

Г. А. Петасюк (м. Київ)

Інтерпретаційні і прикладні аспекти деяких морфологічних характеристик порошків надтвердих матеріалів

Подано результати дослідження інформаційної і геометричної суті новітніх морфологічних характеристик порошків надтвердих матеріалів та ступеню їх чутливості до змін якості порошку. Викладено нову оригінальну методику опосередкованого визначення середнього значення кута загострення різальних кромоч зерен абразивних порошків. Вперше отримано емпіричну математичну модель взаємозв'язку кута загострення різальних кромоч і еквівалентного діаметра зерен мікропорошків синтетичного алмаза з їх абразивною здатністю.

Ключові слова: абразивні порошки, порошки синтетичного алмазу, двовимірні морфологічні характеристики, двовимірні геометричні характеристики, кути загострення різальних кромоч, абразивна здатність, взаємозв'язок характеристик.

ВСТУП

До морфологічних характеристик зерен порошків надтвердих матеріалів (синтетичного алмаза, кубічного нітриду бору та ін.) зазвичай [1] відносять кількість граней і ребер, число та величину просторових (тілесних) кутів на поверхні зерен, форму зерен. До цієї категорії характеристик відносять також форму граней та ребер, метричні їх характеристики. Однак на практиці виконати кількісний аналіз саме такої об'ємної морфології зерен дуже складно, що зумовлено відсутністю відповідних технічних та методичних засобів. Тому існуюча на сьогодні методологічна база рішення такої задачі оперує з проекцією зерен. По суті проекцію зерна в даному випадку можна розглядати як двовимірний (плоский) чи $2D$ аналог зображення зерна на відміну від об'ємного ($3D$) його зображення. Відтак аналогами $3D$ морфологічних характеристик зерна будуть лінії, плоскі кути, периметри та площа проекції. До них слід також додати співвідношення між максимальним та мінімальним розмірами (в іншій термінології — діаметрами) проекції, форм-фактори. Всі ці характеристики є виразниками форми проекції, а оскільки зерно ототожнюється з його проекцією, то і зерно. Тому на сьогодні в сфері діагностики характеристик абразивних порошків, включно з порошками надтвердих матеріалів (НТМ), під терміном “морфологічні характеристики” зерна порошку розуміють саме зазначені вище $2D$ аналогі об'ємних морфологічних характеристик. Це зауваження стосується і цієї роботи.

Слід зазначити, що морфологічні характеристики порошків НТМ завжди були в полі зору їх дослідників. Але особливого розвитку такі дослідження не отримали, оскільки процедури встановлення їх значень були трудомісткими. Так, наприклад, визначення величини кутів загострення різальних кромоч здійснювали шляхом ручної замальовки контуру проекції на часовому

проекторі з наступним використанням для таких же ручних замірів спеціальних шаблонів. Саме в такий спосіб було отримано відомі експериментальні дані з кута загострення різальних кромки стосовно шліфпорошків синтетичного алмаза (СА) та кубічного нітриду бору (КНБ) [2—9]. При цьому за кінцевий результат для порошку певної марки та зернистості автори цитованих робіт зазвичай приймали узагальнені (середні) як по всьому контуру проекції конкретного зерна, так і по сукупності проби проаналізованих зерен значення кутів загострення різальних кромки.

У наш час завдяки застосуванню технологій цифрової обробки зображень (так званих ІМАГ-технологій) досягнуто значних успіхів у справі автоматизації практичної діагностики розмірних, геометричних та морфологічних (сукупно морфометричних) характеристик абразивних порошків. Тому спостерігається поштовплення зацікавленості до теми дослідження морфометричних характеристик порошків НТМ, їх взаємозв'язку з іншими характеристиками. Поміж останніх найчастіше увагу привертають характеристики, які відображають стан поверхні зерен та абразивність порошку. Серед причин такої підвищеної уваги до морфометричних характеристик слід зазначити зростання вимог до якості порошків НТМ, а відповідно, і до їх експертизи. В свою чергу це зумовлено прагненням більш ефективного і, головним чином, передбачуваного використання порошків в інструменті, значним збільшенням пропозицій на ринку порошків НТМ.

З іншої сторони, сучасні технічні засоби діагностики дозволяють в автоматизованому режимі встановлювати значення таких специфічних морфологічних характеристик абразивних порошків як периметри, площу, формфактори, шорсткість та ін. І хоч зазначені характеристики безпосередньо не дають відповіді на питання про величину кутів загострення різальних кромки, проте безсумнівно несуть інформацію про них. А тому можуть бути використані для опосередкованої оцінки кутів загострення, а через них — і абразивності порошку. Загально визнано, що абразивність є однією з найважливіших характеристик порошків НТМ, яка безпосередньо зв'язана з практичним їх використанням як абразивного матеріалу.

Аналіз новітніх публікацій з питань вивчення характеристик абразивних порошків засвідчує підвищений інтерес до їх морфологічних характеристик взагалі і форми зокрема. При цьому предметом зацікавленості виступає взаємозв'язок між характеристиками форми зерен та абразивністю порошку [10, 11]. Так в [10] отримано емпіричну залежність взаємозв'язку продовгуватості K , асиметрії зерен As , полігональності P та гостроти S контуру зі швидкістю (коефіцієнтом) доводки Lr (мм/хв) у вигляді

$$Lr = 0,29K^{2,46} P^{3,41} As^{-2,71} S^{0,34} . \quad (1)$$

Особливу увагу приділяють тим характеристикам форми, які здатні слугувати мірою абразивності порошку та показником ступеня його зносу в інструменті. Саме такою характеристикою, на думку авторів [11], є різкість, яка виражається в термінах функціональної залежності площ двох ортогональних проекцій зерна. Це твердження аргументовано результатами експериментальних досліджень. Досліджували зношуваність кругів з алмазним шаром, виготовленим із шести різних типів алмазів за технологією Saint-Gobain Abrasives MSL. Тести на зношування при постійному навантаженні проводили шляхом обробки виробу із твердого полімеру. Висоту виробу постійно контролювали лінійним варіабельним диференціальним перетворювачем LVDT. Було побудовано графіки зміни переміщення профілю контуру

виробу в залежності від тривалості обробки. Нахил цієї лінії, вирахований за лінійною регресією, і слугував мірою зношування.

