

В.Г. Полторацький, канд. техн. наук; **О.О. Бочечка**, **В.І. Лавріненко**,
Г.А. Петасюк, доктори технічних наук; **О.О. Пасічний**, канд. техн. наук; **В.П. Білоченко**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України Україна, 04074, Київ,
вул. Автозаводська, 2, e-mail: vg.poltoratsky@gmail.com; petasyuyk@ukr.net*

ПОРОШКИ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ З МОДИФІКОВАНОЮ ТЕРМОСТІЙКИМИ ОКСИДАМИ І ХЛОРИДАМИ ПОВЕРХНЕЮ ЗЕРЕН: ОТРИМАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ

Описано технологічно удосконалений метод модифікування шліфпорошків синтетичного алмазу. Метод передбачає нанесення на поверхню зерен порошку рідинно-фазовим способом покриву з насиченого розчину термостійких сполук. Виготовлено дослідну партію модифікованих таким способом шліфпорошків АС6 125/100. В якості матеріалу покриву були використані оксиди бору і алюмінію та хлориди натрію і кальцію. Проведено дослідження морфометричних характеристик, технологічних властивостей і однорідності отриманих шліфпорошків. Подаються результати випробування експериментальних шліфувальних кругів, в різальному шарі яких було використано модифіковані за розробленою технологічною схемою дослідні шліфпорошки. Проведено кореляційний аналіз взаємозв'язку експлуатаційних характеристик експериментальних шліфувальних кругів з морфометричними характеристиками, технологічними властивостями і однорідністю за формоподібністю проекції зерен модифікованих шліфпорошків. Виконано аналітичне подання результатів дослідження зазначеного взаємозв'язку у вигляді емпіричних математичних залежностей. Подаються рекомендації щодо сфер і способів найбільш ефективного застосування випробуваних експериментальних шліфувальних кругів та напрямки можливого продовження проведених в роботі досліджень.

Ключові слова: шліфпорошок, модифікування, покрив, оксиди, хлориди, термостабільність, характеристики, кореляція, апроксимація.

Вступ

Створення нових абразивних порошків надтвердих матеріалів (НТМ) з унікальними технологічними і фізичними властивостями є актуальним науково-прикладним завданням сучасного матеріалознавства дисперсних матеріалів. Практична потреба в подібних абразивних порошках зумовлена сучасним розвитком процесів алмазно-абразивної обробки, зокрема в напрямку підвищення ефективності використовуваного абразивного інструменту (шліфувальних кругів). Атрибутами зазначеної ефективності в даному випадку виступають такі експлуатаційні характеристики інструменту як питома витрата абразиву, показники якості оброблюваної поверхні, продуктивність обробки, міцність утримання зерен порошку у різальному шарі (зв'язці) абразивного інструменту. Однією із складових досягнення оптимальних показників зазначених експлуатаційних характеристик є забезпечення і поєднання унікальних технологічних і фізичних властивостей використовуваних у різальному шарі інструмента абразивних порошків. Подібна оптимізація може бути досягнута модифікуванням шліфпорошків синтетичного алмазу та інших абразивних порошків шляхом нанесення на поверхню їх зерен покриття із термостійких оксидів і хлоридів. Тому створення подібних абразивних порошків є актуальним і важливим науково-прикладним завданням сучасного матеріалознавства дисперсних матеріалів абразивного призначення [1]. Саме створення подібних порошків, вивчення їх фізичних і технологічних властивостей,

морфометричних характеристик, та дослідження ефективності використання нових порошків в інструменті і складає мету цієї роботи.

Матеріали та технологія нанесення термостійкого покриття, визначення термостійкості модифікованих порошків

Як початковий порошок при виготовленні модифікованих порошків використовувався стандартний за [2] шліфпорошок синтетичного алмазу АС6 125/100. Для формування комбінованого термостабільного зносостійкого покриття застосовувалися такі матеріали: оксид бору (борний ангідрид, B_2O_3); оксид алюмінію (Al_2O_3); хлорид кальцію ($CaCl_2$); хлорид натрію ($NaCl$); суміш оксиду бору та оксиду алюмінію ($B_2O_3 + Al_2O_3$); суміш оксиду бору та хлориду кальцію ($B_2O_3 + CaCl_2$); суміш оксиду бору та хлориду натрію ($B_2O_3 + NaCl$).

Механохімічним методом в енергонапруженому подрібнюючому апараті (планетарний млин М-2М [3]) під впливом механохімічної активації було виготовлено нано- та субмікропорошки розчинних та нерозчинних оксидів (B_2O_3 , Al_2O_3) з одночасною активацією поверхні цих порошків для утворення комбінованого кисневмісного покриття. Необхідність механохімії зумовлена тим, що використання первинних нерозчинних компонентів (зокрема Al_2O_3) у початковому стані, як показали результати наших попередніх досліджень [4], не забезпечує необхідної якості покриття. Застосування ж операції механохімічної активації, як показує теоретичний аналіз, сприяє значному покращенню якості покриття. Параметри роботи планетарного млина були такими:

- маса порошку, завантаженого в одну ємність для розмелу, – 1000 карат;
- об'єм ємності для розмелу – $650 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$;
- кількість ємностей для розмелу – 6;
- прискорення, що діє на кулі для розмелу – 40 g;
- потужність електродвигуна – 5.5 кВт.

Покриття початкового (базового) шліфпорошку АС6 125/100) здійснювався методом рідинно-фазного нанесення [5] з водної суспензії, якою слугував насичений розчин відповідного модифікатора. Початковий алмазний порошок масою 25 ст змішували з 10–15 мл насиченого розчину модифікатора протягом 10 хв. із застосуванням магнітної мішалки. Надлишок розчину зливали, суміш фільтрували. Одержану вологу масу порошку висушували, розмішуючи, при температурі 120°C до сухого однорідного стану. Методом гравіметрії після покриття визначено відносну кількість модифікатора (m_{mdf}). За зазначеною вище технологічною схемою було отримано 6 абразивних шліфпорошків з покриттям. Перелік цих нових шліфпорошків, включно із базовим, є таким: $B_2O_3 + Al_2O_3$ ($m_{mdf} = 15.5$, $K_{TC} = 0.96$); $CaCl_2$ ($m_{mdf} = 8.2$, $K_{TC} = 0.98$); $NaCl$ ($m_{mdf} = 9.7$, $K_{TC} = 0.98$); B_2O_3 ($m_{mdf} = 6.3$, $K_{TC} = 0.98$); $B_2O_3 + CaCl_2$ ($m_{mdf} = 8.7$, $K_{TC} = 0.98$); $B_2O_3 + NaCl$ ($m_{mdf} = 9.2$, $K_{TC} = 0.98$); початковий (базовий, $K_{TC} = 0.55$).

Визначення термостійкості модифікованих і початкового порошків виконувалось на сучасному аналітичному обладнанні із застосуванням класичних методів дериватографії. Методика передбачала термообробку як первинних, так і модифікованих зразків у повітряному середовищі в трубчастій печі при температурі 900°C впродовж однієї години. Зразки було зважено до та після нагрівання. За результатами зважування було розраховано коефіцієнт термостійкості K_{TC} як відношення маси шліфпорошку після термообробки до маси початкового шліфпорошку.

Технічні та науково-методичні засоби визначення морфометричних характеристик і технологічних властивостей досліджуваних порошків

Морфометричні характеристики шліфпорошків початкових та модифікованих, включно із висотою зерна, визначались із застосуванням приладу *DialInspect.OSM* фірми *VOLLSTADT.DIAMANT* (Німеччина) [6]. Частина цих характеристик в подальшому використовувалася в якості початкових даних для розрахунку нових оригінальних

морфометричних характеристик та технологічних властивостей досліджуваних порошків. До першої із зазначених двох груп об'єктів відносяться коефіцієнт сплюсненості зерна, питомий периметр та формоподібність його проекції. Другу групу складають такі технологічні властивості як ступінь та товщина покриву, число зерен в одному караті порошку, його зовнішня питома поверхня. До цієї групи можна віднести також і характеристики різальних кромek зерен, якими є їх кількість та кути загострення. При цьому використовувалися розроблені в Інституті надтвердих матеріалів НАН України опосередковано-аналітичні методи, короткий опис суті яких подається нижче.

Приладом *DiaInspect.OSM* діагностується більше 20-ти характеристик проекції зерна абразивного порошку [6]. При виконанні цієї роботи із цього повного переліку характеристик 2D морфології зерна (тобто його проекції) як окремі ознаки якості порошку та як початкові дані для подальших розрахунків використовувалися наступні: максимальний (F_{max} , мкм) і мінімальний (F_{min} , мкм) діаметри Фере проекції, периметри фактичного (p , мкм) та опуклого (p_c , мкм) її контурів, загальна площа проекції фактичного зображення зерен (A_t), форм-фактор фактичного зображення проекції (f_r), Фере-подовження (F_e) та шорсткість проекції (Rg).

