

8. Moazed K.L., Zeidler J.R., Taylor M.J. A thermally activated solid state reaction process for fabricating ohmic contacts to semiconducting diamond // *J. Appl. Phys.* – 1990. – Vol. 68. – P. 2246–2254.

Надійшла 16.08.22

References

1. Burns, R.C., Chumakov, A.I., Connell, S.H., et al. (2009). HPHT growth and x-ray characterization of high-quality type IIa diamond, *J. Phys.: Condens. Matter*, 21, 364224 (14pp)
2. Sumiya, H., & Tamasaku, K. (2012). Large Defect-Free Synthetic Type IIa Diamond Crystals Synthesized via High Pressure and High Temperature. *J. Appl. Phys.*, 51, 090102.
3. Sumiya, H. Toda, N., & Satoh S. (2002). Growth rate of high-quality large diamond crystals. *Journal of crystal growth*, 237–239, 1281–1285.
4. Shiryaev, A.A., Frost, D.J., & Langenhorst F. (2007). Impurity diffusion and microstructure in diamonds deformed at high pressures and temperatures. *Diamond & Related Materials*, 16, 503–511.
5. Kaminsky, F V., & Khachatryan, G. K. (2004). The relationship between the distribution of nitrogen impurity centres in diamond crystals and their internal structure and mechanism of growth. *Lithos*, 77, 255– 271.
6. Bovenkerk, H.P., Bundy, F.P., Hall, H.T., et al. (1959). Preparation of diamond. *Nature*, 184, 4693, 1094–1098.
7. Blank, T.V., & Gol'dberg A.Yu. (2007). Mechanisms of current flow in metal–semiconductor ohmic contacts, *Semiconductors*, 41, 1263–1292.
8. Moazed, K.L., Zeidler, J.R., & Taylor, M.J. (1990). A thermally activated solid state reaction process for fabricating ohmic contacts to semiconducting diamond, *J. Appl. Phys.*, 68, 2246.

УДК 621.921.34–492.544.023.5:539.215

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-178-183

Г.А. Петасюк, д-р техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, 04074
м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Київ, Україна, e-mail: petasyuk@ukr.net*

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ТОВЩИНИ ПОКРИВУ АЛМАЗНИХ ПОРОШКІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРЕН, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИЛАДУ DialInspect.OSM

Відзначається прикладна значимість покриву як способу покращення експлуатаційних властивостей виробів різного функціонального призначення, зокрема абразивного інструменту. Констатується, що важливою характеристикою покриву є його товщина. Проведений огляд наявних публікацій показав, що забезпечення оптимального значення цієї характеристики дозволяє досягти максимального позитивного ефекту від застосування виробів з нанесеним на їхню поверхню покривом. Проаналізовано методичні складові опосередковано-аналітичного визначення товщини покриву. Запропоновано в розрахунковій схемі такого визначення використовувати еліпсоїд як 3D модель зерна абразивних порошоків. Подаються результати порівняльного дослідження товщини покриву, зумовленої використанням еліпсоїда, кулі та куба як можливих 3D аналогів зерна.

Ключові слова: покрив, товщина, алмазне зерно, 3D модель, еліпсоїд, куля, куб, кубооктаедр

Покрив є дієвим засобом впливу на експлуатаційні, технологічні та споживчі властивості виробів, призначених для використання в машинобудуванні, в хімічній, будівельній і харчовій індустріях, фармакології та в інших виробництвах. Головна мета такого впливу – захист робочих поверхонь від дії зовнішніх агресивних середовищ, головним чином від корозії, поліпшення умов застосування і зберігання виробів, збільшення терміну служби та підвищення надійності деталей машин та різального шару абразивних інструментів [1, 2].

