням в шліфпорошку

відносної кількості зерен з іншими формами проекції, зокрема проекцій в формі трикутника, прямокутника і паралелограма.

Однорідність за диференціальною формоподібністю для шліфпорошків СА змінюється в інтервалі від 36,23 до 63,89 %, що значно вище, ніж у випадку шліфпорошків природного технічного алмазу. Є відмінності і в структурі цього показника, тобто в складових його формування. Основний внесок в структура показника однорідності для цього класу шліфпорошків вносять кристалоподібні зерна з 3D формою, близькою до октаедра і кубооктаедра. Тому, якщо оцінювати однорідність шліфпорошків СА тільки за цими двома формами проекції, то це призвело б до ще більш істотного її збільшення в порівнянні з шліфпорошками природного технічного алмазу.

Порівняльний аналіз показує, що шліфпорошки синтетичного алмазу мають більш високий показник однорідності, ніж шліфпорошки природного технічного алмазу, як у разі інтервальної її оцінки, так оцінки за середнім значенням для всіх досліджених зразків зазначених шліфпорошків. У першому випадку осереднене значення однорідності складає 53,01 %, в другому – 38,88 %.

Аналізуючи однорідність, доречним буде зробити одне зауваження, що відноситься до методичного аспекту її застосування. Самого показника однорідності не завжди недостатньо для однозначного висновку щодо якості шліфпорошку. Для цього обов'язково слід враховувати і показник диференціальної формоподібності домінуючої форми (або форм) проекції зерен. Результати проведених авторами досліджень підтверджують такий висновок. Для ілюстрації звернемося до табл. 3. Наприклад, шліфпорошки АЗК15 50/40 (див. рисунок, поз. а) і А8К100 250/200 (див. рисунок, поз. є) мають близькі показники однорідності – 55,21 і 50,88 % відповідно. На підставі цього можна було б зробити висновок про те, що ці шліфпорошки будуть близькі й за якістю. Однак, якщо взяти до уваги домінуючі форми проекції зерен цих шліфпорошків, то мабуть такий висновок потребує уточнення щодо їхньої якості. Так, якщо для шліфпорошку АЗК15 50/40 такою є трапеція, то для шліфпорошку А8К100 250/200 – квадрат і правильний шестикутник з показниками формоподібності 62,8 та 94,16 % відповідно. Зрозуміло, що зазначені форми проекції відповідають і різним 3D формам зерен. У свою чергу 3D форма зерен істотно впливає на такі технологічні властивості абразивних порошків як зовнішня питома поверхня, число зерен в одному караті, товщина покриття, абразивна здатність. Тому висновок про близькість вказаних шліфпорошків за якістю, зроблений на підставі однієї лише однорідності, може виявитися не зовсім коректним.

Відносна похибка ідентифікації

Порівняльний аналіз показує, що відносна похибка ідентифікації форми проекції зерен шліфпорошків синтетичного алмазу в переважній більшості менша, ніж у випадку шліфпорошків природного технічного алмазу. Якщо для кількісної оцінки взяти середнє значення відносної похибки окремо для кожного шліфпорошку за всіма ідентифікованими формами проекції його зерен, то цей показник змінюється в інтервалі від 8,59 до 27,32 % для шліфпорошків синтетичного алмазу і в інтервалі 16,53 до 38,8 % – для шліфпорошків природного технічного алмазу. Кількісне порівняння меж цих інтервалів показує, що відмінність становитиме 1,92–1,42 рази. Це дозволяє зробити висновок про те, що проекція зерен шліфпорошків синтетичного алмазу ближча до ідеалізованих БФА. Особливо це стосується більш міцних і крупнозе-

рнистих шліфпорошків синтетичного алмазу. Якщо з урахуванням цього перейти від проекції зерен до їх 3D форми, то це може бути непрямим кількісним підтвердженням відомого факту, що шліфпорошки синтетичного алмазу в цілому мають і більш досконалу 3D форму в порівнянні з шліфпорошками природного технічного алмазу.

Заслугує на увагу ще і той факт, що у випадку меншого відхилення того чи іншого базового аналогу від фактичної проекції зерна, відносна похибка ідентифікації також менша. Ця обставина може мати корисне прикладне застосування у разі вибору 3D моделі зерна за 2D формою його проекції. В такому випадку відносна похибка може слугувати кількісною оцінкою ступеню адекватності прийнятої 3D моделі зерна, тобто показником відхилення прийнятої ідеалізованої 3D моделі зерна від фактичної його 3D форми.

