

Г. А. Петасюк*, О. О. Бочечка**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*petasyuk@ukr.net

**bochechka@ism.kiev.ua

Автоматизована ідентифікація 3D форми зерен високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу

Обґрунтовано особливу значимість просторової форми зерен у задачах опосередковано-аналітичного визначення технологічних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу. З посиланням на літературні джерела зазначено, що безпосереднє використання фактичної 3D форми зерна таких шліфпорошків замість його 3D моделі дозволяє отримувати більш достовірну інформацію щодо показників технологічних властивостей. Акцентована прикладна важливість створення методичних засобів автоматизованої ідентифікації 3D форми великої за обсягом (до 2000 шт.) проби зерен таких шліфпорошків. Запропоновано оригінальний метод вирішення такої задачі для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Метод базується на відомому фактові про те, що зерна таких шліфпорошків є кристалами з 3D формою, близькою до октаєдрів, кубооктаєдрів та усічених октаєдрів. Подано аналітичну та графічну інформацію щодо форми ортогографічної паралельної проекції зазначених просторових тіл у залежності від 2D форми грані, на якій вони розташовані. Отримано аналітичне подання взаємозв'язку між геометричними параметрами проекції, необхідними для автоматизованої ідентифікації як 2D форми проекції, так і 3D форми зерен, та твірними параметрами октаєдра, кубооктаєдра й усіченого октаєдра. Актуалізовано аналоги морфометричних характеристик абразивних порошків, які діагностують сучасними комп'ютерно-технічними засобами і зерна яких мають 3D форму розглядуваних просторових тіл. На прикладі високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу АС250–АС500 проілюстровано практичне застосування розроблених методичних засобів. Встановлено, що відносна частка зерен іншої, відмінної від октаєдрів, кубооктаєдрів та усічених октаєдрів 3D форм не перевищує 31 %.

Ключові слова: ідентифікація, високоміцний шліфпорошок, зерно, форма, проекція, морфометричні характеристики, технологічні властивості.

ВСТУП

Просторово-об'ємна або у сучасній термінології 3D форма зерен абразивних порошків надтвердих матеріалів (НТМ), зокрема шліфпорошків синтетичного алмазу (СА), є важливою ознакою їхньої якості. Знання цієї характеристики може бути корисним для вибору способів і сфер найбільш ефективного використання порошків СА в абразивній обробці. 3D форма зерен шліфпорошків СА, безвідносно до класу їхньої крупності і міцності, є важливим чинником абразивної здатності таких порошків [1–3]. Зі свого боку абразивна здатність шліфпорошків синтетичного алмазу відноситься до переліку визначальних факторів впливу на ефективність виготовленого інструменту в разі використання порошку як у різальному його шарі [1, 2], так і

в процесі обробки методом вільного абразиву [3]. Особливо актуальною 3D форма зерен є для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, призначених для використання в буровому інструменті [4] та в прецизійному інструменті для правки [5].

Варто зауважити, що в цитованих вище публікаціях, а саме в тих, які стосуються використання алмазних шліфпорошків у різальному шарі абразивного інструменту, на взаємозв'язок абразивної здатності з 3D формою зерен безпосередньо не вказано. Натомість приведено числові значення абразивної здатності шліфпорошків різної зернистості та марок. Водночас слід взяти до уваги, що індексом марки шліфпорошків синтетичного алмазу є середнє значення їхньої статичної міцності за стандартом [6]. Відомо також, що шліфпорошки синтетичного алмазу більшої зернистості та з більшим індексом марки (тобто більш міцних марок) мають досконалішу (в сенсі наближення до форми правильних просторових тіл) 3D форму зерен [7]. Тому маємо підстави опосередковано зробити висновок про взаємозв'язок абразивної здатності шліфпорошків синтетичного алмазу також і з 3D формою їхніх зерен.

Крім того, 3D форма зерен є важливим методологічним елементом опосередковано-аналітичного діагностування (визначення) показників багатьох технологічних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу, зокрема, таких як зовнішня питома поверхня, число зерен в одному караті, товщина і ступінь покриття зерен та характеристики різальних кромок. Розрахунково-методичні схеми опосередковано-аналітичного визначення показників зазначених технологічних властивостей (за винятком характеристик різальних кромок) передбачають використання об'єму і площі поверхні зерна як просторового тіла або близького його аналога, який у сфері алмазних порошків називають 3D моделлю зерна. Необхідність використання 3D моделей зерна зумовлена тим, що зерна більшості шліфпорошків синтетичного алмазу мають форму неправильних просторових тіл. Аналітичне подання об'єму і площі поверхні таких тіл дуже ускладнене. Водночас, використання того чи іншого просторового аналога зерна правильної форми (куб, куля, еліпсоїд) дозволяє обійти цю перешкоду. Але платою за подібне усунення є велика похибка у визначенні об'єму і площі поверхні зерна, а з нею і показників зазначених вище технологічних властивостей. Проте, використання просторового аналога зерна не є обов'язковою нормою (процедурою) для всіх шліфпорошків синтетичного алмазу.

Зокрема, це стосується шліфпорошків синтетичного алмазу марок AC200–AC400, які використовують у породоруйнуючому (геологорозвідувальному) інструменті та в прецизійному правлячому інструменті [8]. За класифікацією, виконаній в даній роботі, зазначені шліфпорошки віднесено до класу високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Зерна таких шліфпорошків є кристалами у формі переважно таких просторових тіл, як октаedr, кубооктаedr та усічений октаedr. Візуальним підтвердженням цього факту можуть слугувати приведені в [4, 9–12] електронні фотографії зерен таких шліфпорошків. Для кількісного підтвердження цього факту в [13] було проведено аналіз формоподібності проекції зерен кондиційних за стандартом [6] високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, які за статичною міцністю зерен задовольняють технічним вимогам нормативного документа [14]. Наближене візуальне оцінювання на підставі цього 3D форми зерен показало, що відносна частка зерен, які мають 3D форму кристалів у вигляді октаедра, кубооктаедра та усіченого октаедра, у складі реальних високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу знаходиться на рівні 83–98 %.

У такому разі, з використанням фактичної форми зерна замість її 3D моделі, є можливість більш точно вираховувати такі важливі геометричні параметри подібних зерен як їхній об'єм і площа поверхні, з використанням аналітичного їхнього подання для тіл зазначеної правильної форми. Це важливо з тієї причини, що під час визначення таких технологічних властивостей як, наприклад, зовнішня питома поверхня і число зерен в одному караті, з врахуванням фізичної суті цих технологічних властивостей, оперують масою контрольної проби шліфпорошку. У разі опосередкованого визначення зазначених технологічних властивостей переходять від маси окремого зерна до його об'єму, з використанням відомого з фізики твердого тіла пікнометричного співвідношення між масою, густиною та об'ємом твердого тіла. Тому важливо в процесі такого переходу водночас використовувати і найбільш достовірне (точне) значення об'єму реального зерна, що дозволить мінімізувати його вплив на достовірність кінцевого результату, тобто на показники зазначених вище технологічних властивостей.

