

# Інструмент, порошки, пасты

---

УДК 621.921.34-492.544.023.5:539.215

**Г. А. Петасюк**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,  
м. Київ, Україна  
*petasyuk@ukr.net*

## **Системно-аналоговий метод ідентифікації геометричної форми проекції зерен абразивних порошків**

*Представлено новий удосконалений метод ідентифікації та кількісного оцінювання геометричної форми проекції зерен абразивних порошків, що заснований на системно-аналоговому підході. Як аналоги прийняті 2D-геометричні фігури (коло, еліпс, трикутник, канонізовані форми чотирикутника, правильні п'яти-, шести- і восьмикутники), що допускають неадитивне аналітичне подання площі через твірні параметри, число яких не більше трьох. Введено диференціальну та інтегральну характеристики формоподібності, запропоновано аналітичний апарат визначення показників цих характеристик. Представлено результати апробації методу на шліфпорошках синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору.*

**Ключові слова:** алмазні порошки, форма проекції зерен, ідентифікація, аналоги проекції, кількісне оцінювання, апробація.

### **ВСТУП**

Просторово-геометрична (у сучасній термінології 3D) форма зерен абразивних порошків є актуальною ознакою їх якості. Вона впливає на різучі властивості зерен та на характеристики різального шару виготовленого з них абразивного інструменту [1], а відтак і на його продуктивність та робочий ресурс. Форма зерен в значній мірі зумовлює розмірні і геометричні характеристики та характеристики форми проекції зерен (сукупно морфометричні характеристики) порошку, його статичну та динамічну міцності, абразивну здатність. Саме морфометричні характеристики, головним чином, і є технологічними властивостями порошків як абразивного матеріалу. Процедура визначення цих характеристик, для короткої назви якої в сучасному понятійному апараті, що стосується сфери абразивних порошків, вживається термін діагностика, має свою специфіку. Вона полягає в тому, що хоч у процесі діагностування морфометричних характеристик аналізуються реальні

зерна абразивного порошку, тобто 3D-об'єкти, проте всі метричні процедури виконуються на проекції зерен, яка є їх 2D-зображенням. Тому всі вимірювані морфометричні характеристики стосуються не зерна, як 3D-об'єкта, а його проекції. Власне, в сфері абразивних порошоків як технологічними властивостями завжди оперують саме характеристиками таких 2D-аналогів фактичних зерен. Подібний підхід є загально прийнятою і звичною нормою для абразивних порошоків, і це закріплено навіть на рівні відповідних нормативних документів. Наприклад, у стандартах на порошки синтетичного (СА) [2, 3] і природного [4] алмазу оперують такими термінами, як довжина і ширина проекції зерна та їх середнім арифметичним, яке іменується середнім діаметром або середнім розміром зерен. Більше того, на основі визначеного таким чином середнього розміру зерен визначається зерновий склад і зернистість алмазних мікропорошків.

На сьогодні в сфері абразивних порошоків під терміном “морфометричні характеристики” порошку розуміють саме 2D-аналоги їх об'ємних морфометричних характеристик. Тому формалізація процесу розпізнавання геометричної форми проекції (або 2D-зображення) зерен абразивних порошоків, розроблення відповідних алгоритмів і методів із наступною автоматизацією цього процесу, установленням взаємозв'язку між параметрами проекції і 3D-формою зерна є актуальними завданнями. У свою чергу, запорукою успішного просування у вирішенні цих завдань є автоматизація діагностики морфометричних характеристик абразивних порошоків, заснована на використанні методичного апарату цифрової обробки зображень і комп'ютерних технологій. Практична реалізація таких IMG-технологій у даній сфері на сьогодні є фактом, що відбувся.

Розпізнавання форми зерен і практичне розділення (класифікація) порошку за виявленими формами його зерен на окремі класи є взаємопов'язаними аспектами однієї більш загальної проблеми – одержання порошоків із необхідними технологічними властивостями. З чисто прикладної точки зору важливо не тільки розпізнати і виявити форму присутніх в порошок зерен, але і здійснити практичне його розділення за цими формами. В цьому контексті методичні засоби ідентифікації та кількісна оцінка наявних в порошок геометричних форм проекції зерен є невід'ємними атрибутами подібних технологій.

Економічними розрахунками відзначається [5] необхідність точного сортування абразивів, оскільки краща їхня якість досягається ідеальною однорідністю за розміром та формою зерен у межах партії. Для того, щоб здійснювати механічну обробку дуже твердих матеріалів, необхідно використовувати абразиви з гострими різальними кромками, кристалічних і щільних форм, здатних до самогострювання і опору найсильнішим ударам [5].

Запропонована стаття присвячена винятково першому із зазначених вище двох аспектів проблеми одержання порошоків із необхідними технологічними властивостями, а саме – розпізнаванню геометричної форми проекції окремих зерен і оцінюванню цієї характеристики сукупності зерен, тобто порошку в цілому.

#### **ОГЛЯД НАУКОВО-ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФОРМИ ЗЕРЕН АЛМАЗНИХ ТА ІНШИХ АБРАЗИВНИХ ПОРОШКІВ**

Як показує проведений огляд наукових публікацій, розпізнавання геометричної форми проекції зерен зазвичай розглядається в контексті апріорної оцінки абразивності та статичної міцності алмазних порошоків і порошоків інших надтвердих матеріалів (НТМ). Така оцінка будується на підставі ре-

зультатів дослідження взаємозв'язку цих технологічних властивостей порошку з іншими його характеристиками, зокрема з характеристиками форми зерен [5–7]. Наприклад, у [7] подаються результати експериментального вивчення впливу форми зерен і їх міцності при статичному стиску на абразивну здатність алмазних порошків різних класів і різного походження. Стосовно алмазних порошків автори відзначають, що найбільшу абразивну здатність мають мікропорошки природного алмазу, виготовлені з кристалів октаедричної форми, а найменшу – з кристалів кубічної форми, а також із кулеподібних зерен зі слідами граней.

Також констатується, що наявність у складі порошків зерен, що є цілими монокристалами, особливо якщо вони є октаедрами, сприяє підвищенню абразивної здатності. Автори пояснюють цей феномен тим, що при абразивній обробці порошком із незакріпленими зернами (у спеціальній термінології – вільним абразивом), зерна постійно подрібнюються. Це є основною причиною втрати порошком абразивної здатності в процесі його використання. Тому природно, що порошки з більш міцними зернами і показали більшу абразивну здатність, ніж порошки з осколків природного алмазу.