ВИСНОВКИ

Вперше виконано кількісну оцінку формоподібності проекції зерен шліфпорошків природного технічного алмазу. Встановлено тенденцію зміни показника цієї характеристики для таких абразивних порошків зі збільшенням їх зернистості і індексу міцності (марки).

Виявлено основні форми проекції зерен стандартних шліфпорошків природного технічного алмазу. Такими є прямокутник, ромб, трапеція, квадрат, правильний шестикутник, трикутник і паралелограм. Серед них домінуючими за показником диференціальної формоподібності є проекції в формі трапеції, квадрата і правильного шестикутника. Відносна частка інших форм проекції набагато менше, вони мають нижчі показники диференціальної формоподібності і відрізняються досить великою відносною похибкою ідентифікації (до 20 %).

Встановлено, що зі збільшенням зернистості та індексу міцності (марки) шліфпорошків природного технічного алмазу відносна частка зерен з проекцією в формі квадрата і правильного шестикутника збільшується, а з проекцією в формі прямокутника, ромба, трикутника і паралелограма – зменшується.

Оскільки форма проекції зерна обумовлена фактичною 3D його формою і розташування зерна на предметному столі мікроскопа, то сформульовані вище висновки в повній мірі відносяться і до 3D їх форми зерен. Наприклад, це повною мірою стосується октаєдрів і кубооктаєдрів, які дають проекції у формі квадрата і правильного шестикутника, і відносна похибка ідентифікації яких дорівнює 4–10 %, що значно менше в порівнянні з іншими базовими формами можливої проекції зерен.

Вперше на кількісному рівні проведено порівняльні дослідження формоподібності проекції зерен стандартних шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу. Виявлено відмінності й подібності в присутніх формах проекції з переліку БФА, показниках формоподібності та однорідності за ними порошків. За результатами проведених порівняльних досліджень співвідношення показників формоподібності проекції зерен і відносної похибки автоматизованої ідентифікації геометричної отримано нове кількісне підтвердження того відомого в сфері алмазних порошків факту, що шліфпорошки синтетичного алмазу в цілому мають і більш досконалу 3D форму в порівнянні з шліфпорошками природного технічного алмазу.

Отримана інформація буде сприяти більш ефективному використанню шліфпорошків синтетичного і природного технічного алмазу, обґрунтовано вирішувати питання можливої їх взаємозаміни.

G. A. Petasyuk, Yu. V. Syrota

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Comparative analysis of the shape-similarity of the projection of the grains of grinding powders of synthetic and natural technical diamond and their homogeneity by this characteristic

A review of publications on the comparative study of morphometric characteristics, technological and physical properties of synthetic and natural technical diamond powders is performed. Applied and methodological aspects of projection of grain of diamond powders as the most acceptable and accessible for estimation of quality of such powders of the expression of 3D of their form are analyzed. According to the results of the review, it is emphasized that the characteristics of the shape-similarity of the projection of the grains of such powders, methods of identifying the shape of the projection of their grains are of great practical importance for abrasive processing. A comparative analysis of the shape-similarity of the projection of the grains of grinding powders of synthetic and natural technical diamond and their uniformity on this characteristic as an important feature of quality. The results of determining the characteristics of shape-similarity are presented, the tendency of their change is established.

Keywords: diamond synthetic, diamond natural, grain, projection, shape, uniformity, identification, relative error.

1. Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГМ, 2000. 298 с.
2. Kvasnytsya V.M. Rare diamond microcrystals. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 6. P. 365–370.
3. Рудаков П.И., Сафронов В.И. Обработка сигналов и изображений. Москва: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000. 416 с.
4. Petasyuk G.A. System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection. *Powder Technol.* September 2014. Vol. 264. P. 78–85.
5. Petasyuk G.A. A system-analogue method of identification of geometric shape of the abrasive grain projection. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 4. P. 277–287.
6. Petasyuk G.A., Vochechka O.O. Generalized index of the shape-similarity of the diamond powders grains projection. *Powder Technology.* 2019. Vol. 353. P. 125–131.
7. Ракин В.И. Реальные октаэдры алмаза. Вестник ИГ Коми научного центра УрО РАН. Геолого-минералогические науки. 2013. № 6. С. 6–9.
8. Вавилов В.В., Устинов А.В. Многоугольники на решетках. Москва: МЦНМО, 2006. 72 с.
9. Petasyuk G.A., Vochechka O.O., Sirota Yu.V. Extension of the applied capabilities of the analogue search method for the shape identification of a projection of abrasive powder grains. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 5. P. 366–374.
10. Sunagawa I. Morphology of natural and synthetic diamond crystals. *Mater. Sci. Earth's. – Tokyo: Inter, TERRA Pub.* 1984. P. 303–330.
11. Miyoshi K. Structures and Mechanical Properties of Natural and Synthetic Diamonds. NASA/TM-1998-107249, Chapter 8. P. 1–21.
12. Lysakovskiy V.V., Novikov N.V., Ivakhnenko S.A., Zanevskyy O.A., Kovalenko T.V. Growth of structurally perfect diamond single crystals at high pressures and temperatures (a review). *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 5. P. 315–324
13. Похиленко Н.П., Шумилова Т.Г., Афанасьев В.П., Литасов К.Д. Находки алмазов на камчатке (вулканы толбачик и авачинский): природный феномен или контаминация синтетическим материалом? *Геология и геофизика.* 2019. № 5. С. 606–618.
14. Шелементьев Ю.Б. Особенности структурно-спектроскопических свойств и морфологии природных, синтетических и облагороженных алмазов: Автореф. дисс. ...канд. геол.-минерал. наук. Москва: МГУ, 2000. 22 с.
15. Шумилова Т.Г. Типоморфные признаки синтетических алмазов и возможные пути техногенного заражения природных объектов. *Международ. науч.-исслед. журн.* 2018. Часть 1, ноябрь № 11 (77). С. 104–108.
16. Палкина Е.Ю. Алмазы Украины: установление генетической природы кристаллов и отбраковка техногенного засорения в связи с прогнозированием и поисками алмазных месторождений. *Минерал. журн.* 1994. № 2. С. 78–84.

17. Shul'zhenko A.A., Nozhkina A.V., Gargin V.G., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Bogatyreva G.P., Petasyuk G.A., Loshak M.G., Aleksandrova L.I., Rusinova N.A., Gvyazdovskaya V.L., Shamraeva V.S. Comparative physico-mechanical characteristics of micron powders of synthetic and natural diamonds and polycrystalline composite materials based on them. *J. Superhard Mater.* 2008. Vol. 30, no. 5. P. 290–296.
18. Богатирьова Г.П., Петасюк Г.А., Петасюк О.У., Осипов А.С. Физико–механические свойства и морфометрические характеристики микропорошков природного и синтетического алмаза. Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: зб. наук. праць Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України–Серія Матеріалознавство. Київ: Логос, 2010. 191 с.
19. Safonova M.N., Petasyuk G.A., Syromyatnikova A.S., Fedotov A.A. The study of grain size distribution and morphometric characteristics of synthetic and natural diamond grinding powders. *J. Superhard Mater.* 2011. Vol. 33, no. 4. P. 274–282.
20. Сафонова М.Н., Петасюк Г.А. Количественный анализ адекватности 3D-моделей зерна порошков природного алмаза. *Материаловедение*. 2013. № 5. С. 49–56.
21. Афанасьев В.П., Похиленко Н.П. Попигаийские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий. *Инноватика и экспертиза*. 2013. Вып. 1 (10). С. 8–15.
22. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний від 01.01.96.
23. ГОСТ Р 52370–2005. Порошки из природных алмазов. Технические условия: Изд-во Стандартинформ, 2005. Введ. 07.09.2005.
24. Vollstädt Diamant GmbH. www.vdiamant.de
25. Petasyuk G.A., Lavrinenko V.I., Sirota Yu.V., Poltoratskiy V.G. Geometric shape of the projection and the characteristics of the cutting edges of the grains synthetic diamond grinding powders of continuous series their grades and granularities. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Advanced Manufacturing Processes II: Selected Papers from the 2nd Grabchenko's Int. Conf. on Advanced Manufacturing Processes*. 2021, P. 422–432.

Надійшла до редакції 09.11.21

Після доопрацювання 09.11.21

Прийнята до опублікування 17.11.21