

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.921.34–492.544.023.5:539.215

Г. А. Петасюк

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

petasyuk@ukr.net

Дослідження впливу способу узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі на похибку визначення товщини покриття алмазних порошків

Проаналізовано методичні складові опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття алмазних порошків, яка є важливою їхньою характеристикою. Доведено важливість способу узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі як фактора впливу на похибку визначення товщини покриття. Представлено результати порівняльного дослідження впливу способу узгодження фактичних геометричних параметрів тестового зерна (кубооктаедра) та прийнятих його 3D моделей (кулі, куба, еліпсоїда) на товщину покриття та похибку її визначення.

Ключові слова: покриття, товщина, похибка, зерно, 3D модель, еліпсоїд, куля, куб, кубооктаедр.

ВСТУП

Покриття поверхні є дієвим засобом впливу на експлуатаційні, технологічні та споживчі властивості виробів, призначених для використання в машинобудуванні, в хімічному та в інших виробництвах. Головна мета такого впливу – захист робочих поверхонь від дії зовнішніх агресивних середовищ, головним чином від корозії [1, 2], збільшення терміну служби та підвищення надійності деталей машин [3, 4], подовження робочого ресурсу різального шару абразивних інструментів [5–10].

Покриття алмазних порошків має прикладне значення як спосіб покращення експлуатаційних властивостей абразивного інструменту.

Важливою характеристикою покриття є його товщина. Проведений огляд наявних публікацій за цим напрямком досліджень показав, що забезпечення оптимального значення цієї характеристики дозволяє досягти максимального

позитивного ефекту від застосування виробів з нанесеним на їхню поверхню покриттям.

У сфері алмазно-абразивної обробки товщина покриття зерен абразивних порошоків надтвердих матеріалів (НТМ) впливає на міцність їхнього утримання в різальному шарі абразивного інструменту, а водночас і на питому витрату самого абразивного порошку [7, 9]. В [10] показано, що такого позитивного ефекту можна досягти лише за оптимальної товщини покриття. Детальний аналіз стану справ у визначенні товщини покриття зерен абразивних порошоків НТМ було виконано в [11], де показано, що наявність високоточних методів визначення товщини покриття зерен є важливою методологічною передумовою ефективного застосування модифікованих таким чином абразивних порошоків. Але, як показав аналіз відомих публікацій, питанню визначення товщини покриття абразивних порошоків належної уваги не приділяли. Головну увагу зосереджували на технологічних аспектах нанесення покриття на зерна. Тому розробка методів визначення товщини покриття залишається актуальною та важливою матеріалознавчою задачею і дотепер.

Поряд зі способом узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі на товщину покриття зерен абразивних порошоків впливають і умови міжфазної взаємодії між зерном та покриттям, тобто адгезійна взаємодія або її відсутність.

Одним із способів підвищення достовірності визначення товщини покриття, як зазначено в [11], є залучення для цього нових 3D моделей зерна алмазних порошоків. Для успішної реалізації такого способу вкрай важливе значення має вибір найбільш оптимальної методичної схеми узгодження розмірних параметрів фактичної форми зерна та прийнятої його 3D моделі. На такий напрямок розвитку методів опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття абразивних порошоків вказано в [11, 12]. Подібних досліджень, як показав огляд відомих публікацій за цією тематикою, майже не проводили. Лише в [12] у разі опосередкованого визначення товщини покриття порошоків синтетичного алмазу із залученням нових 3D моделей зерна було використано схему узгодження за рівністю об'ємів зерна та його 3D моделі. Зазначимо, що такий варіант узгодження розмірних параметрів фактичного зерна з прийнятою його 3D моделлю не є єдиним. Може бути також використана і схема з прирівнюванням площі повних їхніх поверхонь чи відношення площі поверхні до об'єму [12]. Тому значний науково-прикладний інтерес має проведення дослідження впливу способу узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі на похибку визначення товщини покриття алмазних порошоків. Саме вирішення такої науково-прикладної задачі було метою роботи.