Описаний вище методичний підхід може бути використаний для точного опосередковано-аналітичного визначення показників тих технологічних властивостей високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, про які тут іде мова. Загальна розрахункова схема такого підходу викладена в [13]. Початковими даними у разі його застосування слугують окремі морфометричні характеристики зерен контрольної проби порошку, які діагностують за допомогою приладу DiaInspect.OSM [15], чи подібним йому за призначенням. Запропонований в [13] пофракційно-осереднювальний підхід передбачає дві ключові процедури – автоматизовану ідентифікацію форми проекції зерен і віртуальне розділення порошку на чотири фракції за виявленими в його складі зернами-кристалами з 3D формою октаедра, кубооктаедра та усіченого октаедра. Ці дві ключові процедури поєднує третя не менш важлива методична процедура, яка не конкретизована в [13]. Мова йде про автоматизовану ідентифікацію 3D форми зерен (кристалів) високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Саме розробка методу практичної реалізації такої процедури і є метою цієї роботи. Зазначимо, що зерна шліфпорошків синтетичного алмазу в переважній більшості їхніх класів не мають явно вираженої певної просторової форми, тому неможливо ідентифікувати цю форми, оскільки немає власне предмета ідентифікації. Проте для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу така задача допускає конструктивне вирішення, алгоритм (метод) якого і подається в цій публікації.

Об'єктом дослідження та тематичної спрямованості цієї роботи є просторова (3D) форма шліфпорошків синтетичного алмазу марок АС200–АС400, які задовольняють технічним вимогам нормативного документа [14]. Предметами вивчення були автоматизована ідентифікація 3D форми зерен (кристалів) та кількісне оцінювання розподілу зерен таких абразивних порошків за виявленими в їхньому складі 3D формами.

ВСТАНОВЛЕННЯ 2D ФОРМИ ПРОЕКЦІЙ ОКТАЕДРА, КУБООКТАЕДРА І УСІЧЕНОГО ОКТАЕДРА ЯК 3D ФОРМ ЗЕРЕН-КРИСТАЛІВ ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ТА АНАЛІТИЧНЕ ПОДАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ТВІРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИХ ПРОСТОРОВИХ ТІЛ З ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЇХНІХ ПРОЕКЦІЙ

Позитивною перевагою сучасних [16–21] опосередковано-аналітичних методів діагностування технологічних властивостей алмазних шліфпорошків є виконання відповідної розрахункової процедури на рівні окремих зерен проби

порошку. Однак, за такої умови враховували лише необхідні для застосування таких методів розмірні й геометричні характеристики кожного окремого зерна. Щодо 3D форми зерна, як ще одного методичного атрибуту, то її вважали сталою (незмінною) для всього порошку. Найчастіше це оправдано, особливо коли реальна 3D форма зерна далека від просторових тіл правильної форми. Проте на практиці іноді в складі порошку присутня переважна кількість зерен з явно вираженою 3D формою, що збігається з формою правильних тіл або близькою до неї. У такому разі є можливість більш точно вираховувати такі важливі геометричні параметри подібних зерен як їхній об'єм і площа поверхні, з використанням аналітичного представлення зазначених геометричних параметрів для тіл правильної форми.

До важливих методичних атрибутів автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, як уже зазначали, належить і 2D форма проекції їхніх зерен. Тож авторами було проведено аналітичні дослідження зі встановлення форми ортогографічної [22] паралельної проекції октаедра, кубооктаедра та усіченого октаедра на двовимірну картинну площину в залежності від 2D форми грані, на якій розташовано кожне із перерахованих просторових тіл. Як зазначено в [22], проекції відображають тривимірні об'єкти на двовимірну картинну площину, тобто перетворюють точки 3D-простору в 2D-простір. Проекції будували за допомогою прямих (проекторів), що виходять з центра проектування. Ці прямі проходять через кожну точку об'єкта, перетинаючи картинну площину, і на ній утворюють слід – проекцію об'єкта. У подальшому під терміном “проекція” розумітимемо саме ортогографічну паралельну проекцію. Також було отримано аналітичне подання взаємозв'язку між довжиною ребра кристала та геометричними параметрами ортогографічної його проекції (проекцій). Нижче приведено отримані авторами результати такого дослідження, а також деякі кількісні характеристики 3D морфології зерен зазначених вище просторових тіл, які, наприклад, можуть бути корисними у разі опосередкованого визначення характеристик різальних кромок.

Октаедр має 6 вершин і 8 однотипних граней у формі правильного трикутника (рис. 1, *а*). Проекцією ідеального октаедра на площину, паралельну одній із цих граней, завжди буде правильний шестикутник (див. рис. 1, *б*). Взаємозв'язок між довжиною ребра (*a*) октаедра та стороною (*A*) правильного шестикутника як проекцією октаедра є таким: $A = a / \sqrt{3}$. Щодо характерного зображення проекції октаедра, отриманої за допомогою приладу DiaInspect.OSM (див. рис. 1, *в*), відзначимо наступне. Це зображення відповідає октаедру з деяким затупленням його вершин. Саме таку форму здебільшого мають реальні кристали, сформовані в процесі синтезу. Зауважимо також, що характерне зображення проекції октаедра, про яке йде мова, отримане в мультифокусному режимі роботи приладу DiaInspect. OSM. Опис цього режиму роботи приладу DiaInspect.OSM можна знайти в інструкції до його експлуатації “Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis” за посиланням [15]. Це останнє зауваження стосується ілюстрації характерних зображень проекції кубооктаедра і усіченого октаедра.

Кубооктаедр (рис. 2, *а, б*) має 12 вершин і два типи граней – у формі правильного трикутника (8 граней) та у формі квадрата (6 граней). Довжина сторін цих двох фігур-граней є однаковою і дорівнює довжині ребра кубооктаедра. Проекцією кубооктаедра на площину, паралельну грані у формі правильного трикутника, буде правильний шестикутник (див. рис. 2, *г*) з довжиною сторони B_6 . Взаємозв'язок між довжиною ребра (*b*) кубооктаедра та стороною

правильного шестикутника як проекцією кубооктаедра є таким: $B_6 = b$. Проекцією кубооктаедра на площину, паралельну його грані у формі квадрата, на якій він розташований на предметному столі мікроскопа і яка відповідає найбільш стійкому стану рівноваги, буде знову ж таки квадрат (див. рис. 2, в), але з довжиною сторони B_4 . Взаємозв'язок між довжиною ребра кубооктаедра та стороною квадрата (B_4) як проекцією кубооктаедра є таким: $B_4 = \sqrt{2}b$.

