

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.921.34-492.2:004.89

Г. А. Петасюк

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*petasyuk@ukr.net

Визначення показників зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу екстраполяційно-аналітичним та пофракційно-осереднювальним методами: порівняльний аналіз

Проведено огляд публікацій, в яких засвідчено позитивну прикладну значимість питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу абразивного призначення та способів впливу на її змінювання. Проаналізовано тенденції сучасного розвитку методів опосередковано-аналітичного визначення зовнішньої питомої площі поверхні як технологічної властивості таких абразивних шліфпорошків. Досліджено методичні особливості застосування екстраполяційно-аналітичного та пофракційно-осереднювального методів визначення зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу. Виконано порівняльне дослідження застосування цих двох методів до високоміцних та підвищеної міцності шліфпорошків синтетичного алмазу. Встановлено, що застосування пофракційно-осереднювального методу до високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу дозволяє отримувати більш достовірні показники зовнішньої питомої площі поверхні у порівнянні із тими, які надає екстраполяційно-аналітичний метод. Ступінь підвищення для досліджених високоміцних шліфпорошків змінювався від 1,5 до 2,35 рази. Виявлено фактори, які впливають на збільшення значення питомої площі поверхні. Сформульовано практичні рекомендації щодо правомірності і доцільності застосування пофракційно-осереднювального методу визначення зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу такого класу.

Ключові слова: високоміцні шліфпорошки синтетичного алмазу, 3D форма зерен, зовнішня питома поверхня, показник, метод.

Одним із основних напрямків сучасного розвитку науково-методичної бази діагностування функціональних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу є активне впровадження у цю сферу прикладного методичного апарату наукових дисциплін математичного спрямування – матема-

тичної статистики, математичного аналізу, аналітичної геометрії, геометричного і математичного моделювання, елементів штучного інтелекту. Важливим доповненням такого впровадження є створення і залучення до цього процесу сучасних автоматизованих технічних засобів діагностування морфометричних характеристик шліфпорошків синтетичного алмазу та оцінювання якості за ними таких порошків і відповідності їхнього стану вимогам стандартів. На цій науково-прикладній базі розроблено оригінальні опосередковано-аналітичні методи визначення показників таких технологічних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу, як зовнішня питома площа поверхні [1], число зерен в одному караті [2], різальні кромки [3], ступінь [4] і товщина [5] покриття, показники зернового складу [6]. Тут термін “технологічні” не стосується технології застосування шліфпорошків. Він вказує на те, що подібні властивості зумовлені технологією отримання таких порошків чи їхньою модифікацією (диспергуванням, ситовим чи флотаційним розділенням, розділенням методом вібраційної сепарації за 3D формою зерен, нанесенням на поверхню зерен покриття та ін.). За такого трактування терміну “технологічні властивості” до їхнього переліку можна віднести і геометричну форму проекції зерен, яка формується або умовами синтезу алмазу, або технологічними параметрами диспергування, якщо таке відбувається.

Новітнім напрямком сучасного розвитку науково-методичної бази діагностування технологічних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу в першу чергу є розроблення методів, орієнтованих на більш вузьку сферу застосування, а саме до певних груп таких шліфпорошків. До переліку таких груп шліфпорошків слід віднести високоміцні за нормативним документом [7] шліфпорошки та шліфпорошки підвищеної міцності, до яких відносять шліфпорошки марок AC80–AC200, що використовують в алмазних правлячих роликках [8]; у цитованій роботі їх називають порошками алмазу більш високої міцності. У даній роботі для таких шліфпорошків застосовано термін “шліфпорошки підвищеної міцності”. Серед досягнутих результатів у цьому новому напрямку можна відзначити створення нових опосередковано-аналітичних методів визначення показників зовнішньої питомої площі поверхні [9] та характеристик різальних кромок [10] такого класу шліфпорошків синтетичного алмазу. Ці нові методи засновані на пофракційно-осереднювальному підході, вперше запропонованому і обґрунтованому в [11].

Інший новітній напрямок – це розроблення поняттєвого апарату оцінювання формоподібності, алгоритмів логічних і обчислювальних процедур автоматизованої ідентифікації геометричної форми проекції та 3D форми зерен алмазних порошків, у тому числі із залученням елементів штучного інтелекту. На цій основі створено різні варіанти пошуково-аналогових методів автоматизованої ідентифікації геометричної форми проекції зерен алмазних порошків і порошків інших надтвердих матеріалів (НТМ) [12–14], а також 3D форми зерен алмазних порошків [15].

МЕТОДИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ОЦІНЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНІ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Всі технологічні властивості у наведеному вище їхньому переліку є важливими і актуальними для оцінювання якості алмазних шліфпорошків (перш за все порівняльного оцінювання) та для ефективного використання їх в різальному шарі абразивного інструменту. Всі вони заслуговують на увагу і поглиблене дослідження. Проте об’єктом уваги (дослідження) у цій роботі була зовнішня питома площа поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу.

Питома площа поверхні порошків НТМ є важливим атрибутом їхньої якості. Фактор питомої площі поверхні впливає на експлуатаційні можливості таких порошків як абразивного матеріалу, на продуктивність обробки, питому витрату порошку та на якість обробленої поверхні. Ця інформація необхідна для ефективного та раціонального використання абразивних порошків у вигляді паст та суспензій, різних типів абразивного інструменту.

Особливу значимість питома площа поверхні останнім часом набуває у зв'язку з появою та активним застосуванням модифікованих алмазних шліф-порошків, що отримують за допомогою збільшення шорсткості та пористості поверхні їхніх зерен, підвищенням термостійкості шліфувальних порошків синтетичного алмазу, а також у разі нанесення покриття на поверхню зерен таких порошків [16–25]. У подібних застосуваннях питома площа поверхні в кінцевому рахунку є важливим фактором впливу на технологічні властивості модифікованих порошків. Але оскільки шорсткість і пористість поверхні зерен, характеристики їхнього покриття та термостійкість шліфувальних порошків синтетичного алмазу тісно пов'язані зі зміною питомої площі поверхні, то її показник може слугувати також і критерієм кількісного оцінювання ступені модифікації зазначеними способами. Водночас забезпечення більших значень показника питомої площі поверхні посилює позитивний вплив на такі властивості. Так, наприклад, у відомих публікаціях зазначено, що покриття титаном та сумішшю титану з хромом збільшує питому площу поверхні алмазних частинок завдяки шорсткій поверхні, тим самим покращуючи ріжучі властивості композиту [16]. Алмаз із шорсткою поверхнею має більшу площу поверхні порівняно зі звичайним алмазом, що покращує площу контакту між матрицею і частинками та, певною мірою, механічні властивості композитного покриття.