МЕТОДИЧНА СХЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ

Було розглянуто два варіанти дослідження способу узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі: тестовий та імітаційний. В тестовому варіанті обумовлено певну 3D форма зерна і прийнято відомими 3D моделі зерна. Такий варіант дозволив розрахувати точну товщину покриття 3D моделей зерна і адекватно оцінити відносну похибку опосередкованого її визначення. Другий варіант – наближений до реального діагностування морфометричних характеристик порошку на приладі DialInspect.OSM [13] – своєрідне імітування діагностування порошку з допомогою зазначеного приладу. Для цього варіанту складно оцінити реальну відносну похибку опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття. Це обумовлено тим, що фактична 3D форма зерна в такому випадку невідома, а узгодження відбувається

зазвичай за окремими морфометричними характеристиками порошку, які діагностують приладом DiaInspect.OSM чи іншим, подібним йому за призначенням. До таких належать максимальний (F_{\max}) і мінімальний (F_{\min}) діаметри Фере, площа і периметри проекції зерна, його висота H . Об'єм та площу поверхні зерна вираховували чисельним методом на підставі зазначених вище морфометричних характеристик за екстраполяційно-афінною [14] 3D моделлю зерна (відповідно V_{ea} та S_{ea}). Але, як відзначено вище, можливі і інші варіанти схем узгодження. І тому за результатами дослідження в тестовому варіанті можна буде запропонувати оптимальну щодо відносної похибки визначення товщини покриття схему узгодження для застосування її у випадку реальних порошків, коли фактична 3D форма зерна невідома.

Як тестову 3D форму зерна приймали кубооктаедр з довжиною ребра d . Об'єм $V_{кбо}$ та площа поверхні $S_{кбо}$ кубооктаедра, які в подальшому будуть необхідні для узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятих його 3D моделей, є такими:

$$V_{кбо} = \frac{5d^3 \sqrt{2}}{3}; \quad (1)$$

$$S_{кбо} = 2(3 + \sqrt{3})d^2. \quad (2)$$

Об'єми кулі та куба ($V_{кл}$ та $V_{кб}$ відповідно) та площі їх поверхні ($S_{клкбо}$ та $S_{кб}$), як 3D моделей зерна, можна визначити за відомими залежностями:

$$V_{кл} = \frac{\pi D^3}{6}; \quad (3)$$

$$S_{кл} = \pi D^2; \quad (4)$$

$$V_{кб} = a^3; \quad (5)$$

$$S_{кб} = a^2. \quad (6)$$

Об'єм $V_{ел}$ еліпсоїда з осями $A \geq B \geq C$ як третьої прийнятої 3D моделі зерна виражається відомою залежністю

$$V_{ел} = \frac{\pi ABC}{6}. \quad (7)$$

Щодо площі $S_{ел}$ поверхні еліпсоїда, то її визначають через еліптичні інтеграли. Тому для компактного її аналітичного представлення використовували наближену формулу, запропоновану данським математиком Кнудом Томсенном [15]:

$$S_{ел} \approx 4\pi \left[\frac{a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p}{3} \right]^{1/p}, \quad (8)$$

де a, b, c – півосі еліпсоїда; $p = 1,6075$. Якщо в цій формулі перейти від півосей еліпсоїда до його осей (A, B, C) і позначити $A = 2a, B = 2b, C = 2c$, то вона матиме такий вигляд:

$$S_{ел} \approx \pi \left[\frac{A^p B^p + A^p C^p + B^p C^p}{3} \right]^{1/p}, \quad (9)$$

Процедуру тестування виконували для ідеалізованого шліфпорошку, всі зерна якого мали 3D форму кубооктаедра (рис. 1), тобто були рівновеликими і за розміром і однорідними за 3D формою. Зауважимо, що 3D форму зерен у вигляді кубооктаедра або близьку до нього, мають, наприклад, високоміцні шліфпорошки синтетичного алмазу, що задовольняють вимогам нормативного документу [16]. Зазначений факт підтверджується як кількісним аналізом [17]

розподілу зерен за 3D формою, так і візуально електронними фотознімками зерен таких шліфпорошків [5–8]. Проекцією кубооктаедра на поверхню, паралельну його грані у формі квадрата, на якій він розташований на предметному столі мікроскопу і яка відповідає найбільш стійкому стану рівноваги, буде квадрат (рис. 2) з довжиною сторони $l = \sqrt{2}d$, де d – довжина ребра кубооктаедра. Взаємозв’язок між F_{\max} , F_{\min} , H та довжиною ребра кубооктаедра за такого його розташування, виходячи із понятійного сенсу морфометричних характеристик, які діагностують приладом DiaInspect.OSM, виражається залежностями: $F_{\max} = 2d$, $F_{\min} = H = \sqrt{2}d$. Ці залежності отримано на основі аналітичного аналізу рис. 1 і 2.