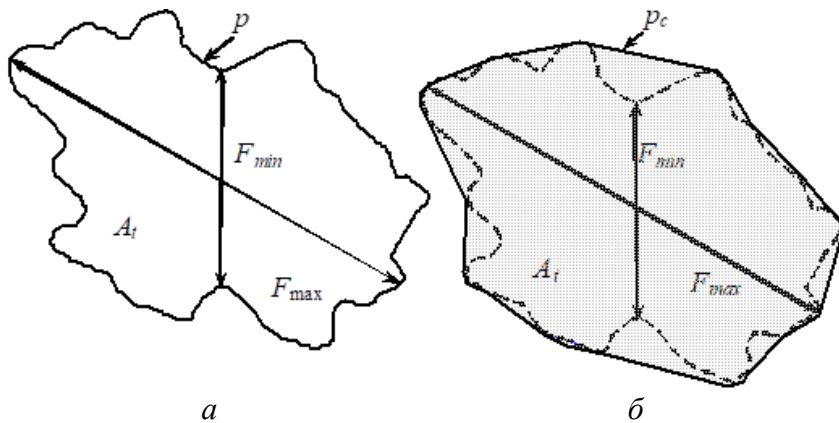


Рис. 1. Фактична (а) і опукла (б) проекції абстрактного зерна: A_t – площа проекції зерна; p – периметр фактичної проекції зерна; p_c – периметр опуклої проекції зерна

Графічна ілюстрація основних морфометричних характеристик із зазначеної вище їх сукупності подається на рис. 1.

Більш повну інтерпретацію геометричної сутності перерахованих вище морфометричних характеристик і детальніший їхній опис можна знайти в роботі [7]. Із цієї сукупності морфометричних характеристик F_{max} , F_{min} , p , p_c , A_t є основними, решта – похідними від них. Вони пов'язані з такими основними залежностями:

$$F_e = F_{max} / F_{min}; \quad f_r = p^2 / (4\pi A_t); \quad Rg = p / p_c, \quad (1)$$

де $\pi = 3,14159\dots$ – математична константа.

Додатково на підставі даних *DiaInspect*-діагностування проводилося обчислення питомого периметру проекції зерен (p_s) як відношення $p_s = p / A_t$. Крім того, у мультифокусному режимі роботи приладу *DiaInspect.OSM* проводили автономне вимірювання висоти (H) зерен. На підставі даних з висоти зерен, максимального і мінімального діаметрів Фере визначали ще одну, введену в [8], нову характеристику порошку – коефіцієнт сплюсненості зерна (F_{fl}). Показник цієї характеристики визначається за формулою:

$$F_{fl} = 1 - \frac{H^2}{F_{min} F_{max}}. \quad (2)$$

Коефіцієнт сплюснення зерен, на відміну від всіх перерахованих вище морфометричних характеристик порошку, є об'ємною (тобто 3D) характеристикою зерна. Якщо зерно має форму просторово-об'ємного тіла, всі три виміри якого рівні між собою (як це має місце,

наприклад, для зерна у формі кулі), то значення цього коефіцієнта буде рівним нулю. У всіх інших випадках він прийматиме значення між нулем, не досягаючи його, і одиницею включно.

Визначення технологічних властивостей (ступінь та товщина покриття, зовнішня питома поверхня, число зерен в одному караті порошку, кількість різальних кромek та середнє значення кутів їх загострення) проводилося на підставі даних DiaInspect-діагностування окремих морфометричних характеристик і модифікованих порошоків та густини матеріалу початкових порошоків і матеріалів покриття. При цьому використовувалися розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України оригінальні опосередковано-аналітичні методи. Нижче подається короткий опис цих методів і алгоритмів практичної їх реалізації.

Опосередковано-аналітичне визначення ступеню покриття модифікованих порошоків виконувалось методом, викладеним в [9]. Необхідність і доцільність застосування такого методу у випадку рідинно-фазового способу нанесення покриття обґрунтовувалася в цитованій вище роботі. Розрахункова залежність є такою

$$\mu = \frac{\rho_c}{\rho_d} \left(\frac{V_{cd}}{V_d} - 1 \right), \quad (3)$$

де V_{cd} , V_d – відповідно середні значення об'ємів зерна шліфпорошку після нанесення на поверхню його зерна покриття та початкового (мкм³), ρ_c , ρ_d – відповідно густина матеріалу покриття та матеріалу зерна абразивного порошку (г/см³). Об'єми V_{cd} та V_d можуть бути вираховані на підставі результатів сучасного автоматизованого діагностування (наприклад, на приладі DiaInspect.OSM) морфометричних характеристик початкового і модифікованого шліфпорошків та виходячи із прийнятої 3D моделі їхніх зерен. При цьому приймається також допущення стосовно однотипності просторово-геометричної форми зерен порошоків початкового та модифікованого.

Товщина рідинно-фазового покриття термостійкими сполуками шліфпорошків надтвердих матеріалів визначалась опосередковано-аналітичним методом, заснованим на пікнометрично-адитивному підході та на 3D моделі зерна у формі еліпсоїда, за запропонованою в [10] залежністю

$$h = A \frac{S_1}{4S_2} \left\{ \sqrt{1 + \frac{4S_2\mu}{S_1} \frac{\rho_d}{\rho_c}} - 1 \right\}, \quad (4)$$

де A – найбільша вісь еліпсоїда (мкм); $S_1 = \tilde{B} + \tilde{C} + \tilde{B}\tilde{C}$; $S_2 = 1 + \tilde{B} + \tilde{C}$; $\tilde{B} = B/A$; $\tilde{C} = C/A$; $A \geq B \geq C$ – осі еліпсоїда (мкм), які ототожнюються з максимальним (F_{max} , вісь A), мінімальним (F_{min} , вісь B) Фере діаметрами проекції зерна та із його висотою (H , вісь C); μ – ступінь покриття.

Розрахункове визначення числа зерен в одному караті порошку здійснювалося за методом [11], заснованим на екстраполяційно-афінній 3D моделі зерна. Суть методики полягає в наступному. Виконується діагностування морфометричних характеристик проби порошку на приладі DiaInspect.OSM. На підставі цих даних і результатів виміру висоти зерен обчислюється їхній об'єм, виходячи з екстраполяційно-афінної 3D моделі зерна [12]. Алгоритм обчислення об'єму докладно викладений у роботі [12]. Потім знаходиться сумарний об'єм (V_Σ) всіх продіагностованих зерен, кількість яких позначається через N . Обчислюється середній об'єм одного зерна. З урахуванням цього, число зерен (n_z) в одному караті (200 мг) порошку визначається за формулою

$$n_z = \frac{NP}{4V_\Sigma \rho_d}, \quad (5)$$

де $P = 0,2$ г – маса одного карату алмазного порошку.

Зовнішню питому поверхню (F_{oss}) порошоків визначали з використанням екстраполяційно-аналітичного методу [13]. Метод заснований на 3D моделюванні площі

поверхні зерен порошку і їхнього об'єму. Виходячи з екстраполяційно-афінної 3D моделі, чисельно визначають площу поверхні (s_i) і об'єм (v_i) кожного зерна досліджуваної їхньої проби. Зовнішню питому поверхню окремих зерен знаходять як частку від ділення площі поверхні на об'єм, помножений на густину матеріалу порошку

$$F_i = \frac{s_i}{v_i \rho_d}. \quad (6)$$

Осереднюючи отримані результати в межах випробуваної проби зерен в кількості N штук, одержують показник питомої поверхні порошку за наступною залежністю

$$F_{oss} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i. \quad (7)$$

Показники характеристик різальних кромки визначались опосередковано-аналітичним методом, викладеним в роботі [14]. Метод заснований на геометричному моделюванні проекції зерна і локальних геометричних елементів плоского рельєфу його контуру, зокрема виступів, як геометричних аналогів різальних кромки. Відповідно до цього методу кількість різальних кромки (n_{ce}) абразивних порошоків та середнє значення кутів їх загострення (φ) знаходяться із отриманої в [14] системи рівнянь:

$$f_r - \frac{n \cdot Rg^2 \cdot \operatorname{tg}(\pi/n)}{\pi[Rg - \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot \sqrt{Rg^2 - 1}]} = 0, \quad (8)$$

$$2\pi f_r - \frac{Rg^2 \cdot n \cdot \sin(\alpha_n) \cdot \{\sin(\alpha_n \cdot m) - \operatorname{tg}(\beta_n) \cdot (\cos(\alpha_n - 1))\}}{\sin(m \cdot \alpha_n)} = 0,$$

$$\varphi = 2(\delta_n - \gamma_n) = \frac{180^\circ \cdot (n - 2)}{n} - 2 \operatorname{arccos}(Rg).$$

Тут n , m – параметр формотворення зіркоподібної моделі проекції зерна, які підлягають визначенню; f_r – форм-фактор проекції зерна, який характеризує ступінь її округлості; Rg – шорсткість проекції зерна, яка відображає ступінь її розвиненості. За результатами розв'язання системи (12) приймається $n_{ce} = n$. Крім того, прийняті наступні позначення $\alpha_n = 2\pi/n$, $\beta_n = \alpha_n/2 = \pi/n$, $\gamma_n = \operatorname{arccos}(Rg)$, $\delta_n = 90^\circ (n - 2)/n$, $\varphi_n = 2(\delta_n - \gamma_n)$. Більш детально методика визначення n_{ce} і φ з системи рівнянь (8) та процедура її отримання викладена в роботі [14].

Автоматизовану ідентифікацію та кількісне оцінювання формоподібності проекції зерен досліджуваних абразивних порошоків проводили пошуково-аналоговим методом [15]. Цим методом передбачаються диференціальні і інтегральні показники формоподібності, а також відносна похибка ідентифікації. В якості можливих базових фігур-аналогів (БФА) фактичної проекції зерна приймається сукупність наступних плоских фігур: овалоподібні фігури (круг та еліпс); прямокутник; ромб; рівнобедрена трапеція (гармонічна, сплющена, видовжена); квадрат, правильні п'ятикутник, шестикутник та восьмикутник; трикутник (різносторонній, правильний, рівнобедрений сплющений та рівнобедрений видовжений); паралелограм.