У [17] алмаз із шорсткою поверхнею було отримано за допомогою методу термохімічної корозії, який використовують як нову армуючу фазу для електроосаджених композитних покриттів Ni–алмаз. SEM-аналіз та вимірювання дзета-потенціалу показали, що алмаз із шорсткою поверхнею мав більшу площу поверхні та сильнішу спорідненість до іонів Ni^{2+} , що приводило до вищого ступеня адсорбції та осадження на його поверхні. Це також покращило міцність зв'язку між нікелевим покриттям та поверхнею алмазних зерен. У цьому разі питома площа поверхні була дієвим фактором, який впливає на покращення адгезії (міцності з'єднання) як між матеріалом покриття та поверхнею зерен, так і між зв'язувальним матеріалом у різальному шарі абразивного інструменту та алмазними частинками (зернами).

У [18] повідомлено про розроблення технології модифікування методом рідкофазного нанесення термостійких неорганічних покриттів (оксидів і хлоридів металів і неметалів) на поверхню зерен шліфувальних порошків синтетичного алмазу, що використовують у шліфувальному інструменті. Модифікування проводили ізотермічним методом рідкофазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів (B_2O_3 , Al_2O_3) і хлоридів (CaCl_2 , NaCl , MgCl_2 , FeCl_2), так і їхніх сумішей ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CaCl}_2$, $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{NaCl}$). На підставі аналізу результатів проведених досліджень констатували, що нанесення покриттів з неорганічних речовин (деяких оксидів і хлоридів) підвищує термостійкість шліфувальних порошків синтетичного алмазу. Модифікування поверхні алмазних зерен комбінацією $\text{B}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ гарантовано вдвічі підвищує зносостійкість алмазних кругів, також знижується шорсткість за параметром *Ra*. Крім того, показано, що у разі необхідності зміною модифікатора поверхні алмазних зерен можна впливати на несучу здатність шорсткої поверхні,

отриманої під час шліфування. Наприклад, модифікація поверхні алмазних зерен комбінацією B_2O_3/Al_2O_3 дозволяє підвищити заповненість шорсткої поверхні і її несучу здатність. Водночас модифікація поверхні алмазних зерен модифікатором NaCl значно знижує заповненість шорсткого шару і несучу здатність такої поверхні.

У [19] з посиланням на відомі публікації відзначено, що для підвищення термостійкості алмазних шліфпорошків їхні зерна покривають металевим або керамічним шаром, а до реакційної суміші додають легуючі добавки певних елементів, які використовують під час синтезу алмазу. Огляд публікацій, у яких досліджували можливості поліпшення експлуатаційних характеристик алмазного шліфувального інструменту спрямованою модифікацією поверхні зерен синтетичних алмазів проводили у [20]. За результатами огляду автори відзначили, що алмазний шліфпорошок із шорсткою поверхнею зерен має більшу площу поверхні та вищу електронегативність ніж звичайний алмазний шліфпорошок. Такі його переваги покращують адгезію між зв'язкою на основі Ni та алмазними зернами із шорсткою поверхнею.

У [21] вивчали модифікацію поверхні алмазних зерен у композиті алмаз/алюміній–матриця. Вирішували задачу пошуку кращих матеріалів для тепловідведення, які мають найвищу теплопровідність за заданих коефіцієнтів теплового розширення. Розв'язання цієї задачі мотивує пошук нових композитних матеріалів з більш чіткою межею розділу матриці та включень високопровідних фаз. Один із застосовуваних для цього підходів полягає у цілеспрямованому збільшенні питомої площі поверхні між матрицею та включеннями для покращення механічної адгезії та теплового потоку. Оскільки поверхня зерен алмазних шліфпорошків має досить гладкі та плоскі грані, то питома площа поверхні таких шліфпорошків досить низька. Для збільшення питомої площі поверхні грані алмазних зерен необхідно структурувати або зробити більш шорсткими. Для отримання шорсткої поверхні на синтетичних кубооктаедричних алмазних зернах застосовували, наприклад, метод термічного травлення за температури 700–1100 °C на повітрі за атмосферного тиску [21].

Звичайний алмаз має недоліки, які стосуються поганого самозаточування та наявності концентрованої шліфувальної напруги під час використання його як абразиву [22]. Більше того, цей тип алмазу, як стверджують автори, погано змочується склоподібною зв'язкою, що призводить до меншої сили утримання зв'язувальної речовини до абразивів (тобто алмаз легко відділяється від матриці зв'язувальної речовини під час шліфування). Ці комплексні фактори не тільки знижують якість поверхні оброблюваної заготовки, але й знижують ефективність обробки. Для вирішення цих проблем було отримано новий тип пористого алмазу з високими властивостями самозаточування за допомогою методу термохімічної корозії. Результати досліджень показали значне покращення об'єму пор та питомої площі поверхні пористого алмазу порівняно зі звичайними алмазними абразивними частинками, а також покращення сили утримання та змочування склоподібної зв'язки до пористих алмазних абразивних частинок. Порівняно зі звичайними алмазними абразивними інструментами, у пористих алмазних абразивних інструментах збільшена ефективність шліфування на 29,6 %, зменшені коефіцієнт шліфування на 15,5 %, а шорсткість поверхні заготовки на 27,5 %, подряпини на поверхні кремнієвої пластини стали менш помітними [22].

У відомих публікаціях теоретично обґрунтовано і експериментальними дослідженнями підтверджено опосередкований взаємозв'язок площі повер-

хні модифікованих зазначеними вище способами алмазних шліфпорошків із продуктивністю абразивного різання та із зносостійкістю різального шару абразивного інструменту [16, 18, 19, 20, 22, 23].

Як спосіб впливу на площу поверхні (зокрема і питому) та на термостійкість і термоміцність алмазних шліфпорошків запропоновано здійснювати їхню термічну обробку [17, 20, 23–27].