У сфері алмазно-абразивної обробки, на яку спрямована ця робота, товщина покриву зерен абразивних порошків НТМ впливає на міцність їхнього утримання в різальному шарі абразивного інструменту, а тому і на питому витрату самого абразивного порошку. При цьому, як відзначається в [3], такий позитивний ефект досягається лише за певної оптимальної товщини покриву. В подібних випадках важливо володіти інформацією щодо товщини покриву, а відтак і методами визначення цієї характеристики. Досить детальний аналіз стану справ у визначенні товщини покриву зерен абразивних порошків НТМ був виконаний в роботі [4]. На підставі проведених досліджень констатувалось, що наявність високоточних методів визначення товщини покриву зерен є важливою методологічною передумовою ефективного застосування модифікованих таким чином абразивних порошків. Як показує аналіз відомих публікацій, питанню визначення товщини покриву у сфері абразивних порошків належної уваги не приділялось. Головна увага була зосереджена на технологічних аспектах нанесення покриву на зерна. Тому розробка методів визначення товщини покриву із залученням нових 3D моделей зерна абразивних порошків та підвищення їх точності є актуальною і важливою матеріалознавчою задачею.

Одним із способів підвищення точності методів визначення товщини покриву є залучення для цього нових 3D моделей зерна абразивних порошків. В нашій роботі в якості таких нових 3D моделей зерна пропонується використовувати еліпсоїд. Саме еліпсоїд до появи екстраполяційно-афінної 3D моделі зерна [5] вважався найбільш адекватним аналогом зерна шліфпорошків синтетичного алмазу при опосередкованому визначенні певних їхніх технологічних властивостей (наприклад, числа зерен в одному караті [6]). Такі позитивні переваги цієї 3D моделі зерна обумовлені тим, що вона успадковує від реального зерна відразу три його розмірні параметри – довжину і ширину (в сучасній інтерпретації максимальний і мінімальний діаметри) його проекції та висоту (H) зерна. Тому складає великий прикладний інтерес доповнення арсеналу відомих розрахункових залежностей опосередковано-аналітичного визначення товщини покриву абразивних порошків і залежностями для 3D моделі зерна у формі еліпсоїда. Разом з такою 3D моделлю зерна будуть проведені порівняльні дослідження відносної похибки визначення товщини покриву, отриманої із застосуванням відомих 3D моделей зерна у формі кулі та куба, які вже давно використовуються для цієї мети.

При мікроскопіюванні порошку проекцією зерна, що має 3D форму еліпсоїда з осями $A \geq B \geq C$, буде еліпс з осями A і B . Якщо морфометричні характеристики діагностуються приладом DiaInspect.OSM [7], як це було у нашому випадку, то A ототожнюється з максимальним діаметром Фере (F_{max} , точний аналог довжини проекції), B – з мінімальним діаметром Фере (F_{min} , дуже близький аналог ширини проекції), а C – з висотою зерна (H). Зазначимо, що такий варіант узгодження розмірних параметрів фактичного зерна з прийнятою його 3D моделлю не є єдиним. В роботі [8] використовується схема з прирівнюванням об'ємів зерна та 3D його моделі. Може бути також використана і схема з прирівнюванням площ повних їх поверхонь чи відношення об'єму до площі поверхні. Подібні дослідження не є предметом цієї роботи, хоча складають великий науково-прикладний інтерес. Подібне вивчення є предметом окремих подальших напрямків продовження досліджень за тематикою цієї роботи.

Для отримання розрахункової залежності опосередковано-аналітичного визначення товщини покриву зерен абразивних порошків НТМ на базі 3D моделі зерна у формі еліпсоїда

будемо виходити із пікнометрично-адитивного підходу [4]. Такий підхід передбачає аналітичне подання об'ємів початкового зерна (V_a) та зерна з нанесеним на його поверхню покривом (V_M). Для еліпсоїда $V_a = \pi ABC/6$, $V_M = \pi(A+2h)(B+2h)(C+2h)/6$, де h – товщина покриву. Об'єм V_M , використовуючи пікнометричне співвідношення між об'ємом, масою (m_M) і густиною (ρ_M) матеріалу покриву як твердого тіла, ступінь покриву ($\mu = m_a/m_M$), який є технологічним параметром процесу нанесення покриву, та густину матеріалу синтетичного алмазу (ρ_a), можна подати у вигляді $V_M = \mu V_a \rho_a / \rho_M$. З урахуванням цього основне рівняння пікнометрично-адитивного методу для зерен у формі еліпсоїда набуває вигляду

$$(A + 2h)(B + 2h)(C + 2h) = ABC + \mu \frac{\rho_a}{\rho_M} ABC \quad (1)$$

Розкриваючи дужки у лівій частині цього рівняння та після його спрощення, отримуємо кубічне рівняння для визначення h . Оскільки $h/A \ll 1$, то нехтуючи членом з h^3 зводимо рівняння (1) до квадратного, розв'язуючи яке матимемо

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

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 у випадку кулі та куба, які в подальшому також будуть використовуватися як 3D моделі зерна, залежності для визначення товщини покриву опосередковано-аналітичним методом є однотипними [4]

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

з різним трактуванням сенсу параметра d . У випадку кулі – це її діаметр (D , тобто $d = D$), у випадку куба – це ребро куба (a , тобто $d = a$).