Відзначимо, що в цій роботі визначався тільки показник диференціальної формоподібності. Цього показника цілком достатньо для дослідження, що тут проводиться. Вихідними даними для визначення зазначеної характеристики формоподібності слугували наступні геометричні параметри проекції зерна: максимальний і мінімальний діаметри Фере, їхнє відношення, яке іменується Фере-подовженням, площа і периметр. Всі ці морфометричні характеристики діагностували приладом *DialInspect.OSM* [6].

Однорідність досліджуваних шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен визначалась методом, викладеним в роботі [16]. Вихідними даними для цього служили

показники диференціальної формоподібності проекції зерен як їх морфометричної характеристики.

Експериментальні шліфувальні круги, в різальному шарі яких використано досліджувані (модифіковані) алмазні шліфпорошки, технічні і методичні засоби визначення експлуатаційних характеристик кругів

Було виготовлено 7 зразків експериментальних шліфувальних кругів форми 12A2-45° 125×5×3×32 на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у різальному шарі, рівною 100%. Круги відрізнялись складом модифікатора зерен базового шліфпорошку, яким був шліфпорошок АС6 125/100. Перелік виготовлених експериментальних шліфувальних кругів, конструктивні їх параметри та маркування за ГОСТ 16172–90 (ISO 6168-80) подаються у табл. 1.

Таблиця 1. Перелік виготовлених експериментальних шліфувальних кругів та їх маркування за ГОСТ 16172–90 (ISO 6168-80)

Порядковий номер	Маркування згідно ГОСТ 16172–90 (ISO 6168-80)	Склад модифікатора поверхні зерен, використаних у робочому шарі алмазних кругів
1	АС6 125/100 В2-08 100 покрив $V_2O_3+Al_2O_3$	суміш $V_2O_3 + Al_2O_3$, (1 : 1)
2	АС6 125/100 В2-08 100 покрив $CaCl_2$	$CaCl_2$ (100 % зерен)
3	АС6 125/100 без покриття	без модифікування поверхні зерен
4	АС6 125/100 В2-08 100 покрив $NaCl$	$NaCl$ (100 % зерен)
5	АС6 125/100 В2-08 100 покрив V_2O_3	V_2O_3 трикратне (100 % зерен)
6	АС6 125/100 В2-08 100 покрив $V_2O_3+CaCl_2$	суміш $V_2O_3 + CaCl_2$, (1 : 1)
7	АС6 125/100 В2-08 100 покрив V_2O_3+NaCl	суміш $V_2O_3 + NaCl$, (1 : 1)

Експлуатаційні показники шліфувальних кругів (зносостійкість та якість обробленої поверхні) було визначено на стенді, створеному на базі модернізованого універсально-заточного станка моделі ЗВ642, та із застосуванням сучасних технічних засобів профілометрії та мікроаналізу, зокрема профілографа-профілометра *SurfTest SJ-201* (фірма *Mitutoyo*, Японія). Більш повний опис зазначених технічних засобів та методики їх застосування можна знайти в [17].

Для вирішення поставлених задач використовувалися відомі та удосконалені методики досліджень. В процесі досліджень використовувалось обладнання, яке широко застосовується в інструментальній промисловості, а також модернізоване обладнання. Достовірність наукових результатів підтверджується великим обсягом проведених експериментальних

досліджень із застосуванням сучасних методик обробки експериментальних даних, стандартних та спеціальних комп'ютерних програм. У якості вихідного оброблюваного матеріалу використовували твердий сплав Т15К6.

При дослідженні експлуатаційних характеристик шліфувальних кругів визначали наступні показники: відносні витрати абразивного порошку в кругах q_p , мг/г; різальну здатність круга Q , мм³/хв. (продуктивність шліфування); шорсткість обробленої поверхні.

Відносну витрату абразивного порошку визначали згідно з ГОСТ 16181-82 як відношення його маси до маси зішліфованого ним матеріалу:

$$q_p = 200\Delta h p / sm, \quad (9)$$

де Δh – лінійний знос круга, мкм; p – маса абразивного порошку у крузі в каратах; 200 – маса одного карату, мг; s – товщина робочого шару круга у вихідному стані, мкм; m – маса абразивного матеріалу, зішліфованого під час випробування, г.

Лінійний метод передбачає визначення зміни висоти робочого шару круга за визначений період його роботи, що виконується за допомогою оптичного вертикального довжиноміра ИЗВ-2 з точністю $\pm 0,001$ мм, пристосувань із мікронними індикаторами або вимірювальних приладів на базі оптичного мікроскопу. При лінійному методі вимірювання зносу круг можливо не знімати зі шпинделя верстата, що виключає похибки базування та підвищує точність вимірів.

Якість оброблюваної поверхні інструментальних матеріалів оцінювали за показниками шорсткості оброблюваної поверхні, виходячи з наступних параметрів: середнього арифметичного відхилення профілю мікронерівностей, Ra , мкм; максимальної висоти мікронерівностей, $Rmax$, мкм; середнього кроку мікронерівностей по базовій лінії, Sm , мкм; відносній опорній довжині профілю мікронерівностей на рівні 50% $Rmax$, t_{50} , %.

Шорсткість оброблених поверхонь вимірювалася за допомогою профілометра-профілографа моделі SurfTest SJ-201 фірми Mitutoyo (Японія). Точність вимірювання, що забезпечується цим приладом, становить 0,01 мкм, допустима основна відносна похибка ± 1 % від виміряного значення.

Визначення морфометричних характеристик і технологічних властивостей досліджуваних шліфпорошків та обговорення отриманих результатів

Ефективність алмазно-абразивного інструменту обумовлюється не тільки раціональним вибором параметрів обробки, а в значній мірі і характеристиками та властивостями абразивного порошку, використаного в його різальному шарі. Тому важливою інформаційно-забезпечувальною задачею є діагностування таких порошків на предмет їх морфометричних характеристик та технологічних властивостей. Це повною мірою стосується і новостворених абразивних порошків НТМ, з модифікованою поверхнею зерен. Наявність подібної інформації дозволяє провести порівняльний аналіз початкового і модифікованих порошків, виявити відмінності між ними за морфометричними характеристиками та технологічними властивостями, оцінити ступінь таких відмінностей, а відтак – і відмінності в якості досліджуваних порошків. Зауважимо, що інформативною ознакою якості здатні слугувати показники однорідності абразивного порошку за його морфометричними характеристиками [18] та за формоподібністю проекції зерен [16].

Проведення такого порівняльного аналізу матиме одну методичну особливість. Діагностування морфометричних характеристик та технологічних властивостей досліджуваних порошків на приладі DiaInspect.OSM виконуватиметься в звичайному режимі, тобто без обмежень на розмір зерен (в термінології інструкції з експлуатації приладу DiaInspect.OSM – без застосування фільтрів). Отримані дані дозволять визначити всі морфометричні характеристики порошків, їх однорідність за цими характеристиками та технологічні властивості всього порошку, тобто із врахуванням всіх його фракцій. Проте

нанесення покриття рідинно-фазовим методом має свої специфічні особливості [9]. Зважаючи на наведені там аргументи, поступатимемо наступним чином. Із всього порошку виділятимемо основну його фракцію. Це можна було б провести шляхом прямого ситового розділення із використанням стандартних сит. Зауважимо, що для технології виготовлення розглядуваних тут модифікованих шліфпорошків така процедура передбачається і є обов'язковою. Однак практична її реалізація потребує додаткових матеріальних і енергетичних витрат, є тривалою у часовому вимірі, призводить до зношування сит. Тому, зважаючи на дослідницьку мету нашої роботи, пряме ситове розділення замінювалось віртуальним із використанням методики комп'ютерного діагностичного сита [19]. В подальшому саме на виділений в такий спосіб основній фракції і проводитимуться зазначені дослідження та порівняльний аналіз.

Результати обчислення зазначених вище морфометричних характеристик і технологічних властивостей досліджуваних шліфпорошків подаються в табл. 2.

Таблиця 2. Середні значення (С. з) морфометричних характеристик (ММХ) і однорідність (u_g) за ними шліфпорошку та технологічні властивості досліджуваних шліфпорошків

Назва ММХ та ТВ	АС6 125/100		B ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃		CaCl ₂		NaCl	
	С. з.	Одн.	С. з.	Одн.	С. з.	Одн.	С. з.	Одн.
F_{max} , МКМ	185,00	0,8040	192,39	0,7686	190,76	0,7435	193,77	0,7816
F_{min} , МКМ	138,08	0,9468	147,73	0,9765	141,65	0,9685	143,93	0,9682
H , МКМ	115,88	0,9468	123,98	0,8392	124,71	0,9685	120,79	0,9682
f_r	1,4013	0,6698	1,3629	0,6459	1,3871	0,6252	1,4778	0,6101
F_e	1,3414	0,6061	1,3022	0,6309	1,3462	0,5590	1,3463	0,6045
$F_{спл}$	0,4691	0,7776	0,4529	0,7665	0,4145	0,6697	0,4782	0,7793
R_g	1,0748	0,6636	1,0719	0,7348	1,0749	0,6131	1,0916	0,6409
A_t , МКМ ²	17523	0,7850	19518	0,8533	18635	0,7454	18551	0,8093
ρ , МКМ	553,9	0,8637	576,8	0,8596	568,1	0,8055	585,2	0,8691
$\rho_{пт}$, 1/М	0,0319	0,7720	0,0297	0,8861	0,0308	0,8333	0,0318	0,7891
u_g	–	0,7136	–	0,7396	–	0,7345	–	0,7202
F_{oss} , м ² /кг	16,67	–	15,31	–	15,74	–	16,64	–
n_z , ШТ.	42103	–	35443	–	36839	–	38215	–
$n_{рк}$, ШТ.	9,54	–	9,9	–	9,50	–	9,00	–
φ , град.	98,21	–	101,29	–	99,08	–	92,73	–
μ , %	–	–	17,42	–	11,73	–	8,77	–
h , МКМ	–	–	4,68	–	4,554	–	4,539	–

