

УДК 621.921.34:666.233.08374

**Г. А. Петасюк*, О. О. Бочечка, В. І. Лавріненко,
Ю. В. Сирота**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*petasyuyk@ukr.net

Методичні особливості кількісного аналізу характеристик різальних кромок високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу

Розглянуто методичні аспекти кількісного аналізу характеристик різальних кромок абразивних порошків. Зазначено, що в практиці визначення показників цих характеристик домінує підхід, заснований на використанні проекції зерна. Обґрунтовано можливість і необхідність переходу в подібній задачі до методичної схеми, заснованої на 3D формі зерна. Запропоновано методичну схему, яка враховує реальну морфологію зерен таких шліфпорошків, що забезпечує більшу правдоподібність отримуваних показників характеристик їхніх різальних кромок. Виконано аналітичну інтерпретацію кількості різальних кромок та кутів їхнього загострення для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. На прикладі шліфпорошків AC400 500/400 та AC200 630/500 проілюстровано доцільність і перевагу методичної схеми з використанням 3D форми зерна як твердого об'єкту фактичних різальних кромок високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Водночас не відкинута методична схема з використанням проекції зерна як твердого об'єкту різальних кромок. На кількісному рівні обґрунтовано рекомендацію для не високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу та інших абразивних порошків застосовувати відомий метод визначення характеристик різальних кромок, заснований на геометричному моделюванні проекції зерна абразивних порошків зіркоподібними многокутниками. Встановлено, що обидва розглянуті методи дають достатньо задовільний результат щодо збігу значення кутів загострення різальних кромок (відносна похибка не перевищує 1 %) та менш задовільний, але прийнятний результат для прикладних застосувань щодо збігу значення числа різальних кромок (відносна похибка 14–17 %).

Ключові слова: алмазні шліфпорошки, різальні кромки, характеристики, зерно, проекція, 3D форма.

ВСТУП

Ефективність абразивного інструмента в значній мірі обумовлена якістю абразивного порошку, який використовують у різальному шарі. В огляді [1], де всебічно аналізували ознаки якості абразивних порошоків та сучасних засобів впливу на них, всю сукупність цих ознак було поділено на три основні групи: зернистість, міцність та форма. Відзначено, що якість шліфпорошків залишається важливим фактором продуктивності інструмента. Також констатували, що більша поінформованість щодо методів і засобів впливу на якість абразивних порошоків корисна як для виробників даного продукту, так і його користувачів. Хоча подібний аналіз є актуальним і прийнята в ньому класифікація є доцільною, зауважимо, що крім зазначених вище трьох ознак якості абразивних порошоків на особливу увагу заслуговують ще й характеристики різальних кромок зерен. Вони є чинниками різальної здатності зерен абразивних порошоків, а відтак впливають і на ефективність самої абразивної обробки.

Саме характеристики різальних кромок зерен високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу та метод визначення їхніх показників є предметом дослідження цієї роботи.

РІЗАЛЬНІ КРОМКИ ЗЕРЕН АЛМАЗНИХ ШЛІФПОРОШКІВ ЯК ОЗНАКИ ЇХНЬОЇ АБРАЗИВНОЇ ЗДАТНОСТІ

Головним виразником різальної здатності зерен абразивних порошоків є їхні різальні кромки. Інформація щодо різальних кромок вкрай важлива для ефективного і прогнозованого використання порошоків надтвердих матеріалів (НТМ) в абразивному інструменті. Як характеристики різальних кромок найчастіше використовують значення кутів їхнього загострення та кількість таких кутів. Ці дві характеристики є найбільш згадуваними в наукових дослідженнях та під час оцінювання якості абразивних порошоків. Стосовно решти характеристик різальних кромок (ширини основи, висоти, радіуса округлення) ~~зауважимо~~, то їх значно рідше згадують у наукових дослідженнях і майже не використовують на практиці, хоча, безумовно, вони впливають на показники процесу обробки, особливо на шорсткість обробленої поверхні. Тому надалі в роботі як характеристики різальних кромок розуміємо виключно їхню кількість та кути загострення.

Саме кути загострення різальних кромок зерен порошоків НТМ та інших абразивних порошоків є одним із основних факторів, що визначають і забезпечують їхню абразивну здатність. Вони також є важливою інформаційною базою як для порівняльного аналізу якості алмазних та інших абразивних порошоків, так і для прогнозування результатів їхнього використання в інструменті. Взаємозв'язок геометричних параметрів зерен алмазних і абразивних порошоків, включно з кутами загострення різальних кромок, з показниками процесу оброблення і якістю обробленої поверхні досліджували у багатьох наукових публікаціях [2–7]. Відзначено, що геометрія вершин зерен впливає на характер їхньої взаємодії з оброблюваним матеріалом [2, 3]. Геометричні параметри зерен та їхня механічна міцність взаємозв'язані, що впливає на працездатність алмазних інструментів [4]. Умови експлуатації шліфувальних кругів, а також якість поверхневого шару оброблюваних поверхонь, багато в чому залежать не тільки від фізико-механічних властивостей зерна, але й від його лінійно-геометричних параметрів. Зокрема, кути загострення вершин різальних кромок зерен разом з іншими факторами визначають динамічну міцність зерна, від якої у підсумку залежить зношування

абразивного інструмента [5]. Значення кутів загострення різальних кромок впливає і на товщину та глибину зрізу. Установлено наближені аналітичні залежності взаємозв'язку цих показників оброблення зі значенням переднього кута зерна (дорівнює приблизно половині кута загострення різальних кромок) та радіусом округлення вершин зерна твердих і крихких матеріалів [6]. Саме більш гострі кути загострення і більша їхня кількість, на думку авторів [7], і забезпечує кращі експлуатаційні властивості алмазних кругів у порівнянні з абразивними. Проведений короткий огляд не вичерпує всіх позитивних моментів прикладного аспекту фактору різальних кромок. Істотним у всіх цих прикладах є та обставина, що будь-яке кількісне дослідження або аналіз вимагають наявності інформації щодо значення кутів загострення різальних кромок та їхньої кількості, а тому актуальною є задача вдосконалення існуючих і розроблення нових методів визначення показників цих геометричних характеристик зерен, автоматизації процесу їхнього діагностування.