У цитованих вище публікаціях об'єктом впливу питомої площі поверхні переважно була адгезія (міцність з'єднання) між зв'язувальним матеріалом у різальному шарі абразивного інструменту та алмазними частинками (зернами). Водночас у [28] надано приклади й інших об'єктів позитивного впливу питомої площі поверхні, також досліджували алмазні порошки з різною питомою площею поверхні, які в подальшому були використані для спікання полікристалічних алмазних компактів (ПАК) за допомогою процесу високого тиску та високої температури (НРНТ). Проведені дослідження показали, що мікроструктура, залишкові напруження та особливо зносостійкість ПАК суттєво залежать від питомої площі поверхні алмазних порошків. Порівняно зі звичайними алмазними порошками, алмазні порошки з більшою питомою площею поверхні значною мірою сприяють утворенню алмаз-алмазного зв'язку під час процесу НРНТ синтезу та сприяють помітно вищій зносостійкості ПАК. За підсумками виконаних досліджень автори дійшли цікавих висновків щодо прикладної сфери. Відзначено, що більша питома площа поверхні алмазного порошку сприяє кращому зв'язку алмаз-алмаз, призводить до більшого стискаючого напруження ПАК, покращує їхню зносостійкість, саме тому алмазні порошки з більшою питомою площею поверхні використовують для створення ПАК. Аналогічний ефект впливу питомої площі поверхні відзначено і в [29], де підкреслено, що питома площа поверхні алмазних зерен має значний вплив на характеристики ПАК. Алмазні зерна з більшою питомою площею поверхні сприяють утворенню алмаз-алмазних зв'язків під час спікання за умов НРНТ, тим самим значно покращується стійкість до стирання. Автори зазначають, що такий морфологічний вплив поширюється і на інші інструменти на основі алмазних шліфпорошків.

Проте, слушно зауважити, що практичне втілення всіх перерахованих переваг і позитивних впливів питомої площі поверхні передбачає знання показника цієї технологічної властивості, а також методів достовірного його визначення. Зауважимо також, що безпосереднє визначення показника повної (загальної) питомої площі поверхні традиційними методами, як зазначено в огляді [30], передбачає ініціювання складних фізичних процесів, наявності непростого у використанні вимірювального обладнання та є дуже трудомістким для виконання. Це, мабуть, і є однією з основних причин не частого використання зараз цієї характеристики на практиці.

За означенням питома площа поверхні ($F_{\text{пт}}$) просторово-геометричного твердого тіла це є відношення маси (m) такого тіла до площі його поверхні (S), тобто $F_{\text{пт}} = m/S$. Отже, встановлення показника питомої площі поверхні такого тіла зводиться до знаходження його маси і площі поверхні. В залежності від деталізації площі поверхні 3D тіла розрізняють внутрішню, зовнішню і повну поверхню, а також і відповідний тип (вид) питомої площі поверхні згідно її класифікації у [31]. У контексті практичної реалізації відношення m/S зауважимо наступне. Якщо встановлення маси 3D тіла зводиться до його зважування і не становить жодних проблем, то знаходження площі поверхні, зокрема внутрішньої її складової, пов'язано зі значними труднощами. Особливо, коли мова йде про 3D тіла мікронного розмірного діапазону, якими є

шліфпорошки синтетичного алмазу, зокрема і високоміцні. Але коли мова йде про зовнішню питому площу поверхні, тобто коли внутрішню питому площу поверхні не враховують, то це значно спрощує процедуру знаходження показника цієї складової повної площі питомої поверхні. Це стосується як 3D тіл окремо, так і сукупності таких тіл. Можливо, це і є основною причиною того, що серед алмазних порошків найчастіше і використовують саме цей тип питомої площі поверхні.

СУЧАСНІ МЕТОДИЧНІ СХЕМИ ОПОСЕРЕДКОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПИТОМОЇ ПЛОЩІ ПОВЕРХНІ ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Доволі розлогий огляд методів визначення питомої площі поверхні дисперсних матеріалів, до яких відносяться і порошки синтетичного алмазу, та її складових представлено в оглядовій публікації [30]. Щодо зовнішньої питомої площі поверхні порошків синтетичного алмазу, то подібний огляд методів її визначення було виконано в [1]. Зазначений огляд включав також інформацію щодо сучасних засобів встановлення значень морфометричних характеристик таких порошків, заснованих на цифровій обробці зображень. Відзначено [1], що всі відомі методи визначення питомої площі поверхні за своєю суттю є опосередкованими. З огляду на це виконана класифікація опосередкованих методів визначення зовнішньої питомої площі поверхні зерен фізичними, хімічними та аналітичними способами. Було запропоновано абсолютно новий екстраполяційно-аналітичний метод опосередкованого визначення зовнішньої питомої площі поверхні абразивних порошків НТМ, у першу чергу шліфпорошків синтетичного алмазу. Метод заснований на екстраполяційно-афінній 3D моделі зерна зазначених шліфпорошків [32]. На сьогодні цей метод є найбільш передовим серед опосередковано-аналітичних методів визначення зовнішньої питомої площі поверхні. Таку перевагу йому забезпечує використання саме екстраполяційно-афінної 3D моделі зерна, яка надає найбільш точне визначення об'єму та площі поверхні реального зерна у порівнянні з іншими можливими 3D його моделями (аналогами) [5]. Проте, незважаючи на таку суттєву позитивну перевагу запропонованого екстраполяційно-аналітичного методу він допускає можливість і подальшого його розвитку (удосконалення), що і було виконано у [9].

Практичне застосування відомого екстраполяційно-аналітичного методу опосередковано-аналітичного визначення зовнішньої питомої площі поверхні порошків синтетичного алмазу [1] передбачає заміну кожного зерна проби його екстраполяційно-афінною 3D моделлю. Причому така заміна здійснюється для кожного зерна без винятку, тобто є обов'язковою. Це стосується як зерен далеко неправильної фрагментарної (уламкової, осколкової) форми, так і зерен явно вираженої правильної форми (наприклад, ідеальних правильних і напівправильних многогранників). Така безальтернативність щодо використання інших, відмінних від екстраполяційно-афінної, 3D моделей зерна є недоліком екстраполяційно-аналітичного методу. Зазначений недолік особливо проявляється (істотний) у разі діагностування показника зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу високоміцних та підвищеної міцності. Тому в подальшому було розроблено новий метод, заснований на пофракційно-осереднювальному підході, суть якого викладена в [11].