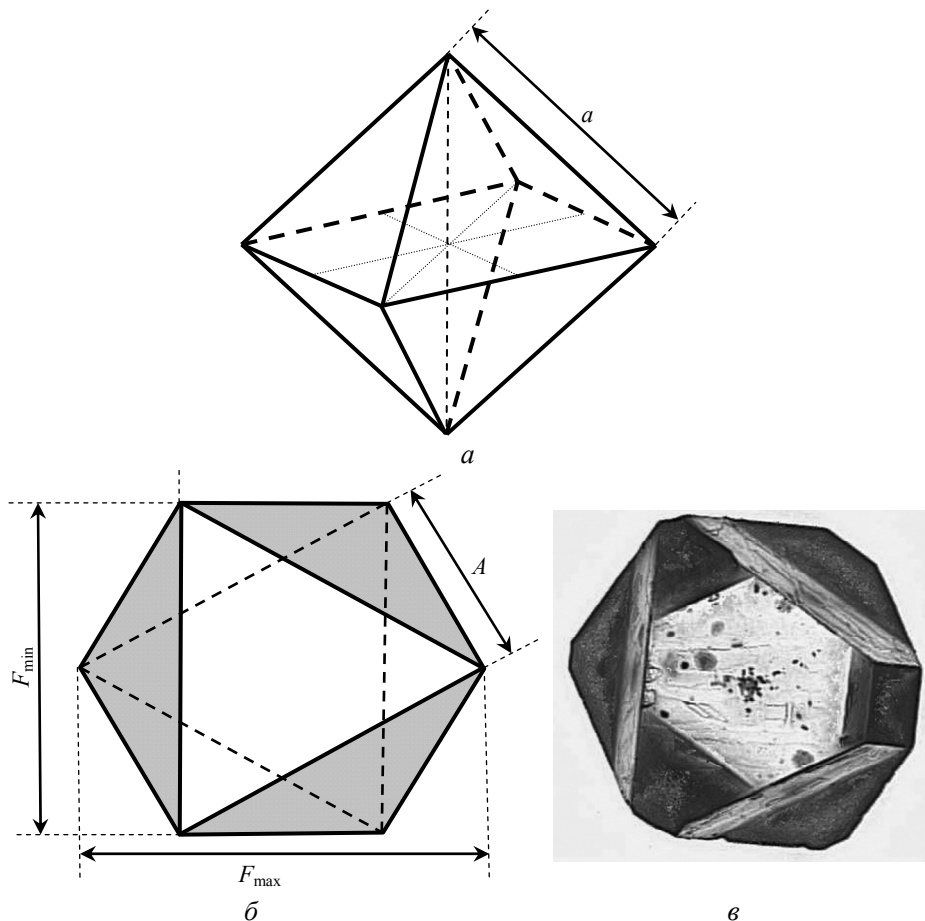


Рис. 1. Октаедр (а) як 3D форма зерен-кристалів високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, його проекція (б) та характерне зображення проекції, отриманої за допомогою приладу DialInspect.OSM (в).

Усічений октаедр (рис. 3, а, б) має 24 вершини і, як і кубооктаедр, два типи граней – у формі правильного шестикутника (8 граней) та у формі квадрата (6 граней). Довжини сторін цих двох фігур-граней рівні між собою і дорівнюють довжині ребра усіченого октаедра. Проекцією усіченого октаедра на площину, паралельну грані у формі правильного шестикутника, буде напівправильний дванадцятикутник (див. рис. 3, в) з довжинами сторін C_{61} та C_{62} ($C_{61} < C_{62}$). Взаємозв'язок між довжиною ребра (с) усіченого октаедра та сторонами напівправильного дванадцятикутника як однією із проекцій усіченого октаедра є таким: $C_{61} = c$, $C_{62} = c/\sqrt{3}$. Проекцією усіченого октаедра на площину, паралельну грані у формі квадрата, буде напівправильний восьмикутник (див. рис. 3, в) з довжинами сторін C_{41} та C_{42} ($C_{41} \leq C_{42}$).

Взаємозв'язок між довжиною ребра усіченого октаедра та сторонами напів-правильного восьмикутника як однією із проєкцій усіченого октаедра є таким: $C_{41} = c$, $C_{42} = \sqrt{2}c$.

