

16. Shul'zhenko, A.A., Gargin, V.G., Rusinova, N.O. (2006). Almaznyy kompozitsionnyy termostoykiy material dlya osnashcheniya burovogo instrumenta [Diamond composite heat-resistant material for equipping the drilling tool]. *Porodoobrazuyushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument - tekhnika i tekhnologiya yego izgotovleniya i primeneniya. - Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, 1*, 8–12 [in Russian].
17. Shul'zhenko, A. A., O. A. Rozenberg, O. A., Gargin, V. G., et al. (2010). Nakatnoy instrument [The rolling tool]. *Sintez, spekaniye i svoystva sverkhtverdykh materialov, [Synthesis, sintering and properties of superhard materials]*. N. V. Novikov (Ed.). NAN Ukraine. In-t sverkhtverdikh materialov im. V. N. Bakulia. (Vols. 1–6; Vol. 1). Kiev: Logos [in Russian].
18. Rusinova, N. O. (2012). Otrymannya, vlastyvoli ta zastosuvannya polikrystalichnykh kompozytsiynykh materialiv na osnovi almazu ta karbidu kremniyu [Obtaining, properties and application of polycrystalline composite materials based on diamond and silicon carbide]. *Instrumental world. – Instrumentalnyy svit, 3-4*, 24–37 [in Ukraine].

УДК 621.921.34-492.2

Г. А. Петасюк, д-р техн. наук¹; **М. Н. Сафонова**²,
Ю. В. Сирота¹, кандидаты технических наук; **О. У. Петасюк**, вед. инж.¹

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ул. Автозаводская 2,
04074 г. Киев, e-mail: petasyuk@ukr.net

²Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия,
e-mail: marisafon_2006@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ШЛИФПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА НА ОСНОВЕ ЭКСТРАПОЛЯЦИОННО-АФФИННОЙ 3D МОДЕЛИ ЗЕРНА

Проанализированы методические особенности опосредованно-аналитического определения толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков синтетического алмаза. Проведенные исследования показали, что наиболее совершенными есть методы, основанные на применении внешней удельной поверхности. Впервые предложено использовать в этой расчетной схеме экстраполяционно-аффинную 3D модель зерна. На примере шлифпорошка AC125 400/315 доказано преимущество такой 3D модели по сравнению с 3D моделью в форме шара. Использование экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна позволяет находить толщину покрытия зерен металлизированных алмазных порошков без традиционного предположения о шарообразной форме их зерен и с меньшей погрешностью. Предложенный новый метод может быть использован и для порошков других абразивных материалов.

Ключевые слова: металлизация, покрытие, опосредовано-аналитические методы, 3D модель зерна, внешняя удельная поверхность.

Металлизация есть одним из действенных методов модификации поверхности зерен порошков синтетического алмаза (СА), кубического нитрида бора и порошков других

сверхтвердых абразивных материалов [1]. Главная цель подобной технологической операции направлена на повышение эффективности применения абразивного инструмента (АИ), изготовленного с использованием металлизированных порошков.

Важным показателем качества металлизированных шлифпорошков СА есть толщина покрытия зерен. Одновременно с однородностью покрытия зерен она является определяющим фактором влияния на микротвердость и трещиностойкость алмазных порошков, на прочность удержания зерен шлифпорошка в режущем слое АИ, а потому и на удельный расход абразивного порошка. Именно удельный расход как характеристика процесса обработки и служит основным критерием эффективности АИ [2].

При этом важно отметить, что такой положительный эффект достигается лишь при выборе оптимальной толщины покрытия, т.е. для конкретной пары связка-покрытие существует оптимальная толщина металлического покрытия [3]. Например, испытание металлизированных алмазных шлифпорошков АСВ (современная марка АС32) зернистостью 125/100 показали, что увеличение толщины никелевого покрытия свыше оптимального не сопровождалось повышением стойкости инструмента [4].

Непосредственное определение толщины покрытия металлизированных зерен теоретически возможно, но крайне сложно в отношении практического осуществления. Поэтому все известные на сегодня методы определения этой характеристики по своей сути являются опосредствованными, поскольку не дают непосредственного ответа относительно толщины покрытия.

