

УДК 621.921.34–492.544.023.5:539.215

ОПОСЕРЕДКОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИВУ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ НОВИХ 3D МОДЕЛЕЙ ЗЕРНА

Г. А. ПЕТАСЮК

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

Вперше аналітично опосередковано встановлено товщину покриття порошків синтетичного алмазу для нових 3D моделей їх зерна. Порівняльно вивчено похибку її визначення, яку вносять запропоновані нові і відомі 3D моделі та відповідні аналітичні залежності. Сформульовано напрямки подальшого розвитку таких досліджень.

Ключові слова: покриття, порошок, зерно, товщина, методи визначення, 3D модель.

For the first time, analytical dependences of indirect determination of the thickness of the coating of synthetic diamond powders for new 3D models of their grain are obtained. Comparative studies of the error in determining the thickness of the coating, which is brought by the proposed new and known 3D models of grain and the corresponding their analytical dependences are carried out. The directions of further development of researches on the subjects considered in the paper are formulated.

Keywords: cover, powder, grain, thickness, methods of determination, 3D model.

Вступ. Покриття – дієвий засіб впливу на експлуатаційні та технологічні властивості виробів, які використовують у машинобудуванні, хімічному та інших виробництвах. Серед головних його завдань – захист робочих поверхонь від впливу зовнішніх агресивних середовищ, головно від корозії [1], збільшення терміну служби деталей машин [2] та різального шару абразивних інструментів [3].

Важливою характеристикою покриття є його товщина, яка впливає на мікротвердість і тріщиностійкість отримуваних модифікованих поверхонь та їхню структуру [3]. При цьому найпозитивнішого ефекту часто досягають лише за оптимальної товщини [4–7]. Тому важливо володіти інформацією про цей параметр, а отже, і методами його визначення. Специфічною особливістю такої процедури для досліджуваних порошків синтетичного алмазу (СА) є мікронний діапазон розмірів їх зерен, на які наносять покриття. Тому відомі методи [8, 9] встановлення товщини покриття на макрооб'єктах для порошків СА безпосередньо не можна застосувати. Досить детально проаналізовано такі дослідження у праці [10] і вказано на неналежну увагу цьому питанню.

Методика досліджень. Опосередковано аналітично діагностували товщину покриття порошків СА, зокрема фактичну просторову форму зерен [10], яку найчастіше ідентифікують, порівнюючи з формою відомих класичних тіл. Проте форма переважної більшості зерен порошків СА інша. Тому її ототожнюють з класичними тілами правильної чи напівправильної форми, які після цього набувають статусу 3D моделі. Зауважимо, що тут термін “3D модель” вжито як просторовий аналог фактичної форми зерна порошку, який ніяк не пов'язаний із 3D моделюванням. Такий термін є усталеним і загальноприйнятним для опосередковано-аналітичних методів діагностування технологічних властивостей алмазних порошків, а також порошків інших абразивних матеріалів. Під час обґрунтування

доцільності вибору тієї чи іншої 3D моделі зерна важливо аналітично подати її об'єм. Найчастіше звертаються до таких однопараметричних 3D тіл правильної форми, як куля [11, 12] або куб [13]. Пропонують [10] долучити ще й октаедр. Визначальними геометричними параметрами цих тіл є діаметр кулі D , ребро куба d_1 чи октаедра d_2 .

Для діагностування товщини покриття порошків СА необхідні також розрахункові залежності. Саме отримати їх для нових 3D моделей зерна – мета цього дослідження. Для її досягнення аналітично подамо взаємозв'язок товщини покриття із його ступенем, густиною матеріалів абразиву і покриття та визначальними геометричними параметрами прийнятої 3D моделі.

Чи не вперше опосередковано аналітично визначили товщину покриття порошків СА в праці [10], де узагальнили відомі розрахункові залежності, по-новому прокласифікували відповідні методи, окреслили напрямки їх подальшого розвитку. Зокрема, звернули увагу на доцільність розширити існуючу базу 3D моделей фактичної форми зерен.

