

УДК 004.942:621.921.34-492.2

**В. М. Колодніцький**, канд. фіз.-мат. наук

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

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СОРТУВАННЯ ПОРОШКІВ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Theoretical bases of a universal method and practical ways of its application for an estimation of characteristics of quality of powders of superhard materials are stated. The computer program of an estimation strength characteristic of powders of superhard materials is created on the basis of the produced principles. Skilled check of the developed program of calculation of characteristics of strength of powders of diamond of mark AC125 by granularity 400/315.*

Ефективність роботи абразивного інструменту, що містить порошки надтвердих матеріалів (НТМ), істотно зростає при використанні порошків НТМ високої однорідності [1]. Залежно від способів виготовлення абразивного інструменту й умов його експлуатації порошок повинен мати різні характеристики якості. Необхідні нормативи якості порошків викладені в ряді нормативних документів [2, 3]. Як правило, характеристика якості порошку оцінюється величиною, розрахованою як середньозважене значення виконаних вимірів показників певної характеристики якості. Відповідно до діючих нормативних документів [2, 3], незалежно від того, чи вимірюють обрану характеристику якості за окремими кристалами, за групами або за єдиною пробою, завжди за її величину приймають середньозважене значення або отриманий єдиний показник якості. Але будь-який порошок складається з безлічі кристалів, зерен, що різняться між собою. Середнє значення величини характеристики якості є малоінформативною й не показує розходжень окремих зерен у порошок, тому що не відбиває складу порошку за цією характеристикою. Виміри величини характеристики якості окремих зерен або фракцій зазвичай представляють широкий діапазон значень, відповідно оцінка якості порошку тільки однією середньозваженою величиною буде слабко інформативною і, як правило, такою, що призводить до неточних або помилкових висновків.

Метою даної роботи є розробка математичного алгоритму та його комп'ютерна реалізація універсального методу оцінки характеристик якості порошку, що дає розгорнуту інформацію про його якість, можливості подальшого сортування й підвищення однорідності за обраним параметром якості [4]. Даний метод ґрунтується на знанні про фракційний склад порошку, одержаний різними методами, наприклад, з використанням мінералогічного аналізу, який дозволяє одержати інформацію про масову частку  $C_i$ , фізичні властивості  $\xi_i$  та хімічний склад кожного мінерального компонента, і тому може бути застосованим для опису фракційного складу матеріалу або продуктів його розподілу [5].

Сутність методу полягає в наступному. Проводять виміри показників характеристик якості за окремими властивостями порошків. Отримані дані являють собою масив зерен з характеристиками якості  $\xi_i$ , які змінюються від  $\xi_{\min}$  до  $\xi_{\max}$ . Увесь масив отриманих показників характеристик якості розбивають на ряд інтервалів  $(\xi_i - \xi_{i+1})$ , відповідних до марки порошку (1, 2, ..., n), і математично обробляють. Дискретні дані про якість порошку, отримані за вимірами окремих характеристик якості одиничних його зерен, груп або фракцій, які входять до складу проби порошку, що досліджується, а також результати виконаних розрахунків вносять у таблицю (табл. 1).

Табл. 1 для оцінки якості порошків містить інформацію про склад порошку за окремою характеристикою якості, що досліджується. Вона складається із семи стовпців. Стовпець 1 містить інформацію про групи або фракції порошку, що різняться між собою за рівнем якості відповідно до наведених інтервалів характеристики якості в стовпці 2 ( $\xi_i - \xi_{i+1}$ ).