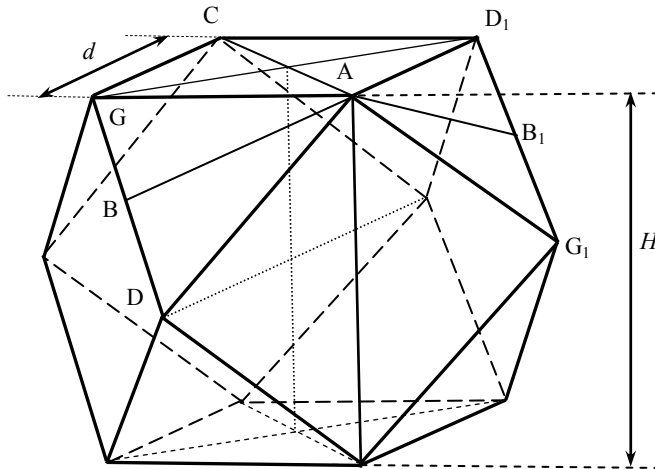


Рис. 1. Кубооктаедр, розташований на грані у формі квадрата, як 3D модель зерна алмазного шліфпорошку.

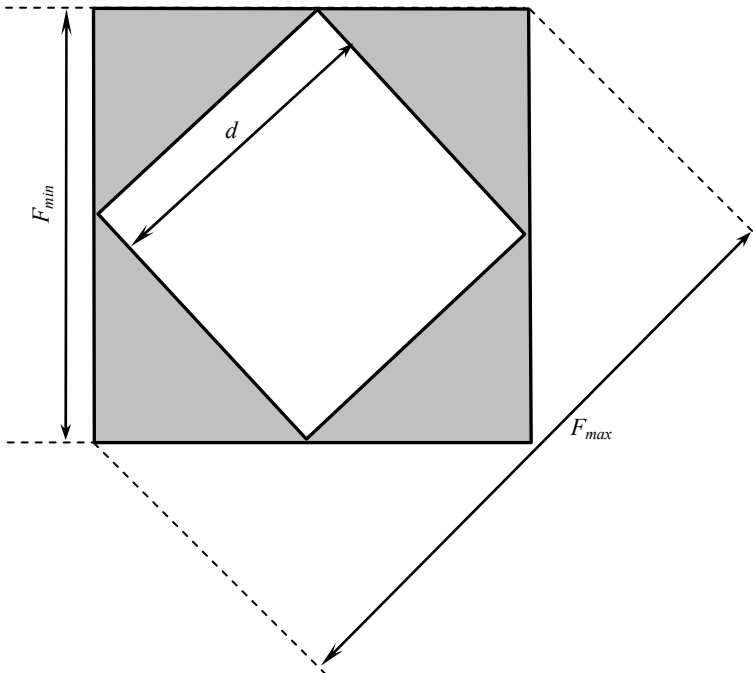


Рис. 2. Проекція кубооктаедра, що розташований на грані у формі квадрата, на площину, паралельну цій грані.

У процесі тестування передбачали, що на зерна такого алмазного шліфпо-рошка було нанесено титанове покриття товщиною $h = 5$ мкм. Щодо способу нанесення покриття, то його приймали таким, щоби не відбувалося взаємодії алмазу з матеріалом покриття, яка може викликати зміну показника його густини. Значенню h за густини алмазу $\rho_a = 3,51$ г/см³, густини матеріалу покриття (в даному разі титану) $\rho_m = 4,5$ г/см³ та $d = 100$ мкм відповідає ступінь покриття $\mu = 42,4$ %, який було вираховано із залежності для опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття у випадку кубооктаедра як 3D моделі зерна. Зазначена залежність отримана в [11] на основі пікнометрично-адитивного підходу і має такий вигляд:

$$h = \frac{d}{2} \left\{ \sqrt[3]{\frac{\mu \rho_a}{\rho_m} + 1} - 1 \right\}. \quad (10)$$

Аналогічний вигляд мають і залежності для визначення товщини покриття за 3D моделями зерна у формі кулі та куба. Проте геометричний параметр d у цьому випадку має дещо інший сенс, а саме: діаметр D кулі у першому випадку і ребро a куба – у другому випадку. Для еліпсоїда, як 3D моделі зерна, залежність для опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття на основі пікнометрично-адитивного підходу є наступною [12]:

$$h = A \frac{S_1}{4S_2} \left\{ \sqrt{1 + \frac{4S_2 \tilde{B} \tilde{C} \mu \rho_a}{S_1^2 \rho_m}} - 1 \right\}, \quad (11)$$

де $S_1 = \tilde{B} + \tilde{C} + \tilde{B}\tilde{C}$; $S_2 = 1 + \tilde{B} + \tilde{C}$; $\tilde{B} = B/A$; $\tilde{C} = C/A$.