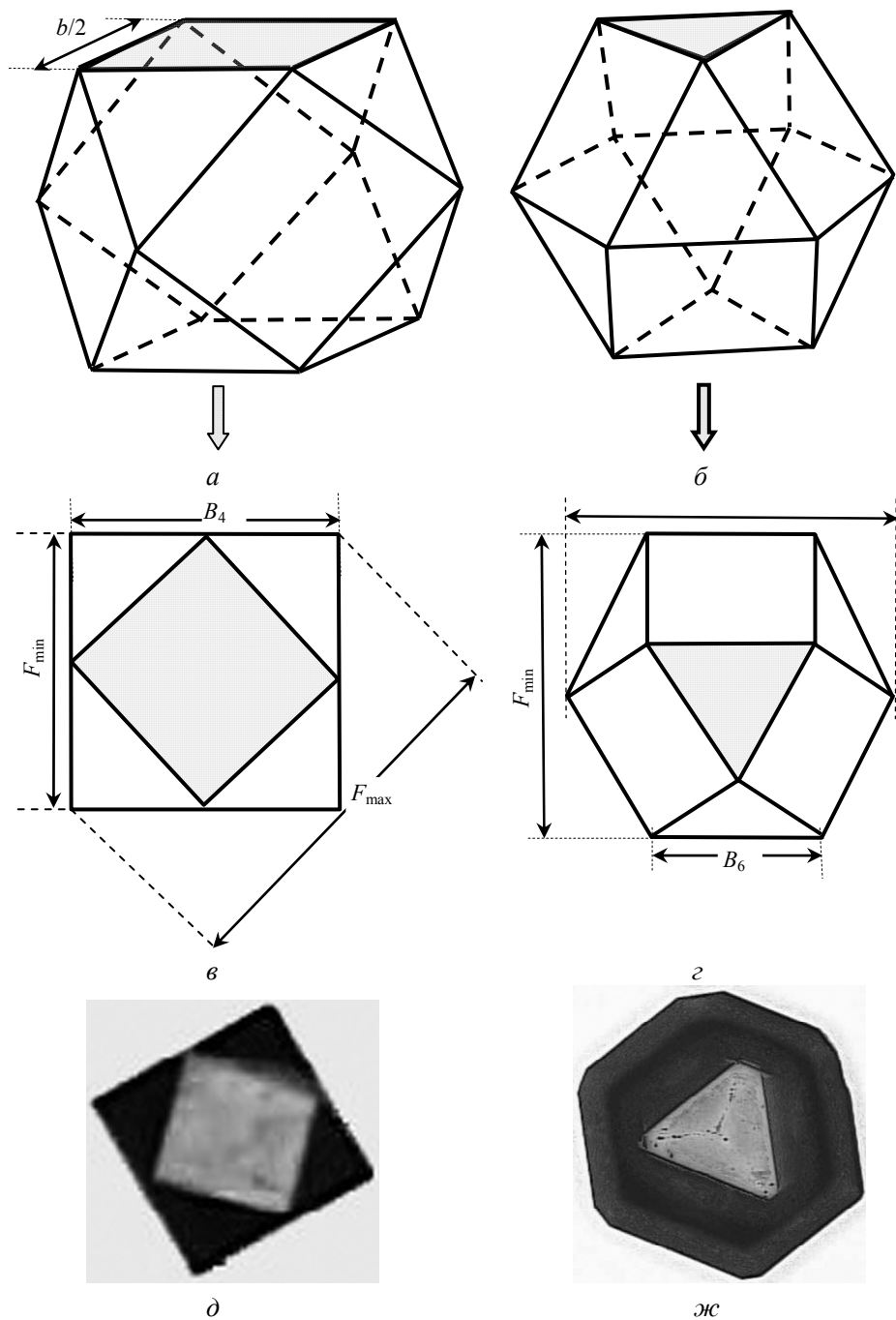


Рис. 2. Кубооктаедр (а, б) як 3D форма зерен-кристалів високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, його проєкція (в, г) та характерне зображення проєкції, отриманої за допомогою приладу DialInspect.OSM (е, ж).

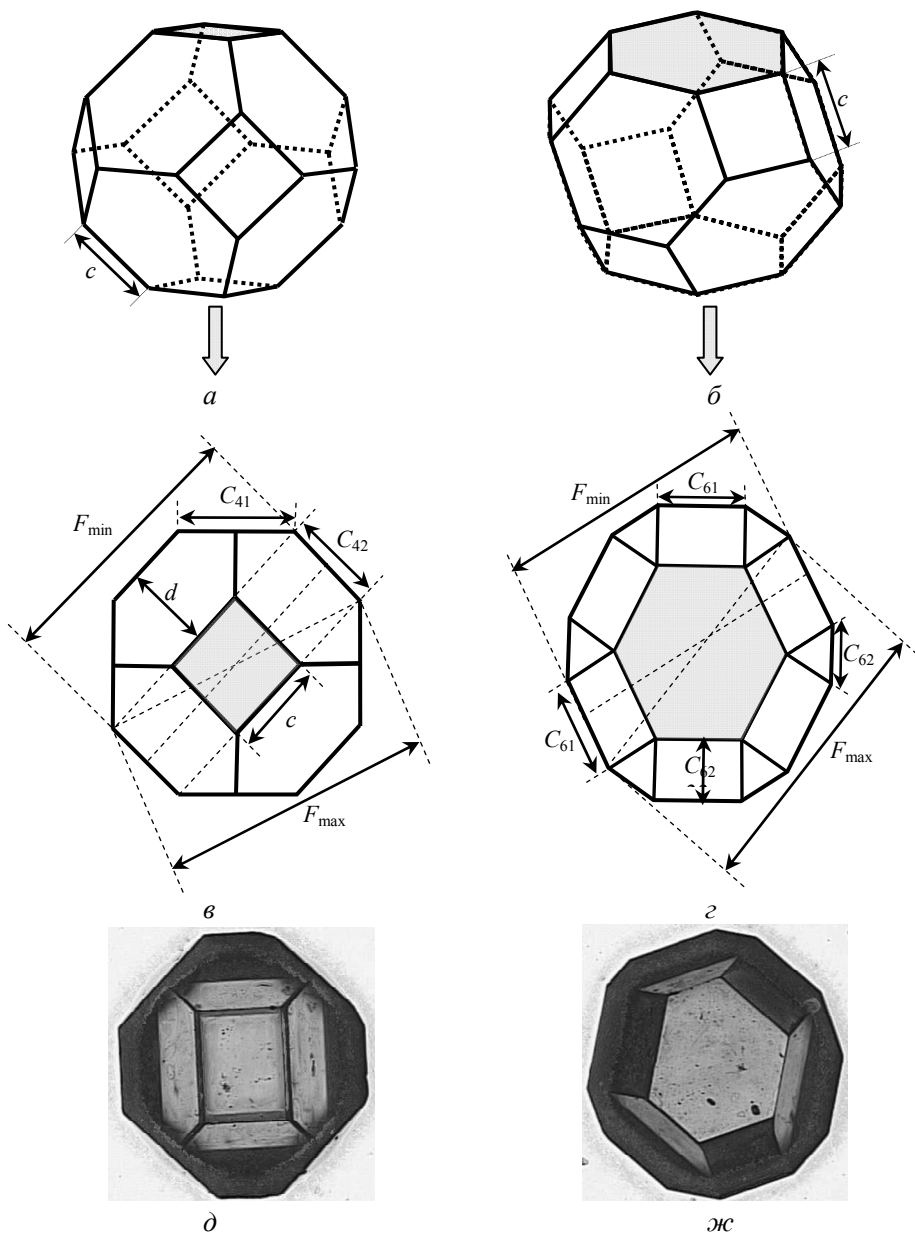


Рис. 3. Позиціонування (розташування) усіченого октаедра (*a* – на грані у формі квадрата; *б* – на грані у формі правильного шестикутника), відповідні цьому його проєкції (*в* – напівправильний восьмикутник; *з* – напівправильний дванадцятикутник) та характерне зображення проєкції, отриманої за допомогою приладу DialInspect.OSM (*д*, *ж*).

У компактному вигляді зазначену вище інформацію приведено в табл. 1. Там само приведено і отримані аналітичні залежності для визначення об'єму та площі поверхні зерна через ребро зазначених вище правильних многогранників та периметру їхньої проєкції.