Одной из основных методических составляющих известных подходов к опосредствованному установлению толщины покрытия зерен при металлизации есть аналитическое определение объема осредненного зерна порошка начального и после металлизации. Для этой цели обычно пользуются 3D моделью зерна в форме шара с известными аналитическими зависимостями для определения его объема. При этом выходят из допущений относительно однородности покрытия и идентичности формы начального и металлизированного зерен. Объем металла покрытия, нанесенного на одно зерно, находят с учетом плотности и массы металла, израсходованного на покрытие определенной массы шлифпорошка и количества зерен алмазного порошка в одном его карате. Далее, исходя из аналитических выражений для объема металла-покрытия (v_m), объемов начального (v_a) и металлизированного (v_c) зерен порошка, составляют уравнение соотношения этих объемов в виде $v_m + v_a = v_c$. В это уравнение подставляют аналитические выражения для объемов, которые там фигурируют, и находят толщину покрытия зерен металлизированных порошков (h).

Особенностью известных опосредованно-аналитические методов определения толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков СА есть использования 3D модели зерна в форме шара, хотя подходы к разработке самых методов отличаются. Из этих известных опосредованно-аналитические методов определения толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков СА следует выделить метод, примененный в работе [5], который основан на использовании внешней удельной поверхности ($F_{уд}$). Такой подход к определению толщины покрытия металлизированных зерен видится наиболее совершенным, поскольку внешняя удельная поверхность может быть получена как экспериментально, так и опосредованно-аналитическими методами. Для определения толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков СА в цитированной выше работе предлагается следующая формула

$$h = \frac{\mu}{\rho_a F_{уд}}, \quad (1)$$

которую авторы, принимая 3D модель зерна в форме шара, для которого $F_{уд} = 6/(d \rho_a)$, приводят к виду

$$h = \frac{\mu d \varphi \rho_a}{6 \rho_m} \quad (2)$$

Здесь ρ_a – плотность алмаза, ρ_m – плотность материала металла-покрытия; $\mu = m_M/m_a$ – степень металлизации; m_M – масса металла, израсходованного на покрытие алмазного порошка массой m_a , d – средний размер зерна алмаза до металлизации; φ – эмпирический коэффициент, который зависит от геометрии зерен и характеризует отклонение его объема от объема шара с диаметром, равным среднему размеру зерна. Для шлифпорошков СА авторы предлагают брать его равным 0,7.

Для усовершенствования предложенного в [5] метода определения толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков СА можно или вообще обойтись без 3D модели зерна, или использовать более оригинальные (в смысле приближения к фактической пространственной форме зерна) 3D модели по сравнению с известными пространственно-классическими телами наподобие шара или куба. Тем не менее, практическое воплощение такой новаторской возможности в работе [5] осталось нереализованным, поскольку ее авторы при определении внешней удельной поверхности, как уже отмечалось, снова обращаются к уже традиционной 3D модели зерна в форме шара. Это вносит значительную погрешность в определение внешней удельной поверхности шлифпорошков СА, фактическая форма зерен которых значительно отличается от шара. К примеру, при определении числа зерен в одном карате и той же внешней удельной поверхности алмазных шлифпорошков такая погрешность составляет 19,9% – 35,6% и 63% – 64 % соответственно [6, 7]. Тем самым вносится погрешность и в результат определения толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков СА.

В настоящей работе при определении толщины покрытия зерен металлизированных шлифпорошков предлагается использовать экстраполяционно-аффинную 3D модель зерна [8]. Общая формула в таком случае остается такой же, т. е. в виде (1), а внешняя удельная поверхность вычисляется методом, описанным в работе [9]. При этом все необходимые начальные данные получаются на основании результатов DiaInspect-диагностики морфометрических характеристик порошка, который подлежит металлизации. В отличие от конкретизированной в [5] формулы (2), формула (1) в таком случае не содержит эмпирического коэффициента φ , что значительно расширяет границы практического ее применения. Это достигается благодаря тому, что экстраполяционно-аффинная 3D модель зерна абразивных порошков наследует от реального зерна 5 параметров: максимальный (F_{max}) и минимальный (F_{min}) диаметры Фере (Feret) проекции зерна, его высоту (H), периметр (P) и площадь (A_i) проекции. По этим главным показателям адекватности новая 3D модель обладает существенным преимуществом перед известными 3D моделями. Благодаря этому увеличивается точность расчетного определения объема и площади поверхности зерна, а в конечном итоге – и толщина покрытия.

