

## **ДІАГНОСТИКА МОРФОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКІВ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ЗАСОБАМИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ**

The question of diagnostics of super hard powders dimensioning, geometry and morphological features by digital image processing technique is considered. Analysis of modern methodology and technical tools for diagnostics was done. Survey of the progress trends of these methods was done, tasks for the future investigation were defined.

Розглянуто питання діагностики розмірних, геометричних та морфологічних характеристик порошоків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень. Зроблено огляд сучасних методичних і технічних засобів діагностування. Проведено аналіз тенденцій їх розвитку, зазначено задачі, на розв'язання яких слід спрямувати подальші дослідження.

Порошки надтвердих матеріалів (НТМ) належать до класу дисперсних матеріалів. Такі матеріали допускають подвійну інтерпретацію форми існування, що є їх специфічною особливістю. З одного боку, порошок є надтвердим матеріалом і тому володіє фізичними, механічними та іншими властивостями, які притаманні матеріалам. З іншого, порошок НТМ можна розглядати як виріб. У такому своєму статусі порошок разом із вищезазначеними володіє ще й технологічними та експлуатаційними властивостями, або як їх ще називають, характеристиками. Ці характеристики стосуються величини окремих частинок, які в розглядуваній предметній області іменуються зернами, співвідношення маси чи розміру зерен певної величини із загальною масою чи кількістю зерен порошку, морфології зерен, питомої поверхні та ін.

**Традиційні характеристики порошоків НТМ та їх діагностика.** Для кількісної оцінки якості порошоків НТМ користуються головним чином їхніми характеристиками. Як дисперсному матеріалу порошкам НТМ притаманна велика кількість характеристик, які залежно від ступеня та тривалості часу їх використання можна розбити на дві групи. Першу групу утворюють характеристики, які властиві всім надтвердим дисперсним матеріалам і є традиційними ознаками їх якості. З цієї причини про такі характеристики можна говорити як про класичні. До таких можна віднести питому поверхню, пористість, розмір зерен (середній, середньозважений, еквівалентний), коефіцієнт (фактор) форми, зерновий склад, насипну щільність та ін. [8]. Другу групу утворюють специфічні характеристики, які пов'язані із використанням порошоків НТМ як абразивного матеріалу (вірніше, виробу). До таких характеристик належать міцність порошку при статичному стисненні зерен, динамічна міцність, окремі морфологічні параметри зерен (радіус закруглення і кут загострення ріжучих кромки) [4, 7].

Вітчизняним стандартом [1] та стандартом ГОСТ 9206-80, який є його попередником, регламентуються такі характеристики як показники зернового складу, коефіцієнт форми зерен, довжина та ширина проекції (розміри описаного прямокутника), міцність порошку при статичному стисненні зерен та динамічна міцність.

Діагностика цих характеристик стосовно порошоків синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору здійснюється згідно з методиками стандарту [1]. Зокрема, показники зернового складу порошку визначаються ситовим чи мікроскопічним методами. Перший із них передбачає використання контрольного ситового розділення і стосується шліфпорошків. Другий метод передбачає ручне вимірювання

довжини та ширини проекції проби зерен під мікроскопом. Порошок попередньо розташовують на предметне скло із нанесеною на ньому розділювальною сіткою. Визначають середнє арифметичне вимірюваних величин для певної, передбаченої стандартом, кількості зерен. Будують гістограму розподілу одержаних середніх арифметичних за стандартними інтервалами значень і проводять порівняння відносних частот модального і сусідніх з ним інтервалів з передбаченими стандартом їхніми значеннями. Коефіцієнт форми зерен вводиться як відношення довжини проекції зерна до її ширини. За стандартною методикою вимірювання довжини та ширини проекції приписується проводити з використанням часового проектора (для шліфпорошків) чи оптичних мікроскопів БИОЛАМ, Р15, МБР із збільшенням  $\times 120 \dots \times 1800$  і окулярною сіткою (для мікропорошків). Зазначимо, що з використанням того ж часового проектора проводилось дослідження кількості виступів на контурі проекції зерен, які інтерпретуються як різучі кромки, та кута їх загострення. Ця морфологічна характеристика не передбачена вищезазначеними стандартами, але є дуже важливою з погляду абразивності порошків НТМ. Вимірювання цих характеристик здійснювалось шляхом зарисування (наведення) контуру зображення зерна, спроектованого на паперовий екран, із наступним ручним підрахунком кількості різучих кромки і такого ж вимірювання (з допомогою спеціальних шаблонів) кутів їх загострення. Проте істотного розвитку такі дослідження не отримали через рутинність застосовуваних методів діагностики.