Зауважимо, що саме еліпсоїд до появи екстраполяційно-афінної 3D моделі зерна вважали найбільш адекватним аналогом зерна шліфпорошків синтетичного алмазу за опосередкованого визначення певних їхніх технологічних властивостей, наприклад числа зерен в одному караті [18]. Такі позитивні переваги цієї 3D моделі зерна обумовлені тим, що вона успадковує від реального зерна відразу три його розмірні параметри – дожину і ширину (в сучасній інтерпретації максимальний і мінімальний діаметри) його проекції та висоту H зерна.

У разі мікроскопування порошку, фактична 3D форма якого є еліпсоїдом з осями $A \geq B \geq C$, проекцією зерна буде еліпс з осями A і B . Якщо ж 3D форма реальних зерен не є такою, а морфометричні характеристики діагностуються приладом DiaInspect.OSM, як це було у даному випадку, то узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі у формі еліпсоїда здійснюється шляхом ототожнення A з максимальним діаметром Фере (F_{\max} , точний аналог дожини проекції за стандартом [19]), B – з мінімальним діаметром Фере (F_{\min} , дуже близький аналог ширини проекції [19]), а C – з висотою H зерна.

МЕТОДИЧНА СХЕМА УЗГОДЖЕННЯ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕСТОВОЇ ФОРМИ ЗЕРНА ТА ПРИЙНЯТОЇ ЙОГО 3D МОДЕЛІ

Дослідження впливу способу узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі на похибку визначення товщини покриття алмазних порошків виконували за двома варіантами – тестовим та імітаційно-діагностувальним.

Тестовий варіант дослідження характеризується тим, що 3D форму зерна приймали відомою (в даному випадку це був кубооктаедр). Також приймали відомими і 3D моделі зерна – куля, куб та еліпсоїд. Досліджували наступні варіанти схем узгодження фактичних геометричних параметрів зерна та прийнятої його 3D моделі:

- за середнім розміром (діаметром) зерна;
- за об'ємом зерна;
- за площею поверхні зерна;
- за відношенням площі поверхні зерна до його об'єму.

Узгодження за середнім розміром (діаметром) зерна

Середній розмір D_c зерна визначали як середнє арифметичне довжини та ширини проєкції зерна чи їхніх аналогів – максимального і мінімального діаметрів Фере проєкції зерна [19]. Узгоджені за такою схемою параметри досліджуваних 3D моделей є такими: $D = D_c$, $a = D_c$, $A = F_{\max}$, $B = C = F_{\min}$. Числові їх значення представлені у табл. 1. Там же представлені значення товщини покриття, отримані за залежностями (10), (11) з використанням узгоджених параметрів досліджуваних 3D моделей зерна, та похибка визначення товщини покриття. Узгоджені параметри для еліпсоїда приймали такими: $A = F_{\max}$, $B = C = F_{\min}$.

Узгодження за об'ємом

Алгоритм узгодження проілюструємо на прикладі кожної з досліджуваних 3D моделей зерна. Він зводиться до наступного:

– прирівнювали об'єми кубооктаедра та кулі й після спрощення отримали рівняння

$$5d^3\sqrt{2} = \frac{\pi D^3}{2};$$

– після розв'язання цього рівняння відносно D , матимемо

$$D = d \sqrt[3]{10 \frac{\sqrt{2}}{\pi}};$$

– прирівнювання об'ємів кубооктаедра та куба приводить до рівняння

$$\frac{5d^3\sqrt{2}}{3} = a^3,$$

з якого отримуємо

$$a = d \sqrt[3]{\frac{5\sqrt{2}}{3}}.$$

У разі еліпсоїда поступали по іншому. Прирівняли об'єми кубооктаедра та еліпсоїда і після спрощення отримали рівняння

$$5\sqrt{2}d^3 = \frac{\pi ABC}{6}.$$

В цьому рівнянні є три невідомих – A , B і C , визначення яких за одним відомим параметром d неможливе. Тому, оскільки тестове зерно кубооктаедр, то на підставі аналізу рис. 1 і 2 можемо записати рівняння

$$B = C = d\sqrt{2},$$

що рівнозначно переходу від тривісного еліпсоїда до еліпсоїда обертання. Розв'язуючи із врахуванням цього попереднє рівняння відносно A матимемо

$$A = \frac{5d\sqrt{2}}{\pi}$$

Числові значення узгоджених таким чином параметрів та вирахованих на їхній основі площ поверхонь і об'ємів 3D моделей зерна, для яких прийнято узагальнені позначення S та V відповідно, представлено у табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунку товщина h покритву та похибка Δ її визначення у тестовому варіанті дослідження для прийнятих варіантів узгодження розмірних параметрів тестової форми зерна і прийнятих його 3D моделей та узгоджені значення визначальних геометричних параметрів 3D моделей зерна