Завдання пропонованої роботи полягає в дослідженні геометричних моделей проекції зерен абразивних порошків з метою:

— визначення морфологічних характеристик модельних фігур проекції зерен НТМ (периметри і форм-фактори фактичної та опуклої проекцій, шорсткість, площа проекції) та встановлення в аналітичному вигляді взаємозв'язку цих характеристик з кутом загострення різальних кромки;

— обґрунтування критерію інтерпретації результатів порівняльної оцінки якості порошків за характеристиками шорсткості зерен і питомого периметра їх проекції з одночасною візуальною ілюстрацією наявних відмінностей;

— розробки методики опосередкованого визначення середнього значення кута загострення різальних кромки на контурі проекції зерен абразивних порошків за морфометричними характеристиками, що діагностуються приладом “DiaInspect.OSM” [12];

— отримання емпіричної математичної моделі абразивності порошків СА, незалежними факторами якої б слугували середнє значення кута загострення різальних кромки та характерний лінійний розмір зерен. Оскільки така модель враховує лише геометричні характеристики порошку, то в подальшому називатимемо її моделлю геометричної абразивності.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНИХ ПОРОШКІВ НА ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЯХ ПРОЕКЦІЇ ЗЕРНА

Розробці методики опосередкованого визначення кута загострення різальних кромки на контурі проекції зерен передували дослідження новітніх морфологічних характеристик на геометричних моделях проекції зерен. Як геометричні моделі проекції зерен приймали фігури, утворені з'єднанням вершин правильного багатокутника з точками перетину його діагоналей, проведених із заданої вершини в іншу, розташовану за m вершин (включно) від заданої. Процедура проведення діагоналей здійснюється з кожної з n вершин багатокутника у двох напрямках — за годинниковою стрілкою і проти неї. Отримана за такої побудови при $n = 8$, $m = 2$ геометрична модель проекції зерна разом із прийнятими позначеннями показана на рис. 1. Вона являє собою зіркоподібний багатокутник із рівними сторонами і двома типами вершин: вершинами-западинами та вершинами-виступами. Віднесення вершини до тієї чи іншої категорії здійснюють за величиною відповідного їй кута. Якщо кут при вершині менше 180° , цю вершину ідентифікують як вершину-виступ, якщо ж цей кут більше 180° — то як вершину-западину.

На основі геометричного аналізу модельних фігур були виведені формули для визначення їх морфологічних характеристик, що тут розглянуто, а саме:

$$p = 2nb_n; p_c = na_n; R_{\text{ш}} = \frac{2b_n}{a_n}; P_{\text{пт}} = \frac{p}{S}; \quad (2)$$

$$f = \frac{p^2}{4\pi S}; f_c = \frac{p_c^2}{4\pi S}. \quad (3)$$

Тут p і p_c — периметри відповідно фактичної та опуклої проекції; $R_{\text{ш}}$ — шорсткість; $P_{\text{пт}}$ — питомий периметр; S — площа проекції; f та f_c — форм-фактори відповідно фактичної та опуклої проекції; $\pi = 3,14159\dots$ — математична константа. Зауважимо, що характеристики $R_{\text{ш}}$, $P_{\text{пт}}$ та S відносяться до фактичної проекції зерен. Геометрична інтерпретація цих та інших сучасних

розмірних та морфологічних характеристик порошків НТМ і вживана нова в цій сфері термінологія більш повно подані в [13].

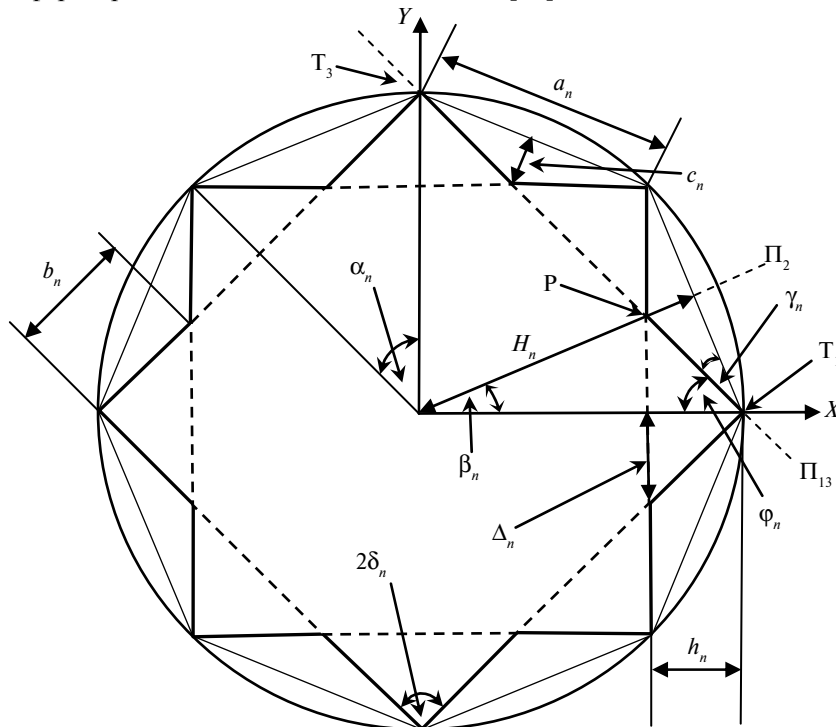


Рис. 1. Схема побудови модельних фігур та прийняті умовні позначення.

Геометричний зміст величин a_n , b_n у співвідношеннях (2) зрозумілий з рис. 1, а формули для їх визначення та визначення площі S мають такий вигляд:

$$a_n = 2R \sin \beta_n; \quad b_n = \frac{a_n}{2 \cos \gamma_n} = \frac{R}{\cos \gamma_n} \sin \beta_n; \quad (4)$$

$$\beta_n = \frac{\alpha_n}{2}; \quad \alpha_n = \frac{360^\circ}{n}; \quad \varphi_n = \delta_n - \gamma_n; \quad \delta_n = \frac{90^\circ(n-2)}{n}; \quad (5)$$

$$S = 2n \frac{a_n H_n}{4} - \frac{2nc_n a_n}{4} = nb_n^2 \cos \gamma_n \left[\frac{\cos \gamma_n}{\operatorname{tg} \beta_n} - \sin \gamma_n \right], \quad (6)$$

де $H_n = R \cos \beta_n$; R — радіус описаного кола.