Характерною методичною рисою публікацій минулих років, що стосуються 3D-форми зерен алмазних порошків, а також форми їх проекції, був візуальний аналіз. Як технічні засоби для цього застосовували або мікроскоп, або спеціальний прилад гоніометр, призначений для кристалографічного аналізу. Кількісна оцінка розподілу зерен за виявленими формами здійснювалася безпосереднім підрахунком. Якщо мати на увазі саме 3D-аналіз форми зерен, то ситуація не змінилася і по нинішній час. Вимушені констатувати відсутність алгоритмів і засобів автоматизації практичного розпізнавання не тільки 3D-форми зерен алмазних порошків, але навіть і форми їх проекції. Як позитивний факт можна лише відзначити те, що намітилася тенденція зацікавленості у розпізнавання та оцінці 3D-форми зерен алмазних порошків за формою їх проекції при тому ж візуальному її контролі [6]. Проводяться дослідження, спрямовані на встановлення взаємозв'язку характеристик контуру проекції з технологічними властивостями порошку, основними з яких, як і раніше, залишається його абразивна здатність і статична міцність. Серед сучасних морфометричних характеристик найбільш актуальною стосовно абразивності порошку є локальний вигин (локальна геометрія) контуру проекції зерна, що описується опуклістю, подовженням, різкістю [6], індексом зношування, кристалічністю [5], шорсткістю [8].

В основі новітніх напрямків розвитку методології діагностики та оцінювання характеристик абразивних порошків лежить впровадження методичного апарату розпізнавання образів і цифрової обробки зображень (так званих IMG-технологій). В результаті з наукової сфери розпізнавання образів і цифрової обробки зображень у сферу абразивних порошків привнесена велика кількість нових морфометричних характеристик [9].

Використання IMG-технологій як інструменту вдосконалення процесу діагностики морфометричних характеристик абразивних порошків дозволило автоматизувати як чисто вимірювальні (метрологічні) операції, так і наступний процес знімання даних вимірів і перетворення їх в електронний формат. Досягається це завдяки переходу до піксельного подання проекції (у термінології IMG-технологій – зображення) зерна. Крім функції автоматизації IMG-технології досконало вирішують завдання подання і збереження проекції великої кількості зерен в електронному виді, зручному для наступного візуального аналізу, в тому числі і автономного. Таким чином, надається відмінна

можливість візуально оцінити форму зерен за формою проекції великої їх кількості у вигляді загальної картини. Вказується на необхідність переходу від візуального оцінювання форми проекції зерен до автоматизованого кількісного аналізу на основі комп'ютерних технологій [5, 6].

Невід'ємним методичним доповненням переходу від форми проекції зерен алмазних порошків до їх 3D-форми є встановлення взаємозв'язку між двома цими геометричними об'єктами. Уточнимо, що під проекцією зерна тут розуміється ортогональна його проекція, тобто контур його виду зверху, перпендикулярно площині, на якій зерно розташовується, займаючи стійке положення рівноваги. Наприклад, якщо зерно має 3D-форму куба або кубооктаедра, то такою ортогональною його проекцією буде квадрат. Для зерна з 3D-формою октаедра – шестикутник. Встановлення такого взаємозв'язку між проекцією (2D-формою) зерна і його 3D-формою є важливим науково-прикладним елементом завдання розпізнавання і оцінювання 3D-форми зерен алмазних порошків за формою їх проекції. Це питання до теперішнього часу не розроблене, хоча є надзвичайно актуальним, на що вказується зокрема і в [5, 6]. Першим кроком до вирішення даного завдання є розробка алгоритмів розпізнавання 2D-ортогональної проекції зерен абразивних порошків. Цей перший крок був започаткований в [10], де викладено системно-критеріальний підхід до розв'язання подібної задачі. Дана робота присвячена подальшому розвитку запропонованого в [10] підходу. Сенс новацій полягає у скороченні до 10 кількості базових фігур-аналогів (БФА), за якими здійснюється ідентифікація фактичної проекції зерен. Таке зменшення здійснюється об'єднанням в окремі фігури (рівнобічну трапецію та трикутник) розглянутих різновидів цих фігур, а також кола і еліпса в одну овалоподібну фігуру. Відповідно вносяться зміни і до алгоритмів визначення ознак формоподібності, диференціальних та інтегральних її показників, відносної похибки формозаміни, понятійний сенс яких буде обумовлено нижче.

#### **РОЗШИРЕННЯ ПОНЯТІЙНОГО АПАРАТУ ДІАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНИХ ПОРОШКІВ, ОБУМОВЛЕНІ СИСТЕМНИМ ПІДХОДОМ ДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПРОЕКЦІЇ ЇХ ЗЕРЕН**

При розробці системно-аналогового методу індивідуальної ідентифікації та сукупного оцінювання геометричної форми проекції зерен абразивних порошків виходили з наступних основних положень, сформульованих за результатами проведеного огляду доступних досліджень з цього питання:

– до теперішнього часу як метод індивідуальної (тобто на рівні окремих зерен) ідентифікації геометричної форми як самих зерен абразивних порошків, так і їхньої проекції застосовується зазвичай візуальний аналіз.

– за винятком привнесеної з топології в розпізнавання і цифрову обробку зображень характеристики, іменованої форм-фактором [6, 11], серед відомих характеристик форми проекції зерен (наприклад, таких як коефіцієнт форми [2–4], Feret-подовження [8], коефіцієнт опуклості [6]) слід констатувати відсутність характеристик, відповідальних за геометричну форму власне проекції зерен.

– маємо підстави говорити про відсутність алгоритмів та методів сукупного (тобто на рівні порошку в цілому) оцінювання геометричної форми проекції зерен абразивних порошків.