Проводилась апробация предложенного метода определения толщины покрытия зерен на металлизированном титаном стандартном шлифпорошке AC125 400/315 [10]. Именно

такой шлифпорошок одновременно с другими шлифпорошками использовался при изучении физико-химических процессов нанесения покрытий на порошки сверхтвердых материалов с целью создания гетерогенных структур метало-алмазных композитов [10]. И это позволило использовать для апробации абсолютно реальные технологические параметры металлизации и физические свойства абразива и металла покрытия. В частности, степень металлизации (μ) титановым покрытием составляла 5%. Плотность титана (ρ_M) принималась равной $4,5 \text{ г/см}^3$, алмаза (ρ_a) – $3,5 \text{ г/см}^3$. Другие указанные выше и необходимые исходные данные были получены диагностированием пробы порошка в количестве 2000 зерен прибором *DialInspect.OSM* [11] и представлены в таблице.

Вычисленные значения толщины покрытия зерен указанного металлизированного порошка предложенным методом (экстраполяционно-аффинная 3D модель зерна) и по методу работы [5] (формула (2), 3D модель зерна в форме шара) составили 1,3 мкм и 3,4 мкм соответственно. При этом диаметр шара, как 3D модели зерна, определялся как среднее арифметическое максимального и минимального диаметров Фере, т. е. $d = (F_{max} + F_{min})/2$. Ориентировочное значение толщины покрытия зерен для данного случая металлизации составляет 1–3 мкм [10]. Как видим, значение толщины покрытия зерен, вычисленное по формуле (2), не вписывается в этот ориентировочный интервал возможных ее значений. Поэтому можем сделать вывод о том, что метод, предложенный в работе [5], дает завышенные значения толщины покрытия зерен. Этот вывод подтверждается и более точным количественным анализом с использованием результатов исследования влияния 3D модели зерна алмазных шлифпорошков на значение их внешней удельной поверхности [7]. По результатам этого исследования внешняя удельная поверхность алмазных шлифпорошков аналогичной с нашим случаем зернистости, вычисленная на основе 3D модели зерна в форме шара, в 2,6 раза меньше ее значения, полученного с использованием экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна. При этом экстраполяционно-аффинная 3D модель зерна дает лишь в 1,03 раза заниженные расчетные значения внешней удельной поверхности по сравнению с экспериментальным ее значением ($9,72 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $10,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ соответственно), а 3D модель зерна в форме шара – в 2,7 раза ($3,67 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $10,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ соответственно). Анализ структуры формулы (1) показывает, что заниженные значения внешней удельной поверхности приводят к пропорциональному увеличению толщины покрытия зерен металлизированных порошков. Такой вывод полностью согласовывает с полученными нашими числовыми данными для рассматриваемых 3D моделей зерна.

Выводы

Использование экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна позволяет находить толщину покрытия зерен металлизированных абразивных порошков без каких-либо ограничений относительно формы их зерен и с меньшей погрешностью. Кроме того, применение этой методической новации и разработанного на ее основе метода устраняет необходимость применения разного рода поправочных эмпирических коэффициентов, которые являются источником погрешностей определения толщины покрытия.

Проаналізовано методичні особливості опосередковано-аналітичного визначення товщини покриття зерен металізованих шлифпорошків синтетичного алмазу. Проведені дослідження показали, що найбільш досконалим є методи, засновані на застосуванні зовнішньої питомої поверхні. Уперше запропоновано використовувати в цій розрахунковій схемі екстраполяційно-афінну 3D

модель зерна. На прикладі шліфпорошка AC125 400/315 доведено перевагу такої 3D моделі в порівнянні з 3D моделлю у формі кулі. Використання екстраполяційно-афінної 3D моделі зерна дозволяє знаходити товщину покриття зерен металізованих алмазних порошків без традиційного припущення щодо кулястої форми їхніх зерен і з меншою похибкою. Запропонований на основі такої методичної новачії метод може бути використаний і для порошків інших абразивних матеріалів.

Ключові слова: металізація, покриття, опосередковано-аналітичні методи, 3D модель зерна, зовнішня питома поверхня.