Також було отримано точні аналітичні аналоги таких геометричних параметрів проєкції зерна як Фере-подовження (F_{el}) та відносна доля світлої (прозорої) частини проєкції зерна (A_{lgh}) у загальній її площі (A_{tot}). Обидві ці характеристики разом із максимальним (F_{max}) і мінімальним (F_{min}) діаметрами Фе-

ре і периметром проекції зерна входять у перелік характеристик, які діагностують за допомогою приладу DiaInspect.OSM [15], і які є важливими для автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен (кристалів) високоміцних шліф-порошків синтетичного алмазу. Ці ж характеристики, за винятком відносної долі світлої (прозорої) частини проекції зерна в загальній її площі, є початковими даними для відомих пошуково-аналогових методів автоматизованої ідентифікації проекції зерен [23, 24]. Фізична сутність цих характеристик коротко описується в [15].

За означенням Фере-подовження вводиться через максимальний і мінімальний діаметри Фере проекції зерна як їхнє відношення, тобто $F_{el} = F_{max}/F_{min}$ [15, 25–27]. У порівнянні з [15], у публікаціях [25–27] подається більш розгорнутий опис максимального і мінімального діаметрів Фере, необхідних для визначення Фере-подовження з посиланням на першоджерело [28], де, очевидно, вони вперше згадуються. Зазначений опис стосується як теоретичного обґрунтування цих геометричних характеристик проекції зерна, так і способу практичного їхнього вимірювання та графічної ілюстрації.

Таблиця 1. Геометричні параметри октаедра, кубооктаедра, усіченого октаедра та їхніх проекцій і теоретичні значення деяких морфометричних характеристик цих просторових (3D) тіл, важливих для автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен (кристалів) високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу

Геометричні характеристики	Просторові тіла				
	октаедр (<i>a</i> – довжина ребра)	кубооктаедр (<i>b</i> – довжина ребра)		усічений октаедр (<i>c</i> – довжина ребра)	
		позиціонування (розташування)			
		правильний трикутник	квадрат	квадрат	правильний шестикутник
Об’єм	$\sqrt{2}a^3/3$	$5\sqrt{2}b^3/3$		$8\sqrt{2}c^3$	
Площа поверхні	$2\sqrt{3}a^2$	$2(3+\sqrt{3})b^2$		$6(1+2\sqrt{3})c^2$	
Площа проекції загальна	$\sqrt{3}a^2/2$	$3\sqrt{3}b^2/2$	$2b^2$	$7c^2$	$4\sqrt{3}c^2$
Площа світлої частини проекції	$\sqrt{3}a^2/6$	$\sqrt{3}b^2/4$	b^2	c^2	$3\sqrt{3}c^2/2$
A_{lgh}	1/3 = 0,333	1/6 = 0,167	1/2 = 0,5	1/7 = 0,14286	3/8 = 0,375
F_{max}	$2a/\sqrt{3}$	$2b$	$2b$	$\sqrt{10}c$	$\sqrt{9-(1/3)}c$
F_{min}	a	$\sqrt{3}b$	$\sqrt{2}b$	$2\sqrt{2}c$	$5c/\sqrt{3}$
F_{el}	$2/\sqrt{3}\approx1,155$	$2/\sqrt{3}\approx1,155$	$\sqrt{2}\approx1,414$	$\sqrt{5}/2\approx1,118$	$\sqrt{26}/5\approx1,02$
Периметр проекції	$2\sqrt{3}a$	$6b$	$4\sqrt{2}b$	$4(1+\sqrt{2})c$	$6(1+\sqrt{2})c$
Висота зерна <i>H</i>	$\sqrt{2/3}a$	$\sqrt{2/3}2b$	$2\sqrt{2/3}b$	$2\sqrt{2}c$	$3\sqrt{2/3}c$
Двогранний кут	~ 109,47°	~ 125,26°		~ 109,47°	~ 125,26°
Кількість граней	8	14		14	
Кількість вершин	6	12		24	
Кількість ребер	10	24		36	

Так, у [25] діаметр Фере (каліпера) визначено як нормальна відстань між двома паралельними дотичними, що торкаються контуру частинки.

У [26] зазначено, що діаметр Фере – це міра розміру об’єкта в заданому напрямку. Загалом його можна визначити як відстань між двома паралельними площинами, що обмежують об’єкт перпендикулярно цьому напрямку. Тому його також називають діаметром “штангенциркуля” або діаметром “мірної вилки” [26], що означає вимірювання розміру об’єкта за допомогою штангенциркуля. Зазначається, що на практиці діаметри Фере легко визначити через попереднє обчислення опуклої оболонки об’єкта.

За означенням відносна доля світлої (прозорої) частини проекції зерна (A_{lgh}) у загальній її площі (A_{tot}) вводиться як відношення $A_{lgh} = (A_{tot} - A_{Dark})/A_{tot}$, де A_{Dark} – площа темної частини проекції зерна. Дану характеристику, як і максимальний та мінімальний діаметри Фере проекції зерна, діагностували за допомогою приладу DiaInspect.OSM. Цей прилад, який заснований на цифровій обробці зображень, оснащений оптичним мікроскопом і цифровою відеокамерою, а зображення зерна формується проникаючим (або прямим) світловим потоком. Кристали високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу є оптично прозорими тілами. Коли на шляху світлового потоку зустрічається кристалографічна грань, не перпендикулярна напрямку його поширення, то частина світла відбивається і на відповідному місці зображення проекції зерна утворюється менш яскрава його частина в порівнянні із зображенням від граней, які орієнтовані перпендикулярно напрямку світлового потоку. Якщо ж кристал має дві плоско паралельні грані, на одній із яких він розташований на предметному столі мікроскопу, а потік світла направлений перпендикулярно цим граням, то потік світла практично в повному обсязі проходить крізь такі площини на поверхні кристалу і на зображенні відтворюється найбільш світла (в порівнянні з іншими ділянками) частина проекції кристалу. Водночас, чим більша площа такої грані, тим більшою буде і доля відповідної світлої частини проекції кристалічного зерна в загальній її площі. За допомогою програмного забезпечення приладу DiaInspect.OSM ці складові проекції аналізують і отримують у числовому виді.

МЕТОДИЧНА СХЕМА (АЛГОРИТМ) АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЯ 3D ФОРМИ ЗЕРЕН (КРИСТАЛІВ) ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Методична схема (алгоритм) автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен (кристалів) високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу передбачає наступні процедури.