Метою цього дослідження є порівняльний аналіз показників зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу високоміцних та підвищеної міцності, визначених зазначеними вище двома методами.

МЕТОДИЧНІ ЗАСОБИ ТА МАТЕРІАЛИ (ШЛІФПОРОШКИ)

Для досягнення поставленої мети проводили порівняльне визначення зовнішньої питомої площі поверхні стандартних за нормативними документами [7, 33] високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу різними методами. Використовували відомий екстраполяційно-аналітичний метод [1] (обов'язкова заміна фактичної просторової форми всіх зерен проби екстраполяційно-афінною 3D їхньою моделлю безвідносно до того, правильною чи неправильно є фактична його просторова форма) та запропонований у [9] удосконалений його варіант. Оскільки запропонований новий метод заснований на пофракційно-осереднювальному підході [11], то в подальшому іменували його пофракційно-осереднювальним. Відбір проби порошку здійснювали після ретельного перемішування згідно з вимогами стандарту на вказаний надтвердий дисперсний матеріал [33].

Зазначений порівняльний аналіз виконували у двох варіантах. У першому із них об'єктом дослідження були високоміцні та підвищеної міцності шліфпорошки синтетичного алмазу марок AC80–AC200 зернистістю 250/200 та марок AC100–AC400 зернистістю 500/400, у другому варіанті таким був конкретний високоміцний шліфпорошок, а саме AC300 500/400. Завданням у першому варіанті був порівняльний кількісний аналіз показників зовнішньої питомої площі поверхні високоміцних та підвищеної міцності шліфпорошків синтетичного алмазу різних марок і зернистості, визначених відомим екстраполяційно-аналітичним методом [1] та запропонованим у [9] пофракційно-осереднювальним методом, та ступені впливу на їхнє значення сукупної відносної частки зерен у зерновому складі, 3D форма яких збігається з октаедром, кубооктаедром чи усіченим октаедром (N_{ko}). В подальшому для зручності подання матеріалу зерна такої 3D форми будемо називати кристалооктаедричними, оскільки кубооктаедр та усічений октаедр є похідними від октаедра. Їх отримують із октаедра за допомогою усікання (відокремлення) у його вершинах тетраедрів із довжиною ребра, що дорівнює половині чи третині ребра октаедра. В обох варіантах отримуємо усічений октаедр, проте в першому варіанті такий усічений октаедр має офіційну назву – кубооктаедр, у другому варіанті він так і не отримав окремої офіційної назви, а тому називали його далі – усічений октаедр. Водночас у першому варіанті порівняльного аналізу зазначену відносну частку зерен кристалооктаедричної 3D форми приймали такою, якою вона була у досліджуваному шліфпорошку. Натомість у другому варіанті порівняльного аналізу відносна частка зерен кристалооктаедричної 3D форми N_{ko} у зерновому складі досліджуваного конкретного шліфпорошку цілеспрямовано змінювалася від 0 до 100 % з кроком 10 %. Такий зерновий склад шліфпорошку за кристалооктаедричною 3D формою зерен забезпечував його віртуальне розділення. Процедуру віртуального розділення здійснювали з використанням розроблених автором та у співавторстві програмно-методичних засобів.

Застосуванню таких методів визначення зовнішньої питомої площі поверхні передували процедури діагностування морфометричних характеристик кожного із досліджуваних (контрольних) шліфпорошків за допомогою приладу DiaInspect.OSM [34] для певної проби їхніх зерен. Фрагменти DiaInspect-світлин зерен двох крайніх (межових) шліфпорошків кожної із двох груп зразків показано на рис. 1–4, а для третього зразка – на рис. 5.

Із повного переліку морфометричних характеристик, які діагностували для досліджень, які проводили, використовували наступні: максимальний та мінімальний діаметри Фере, висоту зерна, Фере-подовження, периметр та

площу проекції зерна загальну та відносну частку прозорої частини площі проекції зерна в загальній її площі. Більш повну інформацію щодо геометричного і поняттєвого сенсу цих морфометричних характеристик можна знайти на сайті фірми Vollstädt Diamant GmbH [34] та в публікаціях його розробників, наприклад, у [35].



Рис. 1. Фрагмент DiaInspect-світлин зерен шліфпорошку AC80 250/200.



Рис. 2. Фрагмент DiaInspect-світлин зерен шліфпорошку AC200 250/200.

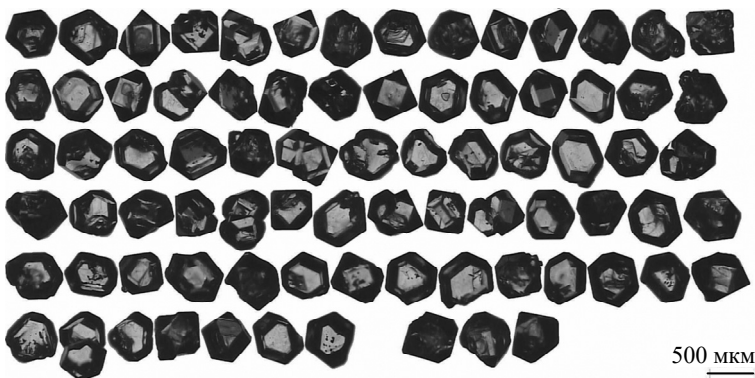


Рис. 3. Фрагмент DiaInspect-світлин зерен шліфпорошку AC100 500/400.

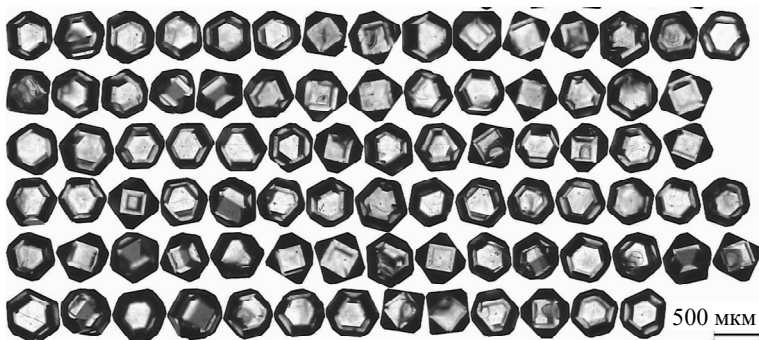


Рис. 4. Фрагмент DiaInspect-світлин зерен шліфпорошку AC400 500/400.