G. A. Petasyuk, M. N. Safonova, J. V. Sirota, O. U. Petasyuk

DETERMINATION OF THICKNESS OF COATED OF METALIZED GRINDING POWDERS OF SYNTHETIC DIAMOND BASED ON EXTRAPOLATION-AFFINE 3D MODELS OF GRAIN

Methodological features of the mediated-analytical determination of the thickness of the coating of grains of metallized grinding powders of synthetic diamond are analyzed. The carried out researches have shown, that the most perfect are methods based on application of an external specific surface. For the first time it is proposed to use the extrapolation-affine 3D model of grain in this calculation scheme. The example of the grinding powder AC125 400/315 proved the advantage of this 3D model in comparison with the 3D model in the form of a ball. The use of the extrapolation-affine 3D model of the grain makes it possible to find the thickness of the coating of grains of metallized diamond powders without the traditional assumption of the spherical shape of their grains and with less error. The proposed new method can be used for powders of other abrasive materials

Key words: metallization, coating, mediated-analytical methods, 3D model of grain, external specific surface.

Литература

1. Прудников Е. Л., Дуда Т. М., Зарицкий А. С. Абразивосодержащие электрохимические покрытия.– Киев: Наук, думка, 1985.– 216 с.
2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах. Под общей редакцией академика НАН Украины Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. Том 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки. Монография. / Под общей редакцией докт. техн. наук А. А. Шепелева – Киев. – 2007. –339 с.
3. Батулин 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. Влияние металлизированных алмазов на работоспособность инструмента на металлической связке // В.Н. Галицкий, В.А.Муровский, Б.М. Емельянов и др. // Синтетические алмазы.– 1971.– вып. 3.– С. 24–26.
5. Евразийский патент 014582 В1 Композиционный материал с высокой теплопроводностью и способ его получения Абызов А.М. Заявл. 29.12.2009. Опубл. 30.12.2010.
6. Петасюк Г. А., Сирота Ю. В. Аналитическое определение количества зерен в одном карате алмазного порошка на основе экстраполяционно-аффиной 3D модели зерна // Сверхтвердые материалы.–2012.– № 3.– С. 70–82.
7. Сафонова М. Н., Петасюк Г. А. Количественный анализ адекватности 3D-моделей зерна порошков природного алмаза // Материаловедение.– 2013.– № 5.– С. 49–56.

8. 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.
9. Петасюк Г. А. Дискретно–геометрический метод определения внешней удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Измерительная техника.– 2008. – №.1 - с. 59-64.
10. Звіт за науково-дослідною темою „Дослідження фізико-хімічних процесів нанесення покриттів на порошки НТМ з метою створення гетерогенних структур метало-алмазних композитів” // ІНМ ім. В.М. Бакуля НАНУ.– Номер держ. Реєстрації 0108U000011.– Арх № 7277.– 2010.– 212 с.
11. DiaInspect/DiaInspect. OSM operating manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vdiamant.de/English/download.htm>

Поступила 17.04. 18

References

1. Prudnikov, E. L., Duda, T. M., & Zaritsky, A. S. (1985) *Abrazivosoderzhashchiye elektrokhimicheskiye pokrytiya [Abrasive-containing electro-chemical coatings]*. Kiev: Nauk, dumka [in Russian].
2. Shepelev A. A. (Eds.). (2007) *Almazno-abrazivnyy instrument v tekhnologiyakh mekhanooobrabotki [Diamond-abrasive tools in mechanic processing technologies]. Sverkhтвердые материалы. Polucheniye i primeneniye [Superhard materials. Preparation and application]*. N. V. Novikov (Ed.); NAN Ukraine. In-t sverkhтвердых материалов им. V. N. Bakulia. (Vols. 1–6; Vol. 1). Kiev: IPC «ALKON» [in Russian].
3. Baturin, V. Ye., Klebanov, Yu.D. & Sumarokov, V.N. (1973) . *Izmereniye tolshchiny metallicheskiy pokrytiy na zernakh almaza i kubicheskogo nitrida bora [Measurement of the thickness of metal coatings on grains of diamond and cubic boron nitride]. Sinteticheskiye almazy. – Synthetic diamonds, 3, 13–16 [in Russian]*.
4. Galitsky, V. N., Murovsky, V. A., Emel'yanov, B. M. et al. (1971). *Vliyaniye metallizirovannykhalmazov na rabotosposobnost' instrumenta na metallicheskoy svyazke [Influence of metallized diamonds on the tool's working capacity on a metal bond]. Sinteticheskiye almazy. – Synthetic diamonds, 3, 24–26 [in Russian]*.
5. Abyzov A.M.(2010). Eurasian patent 014582 [in Russian].
6. Petasyuk, G. A. & Sirota, Yu. V. (2012). Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model, *J. Superhard Mater., Vol. 34,3, 200–208*.
7. Safonova, M. N. & Petasyuk, G. A. (2013). Kolichestvennyy analiz adekvatnosti 3D-modeley zerna poroshkov prirodnogo almaza [Quantitative analysis of the adequacy of 3D models of grain grains of natural diamond powders]. *Materialovedeniye. – Material Science, 5, 49–56 [in Russian]*.
8. Petasyuk G. A. (2014). Ekstrapolyatsionno-affinnaya 3D model' zerna poroshkov sverkhтвердых материалов i yeye inzheneriya [Extrapolation affine 3D model of powder grains of superhard materials and its engineering]. *Sovremennyye problemy yestestvennykh nauk. – Contemporary Problems of Natural Sciences, Vol. 1, 2, 57–62 [in Russian]*.