Необхідні в подальшому формули координат точки P перетину діагоналей в залежності від параметрів n та m формування моделі проєкції зерен мають такий вигляд:

$$x_P = \frac{R \sin m \alpha_n}{\sin m \alpha_n - \operatorname{tg} \beta_n [\cos m \alpha_n - 1]}; \quad y_P = x_P \operatorname{tg} \beta_n. \quad (7)$$

На прийнятих геометричних моделях проводили аналітичне дослідження варіаційного розмаху та шкали значень нових морфологічних характеристик абразивних порошків — шорсткості та питомого периметра їх проєкції. Пер-

шу з цих двох характеристик діагностують сучасними вимірювальними приладами безпосередньо, зокрема приладом “DiaInspect. OSM”. Питомий периметр визначають за результатами діагностики інших морфологічних характеристик, а саме — периметра та площі проекції зерна. Великий практичний інтерес складає обґрунтування межі, яка дозволяє інтерпретувати відмінність між порівнюваними порошками за цими характеристиками як суттєву чи не суттєву з одночасним візуальним порівнянням (спостереженням) наявної відмінності.

Вершини-виступи модельної фігури інтерпретують як різальні кромки. Різальні кромки будемо характеризувати кутом загострення, який ототожнюється з кутом $2\varphi_n$ при вершині-виступі геометричної моделі проекції зерна, висотою h_n та шириною $2\Delta_n$ основи (див. рис. 1). Слід зазначити, що в науково-технічній літературі, присвяченій вивченню різальних кромок, традиційно розглядають дві їх характеристики — кут загострення та радіус заокруглення. З цих двох традиційних характеристик в роботі будемо досліджувати лише кути загострення. Шорсткість зерен визначимо [12] як відношення фактичного периметра модельної фігури до її опуклого периметра. За опуклий периметр приймемо периметр фігури, отриманої шляхом з'єднання вершин-виступів геометричної моделі проекції, тобто багатокутника, описаного навколо модельної фігури. Питомий периметр такої фігури вводимо як відношення її фактичного периметра до площі. Результати розрахунку шорсткості та питомого периметра проекції модельних фігур за формулами (2) приведено в табл. 1. Там же подано розрахункові дані з кута загострення різальних кромок та значення параметрів формоутворення n , m , а також віднесених до R висоти та ширини основи різальних кромок. Значимо, що в процесі розрахунків без жодних негативних наслідків щодо загальності подання матеріалу приймали $R = 1$.

Аналіз поданих в табл. 1 значень характеристик шорсткості та питомого периметра модельних фігур показує, що при рівній кількості вершин-виступів на контурі модельних фігур, які інтерпретують як різальні кромки, показник шорсткості знаходиться у прямій пропорціональній залежності від висоти різальних кромок і в обернено пропорціональній залежності від ширини їх основи та кута загострення. При рівних кутах загострення різальних кромок збільшення їх кількості веде до збільшення показника шорсткості. Аналогічна тенденція взаємозв'язку спостерігається і у випадку питомого периметра. Абсолютні значення показника шорсткості модельних фігур при збільшенні різальних кромок від 5 до 24 та кута їх загострення від 15° до 150° змінюються в інтервалі від 3,8637 (найбільше значення) до 1,0086 (найменше значення). Значення питомого периметра при цьому змінюються від 15,3226 (найбільше значення) до 2,07 (найменше значення). Щодо інтерпретації відмінності (як суттєвої, чи не суттєвої) між порівнюваними порошками за цими характеристиками, то проведені дослідження (див. табл. 1) дають підстави зробити наступні висновки. Навіть незначна відмінність між показником шорсткості модельних фігур (наприклад, у другому після коми знакові) є суттєвою. Це видно на прикладі варіантів 3 та 5 (див. табл. 1). Показник шорсткості у першому випадку дорівнює 1,0824, в другому — 1,0515. Різниця складає 0,0309 (~ 2,85 %). У той же час візуальний порівняльний аналіз відповідних модельних фігур (рис. 2) свідчить про суттєву різницю їх геометрії з точки зору шорсткості. Тобто, має місце певна дисгармонійність (непропорціональність) між динамікою зміни показника шорсткості і якістю порошку за цією характеристикою. Стосовно питомого периметра, то тут як

кількісна, так і якісна картини є більш гармонійними в зазначеному вище сенсі.

Таблиця 1. Результати розрахунку шорсткості та питомого периметра, значення кутів загострення різальних кромок, їх висоти та ширини основи при різних значеннях параметрів n і m формоутворення модельних геометричних фігур

№ п/п	n	m	$2\varphi_n$, град	$R_{ш}$	$P_{пр} \times R$	$2\Delta_r/R$	h_n/R
1	5	2	36,00	1,2361	6,4721	0,6910	0,4490
2	6	2	60,00	1,1547	4,0000	0,5000	0,5774
3	8	2	90,00	1,0824	2,8284	0,2929	0,5858
4	8	3	45,00	1,4142	5,2263	0,5000	0,4142
5	10	2	108,00	1,0515	2,4721	0,1910	0,5257
6	10	3	72,00	1,2361	3,4026	0,3090	0,4490
7	10	4	36,00	1,7013	6,4721	0,5000	0,3249
8	12	2	120,00	1,0353	2,3094	0,1340	0,4641
9	12	3	90,00	1,1547	2,8284	0,2113	0,4226
10	12	4	60,00	1,4142	4,0000	0,3170	0,3660
11	12	5	30,00	2,0000	7,7274	0,5000	0,2679
12	16	2	135,00	1,0196	2,1648	0,0761	0,3675
13	16	3	112,50	1,0824	2,4054	0,1173	0,3512
14	16	4	90,00	1,2027	2,8284	0,1659	0,3318
15	16	5	67,50	1,4142	3,5999	0,2294	0,3066
16	16	6	45,00	1,8000	5,2263	0,3244	0,2688
17	16	7	22,50	2,6131	10,2517	0,5000	0,1989
18	20	2	144,00	1,0125	2,1029	0,0489	0,3013
19	20	3	126,00	1,0515	2,2447	0,0747	0,2931
20	20	4	108,00	1,1223	2,4721	0,1032	0,2841
21	20	5	90,00	1,2361	2,8284	0,1367	0,2735
22	20	6	72,00	1,4142	3,4026	0,1790	0,2601
23	20	7	54,00	1,7013	4,4054	0,2371	0,2417
24	20	8	36,00	2,2027	6,4721	0,3277	0,2130
25	20	9	18,00	3,2361	12,7849	0,5000	0,1584
26	24	2	150,00	1,0086	2,0706	0,0341	0,2543
27	24	3	135,00	1,0353	2,1648	0,0517	0,2497
28	24	4	120,00	1,0824	2,3094	0,0706	0,2447
29	24	5	105,00	1,1547	2,5209	0,0918	0,2391
30	24	6	90,00	1,2605	2,8284	0,1163	0,2327
31	24	7	75,00	1,4142	3,2854	0,1464	0,2247
32	24	8	60,00	1,6427	4,0000	0,1857	0,2144
33	24	9	45,00	2,0000	5,2263	0,2412	0,1998
34	24	10	30,00	2,6131	7,7274	0,3295	0,1766
35	24	11	15,00	3,8637	15,3226	0,5000	0,1317