Передбачений також контроль і інших характеристик (абразивної здатності, вмісту домішок, вологи та ін.). Проте вони, як і статична та динамічна міцності, тут не розглядаються. Предметом дослідження та аналізу цієї роботи є розмірні, геометричні та морфологічні (сукупно – морфометричні [5]) характеристики абразивних порошків.

Питання нормативно-технічного арсеналу характеристик порошків НТМ, методи визначення їх показників і випробувань перебувають у динаміці та постійному розвитку. Серед об'єктивних причин такого стану речей як найбільш важливу на сьогоднішній день слід назвати підвищення вимог до якості порошків НТМ. Це зумовлене тенденцією зростання об'ємів світового виробництва порошків НТМ і розширення географії їх виробників.

Зазначені вище обставини стимулюють не тільки впровадження в сферу практичного використання нових високоінформативних характеристик і підвищення інформативності тих, що традиційно застосовуються, але і розробку сучасних науково-методичних і технічних засобів визначення їх показників. Одержання важливих прикладних результатів у розв'язанні цієї задачі безпосередньо пов'язане з найновішими досягненнями науково-технічного прогресу в галузі автоматизації, приладобудування та електроніки. До переліку таких досягнень, які дали істотний поштовх у розвитку науково-технічної і матеріальної бази діагностики характеристик порошків НТМ, слід віднести комп'ютерно-обчислювальну техніку і відео-цифрову комп'ютерну обробку зображень. Започаткований на цьому якісно новий етап у розвитку методології діагностики морфометричних характеристик порошків НТМ відрізняється високим ступенем автоматизації, а саме:

- 1) процедури сканування зерен порошку, що випробовується;
- 2) метрологічних (вимірювальних) процедур;
- 3) обчислювальних процедур, пов'язаних з опрацюванням даних вимірювань і інтерпретацією результатів;
- 4) візуалізації результатів опрацювання даних вимірювань і зображення зерен.

Метою цієї роботи є: 1) провести аналіз відомих за сучасними публікаціями нових морфометричних характеристик шліф- і мікропорошків НТМ з позицій підходів до інтерпретації їх сутності, способів запровадження, методів (методик, алгоритмів, процедур) визначення показника за результатами діагностики, взає-

мозв'язку з іншими характеристиками, інформації про те, яким приладом ті або інші автори діагностували конкретну характеристику; 2) привернути увагу спеціалістів у галузі цифрової обробки зображень до актуальних завдань практичної діагностики морфометричних характеристик порошоків НТМ, які потребують вирішення.

**Сучасні науково-методичні засоби діагностики морфометричних характеристик порошоків НТМ.** Один з основних напрямків сучасного розвитку методології діагностики нових морфометричних характеристик заснований на використанні алгоритмічного та математичного апарату комп'ютерно-цифрової обробки зображень. Практичне здійснення нової методології реалізується в сучасних відео-комп'ютерних комплексах автоматизованої діагностики морфометричних характеристик порошоків НТМ методом комп'ютерно-цифрової обробки зображень [2, 9–13].

Бельгійська компанія Ossih S. A. розробила систему ALPHA [11] для контролю якості суперабразивів. Система ALPHA оснащена ілюмінуючою телеметричною оптичною системою, чорно-білою відеокамерою. Кожне зображення, яке продукується системою ALPHA, передається до програми аналізу зображень CALLISTO, спеціально розробленою Ossih S. A. для контролю якості гранульованих матеріалів. Практично реально аналізувати 6000 частинок за хвилину, при цьому запам'ятовуються в реальному часі всі дані про розмір, форму і контур.

У складі системи ALPHA є пакет програм CALLISTAT, який здійснює візуалізацію шляхом побудови дво- чи тривимірних діаграм розподілення. Результати надаються користувачеві у вигляді статистичних звітів, які генеруються одночасно з візуалізацією.

Система ALPHA оперує такими характеристиками, як індекс зношування, ситовий діаметр, полігональність і кристалічність, круглість чи фактор форми, продовгуватість. Такі характеристики, як ситовий діаметр, індекс зношування, продовгуватість та кристалічність, на думку розробників, дають змогу на кількісному рівні виявляти і пояснювати істотні відмінності в морфології порошоків, прогнозувати очікувані результати практичного їх застосування.