Рис. 5. Фрагмент DiaInspect-світлин з зерен шліфпорошків AC300 500/400.

Методику застосування екстраполяційно-аналітичного методу викладено в [1] та інших публікаціях. Результати визначення зовнішньої питомої площі поверхні досліджуваних шліфпорошків екстраполяційно-аналітичним методом наведено у табл. 1 і 2, де представлено визначені різними методами (I – екстраполяційно-аналітичним, II – пофракційно-осереднювальним) показники зовнішньої питомої площі поверхні досліджуваних стандартних шліфувальних порошків синтетичного алмазу різних марок зернистістю 250/200 (див. табл. 1) та 500/400 (див. табл. 2) і допоміжна інформація, що стосується марки шліфпорошку, загальної кількості зерен у пробі шліфувального порошку (N , шт.), абсолютної (шт.) та відносної (в дужках, %) кількості (N_{ko}) зерен у виділених фракціях шліфувального порошку, зерна яких мають 3D форму октаєдрів, кубооктаєдрів, усічених октаєдрів, а також коефіцієнта відмінності показників зовнішньої питомої площі поверхні, визначених порівнюваними методами:

$$K_{ssa} = \frac{f_{ea} - f_{fa}}{f_{fa}} \cdot 100\%,$$

де f_{ea} , f_{fa} – показники зовнішньої питомої площі поверхні, вираховані екстраполяційно-аналітичним та пофракційно-осереднювальним методами відповідно.

Реалізація пофракційно-осереднювального методу визначення зовнішньої питомої площі поверхні високоміцних та підвищеної міцності шліфпорошків синтетичного алмазу передбачала ряд кроків. На першому з них, як уже зазначали, проводили діагностування їхніх морфометричних характеристик за допомогою приладу DiaInspect.OSM [34]. Потім проводили автоматизовану ідентифікацію та кількісне оцінювання формоподібності проекції зерен шліфпорошків. Цю процедуру виконували удосконаленим варіантом пошуково-аналогового методу [14], який передбачає пошук фактичної проекції зерна серед дванадцяти її базових фігур-аналогів. Після цього виконували автоматизовану ідентифікацію 3D форми зерен за критеріями ідентифікованої форми проекції зерен, значенням відносної долі світлої частки проекції зерна в загальній її площі та за показником Фере-подовження [15].

Наступним кроком було віртуальне розділення початкового шліфпорошку на передбачувані пофракційно-осереднювальним методом чотири фракції за такими 3D формами зерен: октаєдри, кубооктаєдри, усічені октаєдри та решта зерен, 3D форма яких не збігалася із 3D формою зерен перших трьох фракцій. Зауважимо, що 3D форму зерен четвертої фракції не конкретизували, тому що зерна цієї фракції не мають канонізованої 3D форми.

Таблиця 1. Результати визначення різними методами зовнішньої питомої площі поверхні стандартних шліфпорошків синтетичного алмазу марок АС80, АС100, АС160, АС200 зернистістю 250/200 та допоміжна інформація щодо досліджуваних шліфпорошків

Шліф поро- шок	Число зерен, шт				Зовнішня питома поверхня, м ² /кг				K _{ssa} , %
	N	за фракціями	N _{ко}	I	II		у ці- лому		
					за фракціями				
AC80	934	октаедр	14	318	8,20	октаедр	8,47	7,71	6,36
		кубооктаедр	137	(34,055 %)		кубооктаедр	7,02		
		усіч. октаедр	167			усіч. октаедр	7,35		
		решта	616			решта	7,94		
AC100	1157	октаедр	33	898	7,89	октаедр	8,49	7,49	5,07
		кубооктаедр	66	(76,81 %)		кубооктаедр	7,52		
		усіч. октаедр	799			усіч. октаедр	7,01		
		решта	259			решта	7,89		
AC160	1239	октаедр	37	1124	7,49	октаедр	8,24	7,16	4,41
		кубооктаедр	265	(90,72 %)		кубооктаедр	7,66		
		усіч. октаедр	822			усіч. октаедр	7,00		
		решта	115			решта	7,94		
AC200	1031	октаедр	18	939	7,28	октаедр	7,55	7,02	3,57
		кубооктаедр	353	(91,08 %)		кубооктаедр	6,92		
		усіч. октаедр	568			усіч. октаедр	6,99		
		решта	92			решта	7,46		

Примітка. Метод визначення зовнішньої питомої площі поверхні: I – екстраполяційно-аналітичний; II – пофракційно-осереднювальний.

Далі новим пофракційно-осереднювальним методом визначали показник зовнішньої питомої площі поверхні кожного контрольного шліфпорошку. Для цього спочатку було вираховано показники зовнішньої питомої площі поверхні перших трьох фракцій, зерна яких мали 3D форму октаедра, кубооктаедра, усіченого октаедра відповідно. Показник зовнішньої питомої площі поверхні зерен останньої четвертої фракції визначали відомим опосередковано-аналітичним методом [1]. Отримані для всіх чотирьох фракцій значення зовнішньої питомої площі поверхні, як це передбачається пофракційно-осереднювальним методом, було усереднено через знаходження середньозваженого. Результати та допоміжна інформація для досліджуваних шліфпорошків зернистістю 250/200 і 500/400 представлено у табл. 1 і 2 відповідно

Результати визначення показників зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошку АС300 500/400 пофракційно-осереднювальним методом в залежності від відносної частки N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі цього шліфпорошку (другий варіант порівняльного аналізу) представлено на рис. 6.