З огляду на ці обставини та беручи до уваги завдання розробки нового системно-аналогового методу індивідуальної ідентифікації та сукупного оцінювання геометричної форми проекції зерен доповнимо методичний апарат

сфери діагностики характеристик абразивних порошків додатковими поняттями. Оскільки запропонований алгоритм розпізнавання геометричної форми проекції зерен заснований на порівнянні фактичної проекції зерна з прийнятими її базовими аналогами з сукупності відомих геометричних фігур, то характеристику, відповідальну за форму проекції зерен, називатимемо формоподібністю проекції зерен. Термін “формоподібність” вживатиметься із уточнюючим його словом – диференціальна або інтегральна. При цьому диференціальна формоподібність поєднується з розпізнаванням (ідентифікацією) форми проекції окремого (індивідуального) зерна за одним із найбільш близьких до неї базовим аналогом. Інтегральна формоподібність стосуватиметься ідентифікації форми проекції сукупності зерен із врахуванням адекватності можливої заміни фактичної форми проекції конкретного зерна почергово всіма базовими аналогами. З кожною із зазначених двох формоподібностей зв’язується система показників  $f_m^{(n)}$  та  $f_m^{(i)}$  відповідно, де  $m$  – номер БФА,  $m = 1, 2, \dots, M$ , ( $M$  – кількість БФА). Таким чином, число таких показників в обох випадках відповідає кількості прийнятих БФА, тобто кожному базовому аналогу відповідають свої показники формоподібності фактичної проекції. Крім того, вводяться системи ознак та критеріїв формоподібності і відносна похибка формозаміни.

Пропонований тут системно-аналоговий метод індивідуальної ідентифікації та сукупного оцінювання геометричної форми проекції зерен алмазних порошків, як і викладений в [10], передбачає пошук найбільш адекватної форми проекції із сукупності можливих базових її аналогів. Як базові аналоги проекції зерен приймаються наступні плоскі геометричні фігури: коло, еліпс, рівнобічна трапеція в трьох варіантах (гармонічна –  $D > b > h$ ; стиснута –  $b > D > h$ ; видовжена –  $D > h > b$ ;  $D$  – діагональ,  $b$  – більша основа,  $h$  – висота), трикутники в чотирьох варіантах (звичайний, рівносторонній, рівнобедрений стиснутий і рівнобедрений видовжений), квадрат, ромб, прямокутник, паралелограм, правильні п’яти-, шести- і восьмикутники. Для всіх цих фігур було отримано в аналітичному виді аналоги наступних необхідних надалі морфометричних характеристик зерен порошку: максимальний ( $F_{\max}$ ) і мінімальний ( $F_{\min}$ ) діаметри Фере, їх відношення, яке іменується Фере-подовженням ( $F_{el}$ ), площа і периметр. Встановлення формоподібності фактичної проекції зерен здійснюється послідовним обчисленням значень контрольних нормованих функціональних комплексів (правил ідентифікації) на морфометричних характеристиках проекції реального зерна. Морфометричні характеристики зерен, що входять в ці функціональні комплекси, діагностуються сучасними приладами автоматизованої діагностики морфометричних характеристик абразивних порошків, наприклад приладом DiaInspect.OSM [8]. Зазначимо, що арсенал морфометричних характеристик, які діагностуються цим чи іншими, подібними йому за призначенням, приладами, значно більший, ніж використана тут їх кількість. Більш повний їхній перелік і геометричну інтерпретацію представлено в [11, 12].

При виборі базових аналогів форми проекції виходили з того, що форма проекції низькоміцних дрібнозернистих алмазних шліфпорошків у загальному обрисі близька до округлої із численними не довгими прямолінійними ділянками. Тому для розпізнавання проекції подібних реальних фігур у перелік БФА внесені фігури у формі кола і еліпса. Проекція зерен високоміцних алмазних шліфпорошків має форму, близьку до правильного многокутника. Тому в БФА включені квадрат, правильні п’яти-, шести- і восьмикутники. Форма проекції зерен, проміжних між низько- і

високоміцними, має подібність із трикутником, прямокутником, трапецією, ромбом. Тому і ці фігури внесені в базову сукупність аналогів із конкретизацією виду деяких з них, зокрема трикутника (правильного, рівнобедреного видовженого і рівнобедреного сплющеного) і трапеції (рівнобічної гармонічної, рівнобічної видовженої і рівнобічної сплющеної).

### АНАЛІТИЧНЕ ПОДАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КРИТЕРІВ ФОРМОПОДІБНОСТІ ДЛЯ БАЗОВИХ ФІГУР-АНАЛОГІВ

Суть розробленого системно-аналогового методу індивідуальної ідентифікації та сукупного оцінювання геометричної форми проекції зерен алмазних порошків полягає в наступному. Для кожної БФА вводиться система ознак її формоподібності (по три ознаки для кожної фігури). Введені ознаки є узагальненням привнесеної з топології в розпізнавання і цифрову обробку зображень характеристики, іменованої форм-фактором [6, 13]. Ця безрозмірна характеристика, яку позначено  $ff_k$ , традиційно використовується для кількісної оцінки ступеня близькості (подібності) форми проекції реальної фігури до кола. Вона приймає значення, рівне одиниці, тільки в тому випадку, якщо фактична форма розпізнаваної фігури точно збігається з колом і вводиться як відношення

$$ff_k = \frac{p^2}{4\pi S}, \quad (1)$$

де  $p$  і  $S$  – відповідно периметр і площа фігури, що підлягає розпізнаванню;  $\pi$  – математична константа. Для кола з радіусом  $R$  маємо

$$p = 2\pi R, S = \pi R^2,$$

обчислення за формулою (1) дає результат  $ff_k = 1$ . Для інших, відмінних від кола, розпізнаваних фігур зі своїми значеннями  $p$  і  $S$ , обчислене за формулою (1) значення  $ff_k$  не буде рівним одиниці.

При розробці системно-аналогового методу індивідуальної ідентифікації та сукупного оцінювання геометричної форми проекції зерен алмазних порошків, що викладається тут, число таких ознак формоподібності, аналогів форм-фактора в традиційно прийнятому сенсі (тобто, форм-фактора колоподібності або округлості), збільшено, як уже відзначалось, до трьох для проекції у формі кола і поширено на проекції інших БФА. Для назви таких функціональних характеристик (ознак) вводиться термін прості ознаки формоподібності (ПОФ) і приймається позначення  $\Pi_{mm}^{(p)}$ . Тут  $p$  – номер ознаки ( $p = 1, 2, 3$ );  $m$  – номер БФА, до якої відноситься ознака ( $m = 1, 2, \dots, M$ ),  $M$  – кількість БФА;  $n$  – номер зерна, що аналізується ( $n = 1, 2, \dots, N$ );  $N$  – кількість зерен у досліджуваній їх пробі. Для кращого розуміння сутності розробленого алгоритму важливо відзначити, що аргументами ПОФ є окремі морфометричні характеристики проекції реального зерна. У той же час вид цих функціональних ознак отриманий, виходячи зі співвідношення між геометричними параметрами відповідної конкретної БФА. Перелік БФА наведено в табл. 1. Там же обумовлено геометричні параметри, що визначають кожен з них, та формули для периметра і площі через ці твірні параметри. Було також встановлено аналоги таких твірних параметрів, що надаються сучасними приладами автоматизованої діагностики морфометричних характеристик абразивних порошків засобами розпізнавання і цифрової обробки зображень. У випадку, якщо такий параметр-аналог не збігається з жодним із твірних параметрів окремої БФА, що характерно для всіх БФА за винятком