9. Petasyuk G. A. A discrete-geometrical method of measuring the specific surface of powders of superhard materials, *Measurement Techniques*, 2008, Vol. 51, 1, p. 94–101.
10. Zvit za naukovo-doslidnoyu temoyu „Doslidzhennya fizyko-khimichnykh protsesiv nanesennya pokryttiv na poroshky NTM z metoyu stvorennya heterohennykh struktur metalo-almaznykh kompozytiv” [Report on the research topic "Investigation of the physico-chemical processes of applying coatings to SHM powders for the purpose of creating heterogeneous structure-tour of metal-diamond composites"] *Institut nadtverdykh materialiv im. V.M. Bakulya Natsionalnoyi akademiyi nauk Ukrayiny. Nomer derzh. Rehistratsiyi 0108U000011.– Arkh № 7277. – Bakul Institute for Superhard Materials National Academy of Sciences of Ukraine. State number. Registration 0108U000011.- Archive number 7277* [in Ukrainian].
11. DiaInspect/DiaInspect. OSM operating manual. (n.d.). *vdiamant.de*. Retrieved from <http://www.vdiamant.de/English/download.htm>

УДК 621.922.079

О. І. Чернієнко, канд. техн. наук; **О. О. Бочечка**, д-р техн. наук;
Е. М. Луцак; **А. С. Бєляєв**; **Л. О. Романко**, канд. техн. наук;
О. Ю. Клепко, канд. фіз.-мат. наук; **С. О. Лисовенко**, канд. хім. наук

*Институт надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074 м. Київ, E-mail: o.cherniyenko@gmail.com*

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ І ЕЛЕКТРООПІР АЛМАЗНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ ТА КОМПОЗИТІВ АЛМАЗ-МІДЬ, АЛМАЗ-МІДЬ-ТИТАН

Досліджено залежність питомого електроопору алмазних композитів та полікристалів від тривалості спікання та вплив зв'язки на теплопровідність алмазних матеріалів. Найменше значення питомого електроопору має композит алмаз-мідь, а найвище – алмазні полікристали, що не містять добавок. Показано, що при збільшенні тривалості спікання електроопір зразків зменшується, а густина збільшується. Теплопровідність полікристалів визначається, в основному, фонною компонентою. Введення міді підвищує теплопровідність композитів, а введення зв'язки мідь-титан її зменшує.

Ключові слова: алмазний композит, алмазний полікристал, теплопровідність, електроопір.

Вступ

Надтверді композиційні матеріали на основі алмазу широко застосовуються в різальному і буровому інструментах, а також мають потенціал для використання в електроніці.

Створення таких матеріалів здійснюється шляхом спікання алмазного порошку під дією високої температури та високого тиску.

Отримання алмазного композиційного матеріалу (АКМ) є динамічним процесом. Одночасно відбуваються пластична деформація, ущільнення та графітизація зерен алмазного порошку. Для поліпшення спікання алмазних нанопорошків в них вводять активуючі добавки,