Фірма VOLLSTADT DIMANT GmbH розробила прилад DiaInspect.OSM [10] на базі оптичного мікроскопу Nikon ECLIPSE E200 та цифрової відеокамери JVG кольорового зображення. Технічні і комп'ютерно-програмні засоби приладу дають можливість проводити автоматизовану кількісну діагностику розмірних та морфологічних характеристик порошоків різних абразивних матеріалів. DiaInspect.OSM забезпечений автоматизованим оптичним мікроскопом із предметним столиком і фокусом, що контролюється за допомогою приводу. Передбачена можливість контролю всіх осей мікроскопу в ручному режимі. Автоматизоване сканування забезпечує зображення з високою розрізняльною здатністю та аналіз частинок у реальному масштабі часу. В процесі сканування формується колекція зображень одиничних частинок з даними про їх розмір, форму та колір. Є модуль "віртуального" сортування частинок за трьома параметрами і за 10-ма класами результатів.

Обробка зображення допускає пороги (обмеження) на розмір та форму із можливістю їх налаштування і дає змогу виконувати розділення частинок, що торкаються. Для кожної частинки обчислюється більше 20 параметрів. Десять з них, які на думку розробників становлять найбільший інтерес, наводять в інтерактивній таблиці результатів, вони є доступними при використанні "віртуального" сортування.

Приладом DiaInspect.OSM діагностують такі морфометричні характеристики: площа загальна і площа темної частини проекції зерна, периметри істинного (фактичного) та опуклого її контурів, максимальний ( $F_{\max}$ ) і мінімальний ( $F_{\min}$ ) діаметри Feret, форм-фактори опуклої та фактичної проекцій зерна, еліптичність,

Feret-подовження, шорсткість зерен та ін. Шорсткість характеризує гладкість контуру проекції й обчислюється за такою залежністю:

$$R = \frac{P_r}{P_c}, \quad (1)$$

де  $p_r$  та  $p_c$  – відповідно периметр фактичного та опуклого контурів зображення зерна.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України приладом Dialnspect.OSM додатково діагностують ще одну геометричну характеристику, яку називають питомим периметром проекції. Вона, як і шорсткість, характеризує гладкість контуру проекції і являє собою відношення фактичного периметру проекції зерна до її загальної площі  $A$ :

$$P_{\text{äi}} = \frac{P_r}{A}. \quad (2)$$

Є роботи, в яких методичні і технічні засоби діагностики розмірних характеристик порошків НТМ методом цифрової обробки зображень не були предметом дослідження чи аналізу, а лише згадувались як інструмент досягнення певної мети. Тематика цих робіт стосується контролю зернового складу алмазних мікро- та субмікропорошків. У роботі [2] проводили дослідження зернового складу активованих і металізованих ультрадисперсних алмазних порошків з використанням оригінального створеного в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України на базі растрового електронного мікроскопу BS-340 комплексу програмно-цифрової обробки зображень. Оцінку зернового складу проводили за інтегральними кривими розподілу зерен за розмірними інтервалами, які надаються комплексом.

Цікавий підхід до вирішення питання розширення морфометричних характеристик абразивних порошків описаний в роботах [12, 13]. Автори пропонують задавати контур зображення частинки у вигляді масиву  $x, y$  координат певної кількості його точок, отримуваних шляхом оцифрування. До отриманого таким чином набору пар точок  $\{x_0, y_0\}, \{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}, \dots, \{x_M, y_M\}$ , ( $i=0,1,2,\dots, M$ ), де  $M$  – кількість точок оцифрування, як до заданої таблицею функції  $y = f(x)$  застосовують математичний апарат дискретного перетворення Фур'є [6]. У стислому викладі це означає, що є дискретно задана в інтервалі  $[l, l+2\pi]$  функція  $y = f(x)$ . Розв'язується задача наближення цієї функції у точках її задання рядом Фур'є:

$$y = \sum_{k=0}^N \{a_k \cdot \cos(kx) + b_k \cdot \sin(kx)\}, \quad (3)$$

$$x(\theta_i) = \sum_{k=0}^{N-1} \{a_x(k) \cdot \cos(k \cdot \theta_i) + b_x(k) \cdot \sin(k \cdot \theta_i)\}, \quad (4)$$

$$y(\theta_i) = \sum_{k=0}^{N-1} \{a_y(k) \cdot \cos(k \cdot \theta_i) + b_y(k) \cdot \sin(k \cdot \theta_i)\}, \quad (5)$$

$$\theta_i = \arctg\left(\frac{y_i}{x_i}\right), \quad a_x(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i(i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi ik}{N}\right), \quad b_x(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i(i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi ik}{N}\right), \quad (6)$$

$$a_y(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i(i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi ik}{N}\right), \quad b_y(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i(i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi ik}{N}\right), \quad (7)$$

де  $a_k, b_k$  – коефіцієнти Фур'є;  $k$  – номер гармоніки;  $N$  – число гармонік, що враховуються.