Відносна похибка визначення товщини покриву зерен запропонованим методом обчислювалася шляхом тестування. Процедура тестування виконувалася для ідеалізованого шліфпорошку, всі зерна якого мали 3D форму кубооктаедра (рис. 1), тобто були рівновеликі за розміром і однорідними за 3D формою.

Зауважимо, що 3D форму зерен у вигляді кубооктаедра або близьку до нього мають, наприклад, високоміцні крупнозернисті шліфпорошки синтетичного алмазу. Проекцією кубооктаедра на площину, паралельну його грані у формі квадрата, на якій він розташовується на предметному столі мікроскопу, буде знову ж таки квадрат (рис. 2)

із довжиною сторони $l = \sqrt{2} d$, де d – довжина ребра кубооктаедра. Взаємозв'язок між F_{max} , F_{min} і H та ребром кубооктаедра, виходячи із понятійного сенсу морфометричних

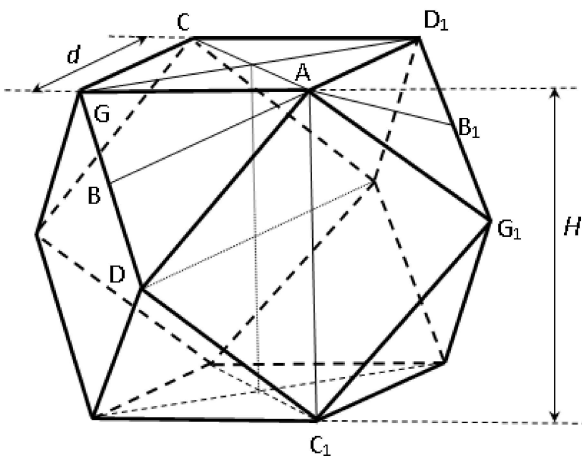


Рис. 1. Кубооктаедр як 3D модель зерна абразивного порошку (розташування на грані у формі квадрата)

характеристик, які діагностуються приладом DiaInspect.OSM, виражається такими залежностями: $F_{max} = 2d$, $F_{min} = \sqrt{2}d$, $H = \sqrt{2}d$.