Закінчення таблиці 2

Назва ММХ та ТВ	AC6 125/100		B ₂ O ₃		B ₂ O ₃ +CaCl ₂		B ₂ O ₃ +NaCl	
	С. з.	Одн.	С. з.	Одн.	С. з.	Одн.	С. з.	Одн.
F_{max} , МКМ	185,00	0,8040	194,12	0,7846	190,74	0,7818	189,70	0,8733
F_{min} , МКМ	138,08	0,9468	147,85	0,9765	144,16	0,9687	149,14	0,9837
H , МКМ	115,88	0,9468	125,32	0,9765	121,50	0,9687	132,33	0,9837
f_r	1,4013	0,6698	1,4160	0,7226	1,4134	0,6405	1,4532	0,6928
F_e	1,3414	0,6061	1,3132	0,6244	1,3238	0,6072	1,2724	0,7314
$F_{спл}$	0,4691	0,7776	0,4472	0,7694	0,4566	0,7553	0,3779	0,8236
R_g	1,0748	0,6636	1,0854	0,6635	1,0783	0,6523	1,0906	0,6608
A_t , МКМ ²	17523	0,7850	19553	0,8338	18586	0,7901	18816	0,8749
p , МКМ	553,9	0,8637	588,3	0,8756	572,9	0,8688	584,5	0,9123
$p_{пт}$, 1/М	0,0319	0,7720	0,0303	0,8633	0,0311	0,8142	0,0313	0,8343
u_g	–	0,7136	–	0,7599	–	0,7345	–	0,8187
$F_{осс}$, М ² /КГ	16,67	–	15,59		16,10	–	15,50	–
n_z , ШТ.	42103	–	35012		37966	–	34474	–
$n_{рк}$, ШТ.	9,54	–	9,88		9,18	–	9,46	–
φ , град.	98,21	–	97,82		96,85	–	94,91	–
μ , %	–	–	14,6		10,06	–	14,79	–
h , МКМ	–	–	5,051		3,659	–	5,118	–

DiaInspect-фотографії базового шліфпорошку та модифікованого його зразка, отриманого шляхом нанесення на зерна покриву із суміші оксидів B₂O₃+Al₂O₃, із суміші оксиду і хлориду B₂O₃+NaCl, і тільки хлориду NaCl показано на рис. 2.

Аналіз поданих у табл. 2 даних показує, що показники однорідності за окремими морфометричними характеристиками лежать в інтервалі 0,6045–0,9765. Найбільш однорідними досліджувани порошки є за такими морфометричними характеристиками, як мінімальний діаметр Фере, площа і периметр проекції зерен, максимальний діаметр Фере. Як правило, показники однорідності за зазначеними характеристиками у випадку базового шліфпорошку є меншими в порівнянні із модифікованими його зразками. Це дає підстави зробити висновок про те, що нанесення покриву сприяє покращенню якості абразивних порошоків. Даний висновок підтверджується і тенденцією зміни узагальненого показника

однорідності. Для всіх модифікованих шліфпорошків цей показник змінюється в інтервалі 0,7202–0,8187 і вищий у порівнянні із базовим шліфпорошком, для якого він рівний 0,7136. Тобто, збільшення складає 0,7136–0,7136 %.

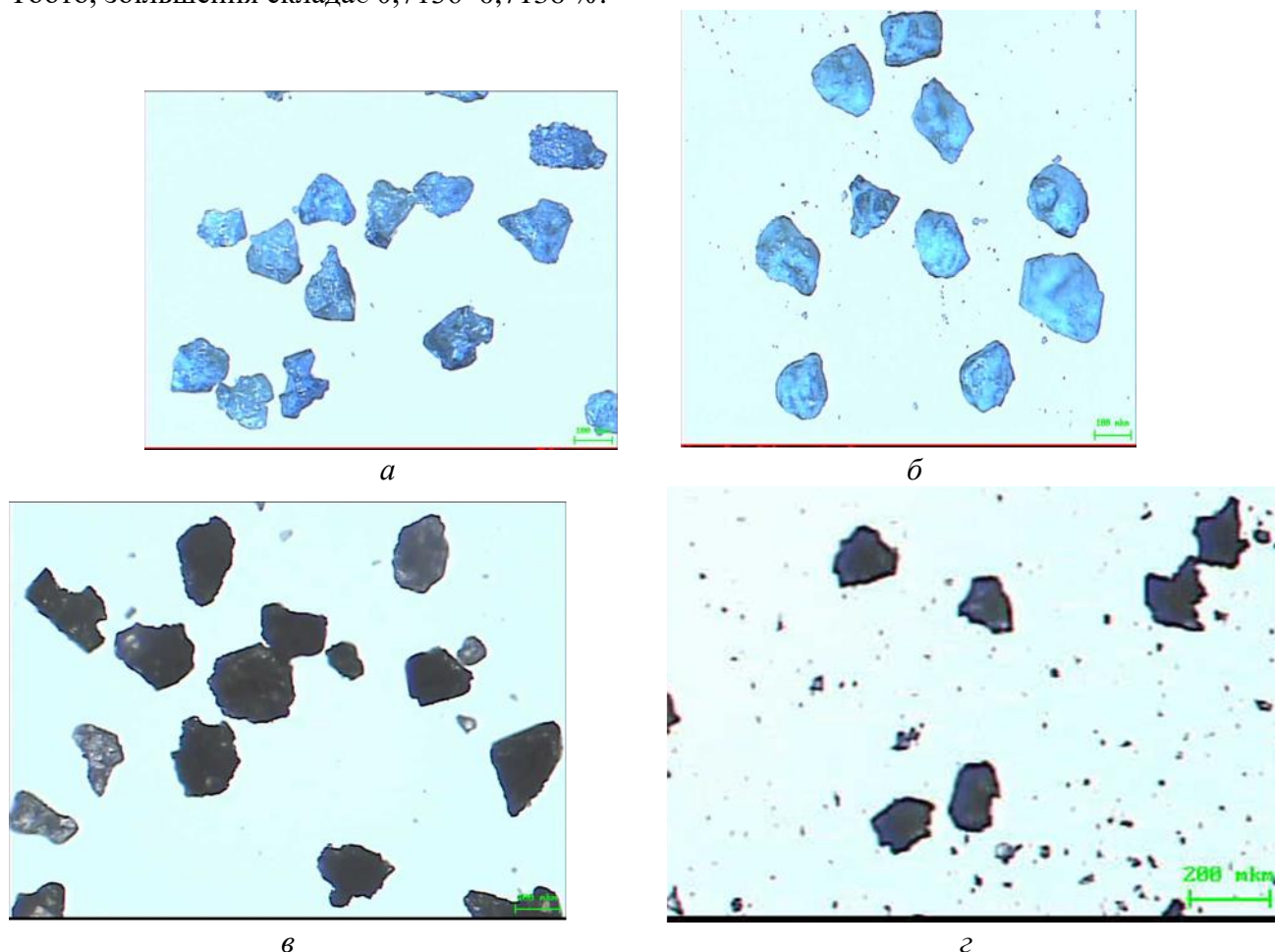


Рис. 2. DiaInspect-фотографії базового шліфпорошку (а) та модифікованих сумішшю оксидів B_2O_3 і Al_2O_3 (б), сумішшю оксиду B_2O_3 і хлориду $NaCl$ (в) та тільки хлоридом $NaCl$ (г) його зразків

Значення зовнішньої питомої поверхні знаходиться на рівні 15,31–16,67 м²/кг, кількість зерен в одному караті становить від 34474 до 42103 шт. Середнє значення кількості різальних кромок на одне зерно – від 9 до 10 шт., а середнє значення кутів їх загострення – від 92,73° до 101,29°.

Автоматизована ідентифікація форми проекції зерен порошків, призначених для виготовлення модифікованих шліфпорошків, та кількісного її оцінювання за диференціальною формоподібністю здійснювалася пошуково-аналоговим методом [15]. На підставі отриманих показників диференціальної формоподібності ($f_k^{(п)}$, %) визначалась однорідність досліджуваних порошків за формоподібністю проекції зерен [16]. Отримані результати подаються у табл. 3.

Порівняльний аналіз даних табл. 3 показує, що для базового шліфпорошку домінантними є проекції у формі прямокутника та трикутника з показником диференціальної формоподібності 67,55 % та 13,42 % відповідно. Такі ж форми проекції зерен домінують і у випадку модифікованих шліфпорошків. Виняток складає лише порошок, модифікований сумішшю B_2O_3+NaCl , для якого другою домінуючою формою проекції виявилась рівнобедрена трапеція з показником формоподібності 7,89. Щодо показника формоподібності

до базового аналога у формі прямокутника, то він для цього модифікованого шліфпорошку виявився рівним 78,95, і це є максимальне його значення серед всіх досліджених порошків.