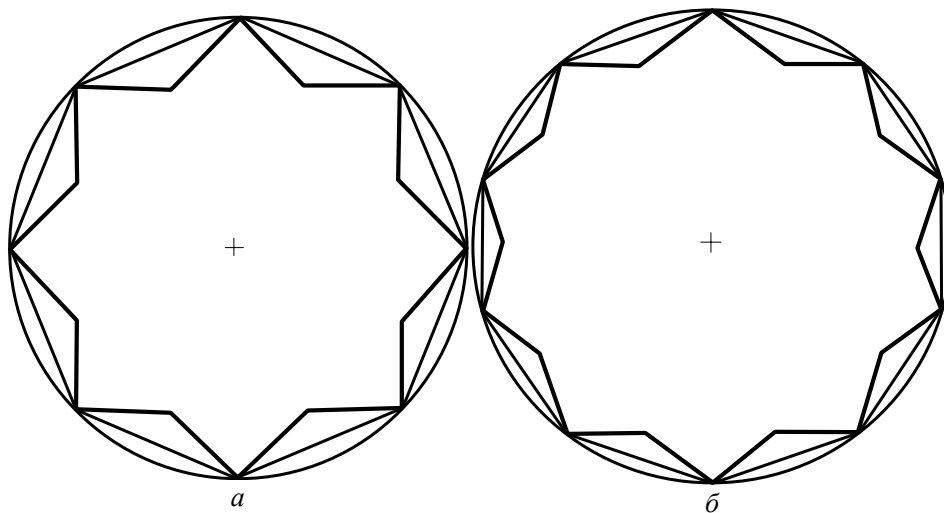


Рис. 2. Порівняльні моделі проекції зерен: *a* — варіант 3, $R_{ш} = 1,0824$, $P_{шт} = 2,8284/R$; *б* — варіант 5, $R_{ш} = 1,0515$, $P_{шт} = 2,4727/R$ (номери варіантів — за табл. 1).

МЕТОДИКА ОПОСЕРЕДКОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КУТА ЗАГОСТРЕННЯ РІЗАЛЬНИХ КРОМОК

Проведені на геометричних моделях проекції зерен дослідження морфометричних характеристик абразивних порошків мають два прикладних аспекти. Про перший з них мова йшла вище. Він пов'язаний зі встановленням межі інтервалу можливих значень шорсткості і питомого периметра та динаміки зміни показників цих характеристик в залежності від кута загострення різальних кромки, а також інтерпретації відмінності між порівнюваними порошками за цими характеристиками як суттєвої чи не суттєвої. Інший не менш цікавий прикладний аспект стосується можливості використання створених науково-методичних засобів для оцінки величини кутів загострення різальних кромки на контурі проекції абразивних зерен. При розв'язанні цієї задачі будемо виходити із того, що нам відомі такі морфологічні характеристики абразивного порошку як шорсткість, форм-фактор, площа, периметри фактичної та опуклої проекцій зерен, а також питомий периметр фактичної проекції. Потрібно знайти параметри n та m формоутворення моделі контуру проекції зерен, через які виражається середнє значення кута загострення різальних кромки Φ . Іншими словами розв'язати задачу обернену до тієї, яку розглядали вище.

Для визначення n будемо виходити з першого рівняння в (3). Підставляючи в нього значення фактичного периметра p за першою формулою в (2) та площі S за формулою (6) після спрощення отриманого виразу матимемо

$$f = \frac{n \operatorname{tg} \beta_n}{\pi \cos \gamma_n [\cos \gamma_n - \operatorname{tg} \beta_n \sin \gamma_n]} \quad (8)$$

Співвідношення (8) являє собою трансцендентне рівняння відносно n . Важливим є той факт, що параметр m формоутворення різальних кромки в нього не входить. Для знаходження коренів цього рівняння застосовуватимемо чисельні методи, зокрема ітераційний метод, із попереднім виділенням інтервалів, в яких лежать корені. Зважаючи на це, приведемо рівняння (8) до

необхідного для такої процедури вигляду, врахувавши при цьому, що $\cos \gamma_n = 1/R_{\text{ш}}$:

$$G(n) = f - \frac{nR_{\text{ш}}^2 \operatorname{tg} \beta_n}{\pi \left[R_{\text{ш}} - \operatorname{tg} \beta_n \sqrt{R_{\text{ш}}^2 - 1} \right]}. \quad (9)$$

Для визначення параметру формотворення шорсткості контуру проекції будемо виходити з останнього рівняння (2). Необхідно, щоб у розгорнутому вигляді це рівняння одночасно містило обидва параметри — i n , і m . З цією метою формулу (6) для площі S приведемо до іншого вигляду. Для цього, використовуючи друге співвідношення в (4), виразимо a_n через b_n : $a_n = 2b_n \cos \gamma_n$. Підставляючи цю залежність в (6), після відповідних перетворень отримаємо

$$S = 2n \frac{a_n H_n}{4} - \frac{2nc_n a_n}{4} = nb_n \cos \gamma_n (H_n - c_n). \quad (10)$$

Далі різницю $H_n - c_n$ виразимо через координати точки перетину діагоналей P , враховуючи співвідношення (7):

$$\begin{aligned} H_n - c_n &= \sqrt{x_P^2 + y_P^2} = x_P \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_n} = \frac{x_P}{\cos \beta_n} = \\ &= \frac{R \sin m \alpha_n}{\cos \beta_n [\sin m \alpha_n - \operatorname{tg} \beta_n (\cos m \alpha_n - 1)]}. \end{aligned} \quad (11)$$

У підсумку для площі S матимемо формулу

$$S = \frac{nRb_n \cos \gamma_n \sin m \alpha_n}{\cos \beta_n [\sin m \alpha_n - \operatorname{tg} \beta_n (\cos m \alpha_n - 1)]}. \quad (12)$$