Ґрунтуючись на коефіцієнтах Фур'є ряду (3), запропоновано [12] нові геометричні і морфологічні характеристики абразивних порошків та формули для визначення їх показників:

$$\text{продовгуватість (елонгація)} - K = \frac{b_y(1)}{a_x(1)} ; \quad (8)$$

$$\text{асиметрія} - A_s = \sqrt{A_{sx} \cdot A_{sy}} , \quad (9)$$

$$\text{де} \quad A_{sx} = \sum_{k=2}^{N_g} |b_x(k)| / |a_x(k)| , \quad A_{sy} = \sum_{k=2}^{N_g} |a_y(k)| / |b_y(k)| ;$$

$$\text{шорсткість} - R = \sqrt{R_x \cdot R_y} , \quad (10)$$

$$\text{де} \quad R_x = \sum_{k=2}^{N_g} k |b_x(k)| / \sum_{k=2}^{N_g} k |a_x(k)| , \quad R_y = \sum_{k=2}^{N_g} k |a_y(k)| / \sum_{k=2}^{N_g} k |b_y(k)| ;$$

$$\text{полігональність (число кутів)} - P = \sqrt{P_x \cdot P_y} , \quad (11)$$

де  $P_x, P_y$  – полігональність контурів  $(x_i, \theta_i)$  та  $(y_i, \theta_i)$ ,  $(i = 0, 1, 2, \dots, M)$  відповідно;

$$\text{гострота контуру:} \quad S = \frac{1}{\sum_{k=1}^{36} \sqrt{[a(k)]^2 + [a(k)]^2}} . \quad (12)$$

Початковими даними для визначення коефіцієнтів Фур'є представлення (3) слугують  $x, y$  – координати точок контуру зерна порошку. Початок системи координат зображення зерна суміщається із центром його ваги [5]. Аналіз розміру зерен проводився на установці SALAD-200 (Shsmadzu Co., LTD), їх форми – аналізатором зображень Luzex-3U (Nireco Co., LTD) з електронним мікроскопом JSM-5410 (Nihondenshs Co., LTD).

Дослідженню нових методів опису форми зерен абразивних порошків присвячена робота [9]. Особливу увагу в ній зосереджено на тих характеристиках форми, які здатні служити мірою абразивності порошку і показником ступеня його зношування у виробі. Саме такою характеристикою форми, на думку авторів, є різкість (sharpness), що виражається в термінах функціональної залежності площ двох ортогональних проєкцій зерна.

Автори проводять класифікацію морфометричних характеристик абразивних порошків за такими категоріями: розмір, площа, периметр, коефіцієнт, середнє і комбіновані параметри. Зазначають, що окремий параметр форми повністю не відображає форму частинок для цілей моделювання. Для цієї мети потрібна мотивовано відібрана група характеристик форми. В аналізованій роботі як такі характеристики прийняті опуклість, різкість і коефіцієнт форми. Як розмірні характеристики і характеристики площі досліджують більший діаметр, менший діаметр, мінімальний діаметр і площа проєкції зерна. Приводиться чітка і зрозуміла інтерпретація цих і інших, зазначених в роботі, характеристик та досить широка бібліографія з розглядуваних питань.

Вказується, що діагностика досліджуваних характеристик проводилася на вертикальному мікроскопі Leica Microsystems DM/LM з об'єктивами 5×, 10×, 20×, 50× і окуляром 10×. Фотопорт дозволяє цифровій камері, оснащєній саморобним фототубусом, захоплювати зображення. Використано камеру Nikon D70s digital. У сенсорі камери типу СС використана фотоматриця на 6 млн. пікселів (3008×× 2000) розміром 23,7×15,6 мм. Зберігання фотографій у форматі високої розділь-

ної здатності JPEG заощаджує ємність диску.