Результати та їх обговорення. Пропонуємо долучити до наведеного вище переліку відомих 3D моделей зерна порошків СА ще й такі тіла, як кубооктаедр (довжина ребра d_3), усічений октаедр (довжина ребра d_4) та еліпсоїд з осями A, B, C ($A \geq B \geq C$). 3D форму перших двох тіл (або близьку до них) мають високоміцні крупнозернисті шліфовані порошки СА. Саме на них найчастіше наносять металевий покриття. Еліпсоїд є найближчим аналогом фактичної 3D форми зерен решти марок порошків СА та інших абразивних порошків. Тому важливо залучити ці нові 3D моделі і отримати з їх допомогою аналітичні залежності для практичних розрахунків товщини покриття таких порошків.

Для їх побудови використовуватимемо пікнометрично-адитивний підхід [10], за яким одержали розрахункові залежності для 3D моделей у формі кубооктаедра, усіченого октаедра та еліпсоїда:

$$h = \frac{d}{2} \left\{ \sqrt[3]{\frac{\mu \rho_1}{\rho_2} + 1} - 1 \right\}. \quad (1)$$

$$h = A \frac{(\tilde{B} + \tilde{C} + \tilde{B}\tilde{C})}{4(1 + \tilde{B} + \tilde{C})} \left\{ \sqrt[3]{1 + \frac{4(1 + \tilde{B} + \tilde{C})}{(\tilde{B} + \tilde{C} + \tilde{B}\tilde{C})^2} \frac{\tilde{A}\tilde{B}\tilde{C}\mu\rho_1}{\rho_2}} - 1 \right\}. \quad (2)$$

Тут h – товщина покриття; d – характерний лінійний розмір (твірний параметр) прийнятої 3D моделі зерна ($d = d_3$ – для 3D моделі у формі кубооктаедра та $d = d_4$ – у формі усіченого октаедра); $\mu = m_1/m_2$ – ступінь покриття, який є технологічним параметром його нанесення (m_1 – маса абразиву, m_2 – маса нанесеного на нього покриття); ρ_1 та ρ_2 – густина матеріалу абразиву та покриття; $\tilde{B} = B/A$, $\tilde{C} = C/A$. Зазначимо, що формула (1) справедлива і для відомих 3D моделей зерна у вигляді куба, кулі та октаедра. В цьому випадку слід покласти $d = d_1$, $d = D$ та $d = d_2$, відповідно.

Дослідження відносної похибки запропонованих залежностей. Для цього використовували тестування, щоб з'ясувати ступінь впливу прийнятої 3D моделі зерна із переліку згадуваних вище на відносну похибку δ визначення товщини покриття. Як тестові форми зерна вживали октаедр, кулю та еліпсоїд. Вважали, що тестові – це зерна шліфованого порошку СА ($\rho_1 = 3,5 \text{ g/cm}^3$) з нанесеним на їх поверхню нікелевим ($\rho_2 = 8,9 \text{ g/cm}^3$) покритвом товщиною $5 \text{ }\mu\text{m}$. Числові значення їх визначальних геометричних параметрів такі: $d_2 = 200 \text{ }\mu\text{m}$ – для октаедра, $D = 200 \text{ }\mu\text{m}$ – для кулі та $A = 300 \text{ }\mu\text{m}$, $B = 250 \text{ }\mu\text{m}$, $C = 200 \text{ }\mu\text{m}$ – для еліпсоїда. За критерій встановлення аналогічних параметрів для 3D моделей приймали рівність об'ємів тестових та модельних тіл. Наприклад, прирівнюючи об'єми кулі

(як тестової форми зерна) та октаедра (як 3D його моделі), матимемо $\pi D^3/6 = \sqrt{2} d_2^3/3$. Розв'язуючи це рівняння для d_2 , отримуємо $d_2 = D\sqrt{2\pi\sqrt{2}}/2$. Аналогічно чинимо для інших тестових зерен та їх 3D моделей. За встановленими так геометричними параметрами і прийнятою товщиною покриття (5 μm) розраховували об'єми тестових зерен та їх 3D моделей. Враховуючи ці об'єми, густину матеріалів абразиву та покриття, за відомою методикою [14] вираховували ступінь покриття μ , який фігурує у залежностях (1) і (2) (див. таблицю), а також за густиною та відповідними геометричними параметрами 3D моделей – товщину покриття.