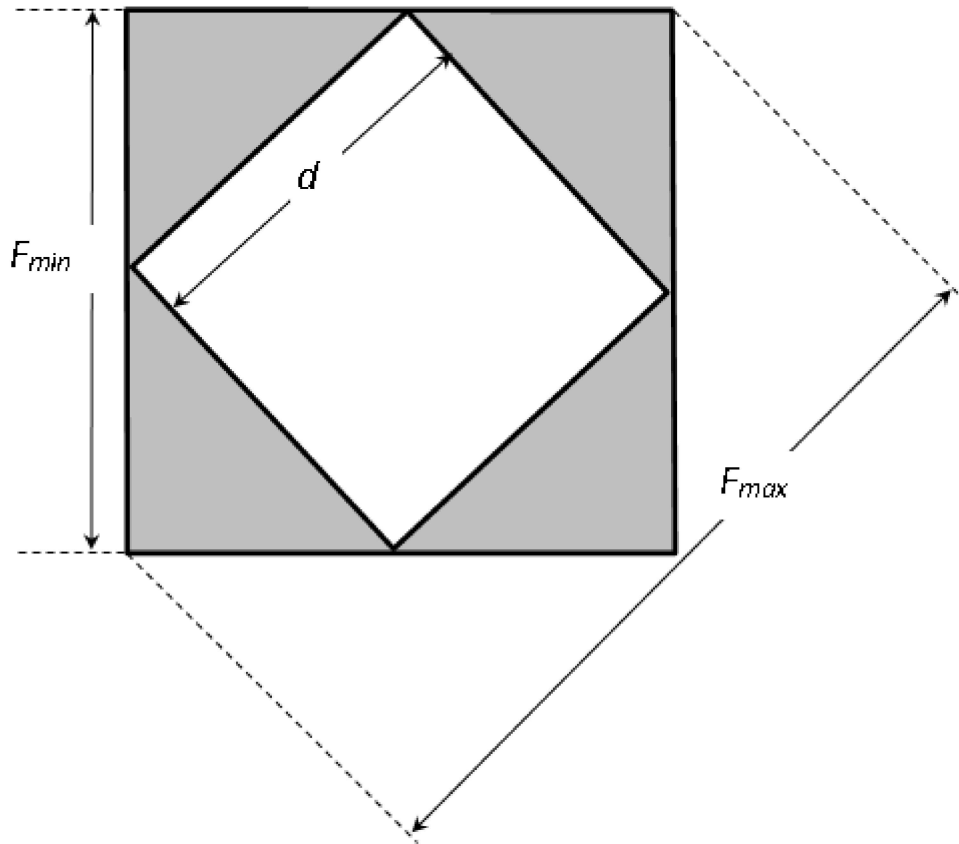


Рис. 2. Проекція кубооктаедра, який розташовується на грані у формі квадрата, на площину, паралельну цій грані

У процесі тестування передбачалось, що на такий алмазний порошок був нанесений титановий покрив товщиною $h = 5$ мкм. Такому значенню h при густині алмазу $\rho_a = 3,51$ г/см³, густині титану $\rho_M = 4,5$ г/см³ та $d = 100$ мкм відповідає ступінь покриття $\mu = 42,4\%$, який був вирахований із залежності для опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття у випадку кубооктаедра як 3D моделі зерна. Зазначена залежність має вигляд (3), розмірний параметр d в правій частині якої має сенс довжини ребра кубооктаедра (рис.1).

Застосування залежності (1) із використанням прийнятих для тестування початкових даних дає $h = 5,5423$ мкм для 3D моделі зерна у формі еліпсоїда, та $h = 8,54$ мкм для 3D моделі зерна у формі кулі і куба. Порівняльний аналіз фактичної товщини покриття тестового зерна у формі кубооктаедра ($h = 5$) з результатом, отриманим при використанні розглядуваних тут 3D моделей зерна, показує, що найменша відносна похибка опосередкованого визначення має місце при застосуванні 3D моделі зерна у формі еліпсоїда і становить 29,79%. Хоча така похибка не є малою, вона може бути прийнятною для практики опосередкованого визначення товщини покриття. Зменшення її значень потребує подальшого вивчення впливу способу узгодження розмірних параметрів фактичного зерна з прийнятою його 3D моделлю на відносну похибку подальшого опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття. Зокрема, схем з прирівнюванням об'ємів чи площ поверхонь цих двох об'єктів або з прирівнюванням відношення об'єму до площі поверхні, про що вже зазначалось. Для двох інших досліджуваних 3D моделей зерна (кулі та куба) похибка значно більша і становить 70,71%. Це дозволяє зробити висновок про доцільність практичного застосування

опосередковано-аналітичного методу у поєднанні з 3D моделлю зерна у формі еліпсоїда для визначення товщини покриття алмазних порошків та порошків інших абразивних матеріалів у випадку використання DiaInspect-характеристик при узгодженні розмірних параметрів фактичного зерна з прийнятою його 3D моделлю.

Висновки

Проведеними дослідженнями обґрунтована доцільність практичного застосування опосередковано-аналітичного методу визначення товщини покриття алмазних порошків та порошків інших абразивних матеріалів у поєднанні з 3D моделлю зерна у формі еліпсоїда у випадку, коли для узгодження розмірних параметрів фактичного зерна та прийнятої його 3D моделі використовуються DiaInspect-характеристики порошку. Така розрахункова схема забезпечує найменшу похибку визначення у порівнянні з відомими 3D моделями зерна у формі кулі та куба.

В подальшому дослідження за розглядуваної в цій роботі тематики слід продовжити в напрямку вивчення впливу інших способів узгодження розмірних параметрів фактичного зерна з прийнятою його 3D моделлю на відносну похибку опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття.