Методологічні підходи до кількісного аналізу характеристик різальних кромок алмазних шліфпорошків

Кількісний аналіз характеристик різальних кромок алмазних шліфпорошків має свої специфічні особливості, які характерні не тільки для різальних кромок, як технологічних властивостей таких абразивних порошків, а й до їхніх морфометричних характеристик. Перша з них полягає в тому, що визначення тієї чи іншої морфометричної характеристики чи технологічної властивості виконують не для одного зерна абразивного порошку, а діагностують певну представницьку сукупність (пробу) його зерен. Водночас показник розглядуваної (оцінюваної) характеристики чи властивості знаходиться за допомогою статистичного опрацювання відповідних даних для зерен всієї продіагностованої проби. Другою не менш суттєвою особливістю є те, що зазначене кількісне оцінювання базується не на реальній 3D формі зерна, а на його проекції, тобто 2D зображенні зерна. Зокрема, відомі на сьогодні підходи до ідентифікації та кількісного оцінювання характеристик різальних кромок, які є предметом дослідження цієї роботи, оперують саме проекцією зерен, тобто 2D їхнього зображенням [2–8]. Фактично ж різальні кромки є такими елементами 3D рельєфу поверхні зерен, як виступи, підвищення з різною площею основи та висотою, стрімкістю, протяжністю. Тобто, вони й самі також є 3D об'єктами. Проте ідентифікувати різальні кромки в такій інтерпретації, тобто як 3D об'єкти, та виконати кількісний аналіз їхніх показників за такого підходу навіть для одного окремо взятого зерна вкрай складно, тим більше для великої сукупності зерен. Головна причина криється в тому, що на сьогодні відсутній методологічний інструментарій автоматизованої ідентифікації зазначених 3D об'єктів як потенційних різальних кромок та кількісного оцінювання їхніх характеристик для великої сукупності (до 1000–2000 і більше) зерен. Щодо одиничних зерен, то в науково-технічній літературі є чимало публікацій, які торкаються ідентифікації та кількісного оцінювання певних геометричних елементів 3D рельєфу зерен абразивних порошків як аналогів різальних кромок. Досить розлогий і охоплюючий огляд публікацій за цією тематикою представлено в [9].

Тому відомі процедури практичної ідентифікації та кількісного оцінювання різальних кромок, які стосуються переважно шліфпорошків синтетичного алмазу (СА), зазвичай проводять на проекції зерна, тобто з використанням його 2D аналога [2–7]. Такий підхід базується на ручному наведенні контуру проекції зерен. Далі на візуалізованій у такий спосіб проекції зерна викону-

ють ідентифікацію, підрахунок кількості та ручний вимір кутів загострення різальних кромки. Для цього використовують спеціальні кутові шаблони [2, 3, 5]. Але особливого розвитку такий метод не набув, оскільки практичне його застосування дуже трудомістке. Та незважаючи на очевидну недосконалість і труднощі практичного його здійснення, застосування отримав саме такий спрощений, але досяжний для практичної реалізації, підхід. Він лежить в основі взаєморозуміння і загальних поглядів на різальні кромки як ознаки якості абразивних порошків між їхніми виробниками, споживачами та дослідниками процесів абразивної обробки. На такому підході, тобто на використанні проекції зерна у процесі діагностування морфометричних характеристик абразивних порошків, базується чимало стандартів на алмазні порошки, зокрема і вітчизняний стандарт [10].

В [11] запропоновано алгоритм автоматизованого аналізу різальних кромки абразивних порошків у такій 2D постановці. Алгоритм ґрунтується на геометричному моделюванні різальних кромки зерен правильними зіркоподібними багатокутниками на підставі окремих 2D морфометричних характеристик абразивних порошків (форм-фактор, шорсткість проекції зерен, її площа). Відповідно до цього опосередковано-аналітичного методу середнє значення кутів загострення (Φ) і кількості різальних кромки ($n_{\text{рк}}$) зерен абразивних порошків, як їхніх кількісних характеристик, визначають із отриманої в [11] системи трансцендентних рівнянь, яку можна подати в такому вигляді:

$$f_r - \frac{n_{\text{рк}} Rg^2 \operatorname{tg}(\pi / n_{\text{рк}})}{\pi [Rg - \operatorname{tg}(\pi / n_{\text{рк}}) \sqrt{Rg^2 - 1}]} = 0, \quad \Phi = \frac{\pi(n_{\text{рк}} - 2)}{2n_{\text{рк}}} - \arccos\left[\frac{1}{Rg}\right], \quad (1)$$

де f_r – форм-фактор; Rg – шорсткість проекції зерна абразивного порошку. Форм-фактор характеризує ступінь округлості проекції зерна, шорсткість – ступінь розвиненості його проекції [12]. Більш детально методику визначення $n_{\text{рк}}$ та Φ із системи рівнянь (1) викладено в [11].

ОСОБЛИВОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РІЗАЛЬНИХ КРОМОК ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Підсумок проведеного огляду методичних особливостей та прикладної значимості різальних кромки зерен абразивних порошків дає можливість зробити наступні висновки. Традиційні методичні засоби практичного ідентифікування та кількісного оцінювання різальних кромки базується на візуальному виявленні та підрахунку різальних кромки, ручному вимірюванню кутів загострення та наступному узагальненню результатів як за одним зерном, так і за їхньою пробою, яку діагностували. Як альтернатива такому підходу та з метою його осучаснення розроблено метод автоматизованої ідентифікації та кількісного оцінювання характеристик різальних кромки абразивних порошків, заснований на геометричному моделюванні проекції зерна абразивних порошків зіркоподібними багатокутниками [11]. Проте в обох зазначених вище методах дослідження різальні кромки інтерпретують як геометричні елементи проекції зерна, тобто 2D його зображення, що вносить певну засторогу до застосування такого методичного інструментарію, оскільки реальні різальні кромки є геометричними елементами не проекції зерна, а зерна як 3D тіла, що вже обговорювали.