Таблиця 1. Фракційний склад порошку НТМ з різними характеристиками якості

| Найменування фракцій в порошок | Інтервал значень характеристики якості $\xi_i - \xi_{i+1}$ | Вміст зерен порошку в інтервалі значень характеристики якості $\gamma_i, \%$ | Кумулятивний вміст зерен в порошок $\Sigma\gamma_i \downarrow, \%$ | Кумулятивна характеристика якості порошку $\bar{\xi}_i \downarrow$ | Кумулятивний вміст зерен в порошок $\Sigma\gamma_i \uparrow, \%$ | Кумулятивна характеристика якості порошку $\bar{\xi}_i \uparrow$ |
|--------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 1                              | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
| 1                              | $\xi_0 - \xi_1$  | $\gamma_1$   | $\gamma_1$   | $\bar{\xi}_1$  | $\Sigma\gamma_i = 100$   | $\bar{\xi}_{\text{пор}}$   |
| 2                              | $\xi_1 - \xi_2$  | $\gamma_2$   | $\gamma_1 + \gamma_2$  | $\bar{\xi}_2$  | ...  | ...  |
| 3                              | $\xi_2 - \xi_3$  | $\gamma_3$   | $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$                                   | $\bar{\xi}_3$  | ...  | ...  |
| ...                            | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  |
| ...                            | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  |
| ...                            | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  |
| $n - 2$                        | $\xi_{n-2} - \xi_{n-1}$                                    | $\gamma_{n-2}$   | ...  | ...  | $\gamma_n + \gamma_{n-1} + \gamma_{n-2}$                         | $\bar{\xi}_{n-2}$  |
| $n - 1$                        | $\xi_{n-1} - \xi_n$  | $\gamma_{n-1}$   | ...  | ...  | $\gamma_n + \gamma_{n-1}$  | $\bar{\xi}_{n-1}$  |
| $n$                            | $\xi_n - \xi_{n+1}$  | $\gamma_n$   | $\Sigma\gamma_i = 100$   | $\bar{\xi}_{\text{пор}}$   | $\gamma_n$   | $\bar{\xi}_n$  |
| Всього                         | $\xi_0 - \xi_{n+1}$  | $\Sigma\gamma_i = 100$   |  |  |  |  |

У стовпці 3 ( $\gamma_i, \%$ ) наводять відомості про диференціальний вміст зерен у порошок, що належить до обраного інтервалу характеристики якості. Вміст усіх зерен (фракцій) у порошок приймають за 100 %. За даними стовпців 2 і 3 визначають середньозважене значення характеристики якості порошку за формулою

$$\bar{\xi}_{\text{пор}} = \frac{\sum \xi_i \gamma_i}{100}. \quad (1)$$

У стовпцях 4 і 6 представлено кумулятивний вміст зерен (фракцій) у порошок. У стовпці 4 показано вміст зерен зверху донизу ( $\Sigma\gamma_i \downarrow$ ), а в стовпці 6 – знизу вгору ( $\Sigma\gamma_i \uparrow$ ). У стовпцях 5 і 7 наведено кумулятивне значення характеристики якості. У стовпці 5 показане кумулятивне значення характеристики якості за зростаючим значенням ( $\bar{\xi}_i \downarrow$ ), у стовпці 7 – за спадаючим ( $\bar{\xi}_i \uparrow$ ). При розрахунку кумулятивні значення характеристик якості груп або фракцій порошку за зростаючим або спадаючим значенням характеристики якості кожної групи або фракції в порошок визначають середнім значенням характеристики якості, розрахованим за формулою

$$\bar{\xi}_{i+1} = \frac{\xi_i + \xi_{i+1}}{2}. \quad (2)$$

Розрахунок характеристики якості порошку, утвореного з 1-ї та 2-ї фракцій, роблять відповідно для стовпців 5 і 7 за формулами

$$\bar{\xi}_2 = \frac{\xi_1 \gamma_1 + \xi_2 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad (3)$$

$$\bar{\xi}_{n-1} = \frac{\xi_n \gamma_n + \xi_{n-1} \gamma_{n-1}}{\gamma_n + \gamma_{n-1}}. \quad (4)$$

Наступні рядки в стовпцях 5 і 7 розраховують за формулами відповідно

$$\bar{\xi}_3 = \frac{\bar{\xi}_2(\gamma_1 + \gamma_2) + \xi_3\gamma_3}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3}; \quad (5)$$

$$\bar{\xi}_{n-2} = \frac{\bar{\xi}_{n-1}(\gamma_n + \gamma_{n-1}) + \xi_{n-2}\gamma_{n-2}}{\gamma_n + \gamma_{n-1} + \gamma_{n-2}}. \quad (6)$$

В останньому нижньому рядку стовпця 5 представлено значення характеристики якості всього порошку  $\xi_{\text{пор}}$ , розраховане за формулою

$$\xi_{\text{пор}} = \frac{\sum \gamma_i \xi_i}{\sum \gamma_i} = \frac{\sum \gamma_i \xi_i}{100\%}. \quad (7)$$