Таблиця 3. Показники диференціальної ($f_k^{(n)}$, %) формоподібності проекції зерен досліджуваних порошків та однорідність (u_{jpg} , %) порошку за формоподібністю проекції зерен

Базові фігури-аналоги	Матеріал покритву						
	АС6 125/100	B ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	CaCl ₂	NaCl	B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ +CaCl ₂	B ₂ O ₃ +NaCl
1	2,15	5,58	8,27	0,00	2,19	3,38	0,00
2	67,55	74,50	64,53	66,38	69,83	69,56	78,95
3	1,05	0,40	1,60	2,59	0,97	1,69	2,63
4	4,76	2,39	2,13	3,88	3,41	2,54	7,89
5	9,31	5,18	6,93	8,19	6,57	7,40	5,26
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,65	1,99	3,47	6,03	1,46	2,11	0,00
8	0,10	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
Трикутник	13,42	9,96	13,07	12,50	15,57	13,32	5,26
Паралелограм	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Однорідність	61,91	69,50	57,71	59,82	63,56	64,25	73,91

Коефіцієнт однорідності, визначений розробленим методом, змінюється в інтервалі 59,82–73,91 % і не є низьким. Найбільш однорідним з показником 73,91 % за формоподібністю проекції зерен виявився базовий шліфпорошок, модифікований сумішшю B₂O₃+NaCl. Такий збільшений в порівнянні із іншими шліфпорошками цієї сукупності показник однорідності можна пояснити досить високим показником диференціальної формоподібності до базового аналога у формі чотирикутника і порівняно невисокими показниками формоподібності для інших базових аналогів.

Результати випробування експериментальних шліфувальних кругів

Для обробки був вибраний важкооброблюваний вольфрамо-титано-кобальтовий твердий сплав марки Т15К6 з розмірами зразка 63×15×7 мм. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,57 м/хв. (для продуктивності обробки 200 мм³/хв.) та 1,14 м/хв. (для продуктивності обробки 400 мм³/хв.). Шліфування проводилося без охолодження, щоб не вносити додаткових збурень в процес обробки, оскільки невідомою на даний момент є можливість ймовірної взаємодії

хлоридів із складниками технологічної рідини, що може бути предметом подальших досліджень. Оцінювалася зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат алмазного порошку (q) та шорсткості обробленої поверхні за показником (Ra). Результати випробувань наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні зерен алмазного шліфпорошку АС6 125/100

Модифікування поверхні зерен алмазного порошку у робочому шарі шліфувальних кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Продуктивність обробки			
	200 мм ³ /хв.		400 мм ³ /хв.	
	q , мг/г	Ra , мкм	q , мг/г	Ra , мкм
$B_2O_3 + Al_2O_3$	7	0,37	17	0,43
$CaCl_2$ (100 %)	9	0,37	20	0,41
без модифікування (базовий зразок)	17	0,31	37	0,52
$NaCl$ (100 %)	17	0,33	46	0,44
B_2O_3 (100 %)	25	0,45	32	0,49
$B_2O_3 + CaCl_2$	22	0,45	43	0,40
$B_2O_3 + NaCl$	343	0,36	–	–

Проаналізуємо результати табл. 4 спочатку з точки зору зносостійкості алмазного інструменту. Відразу звернемо увагу на те, що стовідсоткове модифікування поверхні алмазних зерен чистим оксидом B_2O_3 та його сумішшю із хлоридами $CaCl_2$ або $NaCl$ при продуктивності обробки 200 мм³/хв. тільки збільшує знос круга. Звернемо увагу і на те, що модифікування поверхні зерен тільки хлоридом $NaCl$ фактично не впливає на знос круга. Але таке модифікування у суміші із B_2O_3 є неприпустимим, оскільки відразу ж переводить знос круга у область катастрофічного зносу. Ця обставина не дозволяє використати такий круг для дослідження, що тут проводиться, при продуктивності 400 мм³/хв. (див. табл. 4). Тепер звернемо увагу на варіанти модифікування, які дозволяють підвищити зносостійкість алмазного круга. Перший із них – модифікування чистим хлоридом $CaCl_2$. Другий – комбіноване модифікування, коли зерна модифікуються сумішшю оксидів B_2O_3 та Al_2O_3 .

Зазначені вище варіанти відповідають продуктивності обробки 200 мм³/хв., а що буде при збільшенні продуктивності в 2 рази? Для більш високої продуктивності обробки, зокрема 400 мм³/хв., ситуація з модифікуванням фактично зберігається і найкращим залишається модифікування сумішшю оксидів B_2O_3 та Al_2O_3 .

Таким чином, модифікування поверхні алмазних зерен комбінацією $B_2O_3+Al_2O_3$ гарантовано вдвічі збільшує зносостійкість алмазних кругів, як за невеликої, так і за підвищеної продуктивності обробки.

Тепер розглянемо вплив модифікації поверхні зерен на шорсткість оброблюваної поверхні. Звернемо увагу, що тут вже значний вплив має продуктивність шліфування. Якщо при невеликій продуктивності, рівній 200 мм³/хв., шліфувальний круг із алмазними зернами без модифікування поверхні дає найменше значення шорсткості обробленої поверхні

за параметром Ra (табл. 4), то при значно вищій продуктивності ($400 \text{ мм}^3/\text{хв.}$) цей же круг дає вже найбільші значення шорсткості за параметром Ra (табл. 4). Таким чином, модифікування поверхні алмазних зерен сумішшю оксидів V_2O_5 та Al_2O_3 при підвищеній продуктивності шліфування не тільки гарантовано підвищує зносостійкість алмазного круга, а і дозволяє зменшити шорсткість обробленої поверхні. Тобто, таке модифікування дає бажаний подвійний позитивний ефект.

Узагальнюючий аналіз взаємозв'язку експлуатаційних характеристик експериментальних шліфувальних кругів з морфометричними характеристиками і технологічними властивостями використаних у їх різальному шарі абразивних порошоків

Узагальнюючий аналіз взаємозв'язку експлуатаційних характеристик експериментальних шліфувальних кругів з морфометричними характеристиками і технологічними властивостями використаних у їх різальному шарі абразивних порошоків передбачав об'єднане математичне опрацювання отриманих аналітичних та експериментальних даних. Мета такого математичного опрацювання полягала, по-перше, в кількісній оцінці взаємозв'язку між показниками обробленої поверхні, параметрами процесу обробки, морфометричними характеристиками, технологічними властивостями та однорідністю модифікованих шліфпорошків, використаних у різальному шарі інструменту. По-друге, в аналітичному поданні цього взаємозв'язку у вигляді емпіричних математичних залежностей. Методична схема математичного опрацювання полягала у наступному. На першому етапі проводився кореляційний аналіз сукупності досліджуваних факторів, який передбачав знаходження коефіцієнтів парної та множинної кореляції. Потім із врахуванням цього на другому етапі виконувалось аналітичне подання взаємозв'язку між найбільш значимими факторами за результатами встановлених коефіцієнтів парної кореляції.

Результати випробувань експериментальних шліфувальних кругів подаються у табл. 4. Наведена в ній інформація стосується характеристик різального шару круга, параметрів процесу обробки, зокрема продуктивності обробки (Q , $\text{мм}^3/\text{хв.}$), а також зносостійкості за відносною витратою алмазного порошку (q , мг/г) і шорсткості обробленої поверхні (Ra , мкм) як показників процесу обробки.

Перед виготовленням кругів проводилося діагностування морфометричних характеристик шліфпорошків з нанесеним на них покриттям, призначених для використання в різальному шарі інструменту. Отримані результати (табл. 2) були проаналізовані разом із даними табл. 4. На підставі такого об'єданого попереднього аналізу із сукупності морфометричних характеристик для подальших досліджень їх взаємозв'язку з експлуатаційними характеристиками експериментальних шліфувальних кругів були відібрані наступні: шорсткість проекції зерна (R_g), питомий периметр проекції зерен (p_s), число зерен (n_z) в одному караті, зовнішня питома поверхня (F_{oss} , $\text{м}^2/\text{кг}$), кількість (n_{ce}) і середнє значення кутів загострення різальних кромки (ϕ) та однорідність шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен (u_{pg}). Саме від цих характеристик слід очікувати найбільшого впливу на показники процесу обробки виготовленими експериментальними кругами. Їхні значення виділено в окрему таблицю (табл. 5). Там же подаються і розрахункові значення ступеню покриття (μ) та його товщини (h).

Зауважимо, що табл. 5 є свосереднім продовженням табл. 4. Вона доповнює характеристику різального шару експериментальних кругів. Тому для проведення кореляційного аналізу доцільно об'єднати в одну сукупність параметри (фактори) процесу і відібрані морфометричні характеристики абразиву, наведені у цих двох таблицях. При цьому залежними факторами слугуватимуть q та Ra , а всі інші параметри – як незалежні фактори. Із таблиць 4 та 5 було сформовано дві матриці значень цих факторів – окремо для кожного із двох залежних факторів.