Формули (1) і (2) містять три аргументи: геометричний параметр, ступінь покриття зерна та відношення густини матеріалів абразиву і покриття. Найбільше на точність опосередкованого визначення товщини покриття впливатиме перший із них, значення якого суттєво залежать від прийнятої 3D моделі фактичної форми зерна та критерію узгодження геометричних параметрів зерна та його 3D моделі. Другий і третій аргументи не залежать від 3D моделі зерна, тому їх можна кваліфікувати як технологічні параметри покриття, які абсолютно детерміновані.

Аналіз результатів таблиці повністю підтверджує припущення про характер взаємозв'язку 3D моделі зерна і похибки опосередкованого визначення товщини покриття. Наприклад, для тестового (тобто фактичного) зерна у формі еліпсоїда максимальною буде похибка за використання 3D моделі зерна у вигляді усіченого октаедра (63,4%). Проте 3D модель зерна у формі кулі може її мінімізувати до 1,36%, тобто зменшити в 46 разів. Подібна тенденція і для тестового зерна у формі октаедра та кулі. Співвідношення між максимальною (3D модель у формі усіченого октаедра) і мінімальною (у формі кулі) похибками в першому випадку становить 18,8 рази, в другому – 17,9 рази (3D моделі у формі усіченого октаедра та октаедра, відповідно). Але в обох випадках таке зменшення суттєве. Якщо 3D модель зерна збігається зі вказаними у таблиці тестовими тілами, то формули (1) і (2) дають точний результат. Отже, у всіх досліджених варіантах вибору 3D моделі зерна її геометричний параметр, який присутній у залежностях (1), (2), суттєво впливає на точність опосередковано аналітичного визначення товщини покриття.

ВИСНОВКИ

Формули (1) і (2), коли фактична 3D форма зерна є кубом, октаедром, кубооктаедром, усіченим октаедром, кулею чи еліпсоїдом, дають точний результат. Якщо ж фактична 3D форма зерна не збігається із зазначеними вище просторови-

Тестова форма зерен, прийняті їх 3D моделі, ступінь і товщина покриття та похибка її визначення

Зерно		μ , %	h , μm	δ , %
фактична форма	3D модель			
II	I	40,08	3,890	22,2
	II		5,000	0,00
	III		2,923	41,54
	IV		1,733	65,34
	V		4,826	3,48
	VI		4,317	13,66
V	I	40,08	4,030	19,4
	II		5,179	3,58
	III		3,903	59,44
	IV		1,795	64,10
	V		5,00	0,00
	VI		4,317	13,66
VI	I	32,65	4,085	18,30
	II		5,250	5,00
	III		3,069	38,62
	IV		1,830	63,40
	V		5,068	1,36
	VI		4,998	0,04

Примітка: I – куб; II – октаедр; III – кубооктаедр; IV – усічений октаедр; V – куля; VI – еліпсоїд.

ми тілами, то геометричні параметри прийнятої 3D моделі зерна з-поміж інших складових розрахункових залежностей найвідчутніше впливають на точність опосередковано аналітичного визначення товщини покриття. Надалі дослідження за вказаною тематикою доцільно виконувати у таких напрямках: аналітична побудова нових адекватніших та відмінних від просторових тіл правильної форми 3D моделей зерна абразивних порошків; отримання на базі таких 3D моделей нових залежностей опосередкованого визначення товщини покриття; розроблення і вивчення критеріїв узгодження геометричних параметрів фактичної форми зерна абразивних порошків з прийнятою його 3D моделлю, зокрема, використання площі поверхні, та створення критеріїв кількісного оцінювання адекватності прийнятих 3D моделей.