У процесі діагностики абразивні зерна розташовуються на скляному слайді, який потім поміщається на предметний столик. Налаштування предметного столику за координатними осями  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  (фокус) здійснюється вручну. Зразок освітлювався відбитим світлом. Зауважимо, що минаюче світло краще визначає край, але застосовуваний авторами мікроскоп позбавлений такої можливості.

Цікавий і найбільш прийнятний для сфери характеристик порошоків НТМ набір ознак зображення пропонується розробниками більш загальної системи, а саме розпізнавання та аналізу зображень просторової структури матеріалів [3]. До переліку основних характеристик зерна як конструктивного елементу матеріалу виокремлено такі характеристики (ознаки) зерна: периметр і площа; розміри, периметр і площа описаних прямокутника та кола; відношення площі зерна до площі описаних прямокутника та кола; діаметри зерна; діаметр зерна перпендикулярний; кут нахилу вісі симетрії до вісі  $X$  та ін. Великий практичний інтерес становить адаптація цієї системи і до дисперсних матеріалів, а саме до автоматизованої діагностики певної сукупності (проби) зерен з наступним опрацюванням результатів вимірювання згаданих характеристик для кожного окремого зерна проби.

**Аналіз тенденцій і завдання вдосконалення методології діагностики характеристик порошоків НТМ.** Вивчення та аналіз вітчизняної і зарубіжної науково-технічної літератури, яка стосується сучасних методичних та технічних засобів автоматизованої діагностики морфометричних характеристик абразивних порошоків, виявили, що цьому питанню приділяється значна увага. Серед напрямків розвитку та вдосконалення сучасної науково-методичної бази у цій сфері визначальним є застосування математичного та понятійного апарату цифрової обробки зображень. Із сфери цифрової обробки зображень, зокрема їх ознак, в сферу абразивних порошоків цілком обґрунтовано привнесено велику кількість нових характеристик. Однак така процедура здебільшого не узгоджена із чинними стандартами на ці дисперсні матеріали.

Якщо проаналізувати сукупність морфометричних характеристик порошоків НТМ, які використовуються як атрибути їх якості, то всі вони мають аналоги серед ознак зображення. Але арсенал ознак зображення більш багатий, ніж арсенал використовуваних на практиці морфометричних характеристик порошоків НТМ. Тому надається відмінна нагода поповнити цей арсенал новими характеристиками. При цьому процедура поповнення може здійснюватись або шляхом прямого перенесення ознак зображення із сфери обробки зображень в сферу характеристик порошоків НТМ, або введенням нових складних характеристик у вигляді функціональних залежностей, аргументами яких є ознаки зображення. Прикладом таких нових складних характеристик можуть бути шорсткість зерен та питомий периметр їх проекції, які тісно корелюють з абразивною здатністю порошоків НТМ.

При виборі ознак зображення для використання їх як характеристик зерна порошку слід орієнтуватися на кінцевого споживача, тобто з врахуванням вимог стандарту на той чи інший абразивний порошок. Наприклад, у випадку порошоків синтетичних алмазів чи кубічного нітриду бору, які використовуються в Україні, – це стандарт [1]. Згідно з цим стандартом за довжину та ширину зерна приймають відповідно довжину і ширину прямокутника, описаного навколо проекції зерна. При цьому довжину прямокутника ототожнюють з відрізком, який з'єднує дві максимально віддалені точки проекції. За значенням довжини і ширини зерна визначається коефіцієнт форми зерен, значення якого регламентується стандартом. Проведений аналіз відомих спеціалізованих відео-комп'ютерних комплексів, які використовують для діагностики характеристик порошоків НТМ, засвідчив, що ні один із них, за винятком системи розпізнавання та аналізу зображень просторової структури матеріалів [3], не дає такої характеристики як довжина і

ширина прямокутника, описаного навколо зображення зерна. Натомість надаються діаметри зображення (максимальний, мінімальний, діаметри Feret і ін.), які можна інтерпретувати як аналоги зазначених розмірів описаного прямокутника. І коли за довжину такого прямокутника, наприклад, можна прийняти максимальний діаметр, то мінімальний діаметр не завжди відповідає ширині описаного прямокутника. Тому саме систему [3] слід прийняти за основу при розробці відеокомп'ютерного комплексу для автоматизованої діагностики характеристик порошків НТМ, орієнтованого на наших національних виробників та споживачів.