Таблиця 5. Значення відібраних для подальшого дослідження морфометричних характеристик шліфпорошків з нанесеним на їх зерна покривом на основі термостійких оксидів і хлоридів та розрахованими значеннями ступеню і товщини покриву

Матеріал та ступінь покриву (μ , %)	Морфометричні характеристики та технологічні властивості основної фракції шліфпорошку								
	Rg	p_s , мкм ⁻¹	F_{oss} , м ² /кг	u_{fpg}	h , мкм	n_z , шт.	n_{ce} , шт.	$n_z \times n_{ce}$, шт.	ϕ , град.
$B_2O_3+Al_2O_3$, ($\mu=17,42$)	1,0719	0,0297	15,31	35,93	4,68	35443	9,90	350886	101,29
$CaCl_2$, ($\mu=11,73$)	1,0749	0,0908	15,74	21,30	4,55	36839	9,50	349970	99,08
$NaCl$, ($\mu=8,77$)	1,0916	0,0318	16,64	20,07	4,54	38215	9,00	343935	92,73
B_2O_3 , ($\mu=14,6$)	1,0854	0,0303	15,59	25,86	5,05	35012	9,88	345919	97,82
$B_2O_3+CaCl_2$, ($\mu=10,60$)	1,0783	0,0311	16,10	29,02	3,66	37966	9,18	348528	96,85
B_2O_3+NaCl , ($\mu=14,79$)	1,0906	0,0313	15,50	23,26	5,118	34474	9,46	326124	94,91

З використанням оригінальних програмних засобів та числової інформації, поданої в цих матрицях як початкових даних, був проведений кореляційний аналіз взаємозв'язку факторів кожної із виділених їх груп з кожним із залежних факторів. Вирахувані коефіцієнти кореляції подаються у табл. 6.

Таблиця 6. Коефіцієнти кореляції незалежних факторів із зносостійкістю інструменту за питомою витратою алмазу (q , мг/г) та шорсткістю обробленої поверхні (Ra , мкм) як залежними факторами

Залежний фактор	Незалежні фактори								R_{mk}
	Q , мм ³ /хв.	Rg	p_s , мкм ⁻¹	F_{oss} , м ² /кг	u_{fpg}	$n_z \times n_{ce}$, шт.	ϕ , град.	h , мкм	
q , мг/г	-0,2093	0,4543	-0,1864	-0,1748	0,6107	-0,9490	-0,3389	0,3473	0,95083
Ra , мкм new	0,4963	-0,0356	-0,2052	-0,1345	-0,0759	0,2676	0,1740	0,0119	0,7061

Порівняльний аналіз наведених у табл. 6 парних коефіцієнтів кореляції показує, що найбільший вплив на відносні витрати алмазного порошку виявляють добуток числа зерен в одному караті на кількість кутів загострення різальних кромки (своєрідний потенціал абразивності різального шару інструменту), показник однорідності шліфпорошку за формоподібністю проекції зерен, шорсткість проекції зерна, товщина покриву, середнє значення кутів загострення різальних кромки та продуктивність обробки. У випадку шорсткості обробленої поверхні за параметром Ra найбільший вплив на неї виявляють продуктивність обробки, добуток числа зерен в одному караті на кількість кутів загострення різальних кромки, питомий периметр проекції зерен, середнє значення кутів загострення різальних кромки та зовнішня питома поверхня порошку. Коефіцієнти множинної кореляції виявились такими: $R_{mk} = 0,95083$ у випадку питомої витрати абразиву та $R_{mk} = 0,7061$ у випадку шорсткості обробленої поверхні.

Такі значення цих коефіцієнтів свідчать про наявність взаємозв'язку між відібраною для аналізу сукупністю незалежних факторів з кожним із залежних факторів. Для подання цього взаємозв'язку в аналітичному вигляді була виконана апроксимація відповідних експериментальних даних, відібраних із врахуванням виконаного вище аналізу коефіцієнтів кореляції, із використанням програмного комплексу LgAproх [21]. В автоматизованому режимі було проаналізовано по 368640 варіантів апроксимівних залежностей для кожного із двох залежних факторів. Для відносної витрати абразивного шліфпорошку в автоматизованому режимі було проаналізовано 8388608 варіантів апроксимівних залежностей. Найбільш оптимальною за середнім значенням відносної похибки із них виявилася така:

$$q = a_0 + 1,5a_1 \lg(Q) + a_2 Rg + a_3 \lg(n^*) + a_4 \varphi + \frac{a_5}{\lg(u_{fpg})} + a_6 h \sqrt{h} \quad (10)$$

де $a_0 = 41371.76$ мг/Г; $a_1 = 34.7932$ (мг×хв)/(Г×мм³); $a_2 = -5552.083$ мг/Г; $a_3 = -13925.21$ мг/Г; $a_4 = -0.6739$ мг/(Г×град.); $a_5 = 232.0395$ мг/Г; $a_6 = -2.7432$ мг/(Г×мм^{1.5}); $n^* = (n_z \times n_{ce})/1000$.

У випадку шорсткості обробленої поверхні в автоматизованому режимі було проаналізовано 2985984 варіантів апроксимівних залежностей. Найбільш оптимальною за середнім значенням відносної похибки із них виявилася така:

$$Ra = a_0 + a_1 \tilde{Q}^2 \sqrt{\tilde{Q}} + a_2 p_s^2 \sqrt{p_s} + a_3 F_{oss}^2 \sqrt{F_{oss}} + a_4 \sqrt{n^*} + a_5 \tilde{\varphi}^3 \quad (11)$$

$a_0 = -5.7035$ мкм; $a_1 = 0.0015$ (мкм×хв^{2.5}/мм^{5.5}); $a_2 = -6.5423$ мкм^{3.5}; $a_3 = -0.1988E-02$ (мкм×кг^{2.5}/мг^{2.5}); $a_4 = 0.5392$ мкм; $a_5 = -0.0021$ мг/град.³; $\tilde{Q} = Q/100$; $\tilde{\varphi} = \varphi/10$.

Результати відтворення відповідних експериментальних даних за залежностями (10) та (11) подаються у табл. 7 та 8 відповідно. Середні значення відносної похибки склали 16,24 % у першому випадку та 4,23 % – у другому.

Таблиця 7. Результати відтворення експериментальних даних за залежністю (14) для відносної витрати алмазного порошку (q , мг/Г)

№ з/п	Q, мм ³ /хв	Rg	n*, шт.	φ, град	u _{fpg}	h, мкм	Значення відносної витрати алмазного порошку		
							точне	прогноз	відносна похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	200	1,0719	350,89	101,29	69,50	4,68	7	5,92	15,54
2	200	1,0749	349,97	99,08	57,71	4,55	9	8,38	6,86
3	200	10,0916	343,93	92,73	59,82	4,54	17	25,09	47,57
4	200	1,0854	345,92	97,82	63,56	5,05	25	16,47	34,12
5	200	1,0783	348,53	96,85	64,25	3,66	22	22,98	4,47
6	200	1,0906	326,12	94,91	73,91	5,12	343	344,79	0,52
7	400	1,0787	350,89	101,29	69,50	4,68	17	21,62	27,19

Закінчення таблиці 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	400	1,0719	349,97	99,08	57,71	4,55	20	24,09	20,47
9	400	1,0749	343,93	92,73	59,82	4,54	46	40,80	11,31
10	400	1,0854	345,92	97,82	63,56	5,05	32	32,18	0,56
11	400	1,0783	348,53	96,85	64,25	3,66	43	38,69	10,01

Таблиця 8. Результати відтворення експериментальних даних за залежністю (15) для шорсткості обробленої поверхні (R_a , мкм)

№ з/п	Q , мм ³ /хв	p_s	F_{oss}	n^* , шт	ϕ , град	R_a		
						точне	прогноз	відносна похибка, %
1	200	1,0719	15,31	350,89	101,29	0,37	0,389	5,158
2	200	1,0749	15,74	349,97	99,08	0,37	0,37	0,074
3	200	10,0916	16,64	343,93	92,73	0,33	0,376	14,028
4	200	1,0854	15,59	345,92	97,82	0,45	0,45	0,091
5	200	1,0783	16,10	348,53	96,85	0,45	0,386	14,137
6	200	1,0906	15,50	326,12	94,91	0,36	0,358	0,678
7	400	1,0787	15,31	350,89	101,29	0,43	0,429	0,327
8	400	1,0719	15,74	349,97	99,08	0,41	0,41	0,053
9	400	1,0749	16,64	343,93	92,73	0,44	0,419	5,499
10	400	1,0854	15,59	345,92	97,82	0,49	0,49	0,017
11	400	1,0783	16,10	348,53	96,85	0,40	0,426	6,474

Порівняльний аналіз показує, що залежність (11) дає кращі результати апроксимації, ніж залежність (14). Підвищення відтворювальної здатності залежності (10) можна досягти шляхом використання більшої кількості експериментальних даних, які використовуються для її побудови. Подібні дослідження нами проводяться.

Таким чином, наявність залежностей (10), (11) дозволяє виконувати прогнозування можливих значень показників відносної витрати алмазних порошків та шорсткості обробленої поверхні за параметрами процесу обробки та за показниками визначальних морфометричних характеристик модифікованих шліфпорошків, використаних у різальному шарі абразивного інструменту.

Підсумовуючи виконаний аналіз взаємозв'язку показників обробки виготовленим інструментом з морфометричними характеристиками і технологічними властивостями та з однорідністю модифікованих шліфпорошків, використаних у різальному шарі інструменту, варто відзначити, що заслуговує на увагу і ще один прикладний його аспект щодо шліфпорошків синтетичного алмазу. Він стосується вивчення можливості розширення кола інструментів і для інших видів абразивної обробки, в різальному шарі яких доцільно використовувати модифіковані порошки, зокрема шліфпорошки синтетичного алмазу інших, відмінних від використаних при виконанні цієї теми модифікованих шліфпорошків АС6 125/100. Проведений аналіз взаємозв'язку засвідчив значний вплив на показники процесу обробки одночасно з іншими факторами і однорідності за формою проекції та кількості різальних кромek зерен таких модифікованих шліфпорошків. Додаткові наші дослідження зазначених характеристик шліфпорошків синтетичного алмазу в широкому неперервному діапазоні їх марок і зернистостей показали, що ці характеристик мають тенденцію до зростання із збільшенням індексу марки (фактично статичної міцності) та зернистості [22]. Тому є підстави очікувати подальше покращення показників процесу обробки при використанні модифікованих шліфпорошків синтетичного алмазу більш міцних марок і більших зернистостей в інструменті для інших видів абразивної обробки.