Але коли мова йде про високоміцні шліфпорошки синтетичного алмазу (марки AC125 і вище), то ідентифікацію та кількісний аналіз різальних кро-

мок може бути виконано більш адекватно, із врахуванням особливостей 3D морфології зерен із використанням підходу, викладеного в [13]. Відомо, що зерна таких шліфпорошків мають форму переважно октаедрів, кубооктаедрів та усічених октаедрів [14–19]. Цей факт підтверджує і багаторічний досвід діагностування морфометричних характеристик алмазних порошків на приладі DiaInspector.OSM авторів даної роботи. З врахуванням такої 3D форми зерен аналогами різальних кромок цілком правомірно прийняти вершини зазначених многогранників. У такому разі кількість різальних кромок ототожнюють із кількістю вершин зазначених вище 3D тіл, а кути їхнього загострення – із плоскими кутами, утворюваними відповідними висотами, середніми лініями, діагоналями чи ребрами, що сходяться у вершинах 3D тіл, які одночасно є і вершинами (початком) таких плоских кутів. Подібний аналого-інтерпретаційний підхід є більш реалістичним у порівнянні з оцінюванням характеристик різальних кромок, заснованим на кількісному аналізі проекції зерен. Зазначимо, що вперше він був використаний у [19], де досліджували вплив морфометричних характеристик монокристалів синтетичного алмазу на рівномірність зношування прецизійних алмазнихправлячих роликів.

АНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ 3D МОДЕЛЕЙ ТА ПРОЕКЦІЙ ЗЕРНА ВИСОКОМІЩНИХ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Алгоритм практичного застосування запропонованого авторами методу визначення характеристик різальних кромок високоміщних шліфпорошків синтетичного алмазу передбачає використання певних геометричних параметрів октаедра, кубооктаедра та усіченого октаедра як 3D моделей зерна. Це стосується кількості вершин таких многогранників та плоских кутів при цих вершинах як аналогів кількості різальних кромок та кутів їхнього загострення відповідно. Щодо початкових даних, то ними для запропонованого нового методу слугували окремі морфометричні характеристики проекції зерна, а саме: максимальний ($F_{\max}$) та мінімальний ($F_{\min}$) діаметри Фере, Фере подовження (F_{el}), форм-фактор (f_r), шорсткість (R_g) і периметр (p) проекції зерна, площа проекції зерна загальна (A_t) і відносна доля прозорої частини проекції в загальній її площі (A_{lg}). Більш повну інформацію щодо геометричного сенсу цих характеристик представлено в [12, 20].

Октаедр (рис. 1, а), як правильний многогранник ряду просторових Платонових тіл (тетраедр, гексаедр, додекаедр, ікосаедр), має шість вершин, в яких сходяться по чотири грані у формі правильних трикутників [21]. Проекцією октаедра на площину, паралельну одній із його граней, на якій він і розташовується, завжди буде правильний шестикутник. Особливістю такої проекції є більш світле зображення на її тлі правильного трикутника, вершини якого контактують із сторонами правильного шестикутника (в ідеалі із їхньою серединою) як проекції октаедра (або дуже близько розташовані біля них).

Кубооктаедр та усічений октаедр є похідними від октаедра і належать до ряду Архімедових тіл напівправильної форми [21]. Вони утворюються усіченням вершин октаедра, тобто це октаедр з відрізними верхівками. Кожна з цих верхівок має форму правильної чотирикутної піраміди з довжиною сторони, яка дорівнює половині або третині сторони початкового октаедра. У першому разі отримуємо кубооктаедр (див. рис. 1, б), у другому – усічений октаедр (див. рис. 1, в). Кубооктаедр має 12 вершин, в яких сходяться по чотири грані – дві у формі правильних трикутників, ще дві – у формі квадратів. Проекцією кубооктаедра на площину, паралельну одній із його граней, на якій він і розміщується, буде або правильний шестикутник (якщо ця грань є

правильним трикутником), або квадрат (якщо ця грань є квадратом). Характерною особливістю таких проєкцій є більш світле на її тлі зображення правильного трикутника, вершини якого не контактують із сторонами правильного шестикутника як проєкції кубооктаєдра (розташовані далеко від них) – у першому разі, а у другому – квадрата, вершини якого контактують із сторонами квадрата (в ідеалі із серединою цих сторін) як проєкції кубооктаєдра.