Хіба що кола та еліпса, приводиться отриманий тут вираз для параметра-аналога через твірні параметри БФА. Було також отримано формули простих ознак формодібності для кожної із БФА. Приклади таких ПОФ для БФА у формі кола радіусом  $R$  і квадрата зі стороною  $a$  (рис. 1) для кола є такими:

$$F_{\max} = F_{\min} = 2R, F_{el} = 1, S = \pi R^2, p = 2\pi R, P_1 = \frac{4\pi S}{L^2}, P_2 = \frac{4S}{\pi F_{\max}^2},$$









$$P_3 = \frac{F_{\max} F_{el}}{F_{\min}},$$

а для квадрата










$$F_{\min} = a, F_{\max} = d = a\sqrt{2}, F_{el} = \sqrt{2}, p = 4a, S = a^2, P_1 = \frac{16S}{L^2}, P_2 = \frac{S}{F_{\max}^2},$$

$$P_3 = \frac{F_{el}}{\sqrt{2}}.$$

**Таблиця 1. Перелік БФА, їх геометричні параметри та взаємозв'язок цих параметрів із ознаками зображення проекції зерен**

БФА		Твірні геометричні параметри	Периметр та площа через твірні параметри та їх Dialnspect-аналоги
Геометрична фігура	Назва		
	коло	$R$ – радіус	$p = 2\pi R, S = \pi R^2,$ $F_{\max} = F_{\min} = 2R, F_{el} = 1$
	еліпс	$a, b$ – більша та менша піввісі	$S = \pi ab, F_{\max} = a, F_{\min} = b,$ $F_e = a/b, p = 4aE(m),$ $E(m)$ – еліптичний інтеграл
	прямокутник	$a, b$ – сторони, $b > a$	$p = 2(a + b), S = ab, F_{\min} = a,$ $F_{\max} = \sqrt{a^2 + b^2},$ $F_{el} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a}$
	ромб	$d_1, d_2$ – діагоналі, $d_1 > d_2;$ $h$ – висота	$p = 4a, S = d_1 d_2 / 2, F_{\max} = 2d_1,$ $F_{\min} = h$
	рівнобічна трапеція	$a, b$ – верхня та нижня основи;	$p = a + b + 2d, S = (a + b)h / 2,$ $b = h, F_{\min} = h, F_{\max} = D,$ $F_{el} = D / h$
	гармонічна рівнобічна трапеція	$d$ – бокова сторона; $D$ – діагональ; $h$ – висота	$p = a + b + 2d, S = (a + b)h / 2,$ $b < h, F_{\min} = b, F_{\max} = D,$ $F_{el} = D / b$
	видовжена рівнобічна трапеція	$b > h,$	$p = a + b + 2d, S = (a + b)h / 2,$ $b > h,$ $F_{\min} = h, F_{\max} = b, F_{el} = b / h$
	сплющена		

Таблиця 1. (Продовження)

	квадрат	$a$ – сторона	$p = 4a, S = a^2, F_{\min} = a,$ $F_{\max} = a\sqrt{2}, F_{el} = \sqrt{2}$
	правильний п'ятикутник	$R, r$ – радіуси кола описаного та вписаного; $\alpha$ – центральний кут ( $\alpha = 360^\circ/n$ );	$p = 10R \sin(\alpha/2), S = 2,5R^2 \sin(\alpha),$ $F_{\min} = 2R \sin(\alpha), F_{\max} = R + r,$ $F_{el} = \frac{R+r}{2R \sin \alpha}$
	правильний шестикутник	$n$ – кількість сторін многокутника	$p = 6R, S = 1,5\sqrt{3}R^2,$ $r = \sqrt{3}R/2, F_{el} = 2/\sqrt{3},$ $F_{\min} = 2r, F_{\max} = 2R$
	правильний восьмикутник		$p = 16R \sin(\alpha/2), S = 2\sqrt{2}R^2,$ $F_{\min} = 2r, r = R \cos(\alpha/2),$ $F_{\max} = 2R, F_{el} = 2/\sqrt{3}$
	довільний трикутник	$a, h_a$ – найдовша сторона і відповідна їй висота	$p = a + b + c, S = ah_a/2, F_{\min} = h_a,$ $F_{\max} = a, F_e = a/h_a,$
	правильний трикутник	$a$ – сторона; $h$ – висота	$p = 3a, S = \sqrt{3}a^2/4, F_{\min} = h,$ $F_{\max} = a, F_{el} = 2/\sqrt{3}$
	сплющений рівнобедрений трикутник	$b, h_b$ – основа і відповідна їй висота; $a$ – бічна сторона	$p = b + 2a, S = bh_b/2, F_{\min} = h_b,$ $F_{\max} = b, F_e = b/h_b$
	видовжений рівнобедрений трикутник	$b$ – основа; $a, h_a$ – бічна сторона і відповідна їй висота	$p = b + 2a, S = bh_b/2, F_{\min} = h_a,$ $F_{\max} = a, F_e = a/h_a$
	паралелограм	$a, b$ – сторони ( $b > a$ ); $d$ – більша діагональ; $h_b$ – висота на сторону $b$	$p = 2(a + b), S = bh_b/2, F_{\max} = d,$ $F_{\min} = h_b, F_{el} = d/h_b$

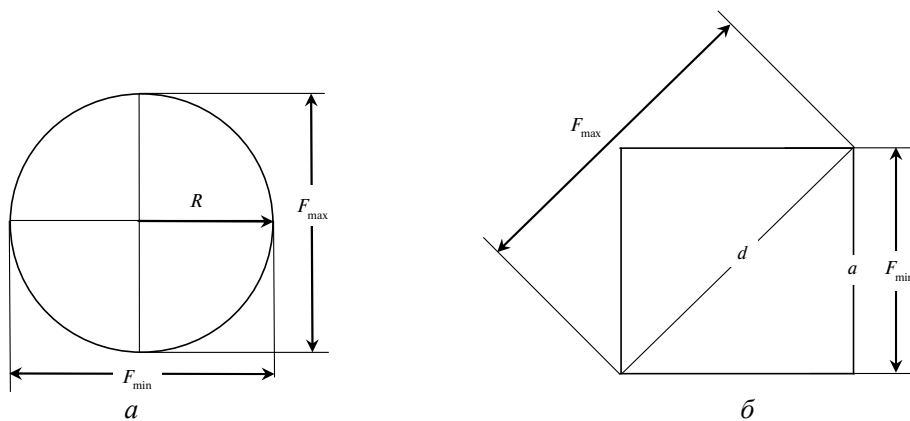


Рис. 1. Визначальні параметри проєкції у формі кола (а) і квадрату (б).