Висновки

1. Розроблено оптимальні технологічні режими модифікування термостійкими оксидами і хлоридами шліфпорошків синтетичного алмазу. Модифікування здійснювалось методом рідинно-фазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів (B_2O_3 , Al_2O_3) та хлоридів ($CaCl_2$, $NaCl$), так і їх сумішей ($B_2O_3+Al_2O_3$, $B_2O_3+CaCl_2$, B_2O_3+NaCl).

2. Проведено дослідження для уточнення та оптимізації технологічних режимів модифікування термостійкими оксидами шліфпорошків синтетичного алмазу. Оптимальна схема модифікування передбачає наступні технологічні операції: змішування порошку з розчином модифікатора протягом меншого часу (5 хв замість 10 хв); фільтрування утвореної суміші; висушування осаду з одночасним його розмішуванням при температурі $120^\circ C$ до сухого однорідного стану. Так, після обробки порошку синтетичного алмазу АС6 125/100 за уточненим оптимізованим режимом з модифікатором B_2O_3 (6.3 %) втрата ваги зразка за результатами диференціального термічного аналізу стала менше в 3,51 рази в порівнянні з первинним немодифікованим зразком.

3. Встановлено, що для досягнення гарантованого збільшення зносостійкості алмазних кругів при продуктивному (продуктивність обробки $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$. і більше) шліфуванні твердих сплавів мінімум у 2 рази рекомендується проводити модифікування поверхні алмазних зерен сумішшю оксидів B_2O_3 та Al_2O_3 .

4. Виявлено, що для досягнення мінімальної шорсткості при доводочних операціях шліфування необхідно застосовувати алмазні зерна, модифіковані хлоридом натрію, або модифікування сумішшю B_2O_3 та $NaCl$. При збільшенні продуктивності шліфування такий зв'язок із морфометричними показниками зникає, і тут рекомендується застосовувати алмазні зерна, модифіковані хлоридом кальцію, або модифікування сумішшю B_2O_3 та $CaCl_2$.

5. Встановлені кореляційні зв'язки залежних і незалежних факторів можуть слугувати своєрідним орієнтиром напрямків подальшого розвитку прикладних і теоретичних досліджень за цією тематикою. Зокрема, це стосується вдосконалення технології виготовлення модифікованих абразивних шліфпорошків, спрямованого на підвищення тих їх морфометричних характеристик та технологічних властивостей, які найбільш корелюють із відносними витратами алмазного порошку та шорсткістю обробленої поверхні. Проведені дослідження показали, що до таких відносяться зовнішня питома поверхня алмазного порошку,

питомий периметр проекції зерен, товщина покриву, однорідність шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен, величина кутів загострення різальних кромки та добуток числа зерен в одному караті шліфпорошка на кількість кутів загострення різальних кромки його зерен.

V. Poltoratskiy, O. Bochechka, V. Lavrinenko, G. Petasyuk, O. Pasichnyi, V. Bilochenko

V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine

**SYNTHETIC DIAMOND POWDERS WITH GRAIN SURFACE
MODIFIED BY HEAT-RESISTANT OXIDES AND CHLORIDES:
PRODUCTION, PROPERTIES, APPLICATION**

A technologically advanced method of modifying synthetic diamond grinding powders is described. The method involves applying to the surface of the grains of powder liquid-phase coating of a saturated solution of heat-resistant compounds. An experimental batch of AC6 125/100 grinding powders modified in this way was made. Boron and aluminum oxides and sodium and calcium chlorides were used as the cover material. The study of morphometric characteristics, technological properties and uniformity of the obtained grinding powders is carried out. The test results of experimental grinding wheels in the cutting layer of which the experimental grinding powders modified according to the developed technological scheme were used are presented. The correlation analysis of interrelation of operational characteristics of experimental grinding wheels and morphometric characteristics, technological properties and uniformity in the shape of the projection of the grains of modified grinding powders is carried out. An analytical presentation of the results of the study of this relationship in the form of empirical mathematical dependences is performed. Recommendations on the areas and methods of the most effective application of the tested experimental grinding wheels and directions of possible continuation of the researches carried out in the work are given.

Key words: grinding powder, modification, coating, oxides, chlorides, thermal stability, characteristics, correlation, approximation.

Литература

1. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / під заг. ред. М.В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
2. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Введ. 01.01.96. – К. : Держстандарт України, 1995. – 72 с.
3. Никитин Ю.И., Уман С.Н., Коберниченко Л.В., Мартынова Л.М. Порошки и пасты из синтетических алмазов. Киев: Наук. думка, 1992. 284 с.
4. Полторацкий В.Г., Бочечка А.А., Лаврінченко В.И. Ткач В.Н., Петасюк Г.А., Білоченко В.А., Лещенко О.В., Грищенко Г.С. Модифицирование шлифпорошков синтетического алмаза и компактов на основе микропорошков cBN термостойкими оксидами и хлоридами методом жидкофазного нанесения. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 22. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2019. С. 317–327.
5. Полторацкий В.Г., Бочечка О.О., Лаврінченко В.И., Лещенко О.В., Пасічний О.О., Білоченко В.П., Білорусець В.В. Формування комбінованого багатокомпонентного термостабільного зносостійкого покриття на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. пр. Вип. 24. Київ: ІНМ ім. В.Н. Бакуля, НАН України, 2021. – С. 296–307.
6. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. URL: <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>.

7. Богатырева Г.П., Петасюк Г.А., Базалий Г.А., Шамраева В.С. К вопросу однородности алмазных микропорошков по морфологическим характеристикам. *Сверхтвердые материалы*. 2009. № 2. С. 71–81.
8. Полторацкий В.Г., Петасюк Г.А., Сафонова М.Н. Бочечка А.А., Ткач В.Н., Шамраева В.С. Новый композиционный абразивный материал из невостробованных порошков природного алмаза. *Сверхтвердые материалы*. 2014. № 2. С. 93–104.
9. Петасюк Г.А., Бочечка О.О., Лавріненко В.І., Полторацький В.Г., Білоченко В.П., Соколюк Д.В. Пікнометрично-адитивний метод визначення ступеня покриття шліфпорошків надтвердих матеріалів з використанням екстраполяційно-афінної 3D-моделі зерна. *Надтверді матеріали*. 2020. № 3. С. 94–99.
10. Спосіб визначення товщини рідинно-фазового покриття термостійкими сполуками зерен абразивних шліфпорошків надтвердих матеріалів: пат. 123373 Україна; заявл. 17.04.2019; опубл. 24.03.2021, Бюл. № 12.
11. Петасюк Г.А., Сирота Ю.В. Аналитическое определение количества зерен в одном карате алмазного порошка на основе экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна. *Сверхтвердые материалы*. 2012. № 3. С. 70–82.
12. Петасюк Г.А. Экстраполяционно-аффинная 3D модель зерна порошков сверхтвердых материалов и ее инженерия. *Современные проблемы естественных наук*. 2014. Т. 1, № 2. С. 57–62.
13. Петасюк Г.А., Богатырева Г.П. Экстраполяционно-аналитический метод определения внешней удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов. *Сверхтвердые материалы*. 2007. № 6. С. 65–76.
14. Петасюк Г.А. Інтерпретаційні і прикладні аспекти деяких морфологічних характеристик порошків надтвердих матеріалів. *Сверхтвердые материалы*. 2010. № 2. С. 79–94.
15. Petasyuk G.A. System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection. *Powder Technology*. 2014. Vol. 264. P. 78–85.
16. Petasyuk G.A., Vochechka O.O. Generalized index of the shape-similarity of the diamond powders grains projection. *Powder Technology*. 2019. Vol. 353. P. 125–131.
17. Лавриненко В.И., Полторацкий В.Г., Сафонова М.Н., Петасюк Г.А., Девицкий А.А. К вопросу об использовании в шлифовальных кругах разнодисперсных порошков из компактов на основе синтетического и природного алмаза с углеродной связкой. *Сверхтвердые материалы*. 2016. № 2. С. 88–94.
18. Петасюк Г.А. Системно-критеріальний метод кількісної оцінки однорідності надтвердих дисперсних матеріалів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2003. № 5. С. 101–105.
19. Новиков Н.В., Никитин Ю.И., Петасюк Г.А. Компьютерное диагностическое сито для идентификации зернистости и зернового состава микроскопических проб алмазных шлифпорошков. *Сверхтвердые материалы*. 2003. № 3. С. 71–83.
20. Петасюк Г.А. Сравнительные возможности программных средств аналитического описания экспериментальных данных в задачах диагностики свойств дисперсных материалов. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 11. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. С. 231–237.
21. Петасюк Г.А., Петасюк О.У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LrArrox для применения в научно-прикладных задачах материаловедения. *Порошковая металлургия*. Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 31. Минск, 2008. С. 58–63.

22. Petasyuk G.A., Lavrinenko V.I., Sirota Yu.V., Poltoratskiy V.G. Geometric Shape of the Projection and the Characteristics of the Cutting Edges of the Grains Synthetic Diamond Grinding Powders of Continuous Series their Grades and Granularities. *Advanced Manufacturing Processes II. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds. by Tonkonogyi V., Trojanowska J., Grabchenko A. et al. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. 879 p.