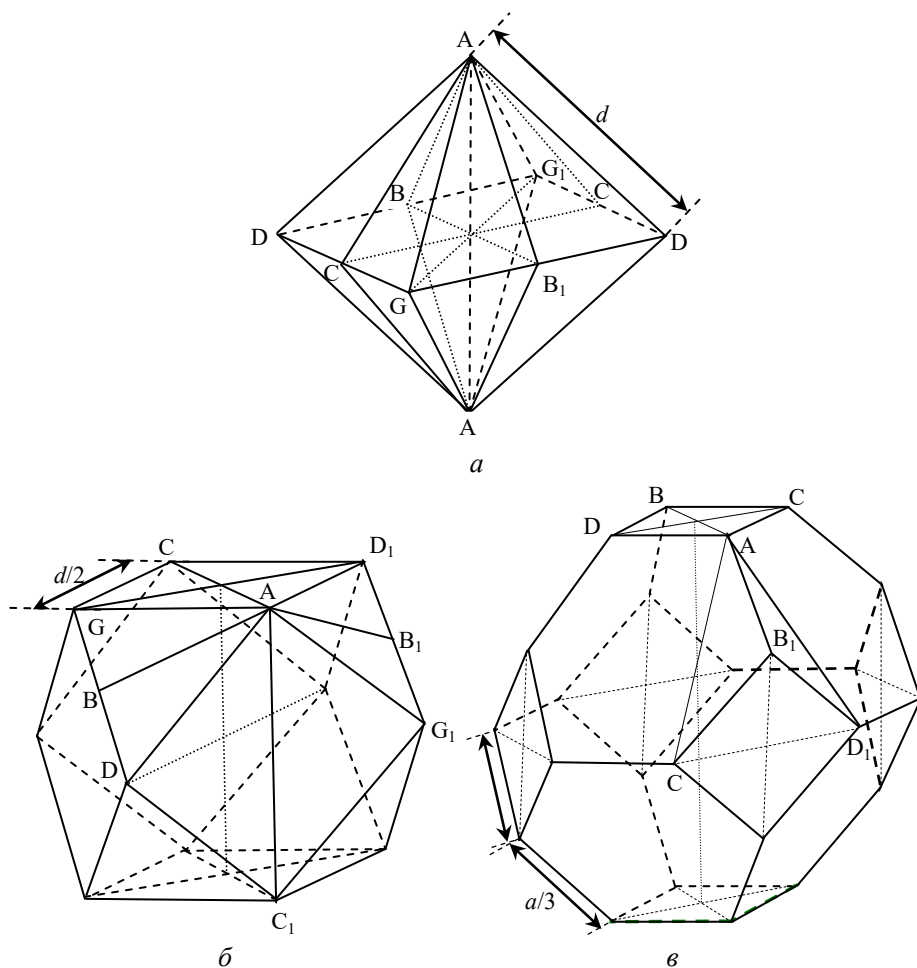


Рис. 1. Графічна інтерпретації кутів загострення різальних кромek високоміцних шліфпошків синтетичного алмазу, зерна яких мають 3D форму октаєдрів (а), кубооктаєдрів (б) та усічених октаєдрів (в).

Усічений октаєдр (див. рис. 1, в) має вісім граней у формі правильних шестикутників і шість граней у формі квадратів. У кожній із 24 вершин сходяться дві шестикутні грані і одна у формі квадрата. Загальна кількість ребер – 36, з яких 24 розділяють шестикутник і квадрат, 12 – два шестикутники. Проєкцією усіченого октаєдра на площину, паралельну одній із його граней, на якій він і розміщується, буде або напівправильний дванадцятикутник (якщо ця грань є правильним шестикутником), або напівправильний восьмикутник (якщо ця грань є квадратом). Характерною особливістю таких проєкцій у першому разі є більш світле зображення правильного шестикутника на тлі

напівправильного дванадцятикутника. Водночас вершини такого правильного шестикутника не контактують із сторонами напівправильного дванадцятикутника як проекції усіченого октаедра і розташовані далеко від них. У другому разі (проекція у формі напівправильного восьмикутника) особливістю є більш світле зображення на її тлі квадрата, вершини якого не контактують зі сторонами зазначеного восьмикутника і розташовані віддалено від його сторін.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РІЗАЛЬНИХ КРОМОК ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ДЛЯ РІЗНИХ 3D МОДЕЛЕЙ ЇХНІХ ЗЕРЕН

3D модель у формі октаедра

У кожній із шести вершин октаедра є два типи рівновеликих за значенням плоских кутів, початок (вершина) яких збігається із вершиною октаедра (див. рис. 1, а). Ці кути лежать у площині, утвореній центральним перетином октаедра, який проходить через дві протилежні його вершини вздовж лінії висот граней у формі правильних трикутників (перший тип: кути $\angle BAV_1$, $\angle CAC_1$), чи через чотири попарно протилежні його вершини по лінії попарно протилежних ребер (другий тип: кути $\angle DAD_1$, $\angle GAG_1$). Геометричний аналіз показує, що значення цих кутів дорівнює $2\arcsin(1/\sqrt{3}) \approx 70,53^\circ$ у першому разі, та 90° – у другому. Середнє значення цих чотирьох кутів дорівнює $80,26^\circ$. Саме такою можна прийняти значення шести кутів загострення для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, зерна яких мають 3D форму октаедра.

3D модель у формі кубооктаедра

У кожній із 12 вершин кубооктаедра є два типи плоских кутів, початок (вершини) яких розташовані у вершинах кубооктаедра (див. рис. 1, б). Перший тип – це кути, які лежать у площині, яка утворюється центральним перетином кубооктаедра, що проходить через дві його вершини вздовж лінії висот граней у формі правильних трикутників ($\varphi_{\text{кубог3}}$, кути $\angle BAV_1$, $\angle CAC_1$), чи через середні лінії граней у формі квадратів ($\varphi_{\text{кубог4}}$, кути $\angle DAD_1$, $\angle GAG_1$). Геометричний аналіз показує, що значення цих кутів дорівнює $\varphi_{\text{кубог3}} = 2\arccos(1/\sqrt{3}) \approx 109,47^\circ$ та $\varphi_{\text{кубог4}} = 90^\circ$ відповідно. Плоскі кути другого типу лежать у площині, яка утворюється центральним перетином кубооктаедра, що проходить через шість його вершин вздовж лінії попарно протилежних ребер. Таким перетином буде правильний шестикутник, тому значення кожного із цих кутів дорівнює $\varphi_{\text{кубог}} = 120^\circ$. Всього маємо три плоских кути в кожній із 12 вершин, середнє значення яких дорівнює $106,49^\circ$. Саме таким можна прийняти значення 12 кутів загострення для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, зерна яких мають 3D форму кубооктаедра.

3D модель у формі усіченого октаедра

Кожна із 24 вершин усіченого октаедра розташована на ребрі початкового октаедра в точці, віддаленій від його вершини на відстань, що дорівнює $1/3$ його довжини. У кожній вершині сходяться по три рівносторонні грані: дві у формі правильного шестикутника та одна у формі квадрата. Така кількість граней породжує існування трьох плоских кутів у кожній вершині усіченого октаедра. Ці кути утворюються діагоналлю однієї із зазначених граней та одним із ребер (кути $\angle BAV_1$, $\angle DAD_1$ та $\angle CAC_1$, див. рис. 1, в). Геометри-

чний аналіз показує, що перший із них утворюється ребром і діагоналлю квадрата як грані усіченого октаедра і дорівнює 135° . Два інших кути утворюються ребром та відповідною меншою діагоналлю правильного шестикутника як гранню усіченого октаедра, кожний із яких дорівнює $125,26^\circ$. Середнє значення цих трьох кутів у кожній із вершин усіченого октаедра дорівнює $128,5^\circ$. Саме таким можна прийняти значення 24 кутів загострення для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу, зерна яких мають 3D форму усіченого октаедра.