Для периметра фактичної проекції p використаємо перше співвідношення в (2). Складаючи відношення $P_{\text{пт}} = p/S$ і враховуючи, що $R = p_c / (2n \sin \beta_n)$, $\cos \gamma_n = 1/R_{\text{ш}}$, після відповідних спрощень матимемо

$$P_{\text{пт}} = \frac{2R_{\text{ш}} n \sin \alpha_n [\sin m \alpha_n - \operatorname{tg} \beta_n (\cos \alpha_n - 1)]}{p_c \sin m \alpha_n}. \quad (13)$$

Отримане рівняння, як і рівняння (8), є трансцендентним відносно m . Для знаходження коренів цього рівняння також застосуємо згадуваний вище ітераційний метод із попереднім виділенням інтервалів, в яких знаходяться корені. Трансформоване у зв'язку з цим рівняння (13) набуває такого вигляду:

$$F(n, m) = P_{\text{пт}} - \frac{2R_{\text{ш}} n \sin \alpha_n [\sin m \alpha_n - \operatorname{tg} \beta_n (\cos \alpha_n - 1)]}{p_c \sin m \alpha_n}. \quad (14)$$

Таким чином, для визначення параметрів n і m маємо систему з двох трансцендентних рівнянь (9) та (14). Відомо, що розв'язок трансцендентних рівнянь, тим більше системи таких рівнянь, не може бути отриманий в аналітичному вигляді. Однак та обставина, що рівняння (9) містить лише одне невідоме, сприяє успішному вирішенню завдання і диктує такий його алго-

ритм. Спочатку з рівняння (9) знаходимо n . Потім із урахуванням одержаного n із рівняння (14) знаходимо і відповідне йому значення m . Далі за формулою

$$2\varphi_n = \frac{\pi(n-2)}{2n} - \arccos R_{\text{ш}}^{-1} \quad (15)$$

знаходимо середнє значення кута загострення. Для практичного здійснення описаного алгоритму була розроблена спеціальна комп'ютерна програма.

МЕТОДИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ

Перевірку розробленого алгоритму визначення кута загострення різальних кромок проводили тестуванням, а також шляхом порівняння отримуваних з його застосуванням розрахункових середніх значень кутів загострення і власних експериментальних даних на рівні окремих зерен. Завдання процедури тестування в першу чергу полягало в перевірці коректності виведення та чисельного розв'язання рівнянь (9) та (14). Початковими даними для тестування слугували морфологічні характеристики моделі проекції зерна (f , $R_{\text{ш}}$, $P_{\text{пт}}$, p , p_c), а вихідними — параметри n та m . Критерієм позитивного результату тестування буде збіг отримуваних значень n та m із точними, поданими в табл. 1, які стосуються конкретних моделей проекції контуру зерна. Проведені тестові розрахунки показали, що отримані значення n та m практично тотожні наведеним в табл. 1. Цей факт свідчить про правомірність постановки задачі, що розглядається, та про адекватність перетворень при виведенні рівнянь (9) та (14). Такі підсумки тестування дають підстави говорити про можливість практичного застосування розробленої методики до аналізу проекції зерен реальних порошків.

Проводили також експериментальне визначення кутів загострення різальних кромок шляхом безпосереднього їх вимірювання на відділених з електронно-цифрової "DiaInspector" фотографії і винесених в окрему картинку (рис. 3, а, б) контурах проекції зерен. Процедуру відділення здійснювали засобами комп'ютерних технологій. Проводили графічний обхід межі зображення кожного окремого зерна, для якого за розробленою методикою було розраховане середнє значення кута загострення як $\Phi = N^{-1} \sum_{n=1}^N 2\varphi_n$, де N —

кількість різальних кромок на досліджуваному зерні. На отриманих в такий спосіб плоских геометричних фігурах (див. рис. 3, б—є) — точній копії контуру (межі) проекції — здійснювали візуальну ідентифікацію різальних кромок зерен шліфпорошків деяких марок і зернистостей та ручне вимірювання кутів їх загострення. Розрахункові середні значення кута загострення різальних кромок для досліджуваних марок порошків були такими: АСК 63/50 — 88,8°, АСС 125/100 — 114,3°, АСК 160/125 — 106,1°, АСС 160/125 (1) — 114,1°, АСС 160/125 (2) — 98,4°. Отримані експериментальні середні значення кута загострення різальних кромок зерен цих же порошків становили: АСК 63/50 — 90,8°, АСС 125/100 — 114,4°, АСК 165/125 — 110,3°, АСС 160/125 (1) — 111,8°, АСС 160/125 (2) — 98,3°. Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних свідчить про хороший їх збіг.

Представляє практичний інтерес застосування розроблених науково-методичних засобів до конкретних абразивних порошків. Зокрема до порошків СА і КНБ, оскільки саме для цих надтвердих дисперсних матеріалів в нашому розпорядженні є як власні результати діагностики морфологічних характери-

стиках, так і експериментальні дані для кута загострення різальних кромки, відомі за публікаціями [2—9].