Дані табл. 1 дозволяють виконувати прогнозування розподілу порошку, що досліджується, на ряд порошоків. Так, розрахункові значення стовпців 4, 5, 6 і 7 дозволяють визначити передбачувані вмісти (вихід) порошоків із заданими характеристиками якості. З цією метою складається баланс виходу для порошку (вміст фракцій у порошку з певною характеристикою якості). Загальний вихід порошоків  $\gamma_{\text{заг}}$  за виключенням зі складу порошку низькоміцних фракцій  $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$  і високоміцних  $\gamma_n$  буде дорівнювати

$$\gamma_{\text{заг}} = 100 - (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_n). \quad (8)$$

Визначають характеристику якості цього порошку  $\xi_{\text{заг}}$  за формулою

$$\xi_{\text{заг}} = \frac{100\xi_{\text{пор}} - \xi_3(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) - \xi_n\gamma_n}{100 - (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_n)}. \quad (9)$$

Даними для розрахунку  $\xi_{\text{заг}}$  є значення  $\xi_3$  і  $\xi_n$  стовпців 5 і 7. Потім прогнозовані результати розподілу можна визначити в такий спосіб. Крім фракцій 1 + 2 + 3 і  $n$ , можна одержати вихід (вміст) і задані характеристики якості з такого балансу, складеного у вигляді виразу:

$$\gamma_{\text{заг}}\xi_{\text{заг}} = \xi_i x + (\gamma_{\text{заг}} - x)\xi_{i-1}. \quad (10)$$

Таким чином, вихідна характеристика якості порошку, що отримана експериментально на основі виміру показників характеристик якості кожного окремого зерна або групи зерен (фракцій), дозволяє шляхом аналітичних розрахунків розширити інформацію про якість порошку, що досліджується, й одержати інформацію про прогнозовані результати його розподілу.

Отримані розрахункові дані про характеристики якості порошку й вміст у ньому зерен або груп зерен (фракцій) з такими характеристиками можна представити графічно у вигляді трьох кривих  $\lambda$ ,  $\alpha$  і  $\nu$  (рис. 1). Побудова кривих характеристик якості порошоків виконується в такий спосіб. По горизонтальній осі відкладаються величини показників характеристики якості  $\xi_i$ , по вертикальних – вміст зерен або фракцій з певними значеннями характеристики якості. Праворуч по осі відкладають значення вмісту зерен фракцій знизу вверх від 0 до 100 %, ліворуч – зверху вниз від 0 до 100 %.

Крива  $\lambda$  на рис. 1 (1) – крива елементарних фракцій, які представляють увесь порошок, що досліджується. При максимальному наближенні  $\gamma_i$  до  $\gamma_{i+1}$  можна визначити якість порошку в точці. Графічно криву 1 (CC') будують від найвищого значення показника характеристики якості зерен порошоків до низького. Крива  $\nu$  на рис. 1 (3) – кумулятивна крива підвищення

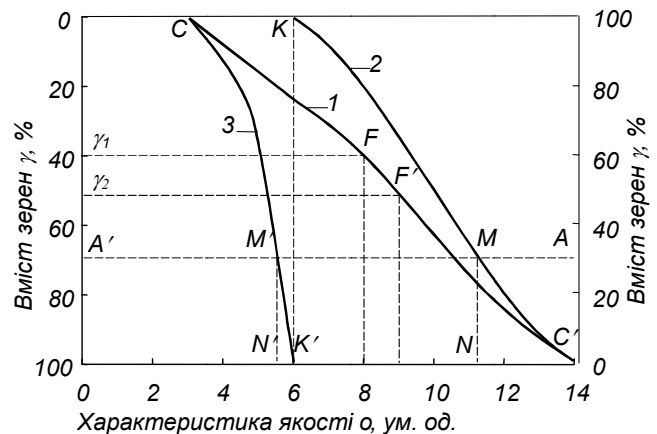


Рис. 1. Характеристики якості  $\lambda$  (1),  $\alpha$  (2) і  $\nu$  (3) порошку.

характеристики якості зерен порошку. Цю криву ( $СК'$ ) будують в осях: вміст зерен у порошок, розташований ліворуч на вертикальній осі, і показник характеристики якості порошку  $\xi$  на нижній горизонтальній осі.