ОПОСЕРЕДКОВАНО-КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РІЗАЛЬНИХ КРОМОК ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Із врахуванням вище викладеного, авторами було запропоновано один із можливих варіантів врахування особливостей 3D морфології зерен абразивних порошків. Він дозволяє вийти за межі одиничного реального зерна як 3D об'єкту і перейти до їхньої великої сукупності. Проте застосування такого підходу має дві передумови. Перша із них стосується того, що всі зерна порошку (або принаймні більша їхня частина) мають 3D форму октаедрів, кубооктаедрів чи усічених октаедрів, а друга – того, що цю 3D форму можна ідентифікувати за формою проекції зерен, тобто за їхнім 2D зображенням. Саме така ситуація має місце, наприклад, для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу в разі визначення показників характеристик їхніх різальних кромок.

Авторами було запропоновано наступну загально-методичну схему кількісного аналізу характеристик різальних кромок таких шліфпорошків [13]. Спочатку проводять діагностування морфометричних характеристик контрольної проби шліфпорошку. З використанням отриманих даних та з застосуванням пошуково-аналогового методу [22, 23] виконують автоматизовану ідентифікацію геометричної проекції зерен шліфпорошку. У процесі такої ідентифікації початкову контрольну пробу зерен ділять на чотири фракції. Автоматизовану ідентифікацію 3D форми зерен виконують за алгоритмом, викладеним у [24]. У першу фракцію із цих чотирьох відділяють зерна, які мають 3D форму октаедра. Проекція таких зерен має форму правильного шестикутника, а показник відносної долі прозорої частини проекції в загальній її площі (A_{lg} [20]), як показує геометричний аналіз, лежить в інтервалі $0,320 \leq A_{lg} \leq 0,364$. У другу фракцію відділяють зерна, які мають 3D форму кубооктаедра. Проекція таких зерен має форму правильного шестикутника чи квадрата з показником відносної долі прозорої частини проекції у загальній її площі в інтервалі $0,120 \leq A_{lg} \leq 0,320$. До третьої фракції відносять зерна, які мають 3D форму усіченого октаедра. Проекція таких зерен має форму напівправильного дванадцятикутника чи напівправильного восьмикутника із показником відносної долі прозорої частини проекції в загальній її площі в інтервалі $A_{lg} \geq 0,364$. І, на сам кінець, четверту фракцію утворюють решта зерен, що залишилися, і які мають іншу форму проекції. Водночас автоматично формується чотири файли даних з морфометричними характеристиками зерен шліфпорошку, які виявилися в кожній із чотирьох фракцій початкового шліфпорошку. Особливістю такого розділення є те, що розділяються не самі зерна реального шліфпорошку, а результати діагностування морфометричних характеристик його контрольної проби, тобто здійснюється своєрідне віртуальне розділення шліфпорошку. У подальшому кількісний аналіз характеристик різальних кромок виконують окремо для

кожної із виділених чотирьох фракцій зерен із наступним узагальненням отриманих результатів.

Для першої фракції зерен різальні кромки ототожнюють із вершинами октаедра, кількість яких $n_1 = 6$. За кути загострення різальних кромок приймають плоскі кути при вершинах октаедра, середнє значення (ϕ_1) яких, як відзначали вище, дорівнює $80,26^\circ$.

Для другої фракції зерен різальні кромки ототожнюють із вершинами кубооктаедра, кількість (n_2) яких дорівнює дванадцять. За кути загострення різальних кромок приймають плоскі кути при вершинах кубооктаедра, середнє значення (ϕ_2) яких, як відзначали вище, дорівнює $106,49^\circ$.

Для третьої фракції зерен різальні кромки ототожнюють із вершинами усіченого октаедра, кількість (n_3) яких дорівнює 24. За кути загострення різальних кромок приймають плоскі кути при вершинах усіченого октаедра, середнє значення (ϕ_3) яких, як відзначали вище, дорівнює $128,5^\circ$.

Для зерен четвертої фракції кількісний аналіз характеристик різальних кромок виконують опосередковано-аналітичним методом, викладеними в [11]. Середні значення кількості різальних кромок та значень кутів їхнього загострення позначатимемо через n_4 та ϕ_4 відповідно.

Узагальнений показник кількості n та значення кутів загострення ϕ різальних кромок зерен всього порошку в цілому, із врахуванням запропонованої в [13] загальної методичної схеми, визначають за допомогою знаходження їхнього середньозваженого значення. Для розглянутих тут різальних кромок відповідні конкретизовані розрахункові залежності є такими:

$$n = w_1 n_1 + w_2 n_2 + w_3 n_3 + w_4 n_4, \quad (2)$$

$$\phi = w_1 \phi_1 + w_2 \phi_2 + w_3 \phi_3 + w_4 \phi_4, \quad (3)$$

де n та ϕ – узагальнені показники кількості та значень кутів загострення різальних кромок зерен всього порошку в цілому, відповідно; n_1, n_2, n_3 та n_4 – середні значення кількості різальних кромок для виділених фракцій зерен; $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ – середні значення кутів загострення різальних кромок зерен виділених фракцій шліфпорошків; w_1, w_2, w_3, w_4 – їхні вагові коефіцієнти. Їх приймають такими: $w_1 = N_1/N, w_2 = N_2/N, w_3 = N_3/N, w_4 = N_4/N$, де N_1, N_2, N_3, N_4 – кількість зерен, що виявилися в кожній із чотирьох виділених їхніх фракцій; N – загальна кількість зерен у пробі контрольного шліфпорошку.

ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ, ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА КОМЕНТАРІ ДО НИХ

Апробацію запропонованого авторами методу здійснювали на прикладі стандартних за [25] шліфпорошків AC400 500/400 та AC200 630/500. У подальшому будемо називати ці шліфпорошки контрольними. Апробація передбачала ряд кроків. На початку проводили діагностування морфометричних характеристик початкових шліфпорошків за допомогою приладу DiaInspect.OSM. DiaInspect-світлина зерен контрольних шліфпорошків показано на рис. 2 і 3. Із повного переліку морфометричних характеристик, які діагностують зазначеним вище приладом, для запропонованого тут методу використовували наступні: максимальний ($F_{\max}$) та мінімальний ($F_{\min}$) діаметри Фере, Фере подовження ($F_{el} = F_{\max}/F_{\min}$), форм-фактор (f_r), шорсткість (Rg) і периметр проекції зерна (p), площу проекції зерна загальну (A_t) та відносну долю її світлої частини (A_{lg}). Більш повну інформацію щодо геометричного сенсу цих морфометричних характеристик наведено в [12, 20].