Діагностування морфометричних характеристик за допомогою приладу DiaInspect.OSM (чи подібним йому за призначенням)

За допомогою приладу DiaInspect.OSM діагностують більше 20-ти морфометричних характеристик абразивних порошків [15]. У процесі вирішення задачі, що розглядали, використовували наступні з них: максимальний (F_{max}) і мінімальний (F_{min}) діаметри Фере проекції зерна, Фере-подовження (F_{el}), периметр (L) проекції, площу проекції зерна загальну (A_{tot}), та відносну долю світлої (прозорої) частини проекції зерна (A_{lgh}). Остання в цьому переліку морфометрична характеристика входить до сукупності початкових даних для автоматизованої ідентифікації 3D форми, інші характеристики – як початкові дані для автоматизованої ідентифікації 2D форми проекції зерен.

Автоматизована ідентифікацію 2D форми проекції зерен

Практичну реалізацію цієї процедури здійснювали пошуково-аналоговим методом [23], зокрема удосконаленим його варіантом з розширеним переліком базових фігур-аналогів (БФА) [24]. Із загального обсягу інформації, яку отримують цим методом, у подальшому автори використовували показники

диференціальної формоподібності, зокрема показник з максимальним значенням, та відносну похибку формозаміни фактичної проекції зерна найближчою 2D фігурою-аналогом із переліку прийнятої базової їхньої сукупності.

Автоматизована ідентифікація 3D форми зерен

Автоматизовану ідентифікацію 3D форми зерна високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу здійснювали на підставі інформації щодо 2D форми його проекції та показника відносної долі світлої (прозорої) частини проекції зерна в загальній її площі. Відповідну інформацію зведено в табл. 2, яку коротко будемо називати таблицею критеріїв. Алгоритм такої ідентифікації полягає в наступному. За показником диференціальної формоподібності з максимальним його значенням для кристалічного зерна, 3D форму якого ідентифікують, фіксували (встановлювали) відповідну форму проекції з переліку прийнятої базової їхньої сукупності. Саме цей найбільш близький аналог і приймали як ідентифіковану форму фактичної проекції відповідного зерна. Цю ідентифіковану форму фактичної проекції знаходимо в першій колонці табл. 2. У другій колонці табл. 2 в тій самій стрічці цієї таблиці перевіряємо, чи попадає фактичне значення показника відносної долі світлої (прозорої) частини проекції цього зерна в приведений в другій колонці табл. 2 інтервал його значень. Якщо цю умову виконано, то назва 3D фігури, зазначена на перетині цієї стрічки табл. 2 із третьою її колонкою і буде ідентифікованою 3D формою зерна, що аналізували. Якщо ж жодний із критеріїв, зазначених у табл. 2, не виконано, то це зерно відносять до окремої четвертої фракції (групи). Для зерен цієї фракції приймали екстраполяційно-афінну 3D модель зерна, що важливо для подальших прикладних застосувань такого методу розділення високоміцних шліфпорошків СА за 3D формою їхніх зерен. Описану вище процедуру послідовно застосовували для кожного зерна проби досліджуваного шліфпорошку. Дані з підсумкової xls-таблиці, отриманої в процесі діагностування початкової проби шліфпорошку з допомогою приладу DiaInspect.OSM, вносили в попередньо створений файл, який відповідає тій чи іншій фракції розділеного шліфпорошку.

Таблиця 2. Критеріальні значення деяких морфометричних характеристик високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, важливих для автоматизованої ідентифікації 3D форми їхніх зерен (кристалів)

2D форма проекції	Відносна доля світлої (прозорої) частини проекції зерна в загальній її площі A_{lgh}	3D форма зерна
Правильний шестикутник	$0,320 \leq A_{lgh} \leq 0,354$	октаедр
Правильний шестикутник	$0,157 \leq A_{lgh} \leq 0,187$	кубооктаедр
Квадрат	$0,400 \leq A_{lgh} \leq 0,600$	
Напівправильний дванадцятикутник	$0,360 \leq A_{lgh} \leq 0,385$	усічений октаедр
Напівправильний восьмикутник	$0,123 \leq A_{lgh} \leq 0,166$	

Приклад практичного застосування запропонованого методу автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу

Було проведено автоматизовану ідентифікацію 3D форми зерен, стандартних за нормативними документами [6, 14] високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу AC200 400/315, AC300 200/160 та AC400 500/400. Відбір проб порошків здійснювали після ретельного перемішування згідно з вимогами стандарту на вказаний надтвердий дисперсний матеріал [6]. Кількість зерен у відібраних пробах для кожного із досліджуваних шліфпорошків складала 232 шт., 1621 шт. та 245 шт. відповідно. Фрагменти DiaInspect-фотографій зерен досліджуваних високоміцних шліфпорошків показані на рис. 4.

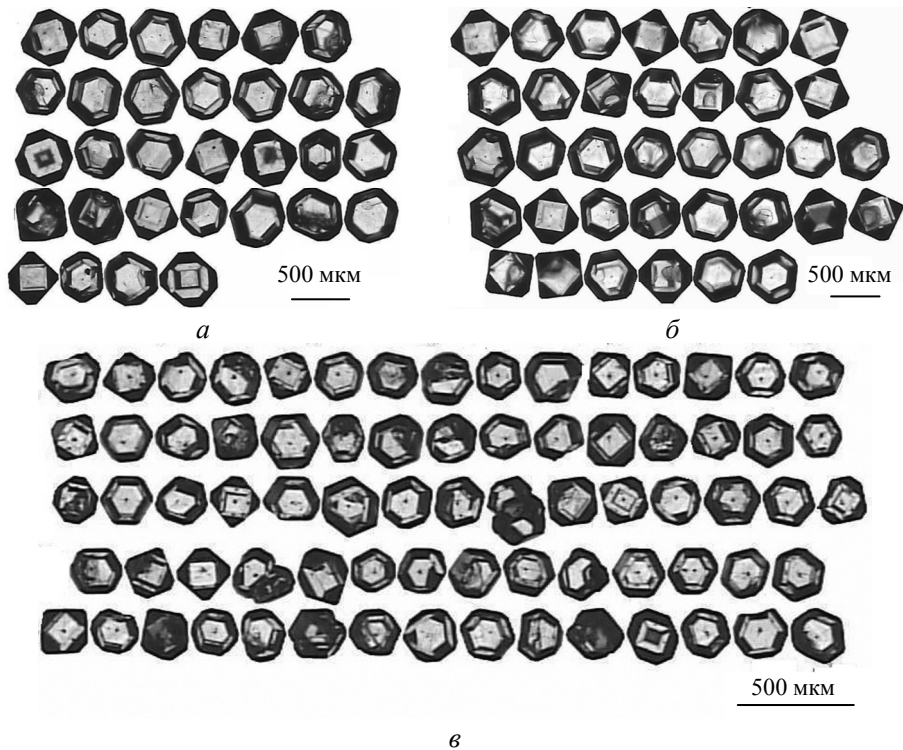


Рис. 4. Фрагменти DiaInspect-фотографії зерен досліджуваних високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу; AC400 500/400 (а), AC200 400/315 (б), AC300 200/160 (в).