1. Широков В. В., Білюк А. І. Формування та вплив інтерметалідних і нікелевих дифузійних покриттів на механічні властивості хромонікелевих сталей і сплавів // Міжвуз. зб. "Наук. нотатки". – Луцьк, 2013. – Вип. 41, № 2. – С. 266–271.
2. *Electric-spark alloying of VT22 alloy by chromium and tungsten electrode materials* / O. V. Paustovs'kyi, V. I. Novikova, I. I. Tymofeeva, O. H. Molyar, Yu. V. Hubin, N. M. Mor-dovets', L. P. Isaeva, and A. D. Kostenko // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 1. – Article number: 120.
3. *Лавріненко В. І.* Надтверді матеріали. – К.: Академперіодика, 2018. – 336 с.
4. *Influence of methylsulfonate anions on the structure of electrolytic cobalt coatings* / Yu. E. Sknar, N. V. Amirulloeva, I. V. Sknar, and F. I. Danylov // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – P. 396–401.
5. *Вплив товщини плазмоелектролітного покриття на корозійну тривкість сплаву Д16Т* / В. Посувайло, І. Івасенко, Г. Веселівська, Я. Сірак та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2018. – Спец. вип. № 12. – С. 139–143.
6. *Батурин В. Е., Клебанов Ю. Д., Сумароков В. Н.* Измерение толщины металлических покрытий на зернах алмаза и кубического нитрида бора // *Синтетические алмазы*. – 1973. – Вып. 3. – С. 13–16.
7. *Mechnyk V. A.* Regularities of structure formation in diamond–Fe–Cu–Ni–Sn–CrB₂ systems // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 1. – С. 93–101.
8. *X-ray micro tomography and image analysis as complementary methods for morphological characterization and coating thickness measurement of coated particles* / Giacomo Perfetti, Elke Van de Casteele, Bernd Rieger, Willem J. Wildeboer, Gabrie M. H. Meesters // *Adv. Powder Techn.* – 2010. – № 21. – P. 663–675.
9. *Growth of Si-doped polycrystalline diamond films on AlN substrates by microwave plasma chemical vapor deposition* / V. S. Sedov, A. A. Khomich, V. G. Ralchenko, A. K. Martyanov, S. S. Savin, O. N. Poklonskaya and N. S. Trofimov // *J. of Coat. Sci. and Techn.* – 2015. – **2**, № 2. – P. 38–45.
10. *Petasyuk G. A.* Methodological and application aspects of indirect analytical determination of coating thickness on metal-coated superabrasive grits // *J. of Superhard Mat.* – 2019. – **41**, № 3. – P. 201–209.
11. *Agglomeration tendency during top-spray fluidized bed coating with gums* / K. Dewettinck, L. Deroo, W. Messens, and A. Huyghebaert // *Lebensm.-Wiss. u.-Techn.* – 1998. – **31**. – P. 576–584.
12. *Метод определения толщины слоя покрытия при получении гранулированных композиционных порошков* / М. В. Лучка, А. В. Деревянко, И. М. Забродский, И. М. Евдокимов, А. И. Райченко // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. – 2011. – № 713. – С. 19–22.
13. *Чистяков Е. М., Кухаренко С. А.* Определение толщины никелевого покрытия зерен алмаза // *Сверхтвердые материалы*. – 1983. – Вып. 3. – С. 48–50.
14. *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* / G. A. Petasyuk, O. O. Bochechka, V. I. Lavrinenko, V. G. Poltoratskyi, V. P. Bilochenko, and D. V. Sokolyuk // *J. of Superhard Mat.* – 2020. – **42**, № 3. – P. 94–99.

Одержано 16.11.2020