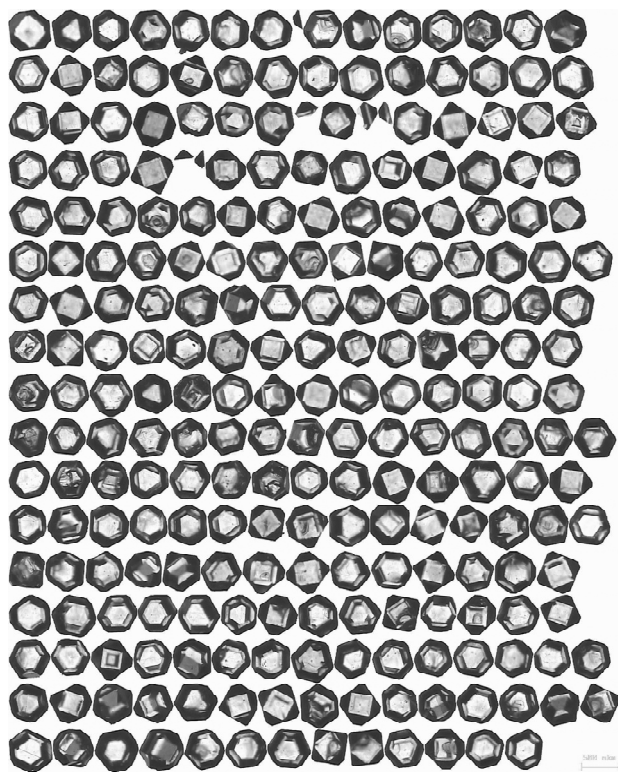


Рис. 2. DialInspect-світлина контрольної проби зерен шліфпорошку AC400 500/400.

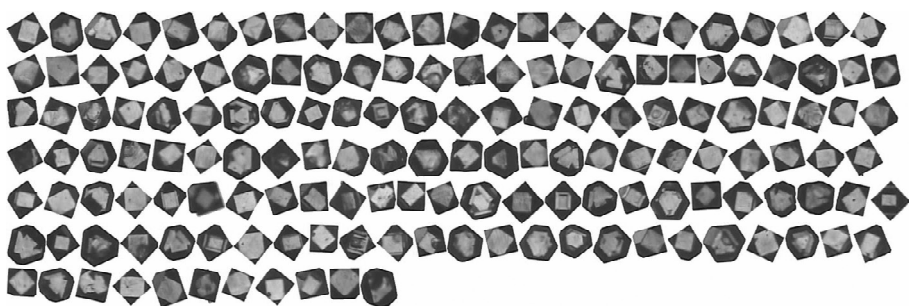


Рис. 3. DialInspect-світлина контрольної проби зерен шліфпорошку AC200 630/500.

Наступним кроком були автоматизована ідентифікація та кількісне оцінювання пошуково-аналоговим методом формоподібності проекції зерен початкового шліфпорошку (табл. 1). Одночасно з аналізом формоподібності виконували віртуальне розділення початкових шліфпорошків на зазначені вище чотири фракції за критеріями ідентифікованої форми проекції зерен та за значенням відносної долі світлої частини проекції зерна в загальній її площі. Кількість зерен у кожній із виділених за таким критерієм чотирьох їхніх фракцій для контрольних шліфпорошків наведено в табл. 2 та 3, де n – кількість різальних кромок; φ – середнє значення кута загострення різальних кромок; δ_n і δ_φ – відносні похибки визначення характеристик різальних кромок.

З урахуванням загальної кількості зерен у пробі кожного із контрольних шліфпорошків було визначено вагові коефіцієнти для виділених фракцій (див. табл. 2, 3). На підставі такої інформації запропонованим мето-

дом розраховували характеристики різальних кромок перших трьох виділених фракцій зерен контрольних шліфпорошків, 3D форма зерен яких була октаедром, кубооктаедром та усіченим октаедром відповідно. 3D форма зерен четвертої фракція не була ідентифікована і не збігалася із зазначеними вище просторовими тілами. Характеристики різальних кромок зерен цієї фракції визначали опосередковано-аналітичним методом, викладеним в [11].

Таблиця 1. Показники диференціальної формодібності $f_k^{(д)}$ абсолютна кількість N зерен даної 3D форми та відносна похибка формозаміни $\Delta_k^{(д)}$ проекції зерен контрольних порошків

Базові фігури-аналоги	АС400 500/400			АС400 630/500		
	$f_k^{(д)}$, %	N , шт	$\Delta_k^{(д)}$, %	$f_k^{(д)}$, %	N , шт	$\Delta_k^{(д)}$, %
Овалоподібні фігури (коло та еліпс)	0	0	–	0	0	–
Прямокутник	0	0	–	0	0	–
Ромб	1,22	3	35,73	0	0	–
Трапеція	1,22	3	10,80	3,18	5	61,11
Квадрат	6,53	16	10,89	70,70	111	4,24
Правильний п'ятикутник	0	0	–	0	0	–
Правильний шестикутник	11,43	28	11,49	25,48	40	5,87
Правильний восьмикутник	0	0	–	0,64	1	12,11
Трикутник	0,41	1	27,07	0	0	–
Паралелограм	0,00	0	–	0	0	–
Напівправильний дванадцятикутник	69,80	171	6,70	0	0	–
Напівправильний восьмикутник	9,39	23	6,09	0	0	–

Таблиця 2. Показники характеристик різальних кромок шліфпорошка АС400 500/400, визначені для фракцій зерен за 3D формою (дана робота) та за 2D формою [11]

Фракції зерен шліфпорошку за 3D формою	Кількість зерен у фракці- ях, шт.	Вагові коєфі- цієнти за фракціями	n , шт.		δ_n , %	ϕ , град		δ_ϕ , %
			А	Б		А	Б	
Октаедр	7	0,0286	6	15	150,0	80,26	118,62	47,79
Кубооктаедр	34	0,1388	12	13	8,33	106,49	113,40	6,49
Усічений октаедр	194	0,7918	24	20	16,67	128,50	123,54	3,86
Решта зерен	10	0,0408	–	6	–	–	85,0	–
Всі зерна	245	–	21	18	–	122,29	121,52	–

Примітка. Колонки А – 3D аналіз; Б – 2D аналіз [11].