Варіант узгодження	3D модель	Визначальні параметри, мкм	S , мкм ²	V , мкм ³	S/V	h , мкм	Δ , %
За середнім розміром (діаметром) зерна	Куля	$D = 170,71$	91553	2604800	0,035148	8,5355	70,71
	Куб	$a = 170,71$	174850	4974900	0,035146	8,5355	70,71
	Еліпсоїд	$F_{\max} = 200,$ $F_{\min} = 141,42,$ $H = F_{\min}$	80760	2094400	0,038560	3,5104	29,79
За рівністю об'ємів	Куля	$D = 165,12$	85650	2357000	0,036339	8,2558	65,12
	Куб	$a = 133,08$	106270	2357000	0,045087	6,6541	33,08
	Еліпсоїд	$A = 225,08,$ $B = 141,42,$ $C = 141,42$	88694	2357000	0,037630	3,6169	27,66
За рівністю площі поверхонь	Куля	$D = 173,57$	94641	2737700	0,034570	8,6783	73,57
	Куб	$a = 125,59$	94641	1981000	0,047774	6,2796	25,59
	Еліпсоїд	$A = 243,66,$ $B = 141,42,$ $C = 141,42$	94641	2551600	0,037091	3,6850	26,30
За рівністю відношення площі поверхні до об'єму	Куля	$D = 149,43$	70149	1747100	0,040153	7,4715	49,43
	Куб	$a = 149,43$	133970	3336600	0,040153	7,4715	49,43
	Еліпсоїд	$A = 169,73,$ $B = 141,42,$ $C = 141,42$	71367	1777400	0,040153	3,3530	32,94

Узгодження за площею поверхні та за відношенням площі поверхні до об'єму

Аналогічним чином реалізується алгоритм узгоджені параметрів за площею поверхні та за відношенням площі поверхні до об'єму. Однак в цих випадках дещо складнішим є алгоритм узгодження для еліпсоїда. Так, після прирівнювання площі поверхні кубооктаедра та еліпсоїда матимемо

$$2(3 + \sqrt{3})d^2 = \pi \left[\frac{A^p B^p + A^p C^p + B^p C^p}{3} \right]^{1/p}$$

Розв'язання цього рівняння відносно A з урахуванням прийнятого допущення щодо B та C ($B = C = \sqrt{2}d$) дає

$$A = \frac{d\sqrt{2}}{2^{1/p}} \left[\frac{3}{\pi^p} (3 + \sqrt{3})^p - 1 \right]^{1/p}.$$

У разі узгодження параметрів за відношенням площі поверхні до об'єму аналогічна залежність матиме вигляд

$$A = \frac{d\sqrt{2}}{\left[3 \left(\frac{3 + \sqrt{3}}{5} \right)^p - 2 \right]^{1/p}}.$$

Числові значення узгоджених за площею поверхні та за відношенням площі поверхні до об'єму визначальних параметрів представлено в табл. 1.

Імітаційно-діагностувальний варіант

Імітаційно-діагностувальний варіант зводиться до імітації реального діагностування морфометричних характеристик порошку на приладі DiaInspect.OSM. Він максимально наближений до реального діагностування товщини покриття абразивних порошоків із використанням, як початкових даних, морфометричних характеристик порошку, отриманих за допомогою приладу DiaInspect.OSM. Порівняння результатів цього варіанту досліджень із результатами тестового варіанту, який по суті є теоретичним дослідженням, дозволить виробити пропозиції щодо практичного діагностування товщини покриття порошоків синтетичного алмазу та порошоків інших НТМ. В імітаційно-діагностувальному варіанті досліджували наступні методичні схеми узгодження фактичних геометричних параметрів фактичного зерна та прийнятих його 3D моделей:

- за середнім розміром (діаметром) зерна;
- за об'ємом зерна;
- за площею поверхні зерна.