Крива  $\lambda$  елементарних фракцій дозволяє оцінити однорідність порошку, що досліджується, за обраним показником характеристики якості. Однорідність оцінюють за вмістом зерен у порошок ( $\gamma_2 - \gamma_1$ ) номінальної фракції, що відповідає середній величині показника характеристики якості. Зокрема, на рис. 1 показано, що однорідність порошку оцінюється вмістом зерен в %. Величина однорідності порошку за обраним показником характеристики якості визначається проведенням двох перпендикулярів від границь інтервалу якості ( $\xi = 8$  і  $9$ ) до перетину з кривою  $\lambda$  в точках  $F$  і  $F'$  і проведенням із цих точок двох горизонтальних прямих до перетину з вертикальною віссю (ліворуч) вмісту зерен у точках  $\gamma_2$  і  $\gamma_1$ . Однорідність порошку за даною характеристикою якості дорівнює вмісту зерен зі значеннями  $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$  (в %), тобто  $50 - 40 = 10$  (див. рис. 1).

Криві  $\alpha$  і  $\nu$  на рис. 1 закінчуються в точках  $K$  і  $K'$ , показники характеристики якості яких дорівнюють середньозваженому значенню якості порошку, що досліджується. За допомогою кривих  $\alpha$  і  $\nu$  можна прогнозувати теоретичні показники розподілу вихідного порошку на два продукти (порошку). Наприклад, умовно задаючи вміст зерен у порошок рівним 30 % (точка  $A$ ), знаходимо вміст зерен у порошок іншого одержуваного порошку – 70 % (точка  $A'$ ). У точках  $M$  і  $M'$  знаходимо перетин горизонтальної прямої вмісту зерен алмазу із кривими  $\alpha$  і  $\nu$  та, опускаючи перпендикуляри на вісь характеристики якості в точках  $N$  і  $N'$ , визначаємо значення показника характеристики якості розділених порошоків. Одержувані значення операції розподілу перевіряють рівнянням балансу

$$100 \xi_n = 30 \xi(N') + 70 \xi(N). \quad (11)$$

На основі вироблених принципів складання аналітичних таблиць і побудови кривих оцінки якості порошоків  $\lambda$ ,  $\alpha$  і  $\nu$  було розроблено комп'ютерну програму розрахунку показників міцності порошоків. Дані, отримані за допомогою цієї програми, надають інформацію у вигляді аналітичних таблиць і графічного зображення – побудованих кривих якості  $\lambda$ ,  $\alpha$  і  $\nu$ . Програма дозволяє на основі даних показників міцності із протоколу випробувань одержати інформацію про середню міцність, однорідність порошку за міцністю, елементарний склад порошку за міцністю, а також дозволяє прогнозувати кількісні результати розподілу зерен порошоків. Алгоритми, що використовуються в програмі, забезпечують аналіз можливості розподілу порошку на фракції за міцністю. На прикладі аналізу міцності розглядають два основні завдання, а саме:

а) розподіл на фракції заданого обсягу (вмісту), коли задають послідовність значень процентного вмісту  $0 = C_0 < C_1 < \dots < C_N < 100\%$ ; у цьому разі міцність  $\Pi_i$  фракції  $[C_{i-1}, C_i]$  визначають за рівнянням

$$\Pi_i = \frac{C_i P_i - C_{i-1} P_{i-1}}{C_i - C_{i-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (12)$$

б) розподіл на фракції заданої міцності, коли задають послідовність значень міцності  $P_{\max} = P_0 > P_1 > \dots > P_N > 0$  й необхідно визначити  $C_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ . Для  $i > 1$   $C_i$  визначають із рівняння (12) і кумулятивних кривих методом послідовних наближень:  $\Pi_i = f(C_i) \rightarrow C_i$ .

Робота програми організована таким чином, що всі складові алгоритму можуть виконуватися в довільній послідовності. Виняток становить лише точка входу, коли слід завантажити вихідні дані. Це забезпечує оперативне й точне проведення дослідження й вибору оптимальних параметрів в ітераційно-діалоговому режимі. Для перевірки роботи комп'ютерної програми було обрано порошки алмазу з високою й низькою вихідною міцністю, проведено аналіз складу їх характеристик міцності, виконано комп'ютерне прогнозування розподілу поро-

шків алмазу на ряд продуктів, що різняться між собою міцністю. Аналітичні дані теоретичного розподілу порошків алмазу було порівняно із практичними результатами розподілу.