Таблиця 2. Результати визначення різними методами зовнішньої питомої площі поверхні стандартних шліфпорошків синтетичного алмазу різних марок АС200–АС400 зернистістю 500/400 та допоміжна інформація щодо досліджуваних шліфпорошків

Шліф- поро- шок	Число зерен, шт				Зовнішня питома площі поверхня, м ² /кг				K _{ssa} , %
	N	за фракціями	N _{ко}	I	II				
					за фракціями	у цілому			
AC100	121	октаедр	2	57	3,94	октаедр	0,00	3,63	8,54
		кубооктаедр	11	(47,11 %)		кубооктаедр	3,78		
		усіч. октаедр	44			усіч. октаедр	3,30		
		решта	64			решта	3,76		
AC160	320	октаедр	1	315	3,74	октаедр	3,95	3,64	2,75
		кубооктаедр	70	(98,44 %)		кубооктаедр	3,84		
		усіч. октаедр	244			усіч. октаедр	3,58		
		решта	5			решта	3,94		
AC200	148	октаедр	2	134	3,86	октаедр	3,99	3,67	5,18
		кубооктаедр	10	(90,54 %)		кубооктаедр	3,79		
		усіч. октаедр	122			усіч. октаедр	3,62		
		решта	14			решта	3,98		
AC250	343	октаедр	4	333	3,82	октаедр	4,28	3,71	2,96
		кубооктаедр	39	(97,08 %)		кубооктаедр	4,05		
		усіч. октаедр	295			усіч. октаедр	3,66		
		решта	5			решта	3,96		
Ac300	171	октаедр	0	162	3,83	октаедр	0,00	3,69	3,79
		кубооктаедр	15	(94,74 %)		кубооктаедр	4,05		
		усіч. октаедр	147			усіч. октаедр	3,64		
		решта	9			решта	4,03		
AC400	245	октаедр	0	239	3,92	октаедр	0,00	3,81	2,89
		кубооктаедр	27	(97,55 %)		кубооктаедр	4,01		
		усіч. октаедр	212			усіч. октаедр	3,56		
		решта	6			решта	11,54		

Примітка. Метод визначення зовнішньої питомої площі поверхні: I – екстраполяційно-аналітичний; II – пофракційно-осереднювальний.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Послідовність аналізу отриманих результатів була наступною. Спочатку цю процедуру було виконано окремо для кожної із двох груп шліфпорошків різної зернистості, досліджуваних у першому варіанті порівняльного аналізу. Потім зроблено сукупний порівняльний аналіз цих двох груп шліфувальних порошків з акцентуванням уваги на виявлення факторів, які впливають на показники зовнішньої питомої площі поверхні, а також на значення введеного коефіцієнта відмінності показників зовнішньої питомої площі поверхні (*K_{ssa}*), визначених екстраполяційно-аналітичним та пофракційно-осереднювальним методами. Фактично *K_{ssa}* – це відносна похибка визначення показника зовнішньої питомої площі поверхні, отриманого екстраполяційно-аналітичним методом за умови, що за точне значення цього показника приймали те його значення, яке визначено пофракційно-осереднювальним методом. Але, оскільки показник *f_{fa}* у більшості реальних умов не є абсолютно точ-

ним (через присутність у складі шліфпорошку, окрім зерен кристалооктаедричної форми, ще і зерен інших 3D форм), то оперуватимемо поняттям “коефіцієнт відмінності” показників. Зауважимо, що важливим аргументом в прийнятій схемі порівняння є також фактор затрат часу на визначення показника зовнішньої питомої площі поверхні. У разі застосування пофракційно-осереднювального методу такі затрати дещо більші, ніж у разі застосування екстраполяційно-аналітичного методу, що зумовлено додатковими обчислювальними процедурами, що використовують у цьому методі.

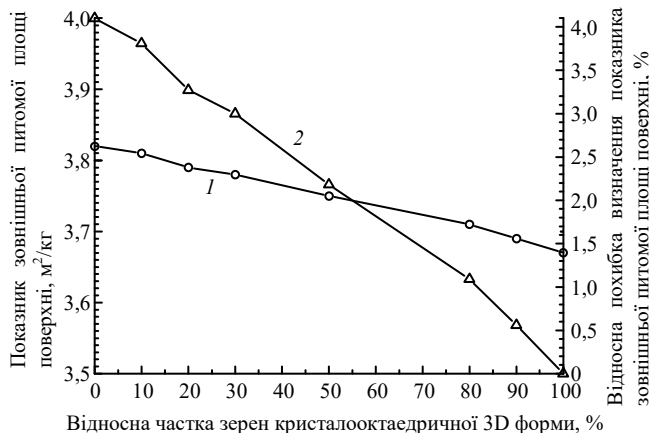


Рис. 6. Залежність показника зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошку АС300 500/400 (1) та відносної похибки його визначення пофракційно-осереднювальним методом (2) від відносної частки зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі.

Як впливає із табл. 1, для різних досліджуваних марок шліфпорошків синтетичного алмазу зернистістю 250/200 показники зовнішньої питомої площі поверхні суттєво не відрізняється між собою, що очікувано, оскільки це шліфпорошки однієї зернистості. Натомість спостерігали більш помітне зменшення коефіцієнта K_{ssa} зі збільшенням сукупної відносної частки N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у складі шліфувального порошку у разі переходу від шліфпорошків із меншим числовим індексом марки до шліфпорошків із більшим числовим індексом марки. Наприклад, у разі переходу від шліфпорошку марки АС80 до шліфпорошку марки АС200 показники зовнішньої питомої площі поверхні, визначені пофракційно-осереднювальним методом, знаходиться в інтервалі 7,02–7,71 м²/кг без чітко вираженої тенденції до зміни. Щодо коефіцієнта K_{ssa} , то зі збільшенням відносної сукупної частки зерен кристалооктаедричної 3D форм його значення зменшуються в 1,78 рази. Це свідчить про те, що на результати застосування екстраполяційно-аналітичного методу до високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу впливають два фактори – марка шліфпорошку та відносна сукупна частка зерен кристалооктаедричної 3D форм. Водночас із цих двох факторів більш впливовим слід визнати перший.

Аналогічну тенденцію взаємозв'язку спостерігали і у разі досліджування шліфпорошків зернистістю 500/400 (див. табл. 2). Тут також показники зовнішньої питомої площі поверхні суттєво не відрізняється між собою, натомість спостерігали більш помітне зменшення коефіцієнта K_{ssa} зі збільшенням сукупної відносної частки N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у складі шліфувального порошку у разі переходу від шліфпорошків із меншим числовим індексом марки до шліфпорошків із більшим числовим індексом марки.

Наприклад, у разі переходу від шліфпорошку марки АС100 до шліфпорошку марки АС400 показники зовнішньої питомої площі поверхні знаходяться в інтервалі 3,63–3,81 м²/кг без чітко вираженої тенденції до зміни. Щодо коефіцієнта K_{ssa} , то зі збільшенням сукупної кількості зерен кристалооктаедричної 3D форми його значення зменшуються в 2,96 рази у цьому варіанті дослідження.