Алгоритм узгодження для кожної із зазначених трьох методичних схем такий же, як і у випадку тестового варіанту з тією різницею, що об'єм та площу поверхні кубооктаедра обчислювали за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна. Необхідні для побудови такої 3D моделі зерна геометричні параметри на підставі аналітичного аналізу рис. 1 і 2 були такими: $F_{\max} = 2d$, $F_{\min} = \sqrt{2}d$, $H = F_{\min}$, $A_t = F_{\min}^2 = 2d^2$, $L = 4F_{\min} = 4\sqrt{2}d$, де A_t і L – площа і периметр проєкції кубооктаедра (див. рис. 2). Числові значення об'єму та площі поверхні кубооктаедра, вираховані за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна за зазначеними вище початковими даними, дорівнюють $V_{\text{ea}} = 2585000 \text{ мкм}^3$ та $S_{\text{ea}} = 96987 \text{ мкм}^2$. Фактичні значення геометричних параметрів реального зерна (кубооктаедра з довжиною ребра $d = 100 \text{ мкм}$) дорівнюють $V_{\text{кбо}} = 2357000 \text{ мкм}^3$ та $S_{\text{кбо}} = 94641 \text{ мкм}^2$. Тобто, відносна похибка такої заміни складає 17,11 % у першому випадку та 3,41 % – у другому.

Виравані числові значення узгоджених таким чином параметрів представлено у табл. 2. Там же представлено значення товщини покриття, отримані за залежностями (10), (11) з використанням узгоджених параметрів досліджуваних 3D моделей зерна, та похибка визначення товщини покриття.

Також у табл. 2 представлено значення товщини покриття, отримані методом, викладеним в [20]. Згідно цього методу товщина покриття кожного ок-

ремого зерна вираховують за формулою $h = \frac{\mu \rho_a V}{\rho_m S}$, де ρ_a , ρ_m – густина матеріалів абразивного порошку та покриття відповідно; μ – ступінь покриття [11]; S і V – відповідно площа поверхні та об'єм зерна абразивного порошку, на яку наносять покриття. Далі знаходили середнє значення товщини покриття для кожного зерна. Площу поверхні і об'єм зерен порошку визначали за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна.

Таблиця 2. Результати розрахунку товщина h покриття та похибка Δ її визначення у імітаційно-діагностувальному варіанті дослідження для прийнятих варіантів узгодження розмірних параметрів фактичної форми зерна і прийнятих 3D його моделей та узгоджені значення визначальних геометричних параметрів 3D моделей зерна

Варіант узгодження	3D модель	Визначальні параметри, мкм	S , мкм ²	V , мкм ³	S/V	h , мкм	Δ , %
За середнім розміром (діаметром) зерна	Екстраполяційно-афінна	$F_{\max} = 200$, $F_{\min} = 141,42$, $H = F_{\min}$	96987	2585000		3,5104	29,79
	Куля	$D = 170,71$	91553	2604838		8,5355	70,71
	Куб	$a = 170,71$	174853	4974874		8,5355	70,71
	Еліпсоїд	$A = 216,25$, $B = 141,42$, $C = 141,42$	85887	2264543		3,5814	28,37
За рівністю об'ємів	Куля	$D = 170,28$	91087	2585000		8,5138	70,28
	Куб	$a = 137,24$	113012	2585000		6,8621	37,24
	Еліпсоїд	$A = 246,85$, $B = 141,42$, $C = 141,42$	95666	2585000		3,6959	26,08
За рівністю площі поверхонь	Куля	$D = 176,61$	97987	2884208		8,8304	76,61
	Куб	$A = 127,79$	97987	2087016		6,3897	27,79
	Еліпсоїд	$A = 254,05$, $B = 141,42$, $C = 141,42$	97987	2660411		3,7198	25,60

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняльний аналіз результатів, отриманих у тестовому варіанті досліджень, показав, що для всіх досліджених схем узгодження розмірних параметрів тестової форми зерна і прийнятих його 3D моделей найменшу (26,3 %, табл. 1) відносну похибку Δ визначення товщини покриття дає схема за рівністю площі поверхонь та з використанням 3D моделі зерна у формі еліпсоїда обертання. Вона не суттєво більша, ніж у випадку 3D моделі зерна у формі куба (25,59 %), проте є стабільно мінімальною для всіх інших схем узгодження. Якщо абстрагуватись від прийнятих у тестовому режимі фактичної 3D форми зерна та його 3D моделей, то на цій підставі можна зробити висновок про те, що схема узгодження за рівністю площі поверхні та з використан-

ням 3D моделі зерна у формі еліпсоїда обертання є найбільш універсальною і може бути прийнятною для практичного застосування.