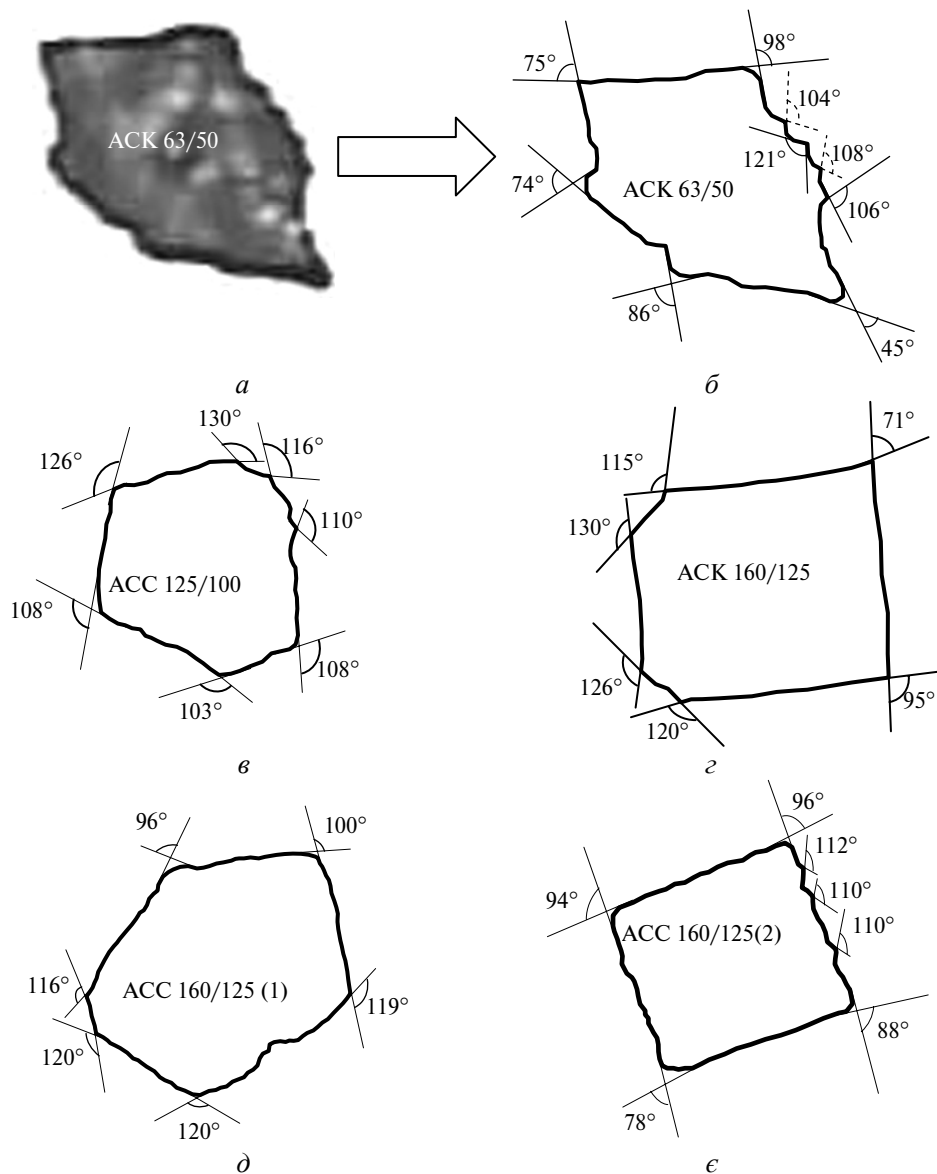


Рис. 3. Результати ідентифікації та вимірювання кутів загострення різальних кромки для зерен досліджуваних шліфпорошків синтетичного алмаза: електронно-цифровий знімок проекції зерна (а), контури проекції зерен (б—є).

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ СТВОРЕНИХ НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ЗАСОБІВ ДО СТАНДАРТНИХ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗА ТА КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

З використанням створених науково-методичних засобів проводили розрахунок геометричних параметрів (кута загострення, висоти та ширина основи) різальних кромки порошоків СА та КНБ, які відповідають вимогам нормативних документів [14, 15] на ці порошки. Досліджували мікропорошки мар-

ки АСМ, а також шліфпорошки марок АС2—АС100, КВ зернистостей, вказаних в табл. 2 і 3. Завдання дослідження полягало у визначенні за розробленою методикою згадуваних вище геометричних параметрів різальних кромок стосовно зазначених порошків. З метою отримання початкових даних, необхідних для такого розрахунку, попередньо проводили діагностування морфометричних характеристик досліджуваних порошків на приладі “DiaInspect.OSM”. Результати розрахунку подані в табл. 2 (мікропорошки СА) і в табл. 3 (шліфпорошки СА і КНБ). Крім того, в табл. 3 наведені експериментальні значення кута загострення різальних кромок досліджуваних шліфпорошків СА та КНБ в тому обсязі, в якому ці дані були представлені у відповідних першоджерелах [2—9].

Таблиця 2. Розрахункові дані кута загострення різальних кромок, висоти та ширини основи стандартних [14] мікропорошків СА марки АСМ

Марка та зернистість, мкм, мікропорошку	Φ , град	h_n , мкм	$2\Delta_n$, мкм
АСМ 60/40	103,268	10,605	13,397
АСМ 60/40	102,198	10,071	12,480
АСМ 40/28	98,688	8,485	9,881
АСМ 28/20	96,670	7,215	7,289
АСМ 20/14	94,254	3,314	4,261
АСМ 14/10	92,724	3,313	4,219

Щодо цих відомих експериментальних даних необхідно відмітити наступне. У 60-тих роках минулого століття дослідженню (головним чином експериментальному) геометричних характеристик проекції зерен абразивних порошків взагалі, природного і синтетичного алмазу та КНБ в тому числі, приділяли велику увагу. Про це свідчить, зокрема, значна кількість публікацій в періодичних та інших наукових виданнях. Якщо брати порошки СА, то об’єктом вивчення були відомі на той час шліфпорошки марок АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС (за стандартом [14] АС2, АС4, АС6 АС15, АС32 відповідно). У [3, 9] приведено експериментальні дані і для шліфпорошків АС15. Звертає на себе увагу той факт, що експериментальні дані з різних літературних джерел різняться між собою, часом і суттєво. Так, наприклад, автори [5] дають такі значення кута загострення для шліфпорошку марки АСО: 71° (80/63), 76° (125/100). У той же час в [3] для тих же зернистостей аналогічного шліфпорошку подано значення кута загострення, рівні 104° і 115° відповідно. Для шліфпорошку марки АСО за даними [6] значення кута загострення складають: 55° (100/80), 60° (160/125), а за даними [3] — 112° і 113° відповідно. Як бачимо, і в першому, і в другому випадках різниця суттєва. Теж саме можна сказати і про шліфпорошки СА інших марок (див. табл. 3). У [7] для шліфпорошків СА зернистостей 5 і 12 (відповідає зернистостям 63/50 та 160/125) за стандартом [14]) без зазначення їх марки значення кутів загострення оцінюються величинами 80° та 87° відповідно. Можна здогадуватись, що ці дані є усередненими і відносяться до існуючих на ту пору шліфпорошків марок АСО—АСС. Додамо, що в [8] приведено не усереднені, а інтервальні (70° — 110°) значення кута загострення різальних кромок шліфпорошків СА зернистості 25 (відповідає зернистості 315/250 за

стандартом [14]) також без зазначення марки. Проте найбільш досконалою подачею експериментальних даних з поміж інших вирізняється робота [9]. У ній для зерен різних марок і зернистостей досліджуваних порошоків СА і КНБ одночасно із значенням кута загострення подано і похибку його визначення. Очевидно саме таку інтервальну оцінку кута загострення різальних кромок шліфпорошків СА і слід визнати найбільш логічною. Тому є сенс оцінювати отримані тут розрахункові дані цієї характеристики саме з позиції викладених вище обставин.