Проте, абсолютні значення показників зовнішньої питомої площі поверхні для шліфпорошків зернистості 500/400 дещо менші, ніж у разі шліфпорошків зернистістю 250/200. Це можна пояснити тим, що зовнішня питома площа поверхні алмазних шліфпорошків крупніших зернистостей менша у порівнянні зі шліфпорошками дрібної зернистості. Даний факт переконливо підтверджений, наприклад, результатами експериментальних досліджень, опублікованих у [36], де показано, що показники зовнішньої питомої площі поверхні менш чутливі до марки шліфпорошку, тобто до показника статичної міцності зерен, ніж до їхньої зернистості (розміру).

Аналіз представлених у табл. 1 і 2 даних дає підстави також стверджувати, що головними факторами, які впливають на результати опосередковано-аналітичного визначення показників зовнішньої питомої площі поверхні, є застосовуваний для цього метод (суб'єктивний фактор) та сукупна відносна кількість N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі шліфпорошку (об'єктивний фактор). Порівняльний аналіз показує, що у разі застосування пофракційно-осереднювального методу отримуємо менший показник зовнішньої питомої площі поверхні у порівнянні з екстраполяційно-аналітичним методом. Це обумовлено тим фактом, що у першому разі використана фактична 3D форма зерен, у другому – 3D модель фактичної форми зерна. Тому в першому разі отримуємо точне значення об'єму зерна, у другому – наближене, а відтак і перевагу щодо достовірності визначення показника зовнішньої питомої площі поверхні слід віддати пофракційно-осереднювальному методу. Такий висновок підтверджує і обчислювальний експеримент автора для шліфпорошку АС160 500/400 (див. табл. 2). Віртуальним розділенням із цього шліфпорошку була виділена фракція, яка складається виключно із зерен кристалооктаедричної форми, для якої $N_{ko} = 100$ %. Далі було визначено показник зовнішньої питомої площі поверхні виділеного таким способом шліфпорошку екстраполяційно-аналітичним та пофракційно-осереднювальними методами. У першому разі він дорівнював 3,88 м²/кг, у другому – 3,64 м²/кг. З врахуванням цього, показники зовнішньої питомої площі поверхні, отримовані пофракційно-осереднювальним методом, було використано як базу для порівняння.

Вивчення результатів визначення пофракційно-осереднювальним методом показників зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошку АС300 500/400 в залежності від відносної частки N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі цього шліфпорошку (другий варіант порівняльного аналізу) показує, що і тут має місце така ж тенденція, як і у разі двох груп шліфпорошків, досліджених у першому варіанті порівняльного аналізу. Тут також спостерігали помітне зменшення показників зовнішньої питомої площі поверхні зі збільшенням сукупної кількості K_{ssa} зерен кристалооктаедричної 3D форми у складі шліфувального порошку. Мінімального значення показників зовнішньої питомої площі поверхні досягають за $K_{ssa} = 100$ %, тобто, коли у зерновому складі шліфпорошку всі його зерна мають кристалооктаедричну 3D форму. Водночас це мінімальне значення показників зовнішньої питомої площі поверхні є найбільш точним її значенням, яке визначають

пофракційно-осереднювальним методом. Зазначимо також, що визначене із застосуванням екстраполяційно-аналітичного методу значення показника зовнішньої питомої площі поверхні на 4,09 % більше від цього мінімального значення.

Застосовуваний метод, як уже відзначено, є суб'єктивним фактором і допускає вибір із двох можливих варіантів: екстраполяційно-аналітичний чи пофракційно осереднювальний. Підставою для надання переваги одному із них може слугувати сукупна відносна кількість N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі шліфпорошку. Для двох крайніх можливостей, тобто, коли у зерновому складі шліфпорошку такі зерна відсутні, або ж навпаки, всі зерна шліфпорошку мають кристалооктаедричну 3D форму, вибір методу визначення показників зовнішньої питомої площі поверхні вирішується однозначно. У першому разі слід застосовувати екстраполяційно-аналітичний метод, у другому – пофракційно-осереднювальний. Якщо ж у зерновому складі шліфпорошку кристалооктаедричну 3D форму має лише певна частка зерен, то необхідно приймати компромісне рішення (варіант) щодо вибору методу визначення показників зовнішньої питомої площі поверхні. Така ситуація насправді є найбільш типовою для високоміцних та підвищеної міцності шліфпорошків синтетичного алмазу. У цьому разі вимушені приймати компромісне рішення і вибирати між часовими затратами на реалізацію пофракційно-осереднювального методу та прагненням отримати найбільш близьке до точного значення показника зовнішньої питомої площі поверхні. Традиційно для кількісного оцінювання відхилення розрахованого значення від точного її значення використовують відносну похибку. Однак у цій ситуації, тобто для показника зовнішньої питомої площі поверхні, застосування відносної похибки не є досконалим, оскільки потребує наявності інформації щодо точного значення показника зовнішньої питомої площі поверхні. Для пофракційно-осереднювального методу точного значення показника зовнішньої питомої площі поверхні досягають, як уже відзначали, коли всі зерна шліфпорошку мають виключно кристалооктаедричну 3D форму. Зрозуміло, що поєднати таку ідеальну ситуацію з реальним наявним шліфпорошком неможливо, а відтак і неможливо оцінити відносну похибку розрахункового визначення показника зовнішньої питомої площі поверхні цим методом. Тому у дослідженні зовнішньої питомої площі поверхні у разі, коли відносна частка зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі відповідного шліфпорошку не дорівнює 100 %, не застосовували термін “відносна похибка”, а оперували терміном “ступінь достовірності”. Достовірність, як і відносна похибка, є кількісною оціночною характеристикою розрахункового значення досліджуваної величини.

В пошуку такої оціночної характеристики порівнювали табл. 1 та 2 і рис. 6. Аналіз наведених даних свідчить про тісний зв'язок між сукупною відотною кількістю N_{ko} зерен кристалооктаедричної 3D форми у складі шліфпорошку та показником відмінності зовнішньої питомої площі поверхні, визначеної екстраполяційно-аналітичним та пофракційно-осереднювальним методами.