У разі імітаційно-діагностувального варіанту дослідження мінімальне значення похибки опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття забезпечує застосування 3D моделі зерна у формі еліпсоїда. Щодо узгодження розмірних (геометричних) параметрів фактичної форми зерна та прийнятої його 3D моделі, то, як і випадку тестового варіанту дослідження, найбільш прийнятною виявилася схема з прирівнюванням площ поверхні цих двох об'єктів. Об'єм та площу поверхні фактичної форми зерна знаходили чисельним методом за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна з використанням результатів діагностування морфометричних характеристик контрольної проби порошку на приладі DiaInspect.OSM.

Результати розрахунку товщина покриття та похибки її визначення у імітаційно-діагностувальному варіанті дослідження для прийнятих варіантів узгодження розмірних параметрів фактичної форми зерна і прийнятих 3D його моделей та узгоджені значення визначальних геометричних параметрів 3D моделей зерна представлено у табл. 2. Порівняльний аналіз отриманих у імітаційно-діагностувальному варіанті результатів показує, що для всіх досліджених схем узгодження розмірних параметрів фактичної форми зерна і прийнятих 3D його моделей найменшу (25,6 %) відносну похибку визначення товщини покриття доставляє схема за рівністю площ поверхонь та з використанням 3D моделі зерна у формі еліпсоїда. Подібна ситуація з мінімальною похибкою у поєднанні із 3D моделлю зерна у формі еліпсоїда є стабільною і для всіх інших схем узгодження. Другою також стабільно, проте з дещо меншою (27,79 %) мінімальною похибкою, є схема узгодження за рівністю об'ємів у разі використання 3D моделі зерна у формі куба. Як бачимо, і у випадку імітаційно-діагностувального варіанту дослідження найбільш універсальною для практичного застосування є схема узгодження за рівністю площ поверхні та з використанням 3D моделі зерна у формі еліпсоїда. Також задовільні (29,79 %) значення відносної похибки дає схема узгодження за рівністю об'ємів у поєднанні із 3D моделлю зерна у формі еліпсоїда обертання та безпосередній розрахунок товщини покриття за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна на підставі даних DiaInspect-діагностування порошку [20].

З огляду на практичне діагностування товщини покриття реальних абразивних порошоків, варто зупинитися на одному важливому методичному моменті. Він стосується числових значень площі поверхні та об'єму зерен реального порошку, необхідних для узгодження розмірних параметрів фактичної форми зерна і прийнятих його 3D моделей. Оскільки фактична 3D форма зазвичай невідома, то невідомі і значення геометричних характеристик зерна фактичного порошку. Як показали проведені дослідження, одним зі способів отримання необхідних даних площі поверхні та об'єму зерен реального порошку у разі діагностування його морфометричних характеристик з допомогою приладу DiaInspect.OSM є їхнє обчислення за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна та використанням результатів DiaInspect-діагностування. Проведеними дослідженнями встановлено, що відносна похибка після такої заміни складає 17,11 % у разі обчислення об'єму та 3,41 % – у разі обчислення площі поверхні зерна.

ВИСНОВКИ

Проведеними дослідженнями обґрунтована доцільність практичного застосування опосередковано-аналітичного методу визначення товщини пок-

риття алмазних порошків та порошків інших абразивних матеріалів з використанням 3D моделі зерна у формі еліпсоїда та алгоритму узгодження розмірних параметрів фактичного зерна та прийнятої його 3D моделі за рівністю їхній площі поверхні. Така розрахункова схема забезпечує похибку визначення товщини покриття, що дорівнювала 25,6 %. Зазначена похибка є найменшою у порівнянні з відомими і найбільш застосовуваними на практиці 3D моделями зерна у формі кулі та куба та традиційної схеми узгодженням за середнім розміром зерен, вирахованим за результатами мікроскопіювання порошку, товщину покриття якого визначали.

У разі, коли фактична 3D форма зерна невідома (а подібна ситуація є найбільш характерною для практики опосередкованого діагностування товщини покриття), було запропоновано визначати площу поверхні зерен реального порошку чисельним методом за екстраполяційно-афінною 3D моделлю зерна. Як показали проведені дослідження, похибка у разі заміни фактичної форми зерна її аналогом у разі мікроскопування порошків за допомогою приладу DiaInspect.OSM не перевищує 3,41 %.