G.A. Petasyuk

V.N. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine, Kyiv

INVESTIGATION OF THE CALCULATED THICKNESS OF DIAMOND POWDER COATING USING THE SIZE PARAMETERS OF GRAINS OBTAINED WITH THE DEVICE DiaInspect.OSM

The applied significance of the coating as a way to improve the performance of products of different functional purposes, particularly abrasive tools, is noted. It is stated that an important characteristic of the coating is its thickness. A review of existing publications has shown that ensuring the optimal value of this characteristic allows to achieve the maximum positive effect from the use of products with a coating applied to their surface. Methodological components of indirect-analytical determination of coating thickness are analyzed. It is proposed to use an ellipsoid as a 3D model of abrasive powder grains in the calculation scheme of such a determination. The results of a comparative study of the thickness of the coating due to the use of an ellipsoid, a sphere and a cube as possible 3D analogues of grain are presented.

Key words: *coating, thickness, diamond grain, 3D model, ellipsoid, sphere, cube, cubooctaedron*

Література

1. Sknar Yu.E., Amirulloeva N.V., Sknar I.V., Danylov F.I. Influence of methylsulfonate anions on the structure of electrolytic cobalt coatings. Danylov // Materials Science. – 2016. – Vol. 52, N 3. – P. 396–401.
2. Лаврінченко В.І. Надтверді матеріали. – К.: Академперіодика, 2018. – 336 с.
3. Батурын 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.

4. Petasyuk G. A. Methodological and Application Aspects of Indirect Analytical Determination of Coating Thickness on Metal-Coated Superabrasive Grits // *Journal of Superhard Materials*. – 2019. – Vol. 41, N. 3. P. 201–209.
5. 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.
6. Бакуль В. Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка // *Синтетические алмазы*. – 1976. – Вып. 4. – С. 22–27.
7. Сайт компанії «Vollstäedt Diamant GmbH» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vdiamant.de/diainspect-osm.html>. (Partikelanalyzer – Vollstaedt Diamant GmbH).
8. 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.

Надійшла 26.05.22

References

1. Sknar, Yu.E., Amirulloeva, N.V., Sknar, I.V., & Danylov, F.I. (2016). Influence of methylsulfonate anions on the structure of electrolytic cobalt coatings. *Materials Science*. 52, № 3. 396–401.
2. Lavrinenko, V.I. (2018). *Nadtverdi materialy [Superhard materials]*. Kyiv: Akadempriodyka [in Ukrainian].
3. Baturin, V.Ye., Klebanov, YU.D., & Sumarov, V.N. (1973). Izmereniye tolshchiny metallicheskih pokrytiy na zernakh almaza i kubicheskogo nitrida bora [Measurement of the thickness of metal coatings on the grains of diamond and cubic boron nitride]. *Sinteticheskie almazy. – Synthetic Diamonds*, 3, 13–16 [in Russian].
4. Petasyuk, G.A. (2019). Methodological and Application Aspects of Indirect Analytical Determination of Coating Thickness on Metal-Coated Superabrasive Grits. *Journal of Superhard Materials*, 41, 3, 201–209.
5. Petasyuk, G.A. (2014). Ekstrapolyatsionno–affinnaya 3D model' zerna poroshkov sverkhhtverdykh materialov i yeye inzheneriya. [Extrapolation-affine 3D model of a grain of powders of superhard materials and its engineering]. *Sovremennyye problemy estestvennykh nauk – Modern problems of natural sciences*. 1, 2, 57–62 [in Russian].
6. Bakul, V.M. (1976). Chislo zeren v odnom karate – odna iz vazhneyshikh kharakteristik almaznogo poroshka [The number of grains per Carat is one of the most important characteristics of diamond powder]. *Sinteticheskie almazy – Synthetic diamond*. 1976, 4, 22–27 [in Russian].
7. Vollstäedt Diamant GmbH. *vdiamant.de*. Retrieved from: <https://vdiamant.de/diainspect-osm.html>. (Partikelanalyzer - Vollstaedt Diamant GmbH).
8. Petasiuk, G.A. (2021). Oposeredkovane vyznachennia tovshchyny pokryvu poroshkiv syntetychnoho almazu z vykorystanniam novykh 3D modelei zerna [Indirect determination of the thickness of the coating of synthetic diamond powders using new 3D models of their grain]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical mechanics of materials*, 6, 133–136. [in Russian].