Таблиця 3. Показники характеристик різальних кромок шліфпорошка AC200 630/500, визначені для фракцій зерен за 3D формою (дана робота) та за 2D формою [11]

Фракції зерен шліфпорошку за 3D формою зерен	Кількість зерен у фракціях, шт.	Вагові коефіцієнти за фракціями	n, шт		δ_n , %	φ , град		δ_φ , %
			А	Б		А	Б	
Октаедр	9	0,057	6	18	200,0	80,26	122	52,00
Кубооктаедр	133	0,847	12	9	25,0	106,49	104	2,34
Усічений октаедр	9	0,0573	24	20	16,67	128,50	126	1,95
Решта зерен	6	0,0382	–	9	–	99,67	112	–
Всі зерна	157	–	12		–	105,96		–

Примітка. Колонки А – 3D аналіз; Б – 2D аналіз [11].

Водночас методом, викладеним в [11], визначали також кількість (n) різальних кромок та середнє значення кутів їхнього загострення (φ , град.) для зерен початкових (не розділених на фракції) контрольних шліфпорошків. Вони виявилися такими: $n = 18$, $\varphi = 121,52^\circ$ – для шліфпорошку AC400 500/400 і $n = 10$, $\varphi = 105,26^\circ$ – для шліфпорошка AC200 630/500. Цим же методом було визначено характеристики різальних кромок зерен 1–4 фракцій кожного із контрольних шліфпорошків (див. табл. 2 та 3). Така інформація необхідна для порівняння запропонованого нового та відомого методів визначення зазначених характеристик різальних кромок, зокрема похибки визначення показників цих характеристик різальних кромок відомим методом. Як основу для порівняння було використано показники різальних кромок, отримані запропонованим новим методом, оскільки він враховує 3D морфологію реальних зерен високоміцних шліфпорошків СА.

Порівняльний аналіз отриманих результатів (див. табл. 2 та 3) проводили за двома варіантами: у першому порівнювали характеристики різальних кромок 1–3 фракцій контрольних шліфпорошків, вираховані новим, заснованим на 3D підході методом (колонки А), і відомим опосередковано-аналітичним методом, який ґрунтується на геометричному моделюванні різальних кромок зерен правильними зіркоподібними багатокутниками з використанням окремих 2D морфометричних характеристик абразивних порошків (колонки Б). Другий варіант передбачав порівняльний аналіз характеристик різальних кромок для всього шліфпорошку в цілому, отриманих з використанням нового комбінованого (3D та 2D) підходу, що запропоновано авторами, та відомого методу, заснованого на 2D підході. За базу порівняння приймали характеристики різальних кромок, отримані з використанням 3D підходу, оскільки він враховує фактичну 3D морфологію зерен і тому більш адекватно відповідає реальній суті різальних кромок. Зауважимо, що другий варіант порівняльного аналізу має і важливий прикладний аспект. Він дозволяє на кількісному рівні оцінити можливу похибку визначення показників характеристик різальних кромок методом, заснованим на 2D підході, тобто на геометричному моделюванні різальних кромок зерен правильними зіркоподібними багатокутниками [11]. Це зі свого боку дає можливість сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо правомірності та діапазону застосування цього відомого методу.

Порівняльний аналіз показав, що характеристики різальних кромок шліфпорошків першої фракції, ідентифікована 3D форма зерна яких є октаед-

ром, визначені відомим методом [11], мають завищені показники. Такі значення показників мають місце як для шліфпорошка АС400 500/400, так і шліфпорошка АС200 630/500. Водночас суттєві відмінності для цієї фракції спостерігали для шліфпорошка АС200 630/500, який за міцністю поступається шліфпорошку АС400 500/400. Для характеристик різальних кромок шліфпорошків другої і третьої фракцій, ідентифікована 3D форма зерна яких є кубооктаедром і усіченим октаедром, має місце протилежна картина співвідношення. Характер співвідношення такий, що більш близькими між собою є значення кількості різальних кромок та кутів їхнього загострення для шліфпорошка АС400 500/400, міцність якого більше, ніж шліфпорошка АС200 630/500. Такий характер співвідношення свідчить про ефективність запропонованого авторами методу саме для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Водночас це додає впевненості щодо правомірного використання відомого методу [11] для звичайних (не високоміцних) шліфпорошків синтетичного алмазу та інших абразивних порошків. Саме для такого застосування його і розробляли. Додамо також, що у процесі розроблення цього методу було проведено всебічну перевірку притаманної йому похибки як на проекції зерен реальних абразивних порошків, так і через порівняння з опублікованими експериментальними даними інших авторів.

Було порівняно кількість різальних кромок та значення кутів їхнього загострення для контрольних шліфпорошків, визначених новим (колонки А) та відомим (колонки Б [11]) методами. Для зручності порівняльного аналізу значення кількості та кутів загострення різальних кромок зазначених шліфпорошків представлено окремо (табл. 4).

Таблиця 4. Кількість різальних кромок та значення кутів їхнього загострення для контрольних шліфпорошків, визначені для фракцій зерен за 3D формою новим та за 2D формою відомим [11] методами

Контрольні шліфпорошки		Кількість зерен		n, шт.		δn, %	φ, град		δφ, %
Марка, зернистість	Виділені фракції	у фракціях абсолютна, шт., (відносна, %)	у пробі, шт.	А	Б		А	Б	
АС400 500/400	октаedr	7 (2,86)	245	21	18	14,29	122,29	121,52	0,63
	кубооктаedr	34 (13,88)							
	усічений октаedr	194 (79,18)							
	решта зерен	10 (4,08)							
АС200 630/500	октаedr	9 (5,73)	157	12	10	16,67	105,96	105,26	0,66
	кубооктаedr	133 (84,71)							
	усічений октаedr	9 (5,73)							
	решта зерен	6 (3,82)							

Примітка. Колонки А – 3D аналіз; Б – 2D аналіз [11].