G. A. Petasyuk

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Study of the effect of matching the actual geometric parameters of the grain and its adopted 3D model on the error of determining the thickness of the coating of diamond powders

The methodical components of the indirect-analytical determination of the coating thickness of diamond powders, which is an important characteristic of them, are analyzed. The importance of the method of matching the actual geometric parameters of the grain and its adopted 3D model as a factor influencing the error in determining the thickness of the coating is proven. The results of a comparative study of the influence of the method of matching the actual geometric parameters of the test grain (cuboctahedron) and its accepted 3D models (sphere, cube, ellipsoid) on the thickness of the coating and the error of its determination are presented.

Keywords: coverage, thickness, error, grain, 3D model, ellipsoid, sphere, cube, cubooctahedron.

1. Paterakis G., Anagnostopoulos G., Sygellou L., Galiotis C. Protection of aluminum foils against environmental corrosion with graphene-based coatings. *J. Coat. Sci. Technol.* 2021. Vol. 8. P. 18–28.
2. Hsu C.H., Liu H.T., Huang W.C., Lin M.R. Effect of post heated tin coating on pitting corrosion of austenitic stainless steel. *J. Coat. Sci. Technol.* 2015; Vol. 2, no. 3. P. 93–99.
3. Chen J., Song H., Liu G., Zheng Z., Tang J., Cui L. Improving wear and corrosion properties of magnesium alloy by cold sprayed nano WC–17Co coating. *J. Superhard Mater.* 2021, Vol. 43. P. 213–221.
4. Sknar Yu.E., Amirulloeva N.V., Sknar I.V., Danylov F.I. Influence of methylsulfonate anions on the structure of electrolytic cobalt coatings. *Mater. Sci.* 2016. Vol. 52, no. 3. P. 396–401.
5. Sun Y., He L., Zhang C., Meng Q., Liu B.C., Gao K., Wen M., Zheng W. Enhanced tensile strength and thermal conductivity in copper diamond composites with B₄C coating. *Sci. Reports.* 2017. Vol. 7, art. 10727.
6. Sun Y., Zhang C., He L., Meng Q., Liu B.C., Gao K., Wu J. Enhanced bending strength and thermal conductivity in diamond/Al composites with B₄C coating. *Sci. Reports.* 2018. Vol. 8, art. 11104.
7. Саградян А.И., Агбалян С.Г., Мартиросян А.М., Ордян Н.А., Погосян Х.В. Повышение ресурса работы алмазного инструмента для обработки неметаллических материалов. *Сверхтв. материалы.* 2018. № 3. С. 79–86.

8. Исонкин А.М., Ильницкая Г.Д., Зайцева И.Н. Влияние дефектов алмазов на работоспособность буровых коронок. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля. 2017. Вып. 20. С. 130–137.
9. Lavrinenko V.I., Lubnin A.G., Tkach V.M., Fesenko I.P., Smokvyna V.V. Features of the structural organization of a single-layer diamond-galvanic coating for the ruling tool. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 2. P. 145–150.
10. Батулин В.Е., Клебанов Ю.Д., Сумароков В.Н. Измерение толщины металлических покрытий на зернах алмаза и кубического нитрида бора. *Синт. алмазы.* 1973. Вып. 3. С. 13–16.
11. Petasyuk G.A. Methodological and application aspects of indirect analytical determination of coating thickness on metal_coated superabrasive grits. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no. 3. P. 201–209.
12. Петасюк Г.А. Опосередковане визначення товщини покриття порошків синтетичного алмазу з використанням нових 3D моделей зерна. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2021. № 6. С. 133–136.
13. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. <https://vdiamant.de/languages/diinspect-osm.html>
14. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. Extrapolation analytical method for determination of outer specific surface of powders of superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2007. Vol. 29, no. 6. P. 375–383.
15. Surface Area of an Ellipsoid – Scalene Ellipsoid – Numericana. <http://www.numericana.com/answer/ellipsoid.htm>
16. Шлифпорошки синтетических алмазов марок AC200, AC250, AC300, AC350, AC400. ТУ У 28.5–054717377–072–2003.
17. Petasyuk G.A. A new group averaging approach to diagnostics of technological properties of high-strength synthetic diamond powders. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6.
18. Бакуль В.Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка. *Синт. алмазы.* 1976. Вып. 4. С. 22–27.
19. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний від 01.01.96.
20. Petasyuk G.A. Determining the thickness coating of grinding powders of synthetic diamond based on a specific-surface approach and using an extrapolation-affine 3D model of grain. *J. Coat. Sci. Technol.* 2022. Vol. 9. P. 20–25.

Надійшла до редакції 28.07.22

Після доопрацювання 11.08.22

Прийнята до опублікування 12.08.22