Зауважимо, що значення, рівне одиниці, ПОФ можуть приймати лише на одній із відповідних БФА у випадку ідеального збігу форми проекції аналізованого зерна з формою цієї БФА. Саме ця властивість ПОФ і слугує інструментом розпізнавання форми проекції зерен у запропонованому автором методі. Для більш об'єктивного і правомірного висновку щодо збігу форми проекції аналізованого зерна з формою однієї із базових фігур вводиться узагальнена ознака формоподібності через знаходження середньоарифметичного простих ознак:

$$\Phi_{mn} = \frac{1}{3} \sum_{p=1}^3 \Pi_{mn}^{(p)}. \quad (2)$$

Якщо реальна проекція аналізованого зерна з номером  $n$  не збігається з черговою фігурою з номером  $m$  з базової їх сукупності, то  $\Pi_{mn}^p \neq 1$ ,  $p = 1, 2, 3$ , а також  $\Phi_{mn} \neq 1$ . У цьому випадку абсолютна величина різниці  $\Phi_{mn} - 1$  слугує мірою ступеня відхилення форми проекції зерна, що розпізнається, від форми БФА. Тому значення  $q_{mn}$  модуля (абсолютної величини) цієї різниці приймається як критерій формоподібності реальної, пов'язаної із зерном, проекції, яку слід розпізнати, і БФА:

$$q_{mn} = |\Phi_{mn}^* - 1|. \quad (3)$$

Тут  $m$  – номер БФА, а  $\Phi_{mn}^*$  визначається залежністю

$$\Phi_{mn}^* = \begin{cases} \Phi_{mn}, & \text{якщо } \Phi_{mn} \geq 1; \\ \frac{1}{\Phi_{mn}}, & \text{якщо } \Phi_{mn} < 1. \end{cases} \quad (4)$$

Проведені аналітичні дослідження ПОФ для реальних зерен показали, що у випадку не збігу форми їх проекції з БФА відхилення  $\Phi_{mn}$  від одиниці може бути як в одну ( $> 1$ ), так і в іншу ( $< 1$ ) сторони. Тому вибір  $q_{mn}$  у вигляді (3) з врахуванням (4), з однієї сторони, забезпечує постійне виконання співвідношення  $q_{mn} > 0$ , з іншої – робить цей показник нормованою величиною, що приймає значення з інтервалу  $(0, 1]$ . Це спрощує комп'ютерно-програмну реалізацію алгоритму. Надалі узагальнену ознаку у вигляді (3), (4) будемо називати нормованою узагальненою ознакою формоподібності.

### ВИБІР НАЙБІЛЬШ БЛИЗЬКОЇ ФОРМИ ПРОЕКЦІЇ ДЛЯ ОДНОГО ЗЕРНА

При аналізі формоподібності одного зерна як найбільш правдоподібна форма його проекції приймається та з БФА, для якої відносна похибка формозаміни є мінімальною. Логіку міркувань, покладених в основу аналітичного подання відносної похибки, детально викладено в [10].

Для більшої лаконічності (стислості) подальшого викладу відносно БФА, яка є найбільш близькою до фактичної проекції зерна, припустимо, що вона отримала перше місце за адекватністю серед всіх інших БФА. За аналогією стосовно БФА, яка є другою та третьою серед найбільш близьких до фактичної проекції зерна, вважаємо, що вони отримали друге і третє місця відповідно в переліку найбільш адекватних фігур і т. д.

Зазначимо, що в цій роботі, як і в [10], визначення показників диференціальної та інтегральної формоподібностей здійснюється для всіх БФА. Але на наступному кроці алгоритму при виборі найбільш близької до

фактичної проекції зерна БФА в пропонуваній роботі застосовано дещо змінений алгоритм. Відмінність стосуються того, що деякі БФА групуються (укрупнюються), зокрема, коло і еліпс об'єднуються в групу овалоподібних фігур. При ідентифікації, як найбільш адекватна в сенсі формозаміни овалоподібна фігура з цієї групи, вибирається та фігура, для якої відносна похибка формозаміни є мінімальною. Аналогічним чином поступаємо і у випадку сукупності рівнобічних трапецій і трикутників. Тобто вид рівнобічної трапеції і трикутника не конкретизується, натомість вживається термін рівнобічна трапеція чи просто трикутник відповідно. При цьому, як і у випадку овалоподібних фігур, найбільш адекватною приймається та з різновидів рівнобічної трапеції чи трикутників фігура, яка дає мінімальну похибку формозаміни серед інших представників відповідної групи. Таким чином число фактичних БФА зменшується із 16 до 10.

### **ВИБІР НАЙБІЛЬШ БЛИЗЬКОЇ ФОРМИ ПРОЕКЦІЇ ДЛЯ СУКУПНОСТІ ЗЕРЕН**

Системно-аналоговий метод, як уже зазначалось, надає два типи показників формоподібності проекції зерен аналізованого порошку за підсумками ідентифікації (розпізнавання) форми проекції окремих зерен: диференціальні та інтегральні. Суть першого з них зводиться до того, що для кожної БФА накопичується кількість зерен, похибка формозаміни якою була мінімальною, тобто кількість випадків, коли цій БФА було надано перше місце. За такої умови у процесі аналізу всієї проби  $N$  зерен формується в загальному випадку  $N_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) класів зерен (за кількістю БФА). Деякі із цих класів можуть бути пустими, коли в процесі опрацювання всієї проби зерен не виявилось жодного зерна, проекція якого була б ідентифікована як БФА з таким номером. В подібному випадку відповідний показник диференціальної формоподібності буде рівним нулю.