Таблиця 3. Експериментальні і розрахункові дані кута загострення різальних кромок стандартних шліфпорошків СА та КНБ, розрахункові дані їх геометричних параметрів

Шліфпорошки		Експериментальні дані	Розрахункові дані		
Марка	Зернистість, мкм	Φ, град	Φ, град	h_n , мкм	$2\Delta_n$, мкм
АС2	100/80	112 [3]	95,2	32,2	35,17
	80/63	104 [3]	96,4	25,9	29,01
	63/50	114 [3]	97,5	22,1	25,23
	50/40	115 [3]	97,5	17,6	20,03
АС4	160/125	111 [2]	98,7	46,17	52,24
	125/100	119 [2], 117 [3], 96,0 [4]	95,0	36,74	38,42
	100/80	115 [2], 127 [3], 100,4±3,8 [9]	93,4	32,2	34,17
АС6	80/63	121 [2], 117 [3]	93,5	28,0	29,79
	160/125	115 [2], 105 [3]	103,0	49,31	50,64
	125/100	123 [2], 120 [3], 100,7 [4]	96,0	36,13	40,13
	100/80	120 [2], 126 [3]	100,0	25,92	30,89
	80/63	112 [2], 120 [3]	92,0	24,88	25,76
	63/50	112 [2]	98,3	18,96	21,94
АС15	50/40	109 [2], 117 [3]	99,6	12,99	15,36
	160/125	105 [3]	98,8	49,5	57,76
	125/100	120 [3], 117,2±3,4 [9]	97,7	44,90	49,19
	100/80	—	101,8	26,24	32,30
	80/63	—	105,0	19,13	24,93
	50/40	—	99,0	17,29	20,24
АС20	315/250	—	101,9	59,90	73,83
АС32	400/315	—	109,6	63,16	89,45
	500/400	—	115,8	71,57	114,11
АС50	400/315	—	111,0	59,30	86,22
	315/250	—	113,0	48,34	73,06
	250/200	—	112,9	39,48	59,55
	160/125	—	116,3	21,60	34,80
АС100	315/250	—	112,1	41,84	62,13
КВ	80/63	79 [5]	95,1	31,19	34,10
	125/100	84 [5]	97,4	38,55	43,86
	160/125	—	95,7	45,88	52,26

Порівняльний аналіз відомих експериментальних та отриманих тут даних дає підстави зробити позитивний висновок щодо прийнятності збігу розрахункових даних з наявними експериментальними. Розходження, що спостерігаються, можна пояснити, з однієї сторони, тими спрощеннями, які покладені в основу використаної методики при її розробці. З іншої сторони, має місце фактор не повної ідентичності порошків, до яких відносяться експериментальні та розрахункові дані. Ще одним об'єктивним джерелом розбіжності може бути похибка застосованого авторами [2—9] методу експериментального вимірювання величини кутів загострення різальних кромочок з використанням спеціальних шаблонів. В окремих випадках при ідентифікації різальної кромочки міг існувати і вплив суб'єктивного фактору, яким є вибір точок переходу прямолінійної частини проекції зерна в радіусну. Та незважаючи на це, є всі підстави стверджувати, що отримані розрахункові дані узгоджуються з відомими експериментальними даними.

Стосовно характеру змін розрахункових середніх значень кута загострення різальних кромочок в залежності від марки та зернистості порошку, то на опрацьованому тут об'ємі порошків більш явно проглядається вплив марки. А саме — порошки більш високих марок мають дещо більші кути загострення різальних кромочок. Спостерігається також тенденція збільшення (від 2 до 16 %) кута загострення зі збільшенням зернистості. Але ця тенденція не є стабільною. Подібний характер взаємозв'язку зазначених факторів, але з більшою різницею між мінімальними та максимальними значеннями, відмічено і в [9].

Зауважимо, що, на жаль, для мікропорошків автор не мав у своєму розпорядженні експериментальних даних з кількості різальних кромочок та кута їх загострення. Тому не було можливості оцінити отримані розрахункові значення цих параметрів. Але можна зробити це опосередковано, використовуючи відомі [3, 5, 6] експериментальні дані для шліфпорошків марки АС2 (див. табл. 3) ситової зернистості 50/40, які за розміром зерен, їх морфологією та абразивними властивостями близькі до мікропорошків марки АСМ зернистістю 60/40 і 40/28. Ці експериментальні дані, які стосуються шліфпорошків, разом із отриманими тут розрахунковими даними з кількості різальних кромочок і кута їх загострення, приведено в табл. 3. На основі порівняльного аналізу можна стверджувати, що отримані розрахункові дані і в цьому випадку є достовірними.

ЕМПІРИЧНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИЧНОЇ АБРАЗИВНОСТІ ПОРОШКІВ НТМ

Відомо [3], що кути загострення різальних кромочок значною мірою впливають на абразивність порошків СА, зокрема мікропорошків. Великий науково-прикладний інтерес становить аналітичне описання такого взаємозв'язку. Отримані тут і подані в табл. 2 розрахункові дані з кутів загострення різальних кромочок в сукупності з вирахованими значеннями еквівалентного діаметра як характеристики лінійного розміру зерен та експериментальними даними [3] з абразивності стандартних [14] мікропорошків СА дозволяють на емпіричному рівні вирішити таку задачу. В процесі проведення пов'язаних з цим досліджень використовували раніше розроблені нами алгоритм і комп'ютерну програмну систему LgAprox автоматизованої побудови емпіричних математичних моделей та аналізу їх адекватності [16]. Незалежними факторами досліджуваного процесу були прийняті середні значення кута загострення різальних кромочок Φ та характерний розмір зерен, за який приймали

еквівалентний діаметр їх проекції d_e . Крім того, як незалежний фактор приймали також добуток Φd_e , який дозволяє врахувати спільний вплив двох окремих незалежних факторів на абразивність порошку. Значення наведених незалежних факторів та експериментальні значення абразивної здатності подано в табл. 4. Проведена обробка цих даних показала, що вони добре апроксимуються такою залежністю:

$$A = 26,1927 - \frac{614,0849}{(\Phi/10)^{1,5}} + 2,3948 \left(\frac{d_e}{10} \right)^{1,5} - 0,39468 \left(\frac{\Phi}{10} \right)^{1,25} \left(\frac{d_e}{10} \right)^{1,25}. \quad (16)$$

Результати відтворення з її допомогою експериментальних даних з абразивності подані в табл. 4. Аналіз показує, що встановлена емпірична залежність адекватно відображає об'єктивно існуючий взаємозв'язок між характеристиками, які розглянуто. Тому вона може бути використана для експресного визначення абразивної здатності мікропорошків СА, поєднаного з сучасними технологіями автоматизованої діагностики їх морфометричних характеристик.