Порівняльний аналіз показує, що похибка визначення кількості різальних кромок відомим методом знаходиться в інтервалі 14–17 % із тенденцією в сторону заниження. Проте така похибка є прийнятною в прикладних застосуваннях з кількісного оцінювання характеристик різальних кромок. Щодо значення

кутів загострення, то тут похибка визначення не перевершує 1 %, тобто, отримані результати мають високу точність.

ВИСНОВКИ

Запропонований авторами метод дозволяє отримувати більш адекватну інформацію щодо кількості різальних кромок високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу в порівнянні з методом, заснованим на геометричному моделюванні проекції зерна абразивних порошків зіркоподібними многокутниками, тобто на проекції зерен.

Кількісний аналіз характеристик різальних кромок шліфпорошків синтетичного алмазу доцільніше проводити за 3D формою зерна, як джерелом отримання необхідних початкових даних, а не за формою його проекції.

Проведені дослідження дають підстави обґрунтовано рекомендувати відомий метод визначення характеристик різальних кромок, заснований на геометричному моделюванні проекції зерна абразивних порошків зіркоподібними многокутниками, до застосування у разі не високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу.

G. A. Petasyuk, O. O. Bochechka, V. I. Lavrinenko, Yu. V. Sirota
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Methodological features of quantitative analysis of cutting edge
characteristics of high-strength synthetic diamond grinding
powders

The methodological aspects of quantitative analysis of the characteristics of the cutting edges of abrasive powders are analyzed. It is stated that in the practice of determining the indicators of these characteristics, the approach based on the use of grain projection dominates. The possibility and necessity of switching to a methodological scheme based on the 3D shape of the grain in a similar problem is substantiated. The proposed methodological scheme takes into account the real morphology of the grains of such abrasive powders, which ensures greater plausibility of the obtained indicators of the characteristics of their cutting edges. An analytical interpretation of the number of cutting edges and their sharpening angles for high-strength synthetic diamond powders is performed. The feasibility and advantage of the methodological scheme using the 3D shape of the grain as a generating object of the actual cutting edges of high-strength synthetic diamond powders is illustrated using the example of the AC400 500/400 and AC200 630/500 powders. At the same time, the methodological scheme using the grain projection as a generating object of the cutting edges is not rejected. At the quantitative level, it is reasonably recommended to use the well-known method of determining the characteristics of the cutting edges in the case of non-high-strength grinding powders of synthetic diamond and other abrasive powders, based on the geometric modelling of the grain projection of abrasive powders by star-shaped polygons. It has been established that both methods considered in this work give a very satisfactory result in terms of the coincidence of the values of the sharpening angles of the cutting edges (the relative error does not exceed 1%) and a less satisfactory, but acceptable in the specified sense for applied applications, coincidence of the value of the number of cutting edges (relative error (14–17%).

Keywords: diamond grinding powders, cutting edges, characteristics, grain, projection, 3D shape.

1. Linke B.S. A review on properties of abrasive grits and grit selection. *Int. J. Abras. Technol.* 2015. Vol. 7, no. 1. P. 46–58.
2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. В 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. Киев, 2007. Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / под ред. А.А. Шепелева. 339 с.

3. Никитин Ю.И., Уман С.М., Коберниченко Л.В., Мартынова Л.М. Порошки и пасты из синтетических алмазов. Киев: Наук. думка, 1992. 284 с.
4. Маслов Е.Н. Теоретические основы процесса алмазной обработки материалов. В кн.: Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом. Москва: Наука, 1966. С. 14–29.
5. Ящерицин П.И., Зайцев А.Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск: Наука и техника, 1972. 480 с.
6. Хрульков В.А., Головань А.А. Обработываемость алмазным инструментом твердых и хрупких материалов. В кн.: Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом. Москва: Наука, 1966. С. 93–99.
7. Кузнецов А.М., Голосов И.П. Влияние геометрических параметров синтетических алмазных зерен на их режущие свойства. *Станки и инструмент*. 1964. № 12. С. 28–29.
8. Lees G.A. New method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*. 1964. Vol. 3, is. 1. P. 2–21.
9. Pintaude G. Characteristics of abrasive particles and their implications on wear. In: *New Tribological Ways* / ed. G. Taher, Rijeka: Intech, 2011. P. 117–130.
10. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чин. 01.01.96.
11. 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.
12. Bogatyreva G.P., Petasyuk G.A., Bazalii G.A., Shamraeva V.S. On morphometric uniformity of diamond micron powders. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 2. P. 126–134.
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. Qingzhu G., Meng Y., Yang J., Yonghong W., Junwu L. Characterization of Cr coating obtained on micrometer-scale diamond particles prepared by molten salt method. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 393–404.
15. Sagradyan A.I., Agbalyan S.G., Martirosyan A.M., Ordyan N.A., Pogosyan H.V. Extending life of diamond tools for machining nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 3. P. 216–221.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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, 2012. Вып. 81. С. 162–169.
20. YUMPU DialInspect.OSM DialInspect.OSM. Vollstaedt-Diamant GmbH. <https://www.yumpu.com>
21. Гордєєва Є.П., Величко В.Л. Нарисна геометрія. Багатогранники (правильні, напівправильні та зірчасті). Частина І. Навчальний посібник. Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2007. 198 с.
22. 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.
23. 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.* 2014. Vol. 264. P. 78–85.
24. Petasyuk G.A., Bohechka O.O. Automated identification of the 3D-shape of grains for high-strength grinding powders of synthetic diamond. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 3. P. 239–250.
25. ТУ У 28.5–054717377–072–2003 Шліфпорошки синтетичних алмазів марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. ТУ У 28.5–054717377–072–2003.

Надійшла до редакції 27.12.24

Після доопрацювання 27.12.24

Прийнята до опублікування 04.03.25