Після завершення аналізу всіх зерен контрольної проби у кількості  $N$  штук перевага віддається тій БФА, якій була надана найбільша кількість перших місць. Числове значення диференціальних показників (в %) виразиться залежністю

$$f_m^{(д)} = \frac{n_m}{N} 100, \quad (5)$$

де  $m$  – номер БФА ( $m = 1, 2, \dots, M$ );  $n_m$  – кількість зерен, форму проекції яких було розпізнано як БФА з номером  $m$ . Із всіх диференціальних показників найбільший інтерес становить той, який має максимальне значення. Саме за цим максимальним показником власне і встановлюється диференціальна формоподібність проекції зерен порошка.

Похибка формозаміни, яка є кількісною оцінкою адекватності формозаміни для кожного із класів  $N_m$  визначається за залежністю

$$\Delta_m^{(д)} = \frac{1}{n_m} \sum_{n=1}^{n_m} \delta_n, \quad (6)$$

де  $\delta_n = \min_{1 \leq m \leq M} \{q_{mn}\}$  – мінімальна похибка формозаміни проекції зерна з номером  $n$ ;  $m$  – номер відповідної БФА. Підсумовування здійснюється для всіх класів, які не є пустими, і для тих зерен, які попали в кожний із класів  $N_m$ ;  $n_m$  – кількість зерен у такому класі.

Інтегральна формоподібність ґрунтується на тому, що фактична форма проекції зерна з певною похибкою (адекватністю) може бути замінена кожною із БФА. У цьому випадку для аналізованого зерна поряд із першим урахуються і всі інші місця, надані кожній БФА. Найбільш адекватна БФА визначається за усередненою сумою балів за надані їй місця (з 1-го по  $M$ -те). Оцінка місць здійснюється за 10-ти бальною системою, що відповідає числу БФА. Для кількості балів вводиться позначення  $S_m$ , де  $m$  – номер відповідної БФА. Перше місце оцінюється 10-ма балами, друге – 9-ма, і т. д. Останнє  $M$ -те місце оцінюється одним балом. Отримана сума балів приводиться до максимально можливої суми балів, рівній  $10N$ . Така сума балів буде мати місце в тому випадку, коли мінімальну похибку формозаміни для всіх зерен проби дає одна і та ж БФА. Залежність для визначення інтегрального показника формоподібності отримано у вигляді

$$f_m^{(i)} = \frac{1}{10N} \sum_{n=1}^N S_m. \quad (7)$$

Найбільш високий показник інтегральної формоподібності відповідає тій з БФА, для якої значення  $f_m^{(i)}$  буде максимальним. Показники інтегральної формоподібності за формулою (7) приймають значення з інтервалу (0, 1). При цьому максимальне значення, рівне 1, вони матимуть в тому випадку, коли даній БФА було надане перше місце для кожного зерна із проаналізованої її проби. Адекватність (похибка) заміни при цьому визначається за формулою

$$\Delta_m^{(i)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_{n,m}. \quad (8)$$

Виходячи з понятійної суті інтегральної формоподібності саме за її показниками доцільніше проводити кількісну оцінку формоподібності проекції зерен порошку в цілому. Більш детально алгоритм визначення величин  $f_m^{(i)}$  та  $\Delta_m^{(i)}$  описано в [10].

#### **АПРОБАЦІЯ СИСТЕМНО-АНАЛОГОВОГО МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ І СУКУПНОГО ОЦІНЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПРОЕКЦІЇ ЗЕРЕН АЛМАЗНИХ ПОРОШКІВ**

Апробацію системно-аналогового методу ідентифікації і сукупного оцінювання геометричної форми проекції зерен абразивних порошоків проводили на порошках синтетичного алмазу марки АС300 500/400 та кубічного нітриду бору марки сBN-V (вітчизняний аналог – шліфпорошок кубічного нітриду бору KB 125/100). Попередньо проводили діагностику морфометричних характеристик порошоків, що використовувались для апробації, на приладі DiaInspect.OSM. DiaInspect-фотографії продіагностованої проби зерен кожного з контрольних порошоків представлено на рис. 2, а і 3, а. Схема апробації була наступною. Для одержання уявлення про якість використовуваних порошоків за розміром зерен було побудовано диференціальні і інтегральні криві розподілу еквівалентного діаметру зерен (див. рис. 2, з і 3, з). Еквівалентний діаметр введено як діаметр кола, площа якого дорівнює площі проекції зерна. Апробації проводили у двох варіантах за такою схемою. У першому варіанті здійснювали кількісний аналіз формоподібності зерен контрольних порошоків із встановленням значень показників диференціальної та інтегральної формо-

подібностей і похибки формозаміни. Другий варіант передбачав проведення для скороченої проби зерен у кількості 15 шт. однієї лише ідентифікації форми проекції зерна та похибки формозаміни з одночасною ілюстрацією DiaInspect-фотографії фактичної їх проекції.