Таблиця 4. Результати прогнозування абразивності мікропорошків СА за залежністю (16) за розрахунковими значеннями кутів загострення різальних кромки і еквівалентним діаметром зерен

Φ, град	d_e , мкм	Абразивна здатність	
		експериментальна	розрахована за залежністю (16)
103,268	40,603	3,60	3,5998
102,198	39,961	3,59	3,6133
98,688	28,959	3,58	3,5208
96,670	19,926	3,50	3,5413
94,254	13,609	3,40	3,3853
92,724	12,979	3,00	3,0095

ВИСНОВКИ

Вперше подано оригінальну інформаційно-методологічну інтерпретацію новітніх морфологічних характеристик абразивних порошків, зокрема — шорсткості та питомого периметра. Досліджено діапазон значень та динаміку зміни цих характеристик в залежності від реальної геометрії проекції контуру зерна і їх взаємозв'язок з якістю порошку.

Розроблено нову методику опосередкованого визначення середнього значення кута загострення різальних кромки зерен абразивних порошків. Тестування методики на порошках синтетичного алмазу показало хорошу збіжність та узгодженість розрахункових та відомих експериментальних даних. З використанням розробленої методики вперше отримано нові дані з кута загострення різальних кромки зерен шліфпорошків синтетичного алмаза та кубічного нітриду бору деяких марок та зернистостей. На кількісному рівні виявлено залежність висоти різальних кромки та ширини їхньої основи від зернистості порошку. У той же час в процесі досліджень на проаналізованому об'ємі порошків не спостерігали стабільності характеру впливу марки і зернистості порошку на величину середнього значення кута загострення різальних кромки зерен.

Вперше отримано емпіричну математичну модель взаємозв'язку кута заострення різальних кромок та еквівалентного діаметра зерен мікропорошків синтетичного алмаза з їх абразивною здатністю. Застосування цієї моделі дає можливість проводити оцінку абразивної здатності мікропорошків синтетичного алмаза, не вдаючись до проведення випробувань, передбачених стандартом.

В подальшому дослідження, що проводили, слід продовжити в напрямку розробки методології безпосереднього визначення кутів заострення різальних кромок та їх геометричних параметрів стосовно абразивних порошків, заснованого на використанні процедури оцифрування контуру проекції зерен та на наступному математичному опрацюванні отриманих таким чином числових даних.

Приведены результаты исследования информационной и геометрической сути передовых морфологических характеристик порошков сверхтвердых материалов и степени их чувствительности к изменениям качества порошка. Изложена новая оригинальная методика опосредствованного определения среднего значения угла заострения режущих кромок зерен абразивных порошков. Впервые получено эмпирическую математическую модель взаимосвязи угла заострения режущих кромок и эквивалентного диаметра зерен микропорошков синтетического алмаза с их абразивной способностью.

Ключевые слова: абразивные порошки, порошки синтетического алмаза, двумерные морфологические характеристики, двумерные геометрические характеристики, углы заострения режущих кромок, абразивная способность, взаимосвязь характеристик.

The results of the analysis of the information and geometrical essences of the new morphological characteristics of superhard materials powders and the degree of the characteristics sensitivity to changes the powder quality have been considered. A new original procedure of the indirect calculation of the mean value of edge angles of abrasive powder grains has been proposed. An empirical mathematic model of the interrelation between the edge angle and equivalent diameter of synthetic diamond micron powders and their abrasive ability has been constructed.

Key words: abrasive powders, synthetic diamond powders, 2D morphological characteristics, 2D geometrical characteristics, edge angle, abrasive ability, interrelation characteristics.

1. *Физические свойства алмаза* / Под ред. Н. В. Новикова. — Киев: Наук. думка, 1987. — 187 с.
2. *Никитин Ю. И.* Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. — Киев: Наук. думка, 1984. — 264 с.
3. *Никитин Ю. И., Уман С. М., Коберниченко Л. В. и др.* Порошки и пасты из синтетических алмазов. — Киев: Наук. думка, 1992. — 284 с.
4. *Пивоваров М. С.* Особенности геометрических параметров синтетических алмазов // *Алмазы.* — 1971. — Вып. 7. — С. 8—9.
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. Я.* Обрабатываемость алмазным инструментом твердых и хрупких материалов // *Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом.* — М.: 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. *Маслов Е. Н.* Теоретические основы процесса алмазной обработки материалов // *Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом.* — М.: Наука, 1966. — С. 14—29.

9. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. — Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под ред. А. А. Шепелева. — Киев, 2007. — 339 с.*
10. *Shibata T., Shinohara K., Uchiyama T., Otani M. Lapping performance guide of poli-cristal diamond particelsthrough morfological analysis // Diamond Related Mater. — 2001. — 10, N 3—7. — P. 376—382.*
11. *De Pellegrin D. V., Corbin N. D., Baldoni G., Torrance A. A. The measurement and description of diamond particle shape in abrasion / 2nd Int. Industrial Diamond Conf., Rome, Italy, 19—20 Apr., 2007. — CDR D.5.3. Pdf 210.*
12. *List E., Frenzel J., Vollstaedt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Ind. Diamond Rev. — 2006. — N 1. — P. 42—47.*
13. *Петасюк Г. А. Диагностика морфометричних характеристик порошків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень // Відбір і обробка інформації. — 2009. — Вип. 30 (106). — С. 138—145.*
14. *ДСТУ 3292—95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. — Введ. 01.01.1996. — Київ: Держстандарт України, 1995. — 71 с.*
15. *ТУ У 88.090.018—96. Порошки кубического нитрида бора (кубонита). Технические условия. — Киев: ИСМ НАН Украины, 1996. — 48 с.*
16. *Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических модлей LgArgox для применения в научно-прикладных задачах материаловедения // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. трудов. — Минск, 2008. — Вып. 31. — С. 58—63.*

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

Надійшла 02.02.10