Потрібна координація спеціалістів в сфері порошків НТМ та цифрової обробки зображень у питанні вибору ознак зображення для створення найбільш інформативної базової сукупності морфометричних характеристик порошків НТМ. Крім використовуваних, тепер у цю сукупність повинні бути введені характеристики, які б несли інформацію про наявність на контурі проекції зерен локальних геометричних форм у вигляді виступів, впадин, прямолінійних ділянок, оцінки їх кількості та величини. Актуальним завданням є перехід до просторових аналогів вищеперелічених локальних форм, а саме – виступів, впадин, граней, ребер на поверхні зерен і їх кількісної оцінки. Введення таких ознак в сферу характеристик порошків НТМ дозволить оцінювати абразивність порошку, а через неї – і експлуатаційні показники виготовленого із нього інструменту.

## ВИСНОВКИ

1. Сучасний розвиток методології діагностики порошків НТМ значною мірою ґрунтується на залученні до цієї сфери наукових, методичних та технічних засобів цифрової обробки зображень. Проявляється значна зацікавленість у вивченні взаємозв'язку нових морфометричних характеристик з можливостями порошків НТМ як абразивного матеріалу. Зокрема, з абразивністю порошку і якістю обробленої ним поверхні.

2. Арсенал пропонованих нових розмірних та морфологічних характеристик досить великий і різноманітний. Звертає увагу відсутність єдиних підходів у питаннях інтерпретації характеристик і методів визначення їх значень.

3. Є нагальна потреба гармонізації існуючих стандартів на порошки НТМ із сучасним рівнем розвитку методології діагностики їх характеристик.

4. Доцільно було б на базі системи [3] розробити та запровадити в практику прилад для діагностики морфометричних характеристик порошків НТМ, орієнтований на національний стандарт [1].

Надалі доцільно продовжити дослідження з розглянутої тематики в напрямку розробки методичних засобів переходу від плоского зображення зерна на об'ємне та автоматизовану обробку результатів такої діагностики для певної сукупності зерен. Багатообіцяючим з погляду практичного застосування є продовження подальших розвідок в напрямку розпізнавання та кількісного аналізу на контурі зображень зерен (а ще краще – на їх поверхні) наявності на них локальних форм у вигляді виступів та впадин як елементів, відповідальних за ріжучі (абразивні) властивості зерен, а з ними і порошку в цілому. Актуальним науково-прикладним завданням є проведення кількісного аналізу ступеня впливу фізичних особливостей технічних засобів діагностики на результат визначення показників характеристик.

1. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Введ. 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995.
2. Дуда Т. М., Ткач В. Н., Кузьменко Е. Ф. Зерновой состав активированных и металлизированных ультрадисперсных алмазных порошков // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 4. – С. 63–67.

3. Кисіль Б. В., Русин Б. П. Система обробки, розпізнавання та аналізу зображень просторової структури матеріалів // Відбір і обробка інформації. – 2001. – Вип. 15(91). – С. 164–173.
4. Порошки и пасты из синтетических алмазов / Ю. И. Никитин, С. М. Уман, Л. В. Коберниченко и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 284 с.
5. Рудаков П. И., Сафронов В. И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x – М: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000. – 416 с.
6. Толстов Г. П. Ряды Фурье. – М.: Наука, Физматлит, 1980. – 384 с.
7. Физические свойства алмаза / Под ред. Н. В. Новикова. – К.: Наукова думка, 1987. – 187 с.
8. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1967. – 720 с.
9. The Measurement and Description of Diamond Particle Shape in Abrasion / D. V. De Pellegrin, N. D. Corbin, G. Baldoni, A. A. Torrance // 2<sup>nd</sup> Int. Industrial Diamond Conf. 19–20<sup>th</sup> April Rome Italy CDR D.5.3. Pdf 210.
10. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial diamond review. – 2006. – № 1. – P. 42–47.
11. Pirard E. The cutting edge of superabrasives quality control // Industrial Diamond Review. – 2003. – № 3. – P. 49–50.
12. Lapping performance guide of poli–crystal diamond particles through morphological analysis / T. Shibata, K. Shinohara, T. Uchiyama, M. Otani // Diamond and related materials. – 2001. – **10**, № 3–7. – P. 376–382.
13. Shibata T., Yamaguchi K. Shift  $x$ ,  $y$ -coordinate detection of line figures and the extraction of particle shape information // Powder technology. – 1994. – **81**. – P. 111–115.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, Київ

Одержано  
05.08.2008