Реалізація запропонованого методу автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, як відзначали вище, передбачає ряд кроків. На першому з них проводили діагностування морфометричних характеристик досліджуваних шліфпорошків за допомогою приладу DiaInspect.OSM [15].

Із повного переліку морфометричних характеристик, які діагностували зазначеним вище приладом, для розглядуваного тут прикладу використовують наступні: максимальний та мінімальний діаметри Фере, Фере-подовження, периметр і площу проекції зерна, загальну та відносну частку прозорої частини площі проекції зерна в загальній її площі, висоту зерна. Більш повна інформація щодо поняттєвого сенсу цих морфометричних характеристик та геометричної їхньої інтерпретації знаходиться на сайті фірми Vollstädt Diamant GmbH [15] та в публікаціях розробників приладу DiaInspect.OSM,

наприклад, у [18, 29]. Потім проводили автоматизовану ідентифікацію та кількісне оцінювання удосконаленим пошуково-аналоговим методом формоподібності проекції зерен початкового шліфпорошку. Отримані результати приведено в табл. 3, а саме, показники диференціальної формодібності $f_k^{(л)}$, % до прийнятих можливих базових аналогів проекції зерна, абсолютна кількість зерен N з формою даного базового аналога та відносна похибка формозаміни $\Delta_k^{(л)}$, % проекції зерен кожного із досліджуваних шліфпорошків.

Таблиця 3. Показники диференціальної формодібності ($f_k^{(л)}$, %), абсолютна кількість зерен (N , шт.) та відносна похибка формозаміни ($\Delta_k^{(л)}$, %) проекції зерен досліджуваних високоміцних шліфпорошків

Базові фігури-аналоги	AC400 500/400			AC200 400/315			AC300 200/160		
	$f_k^{(л)}$	N	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	N	$\Delta_k^{(л)}$	$f_k^{(л)}$	N	$\Delta_k^{(л)}$
Овалоподібні фігури (коло+еліпс)	0	0	0,00	2,59	6	0,1453	4,19	68	0,1518
Прямокутник	0	0	0,00	4,74	11	0,1800	10,36	168	0,1609
Ромб	1,22	3	35,73	0,43	1	0,3583	0,00	0	0
Трапеція	1,22	3	10,80	0,00	0	0,0000	0,00	0	0
Квадрат	6,53	16	10,89	0,86	2	0,1041	3,08	50	0,0953
Правильний п'ятикутник	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0000	0,00	0	0
Правильний шестикутник	11,43	28	11,49	9,05	21	0,1032	15,61	253	0,1061
Правильний восьмикутник	0,00	0	0,00	0,43	1	0,0382	0,43	7	0,0403
Трикутник	0,41	1	27,07	0,00	0	0,0000	0,06	1	0,2521
Паралелограм	0	0	0,00	0,00	0	0,0000	0,00	0	0
Напівправильний дванадцятикутник	69,80	171	6,70	74,14	172	0,0646	58,67	951	0,0695
Напівправильний восьмикутник	9,39	23	6,09	7,76	18	0,0646	7,59	123	0,0651
Кількість зерен у пробі шліфпорошок	245			232			1621		

Наступним кроком було віртуальне розділення початкового шліфпорошку на зазначені вище чотири фракції (октаедри, кубооктаедри, усічені октаедри та решта зерен) за критеріями ідентифікованої форми проекції зерен та за значенням відносної долі світлої частки проекції зерна в загальній її площі. Кількість зерен у кожній із виділених за такими критеріями чотирьох фракцій наведено у відповідній колонці табл. 4.

Оскільки викладений тут алгоритм передбачає обчислювальні та логічні процедури, то необхідно створити відповідні комп'ютерно-програмні засоби.

Таблиця 4. Кількість зерен у кожній із виділених чотирьох фракцій досліджуваних високоміцних шліфпорошків

Фракції шліфпорошку за 3D формою зерен	AC400 500/400	AC200 400/315	AC300 200/160
Загальна кількість зерен у пробі	245	232	1621
Октаедр	7	5	53
Кубооктаедр	37	3	95
Усічений октаедр	194	173	958
Решта зерен	7	51	515

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА НАПРЯМКИ ПРИКЛАДНОГО ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ

Виділені фракції разом із отриманими числовими файлами з морфометричних характеристик можуть бути застосовані як початкові дані для розробки в подальшому нових удосконалених методів більш достовірного визначення таких технологічних властивостей як зовнішня питома поверхня, число зерен в одному караті, ступінь і товщина покриття зерен та характеристики різальних кромок. Водночас для перших трьох фракцій, у процесі визначення показників технологічних властивостей яких передбачали обчислення об’єму і площі поверхні зерна, слід використовувати відповідні формули для обчислення цих геометричних характеристик, що приведено в табл. 1. У разі визначення характеристик різальних кромок слід використовувати інформацію щодо кількості вершин і двограних кутів, яку також приведено в табл. 1. Що стосується технологічних властивостей четвертої фракції, то у процесі визначення зовнішньої питомої поверхні, числа зерен в одному караті, ступеню і товщини покриття зерен для обчислення об’єму і площі поверхні зерна слід використовувати екстраполяційно-афінну 3D модель зерна в поєднанні з відомими методами. Проте і для перших трьох фракцій, і для четвертої фракції для автоматизації обчислень доцільно створити відповідні програмні засоби. Вони також мають бути окремими для кожної із зазначених вище технологічних властивостей.