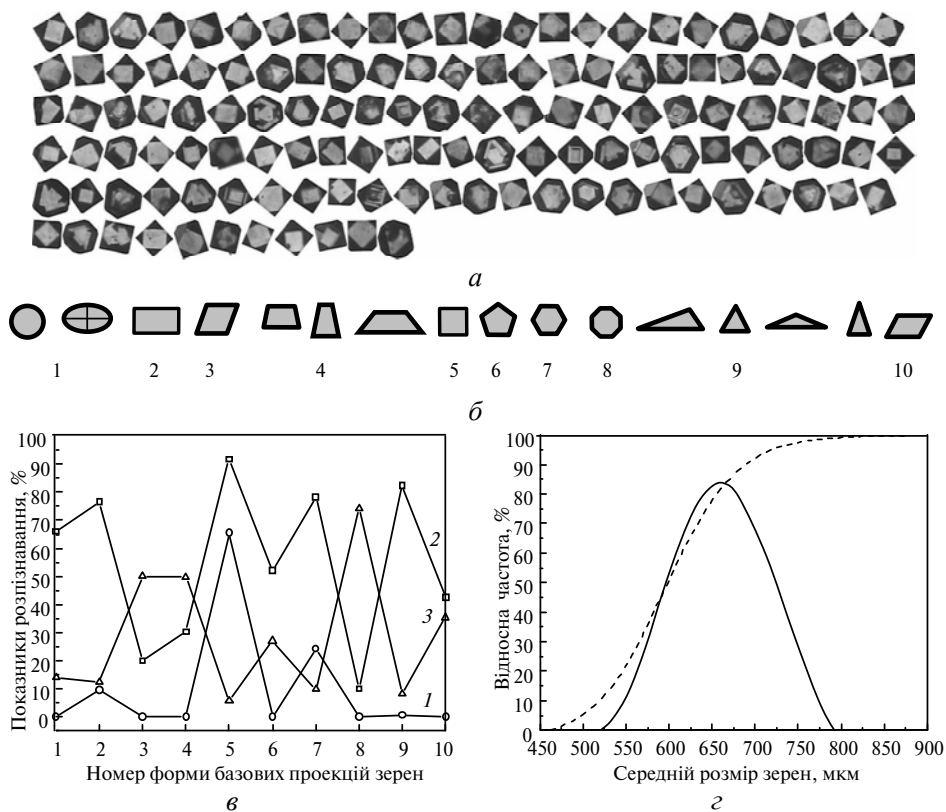


Рис. 2. Візуально-графічна ілюстрація результатів апробації системно-аналогового методу ідентифікації геометричної форми проекції зерен на шліфпорошку AC300 500/400: *a* – DiaInspect-фотографія зерен; *б* – базові форми проекції зерна та їх нумерація; *в* – графічна інтерпретація диференціальної (1) та інтегральної (2) формоподібностей і середнього значення відносної похибки заміни базовим аналогом (3) проекції зерен; *г* – диференціальна (суцільна лінія) та інтегральна (пунктирна лінія) криві розподілу еквівалентного діаметру зерен.

В першому варіанті у випадку показника диференціальної формоподібності до уваги брали лише одну із БФА проекції, яка доставляє найменшу похибку формозаміни фактичної проекції зерна, а також саме значення такої відносної похибки. Результати такої ідентифікації для кожного з базових аналогів накопичуються. В підсумку після осереднення отримуємо розподіл зерен за розпізнаними найбільш адекватними аналогами фактичної форми проекції та відповідну графічну інтерпретацію відносної похибки формозаміни. На графічних ілюстраціях (див. рис. 2, *в* і 3, *в*) цьому варіанту відповідають криві 1 і 2.

У випадку інтегральної формоподібності до уваги брали результати ідентифікації фактичної проекції зерна за всіма БФА. На підставі цього для кожного базового аналога знаходили відповідні показники інтегральної формоподібності. На рис. 2, *в* і 3, *в* представлено графічну ілюстрацію розподілу зерен за цим параметром (криві 2).

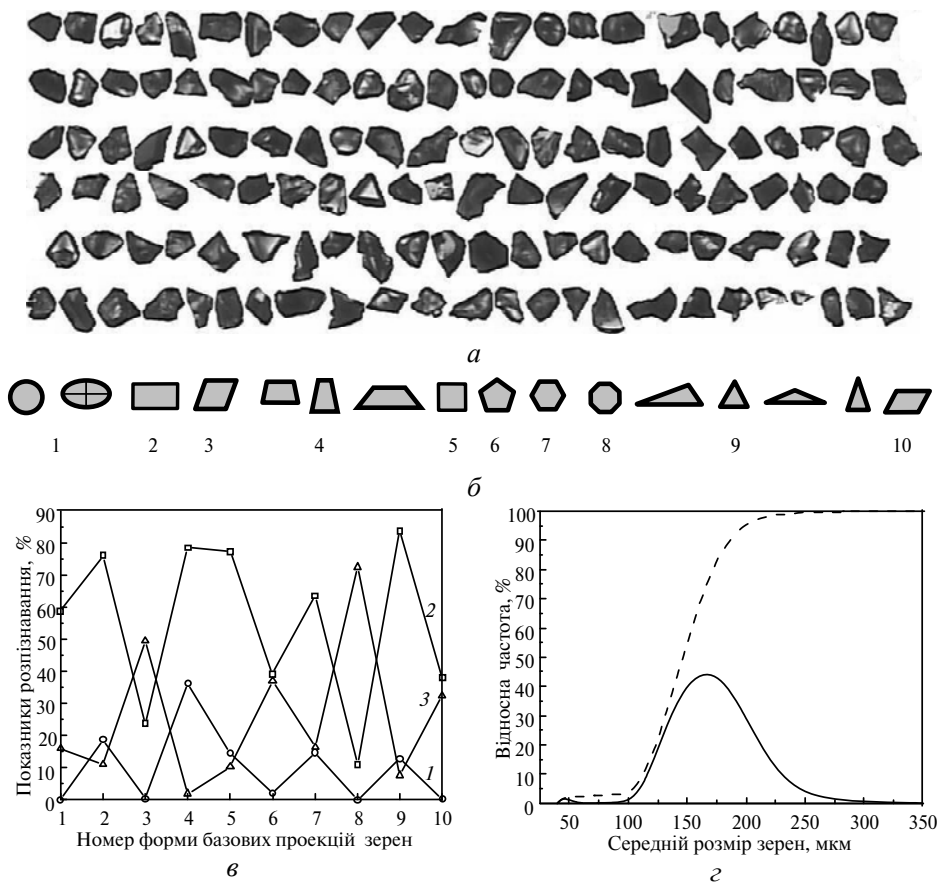


Рис. 3. Візуально-графічна ілюстрація результатів апробації системно-аналогового методу ідентифікації геометричної форми проекції зерен на шліфпорошку cBN-V (аналог KB 125/100): *a* – DiaInspect-фотографія зерен; *б* – базові форми проекції зерна і їх нумерація; *в* – графічна інтерпретація диференціальної (1) та інтегральної (2) формоподібностей і середнього значення відносної похибки заміни базовим аналогом (3) проекції зерен; *г* – диференціальна (суцільна лінія) та інтегральна (пунктирна лінія) криві розподілу еквівалентного діаметру зерен.

Другий варіант є спрощеним варіантом першого. Спрощення стосувалось того, що відносну кількість зерен із формою того чи іншого базового аналога не враховували. За мету ставили візуальне співставлення результату ідентифікації створеними комп'ютерно-програмними засобами форми проекції зерен у кількості 15 шт. і фактичної їх проекції за DiaInspect-фотографіями (рис. 4 і 5). Результати розпізнавання з найменшою відотною похибкою (тобто найбільш адекватної формозаміни фігурами з числа БФА) представлено в табл. 2 і 3.

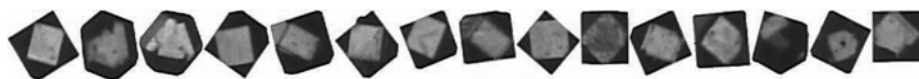


Рис. 4. DiaInspect-фотографія 15-ти зерен шліфпорошку AC300 500/400.