Надійшла 27.06.23

Reference

1. Lavrinenko, V.I., & Novikov, M.V. (2013). *Nadtverdi abrazivni materialy v mehanooobrobtsi [Superhard abrasive materials in machining]*. M.V. Novikov (Ed.). ISM of NAS of Ukraine [in Ukrainian].
2. Poroshky almazni syntetychni. Zagalni tehnicni umovy [Synthetic diamond powders. General technical conditions]. (DSTU 3292–95). (1995). Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
3. Nikitin Yu.I., Uman S.N., Kobernichenko L.V., Martynova L.M. (1992). *Poroshki i pasty iz sinteticheskikh almazov [Synthetic diamond powders and pastes]*. Naukova dumka [in Russian].
4. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2019). Modifitsirovanie shlifporoshkov sinteticheskogo almaza i kompaktoy na osnove mikroporoshkov cBN termostoikimi oksidami i hloridami metodom zhidkofaznogo naneseniia [Modification of synthetic diamond grinding powders and compacts based on cBN micropowders with heat-resistant oxides and chlorides by the method of liquid-phase deposition]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*. (22nd Issue, p. 317–327). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
5. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2021). Formuvannia kombinovanogo bagatokomponentnogo termostabilnogo pokryttia na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazivnogo pryznachennia [Formation of combined multicomponent thermostable wear-resistant coating on the surface of grains of abrasive grinding powders]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science*, (24nd Issue, p. 296–307). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
6. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. (b.d.). <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>.
7. Bogatyreva, G.P., Petasyuk, G.A., Bazaliy, G.A., & Shamraeva, V.S. (2009). K voprosu odnorodnosti almaznykh mikroporoshkov po morfolohicheskim kharakteristikam [On morphometric uniformity of diamond micron powders]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 2, 126–134 [in Russian].
8. Poltoratskiy, V.G., Petasyuk, G.A., Safonova, M.N., et al. (2014). Novyi kompozitsionnyi abrazivnyi material iz nevostrebovannykh poroshkov pryrodnoho almaza [A novel composite abrasive material of unmarketable natural diamond powder]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 36, 2, 136–144 [in Russian].
9. Petasyuk, G.A., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2020). Pikhometrychno-adytyvnyi metod vyznachennia stupenia pokryttia shlifporoshkiv nadtvrdykh materialiv z vykorystanniam ekstrapoliatsiino-afinnoi 3D-modeli zerna [The Additive Pycnometric Method for Assessment of the Degree of Coating of Grinding Powders Made of Superhard Materials Using the Extrapolation-Affine 3D-Model of the Grain]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 3, 199–202 [in Ukrainian].

10. Petasyuk, G.A., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2021). *Patent of Ukraine № 123373. Sposib vyznachennia tovshchyny ridynno-fazovogo pokryvu termostiikymy spolukamy zeren abrazyvnyh shlifporoshkiv nadtverdyh materialiv [The method of determining the thickness of the liquid-phase coating with heat-resistant compounds of grains of abrasive grinding powders of superhard materials].* (Patent Ukrainy № 123373) [in Ukrainian].
11. Petasyuk G.A., & Sirota Yu.V. (2012). Analiticheskoe opredelenie kolichestva zeren v odnom karate almaznoho poroshka na osnove ekstrapoliatsionno-affinnoi 3D modeli zerna [Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 3, 200–208 [in Russian].
12. Petasyuk G.A. (2014). Ekstrapoliatsionno-affinnaia 3D model zerna poroshkov sverhtverdyh materialov i eie inzheneriia [Extrapolation affine 3D model of powder grains of superhard materials and its engineering]. *Sovremennye problemy estestvennykh nauk – Contemporary problems of natural sciences*, 1(2), 57–62 [in Russian].
13. Petasyuk, G.A., & Bogatyreva, G.P. (2007). Ekstrapoliatsionno-analiticheskii metod opredeleniia vneshnei udelnoi poverkhnosti poroshkov sverkhtverdykh materialov [Extrapolation-analytical method for determination of outer specific surface of powders of superhard materials]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 6, 375–383 [in Russian].
14. Petasyuk, G.A. (2019). Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *Journal of Superhard Materials*, 32(2), 128–139.
15. Petasyuk, G.A. (2014). System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection. *Powder Technology*, 264, 78–85.
16. Petasyuk G.A., Bochechka O.O. (2019). Generalized index of the shape-similarity of the diamond powders grains projection. *Powder Technology*, 353, 125–131.
17. Lavrinenko, V.I., Poltoratskiy, V.G., Safonova, M.N., et al. (2016). On grinding applications of variously dispersed powders of compacts based on synthetic and natural diamond with carbon binder. *Journal of Superhard Materials*, 38(2), 140–144.
18. Petasyuk, G.A. (2003). System-criterional method for quantitative estimation of the homogeneity of superhard dispersed materials. *Materials Science*, 39(5), 727–732.
19. Novikov, N.V., Nikitin, Yu.I., & Petasyuk, G.A. (2003). Computer-based diagnostic sieve for identification of grit size and grit size distribution in microscopic samples of diamond grits. *Journal of Superhard Materials*, 25(3), 68–78.
20. Petasyuk G.A. (2008). Sravnitelnye vozmozhnosti programmnyh sredstv analiticheskogo opisaniia eksperimentalnyh dannyh v zadachah diagnostiki svoistv dipersnyh marerialov [Comparative capabilities of software tools for analytical description of experimental data in problems of diagnostics of the properties of disperse materials]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobratyvaiushchii instrument – tehnika i tehnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock-destroying and metal-working tools – engineering and technology of its production and application*. (11nd Issue, p. 231–237). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
21. Petasyuk G.A., & Petasyuk O.U. (2008). Kompiuterno-programmnaia sistema mnogovariantnogo postroeniia i analiza empiricheskikh matematicheskikh modelei LrAprox dlia primeneniia v nauchno-prikladnyh zadachah materialovedeniia [LrAprox computer software system for multivariant construction and analysis of empirical mathematical models for the use in theoretical and applied problems of materials science]. *Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Book of Collected Research Papers*, (issue 31, pp. 58–63). Minsk: [in Russian].

22. Petasyuk G.A., Lavrinenko V.I., Sirota Yu.V., Poltoratskiy V.G. (2021) Geometric Shape of the Projection and the Characteristics of the Cutting Edges of the Grains Synthetic Diamond Grinding Powders of Continuous Series their Grades and Granularities. Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., et al. (Eds.). *Advanced Manufacturing Processes II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (p. 422–432). Springer Nature Switzerland AG.

УДК 536.421.1:620.187:661.057.5

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-225-235

P. Klimczyk, Dr. Sci.(Engr.)¹; **I. A. Petrusha**, Dr. Sci.(Engr.)²; **Yu. Yu. Rumiantseva**, PhD (Engr.)¹; **K. Momot**, Ph.D Student¹; **B. S. Sadovyi**, PhD (Engr.)^{3,4}; **P. S. Sadovyi**, Engr.³; **S. Gierlotka**, PhD (Engr.)³

¹*Lukasiewicz Research Network, Krakow Institute of Technology, Zakopiańska 73 str., 30-418 Krakow, Poland, e-mail: piotr.klimczyk@kit.lukasiewicz.gov.pl*

²*V.M. Bakul Institute for superhard materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Avtozavodska str., 04074 Kyiv, Ukraine, e-mail: dialab@ism.kiev.ua*

³*Institute of High Pressure Physics Polish Academy of Sciences, Sokołowska st. 29/37, 01-142 Warsaw, Poland, e-mail: bsad@unipress.waw.pl; xray@unipress.waw.pl*

⁴*Department of Physics, Ivan Franko National University of Lviv, Universytetska st. 1, Lviv, 79000, Ukraine, e-mail: bsad@unipress.waw.pl*

CONSECUTIVE SOLID-PHASE hBN(1)→cBN→hBN(2) TRANSFORMATIONS AT 7 GPa UNDER EXTREMELY HIGH TEMPERATURE GRADIENTS

A new technical solution for the high-pressure cell (HPC) design has been developed applying to toroidal type apparatus (HPA-T30). The assembly of the cells enables to create a significant radially directed temperature gradient (∇T) of around 250 °C/mm within the reaction volume of the apparatus. The proposed procedure makes it possible to record temperature dependent structural changes and solid-state transformations of compounds within a single sample volume. The capabilities of the method was demonstrated by the example of the thermobaric behavior of graphite-like boron nitride (hBN) at a pressure of 7 GPa in a wide temperature range up to ~3000 °C. The evolution of the solid-phase transformations of primary hBN(1) followed the hBN(1)→cBN→hBN(2) sequence, i.e. included the reconversion stage of cubic cBN into secondary hBN(2) at temperatures above 2680 °C. The structural features of the final phase indicate the formation of a polycrystalline structure of hBN(2) at the stages of recrystallisation annealing (grain growth process) under high temperature thermobaric treatment.

Key words: boron nitride, high pressure, temperature gradient, solid-phase transformations, reconversion, crystal structure

Introduction

Temperature homogeneity within the reaction volumes of a high pressure cell (HPC) is usually a desirable factor in thermobaric experiments because the knowledge of thermodynamic conditions is critical to understanding the physic-chemical nature of the processes occurring under HPHT treatments. The optimized design of the HPC important both for performing fundamental physical research and for technological development [1–3]. A certain disadvantage of gradientless HPC is their restricted practical application in thermobaric experiments at extremely high temperatures above the level of 2200–2300 °C. High temperature exposure is particularly critical for the sealing gasket area as it can significantly increase the risk of depressurisation of the HPC volume [2].