Для порошку алмазу марки АС125 зернистістю 400/315 із середньозваженою міцністю 210,5 Н був проведений аналіз складу порошку за міцністю й представлений у вигляді електронної таблиці [6]. У таблиці показано, що зерна алмазу вихідної марки АС125 розподіляються за міцністю й марками від АС32 до АС250, середньозважена міцність цього порошку становить 210,46 Н, однорідність за міцністю – 32 %.

Отримані дані показали, що теоретично можливо розділити вихідний порошок на п'ять продуктів, поставивши собі за мету розподіл на фракції заданого обсягу. Порошок алмазу марки АС125 зернистістю 400/315 дослідним шляхом за допомогою адгезійно-магнітного сортування<sup>1</sup> був розділений також на п'ять продуктів. В отриманих порошках виміряно середньозважену міцність і визначені їхні марки за [2]. Дані теоретичного комп'ютерного моделювання процесу розподілу й результати практичного розподілу представлено в табл. 4.

Як видно, результати, отримані дослідним шляхом, відповідають даним комп'ютерного моделювання. Безумовно, одержати високий вміст порошків алмазу, що відповідають марці АС200 (20 %) у першому продукті, практично неможливо. Перевірка показала, що адгезійно-магнітне сортування забезпечило вміст зерен у порошку алмазу марки АС200 рівний 10 %. При цьому, знаючи аналітичний склад порошку за міцністю, вдалося виділити в п'ятий продукт зерна алмазу, що відповідають за міцністю марці АС32.

Таким чином, виконані експерименти підтвердили можливість попереднього аналізу складу вихідного порошку надтвердих матеріалів за міцністю за допомогою розробленої програми, а також показали можливість моделювання процесу сортування порошку, що аналізується, на кілька продуктів.

Таблиця 4. Результати розподілу порошку алмазу марки АС125 зернистістю 400/315

| № продукту розподілу | Теоретичні результати |             |       | Практичні результати |             |       |
|----------------------|-----------------------|-------------|-------|----------------------|-------------|-------|
|                      | Вміст, %              | Міцність, Н | Марка | Вміст, %             | Міцність, Н | Марка |
| 1                    | 20,0                  | 341,69      | АС200 | 10,0                 | 386,12      | АС200 |
| 2                    | 17,0                  | 245,28      | АС160 | 22,0                 | 268,73      | АС160 |
| 3                    | 25,0                  | 202,03      | АС125 | 24,0                 | 215,58      | АС125 |
| 4                    | 24,0                  | 154,01      | АС80  | 40,7                 | 144,49      | АС80  |
| 5                    | 14,0                  | 92,54       | АС50  | 3,3                  | 66,48       | АС32  |
| Вихідний             | 100,0                 | 210,46      | АС125 | 100,0                | 210,46      | АС125 |

### Висновки

Розроблено математичний алгоритм графічного й аналітичного методу оцінки характеристики якості порошків НТМ, який дозволяє робити, крім розрахунку середньозваженої величини показника характеристики якості, аналіз складу порошку НТМ за показником, що досліджується, оцінювати однорідність порошку й прогнозувати можливий розподіл вихідного порошку на кілька порошків з різним рівнем показника характеристики якості. Здійснено комп'ютерну реалізацію даного алгоритму та проведено дослідну перевірку розробленої програми на прикладі розрахунку характеристик міцності порошків алмазу марки АС125 зернистістю 400/315.

Автор висловлює вдячність канд. техн. наук Г. Д. Ільницькій та докт. фіз.-мат. наук В. І. Куцу за участь в обговоренні матеріалів статті.

<sup>1</sup> Сортування здійснено канд. техн. наук Г. Д. Ільницькою.

### **Література**

1. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П. И. Ящерицын, М. Л. Хейфец, Б. П. Чемисов и др. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136 с.
2. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 71 с.
3. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Богданов Р. К. и др. Однородные термopочные алмазные шлифпорошки для бурового импрегнированного инструмента // Сверхтв. материалы. – 2003. – № 4. – С. 73–80.
4. Новиков Н. В., Невструев Г. Ф., Ильницкая Г. Д. и др. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. Ч. 1. Теоретические основы метода оценки характеристик качества // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 5. – С. 74–83.
5. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
6. Новиков Н. В., Невструев Г. Ф., Ильницкая Г. Д. и др. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. Ч. 2. Практическое применение нового метода оценки характеристик качества // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 6. – С. 58–67.

*Поступила 30.05.07.*