Слід відзначити ще один важливий прикладний аспект запропонованого методу автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен (кристалів) високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Він стосується можливості застосування його до попередньої оцінки обґрунтованості і доцільності визначення технологічних властивостей даного конкретного високоміцного шліфпорошку синтетичного алмазу за схемою комбінованого використання як фактичної 3D форми, так і 3D моделі зерна. Підставою для прийняття подібного висновку може слугувати інформація щодо формоподібності проекції зерен таких шліфпорошків.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не фінансувалася із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

G. A. Petasyuk, O. O. Bochechka
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Automated identification of the 3D shape of grains
of high-strength synthetic diamond grinding powders

The special significance of the spatial shape of the grains in the tasks of indirectly and analytically determining the technological properties of synthetic diamond grinding powders is substantiated. With reference to literary sources, it is noted that the direct use of the actual 3D shape of the grain of such grinding powders instead of its 3D model allows obtaining more reliable information about the indicators of technological properties. Emphasis is placed on the applied importance of creating methodical means of automated 3D identification of a large (up to 2,000) of grain sample of such abrasive powders. An original method of solving such a problem is proposed for high-strength synthetic diamond grinding powders. The method is based on the well-known fact that the grains of such abrasive powders are crystals with a 3D shape close to octahedra, cubooctahedrons, and truncated octahedra. Analytical and graphical information is provided regarding the shape of the orthographic parallel projection of the specified spatial bodies depending on the 2D shape of the face on which they are located. An analytical presentation of the relationship between the geometric parameters of the projection, necessary for the automated identification of both the 2D shape of the projection and the 3D shape of the grains, and the creative parameters of the octahedron, cubooctahedron, and truncated octahedron was obtained. The analogues of the morphometric characteristics of abrasive powders, which are diagnosed by modern computer and technical means and whose grains have the 3D shape of the considered spatial bodies, have been updated. The practical application of the developed methodological tools is illustrated on the example of high-strength synthetic diamond grinding powders AS250–AS500. It was established that the relative share of grains other than octahedra, cubooctahedrons and truncated octahedra of 3D forms does not exceed 31 %.

Keywords: identification, high-strength grinding powder, grain, shape, projection, morphometric characteristics, technological properties.

1. Афанасьев В.П., Заневский О.А., Ивахненко С.А., Ильницкая Г.Д. Получение и свойства шлиф- и микропорошков компактных алмазно-лонсдейлитовых абразивов. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2016. Вып. 19. С. 320–326.
2. Тимошенко В.В. Вдосконалення алмазних шліфпорошків марок АС6–АС20 абразивного призначення спрямовано зміною їхніх розмірів та фізико-механічних характеристик: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2021. 20 с.
3. Богданович М.Г., Гинзбург О.В., Волошин М.Н., Кишинская З.А. Зависимость абразивной способности алмазных порошков от прочности зерен. *Синтетические алмазы.* 1972. Вып. 2. С. 12–14.
4. Исонкин А.М., Ильницкая Г.Д., Зайцева И.Н. Влияние дефектов алмазов на работоспособность буровых коронок. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017. Вып. 20. С. 130–137.
5. Лавриненко В.И., Петасюк Г.А., Сухарев Д.В. Морфометрические характеристики монокристаллов синтетического алмаза как критерий равномерности износа прецизионных алмазных правящих роликов. *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.* Харьков: НТУ “ХПИ”, 2012. Вып. 81. С. 162–169
6. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний від 01.01.96.
7. 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 / In: *Advanced Manufacturing Processes II.* 2021. 879 p. P. 422–432.
8. Petasyuk G.A., Lavrinenko V.I., Sirota Yu.V., Muzichka D.G. A study of the tendency and extent of variation of morphometric characteristics of standard synthetic diamond grits in a continuous series of their grades and sizes. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 6. P. 414–423.

9. Sun Y., He L., Zhang C., Meng Q., Liu B., Gao K., Wen M., Zheng W. Enhanced tensile strength and thermal conductivity in copper diamond composites with B₄C coating. *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, art. 10727.
10. Sun Y., Zhang C., He L., Meng Q., Liu B.-Ch., Gao K., Wu J. Enhanced bending strength and thermal conductivity in diamond/Al composites with B₄C coating. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, art. 11104.
11. Sagradyan A. I., Agbalyan S. G., Pogosyan H. V. Extending life of diamond tools for machining nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 3. P. 216–221.
12. Цисар М.О., Загора А.П., Івахненко С.А., Ільницька Г.Д., Заневський О.О., Гордєєв С.О. Залежність статичної міцності крупних монокристалів синтетичного алмазу типу ІІа октаедричного габітусу від їх розміру. *Інструментальне матеріалознавство: Зб. наук. пр.* Київ: IHM ім. В. М. Бакуля НАН України, 2021. Т. 24. С. 169–175.
13. Petasyuk G.A. A new fraction-averaging approach to the diagnostics of the technological properties of high-strength synthetic diamond powders. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 453–456.
14. Шлифпорошки синтетических алмазов марок AC200, AC250, AC300, AC350, AC400. ТУ У 28.5–054717377–072–2003.
15. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>
16. Petasyuk G.A. Determining the thickness coating of grinding powders of synthetic diamond based on a specific-surface approach and using an extrapolation-affine 3D model of grain. *J. Coat. Sci. Technol.* 2022. Vol. 9. P. 20–25.
17. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. Extrapolation analytical method for determination of outer specific surface of powders of superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2007. Vol. 29, no. 6. P. 375–383.
18. List E., Vollstaedt H., Frenzel J. Counting particles per carat by means of two-dimensional image analysis. In: 5th ZISC Zhengzhou International Superhard Materials and Related Products Conference in Zhengzhou, Henan, China, 5–7 Sept. 2008.
19. Petasyuk G.A., Sirota Yu.V. Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34, no. 3. P. 200–208.
20. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Lavrinenko V.I., Poltoratsky V.G., Bilochenko V.P., Sokolyuk D.V. The additive pycnometric method for assessment of the degree of coating of grinding powders made of superhard materials using the extrapolation-affinity 3D-model of the grain. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 3. P. 199–202.
21. Petasyuk G.A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 2. P. 128–139.
22. Маценко В.Г. Комп'ютерна графіка: Навчальний посібник. Чернівці: Рута, 2009. 343 с.
23. 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.
24. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Syrota 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.
25. Pabst W., Gregorová E. Characterization of Particles and Particle Systems. ICT: Prague, 2007. 122 p.
26. Debayle J. Geometrical and morphometrical tools for the inclusion analysis of metallic alloys. *Metall. Res. Technol.* 2019. Vol. 116, art. 508.
27. Rivollier S., Debayle J., Pinoli J.-C. Shape diagrams for 2D compact sets - Part II: analytic simply connected sets. *The Australian J. Math. Analysis Appl. (AJMAA)*. 2010. Vol. 7, is. 2, art. 4.
28. Feret L.R. La grosseur des grains des matières pulvérulentes. Premières Communications de la Nouvelle Association Internationale pour l'Essai des Matériaux. Groupe D: 428–436 Zürich (1930).
29. Vollstaedt H., List E. Controlling the stability of superabrasive powders. Proc. 4th Zhengzhou International Superhard Materials and Related Products Conference (4th ZISC), Zhengzhou, P.R. China, 2003.

Надійшла до редакції 26.06.24

Після доопрацювання 26.06.24

Прийнята до опублікування 19.07.24