Рис. 5. DiaInspect-фотографія 15-ти зерен шліфпорошку cBN-V.

**Таблиця 2. Результати розпізнавання геометричної форми проекції 15-ти зерен проби шліфпорошку AC300 500/400 і відповідні значення відносної похибки заміни ( $\Delta_m^{(д)}$ , %)**

Номер зерна (див. рис. 4)	Найбільш близька за відотною похибкою заміни форма проекції зерна із числа базових форм-аналогів (див. рис. 2, б)	$\Delta_m^{(д)}$
1	квадрат	3,06
2	правильний шестикутник	4,06
3	правильний шестикутник	3,32
4	квадрат	4,96
5	квадрат	3,86
6	квадрат	2,52
7	квадрат	4,47
8	прямокутник	2,03
9	квадрат	2,67
10	прямокутник	3,25
11	квадрат	3,57
12	прямокутник	3,01
13	правильний шестикутник	5,34
14	квадрат	3,16
15	прямокутник	1,57

**Таблиця 3. Результати розпізнавання геометричної форми проекції 15-ти зерен проби шліфпорошку cBN-V і відповідні значення відносної похибки заміни ( $\Delta_m^{(д)}$ , %)**

Номер зерна (див. рис. 5)	Найбільш близька за відотною похибкою заміни форма проекції зерна із числа базових форм-аналогів (див. рис. 3, б)	$\Delta_m^{(д)}$
1	правильний шестикутник	6,76
2	трикутник	7,33
3	квадрат	5,27
4	прямокутник	5,28
5	трапеція	2,32
6	прямокутник	1,62
7	трапеція	1,12
8	прямокутник	1,68
9	квадрат	2,21
10	трапеція	0,17

**Таблиця 3. (Продовження)**

11	трикутник	7,57
12	трикутник	17,58
13	трапеція	4,05
14	правильний шестикутник	4,41
15	трапеція	0,08

### ВИСНОВКИ

Розроблено оригінальний системно-аналоговий метод ідентифікації та кількісного оцінювання геометричної форми проекції зерен алмазних порошків як одного зерна, так і на рівні їх сукупності, та оцінювання формоподібності.

Аналітичне подання ознак та показників формоподібності проекції зерна абразивних порошків до можливих базових форм проекції зерен у вигляді аналітичних залежностей, а також правил ідентифікації дозволяє відійти від існуючої практики візуально-суб'єктивного оцінювання форми проекції зерен і надати їй статус повноцінної кількісної характеристики порошку.

Проведені дослідження показали, що створені науково-методичні засоби надають достовірну і об'єктивну інформацію з ідентифікації та кількісного оцінювання геометричної форми проекції як окремих зерен, так і їх сукупності, тобто, порошку в цілому.

*An advanced method of identification and quantitative estimation of geometrical shape of the projection of abrasive powder grains has been proposed. The method is based on the system-analog approach. As analogs of 2D geometric figures (circles, ellipses, triangles, canonized shapes of tetragons, regular pentagons, hexagons, and octagon) that admit nonadditive analytical representation of the area via generating parameters, whose number does not exceed three, have been taken. Differential and integral characteristics of the shape similarity are introduced and the analytical apparatus of determining the characteristics values is proposed. The results of the appraisal of the method using mesh-size powders of synthetic diamond and cBN are discussed.*

**Keywords:** diamond powders, shape of the grain projection, identification, analogs of projection, quantitative estimation, appraisal.

*Представлен новый усовершенствованный метод идентификации и количественного оценивания геометрической формы проекции зерен абразивных порошков. Метод основан на системно-аналоговом подходе. В качестве аналогов приняты 2D геометрические фигуры (окружность, эллипс, треугольник, канонизированные формы четырехугольника, правильные пяти-, шести- и восьмиугольник), допускающие неаддитивное аналитическое представление площади через образующие параметры, число которых не превышает трех. Введены дифференциальная и интегральная характеристики формоподобия, предложен аналитический аппарат определения показателей этих характеристик. Приведены результаты апробации метода на шлифпорошках синтетического алмаза и кубического нитрида бора.*

**Ключевые слова:** алмазные порошки, форма проекции зерен, идентификация, аналоги проекции, количественное оценивание, апробация.

1. Шейко М. Н., Скок В. Н., Лубнин А. Г. Основные характеристики абразивно-алмазного слоя правящих роликов // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 4. – С. 75–78.
2. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. – Введ. 01.01.96.
3. ГОСТ 9206–80. Порошки алмазные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1981.

4. *ГОСТ Р 52370–2005*. Порошки из природных алмазов. Технические условия. – Изд-во Стандартиформ, 2005. – Введ. 07.09.2005.
5. *Pirard E.* The cutting edge of superabrasives quality control // *Ind. Diamond Rev.* – 2003. – N 3. – P. 49–50.
6. *De Pellegrin D. V., Corbin N. D., Baldoni G., Torrance A. A.* The measurement and description of diamond particle shape in abrasion // 2nd Int. Ind. Diamond Conf., Rome, Italy, 19–20 April, 2007. – CDR D.5.3. Pdf 210.
7. *Богдановия М. Г., Гинзбург О. В., Волошин М. Н., Кищинская З. А.* Зависимость абразивной способности алмазных порошков от прочности зерен // *Синтет. алмазы.* – 1972. – Вып. 2. – С. 12–14.
8. *List E., Frenzel J., Vollstadt H.* A new system for single particle strength testing of grinding powders // *Ind. Diamond Rev.* – 2006. – N 1. – P. 42–47.
9. *Петасюк Г. А.* Діагностика морфометричних характеристик порошків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень // *Відбір і обробка інформації.* – 2009. – Вып. 30 (106). – С. 138–145.
10. *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. – **264**. – P. 78–85.
11. *Богатырева Г. П., Петасюк Г. А., Базалий Г. А., Шамраева В. С.* К вопросу однородности алмазных микропорошков по морфометрическим характеристикам // *Сверхтв. материалы.* – 2009. – № 2. – С. 71–81.
12. *Сафонова М. Н., Петасюк Г. А., Сыромятникова А. С.* Компьютерно-аналитические методы диагностики эксплуатационных характеристик алмазных порошков и композиционных материалов на их основе. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 223 с.
13. *Микрокомпьютеры в физиологии* / Под ред. Фрейзера. – М.: Мир, 1990. – 383 с.

Надійшла 16.04.15