Тому цілком оправдано і правомірно за ступінь достовірності прийняти відносну частку зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі відповідного шліфпорошку. Наведена у табл. 1 і 2 інформація, як і залежність, представлена на рис. 6, можуть слугувати критерієм доцільності й правомірності практичного застосування пофракційно-осереднювального методу визначення зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу високоміцних чи підвищеної міцності.

ВИСНОВКИ

За підсумками огляду відомих публікацій встановлено, що тенденцією сучасного розвитку науково-методичної бази опосередковано-аналітичного визначення показників технологічних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу, зокрема і зовнішньої питомої площі поверхні як однієї із важливих їхніх складових, є розроблення нових методів, орієнтованих на більш вузьку сферу застосування, а саме до певних груп таких шліфпорошків.

Проведеними порівняльними дослідженнями виявлено суттєвий вплив відносної частки зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі на достовірність визначення показника зовнішньої питомої площі поверхні шліфпорошків синтетичного алмазу високоміцних та підвищеної міцності екстраполяційно-аналітичним та пофракційно-осереднювальним методами. Встановлено, що такий вплив особливо відчутний для великих значень відносної частки зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі шліфпорошку – від 50 % включно і більше.

Застосування методології віртуального розділення дозволило дослідити вплив на зовнішню питому поверхню високоміцного шліфпорошку відносної частки зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі шліфпорошку у разі зміні її від 0 до 100 % із дискретністю 10 %. Підтверджено, що застосування пофракційно-осереднювального методу доцільно у разі, коли відносна частка зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі шліфпорошку складає не менше ніж 50 %, а відносна похибка визначення не перевищує 2,18 %.

Встановлено, що зі збільшенням відносної частки зерен кристалооктаедричної 3D форми у зерновому складі шліфпорошку показник зовнішньої питомої площі поверхні зменшується і досягає мінімального значення у разі, якщо шліфпорошок складається з виключно зерен саме такої 3D форми. Водночас це мінімальне значення показників зовнішньої питомої площі поверхні і є найбільш точним її значенням, яке можна отримати пофракційно-осереднювальним методом.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор роботи заявляє, що не має конфлікту інтересів.

G. A. Petasyuk

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Comparative analysis of the results of the external specific surface area of high-strength and Increased strength synthetic diamond grinding powders determining by extrapolation-analytical and fractional-averaging methods

A review of publications was conducted, which stated the positive applied significance of the specific surface area of synthetic diamond abrasive powders and methods of influencing the change in its value. Trends in the modern development of methods for indirect-analytical determining of the external specific surface area as a technological property of such abrasive powders were analyzed. Methodological features of the application of extrapolation-analytical and fractional-averaging methods for determining the external specific surface area of

synthetic diamond abrasive powders were studied. A comparative study of the application of these two methods to high-strength and increased-strength synthetic diamond abrasive powders was performed. It was established that the application of the fractional-averaging method to high-strength synthetic diamond abrasive powders allows obtaining more reliable indicators of the external specific surface area in comparison with those provided by the extrapolation-analytical method. The degree of increase for the studied high-strength grinding powders was from 1.5 to 2.35 times. Factors influencing the increase in the specific surface area and methods of their application were identified. Practical recommendations were formulated regarding the validity and feasibility of using the fractional-averaging method for determining the external specific surface area of synthetic diamond grinding powders of this class.

Keywords: High-strength synthetic diamond grinding powders, 3D grain shape, external specific surface area, index, determining methods.

1. 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.
2. Petasyuk G.A., Sirota Yu.V. 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.* 2012. Vol. 34, no. 3. P. 200–208.
3. Petasyuk G.A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 2. P. 128–139.
4. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Lavrinenko V.I., Poltoratsky V.G., Bilochenko V.P., Sokolyuk D.V. 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. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 3. P. 199–202.
5. 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.
6. Novikov N.V., Nikitin Yu.I., Petasyuk G.A. Computer based diagnostic sieve for identification of grit size and grit size distribution in microscopic samples of diamond grits. *J. Superhard Mater.* 2003, Vol. 25, no. 3. P. 68–78.
7. Шлифпорошки синтетических алмазов марок AC200, AC250, AC300, AC350, AC400. ТУ У 28.5-054717377-072–2003.
8. Prikhna T.O., Ilynska H.D., Lavrinenko V.I., Zaitseva I.N., Sheiko M.N., Smokvyna V.V., Tymoshenko V.V. Improvement of physical and mechanical characteristics of synthetic diamond powders synthesized from ferroalloys for increasing the wear resistance of the diamond dressing tool. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44. P. 139–150.
9. Petasyuk G.A. Methodological features of determining the external specific surface area of high-strength synthetic diamond grinding powders. *J. Coat. Sci. Technol.* 2025. Vol. 12. P. 1–9.
10. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Lavrinenko V. I., Sirota Yu. V. Methodological features of quantitative analysis for the characteristics of the cutting edges of high-strength grinding powders of synthetic diamond. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 5. P. 396–407.
11. Petasyuk G.A. A new fraction-averaging approach to the diagnostics of the technological properties of high-strength synthetic diamond powders. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 453–456.
12. Petasyuk G.A. System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection. *Powder Technol.* 2014. Vol. 264. P. 78–85.
13. Petasyuk G.A. A system-analogue method of identification of geometric shape of the abrasive grain projection. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 4. P. 277–287.
14. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Sirota Yu.V. Extension of the applied capabilities of the analogue search method for the shape identification of a projection of abrasive powder grains. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 5. P. 366–374.
15. Petasyuk G.A., Bochechka O.O. Automated identification of the 3D-shape of grains for high-strength grinding powders of synthetic diamond. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 3. P. 239–250.
16. Son K.-S., Lee J.-H., Choi Y.-J., Jung U.-Ch., Chung W.-S. Effect of intermediate layer coated diamond particles on performance of diamond tool. *J. Surf. Sci. Eng.* 2013. Vol. 46, is. 5. P. 216–222.

17. Hong Q., Zhou R., Guo X., Wang Zh., Yin Sh. A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 137, art. 110093.
18. Лавриненко В.І., Бочечка А.А., Полторацкий В.Г., Солод В.Ю. Модифицирование шлифпорошков синтетического алмаза для шлифовального инструмента. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2020. Т. 6. С. 56–59.
19. Lavrinenko V.I., Bochechka O.O., Poltoratskyi V.G., Smokvyna V.V., Solod V.Yu. Improving the performance of diamond grinding tool by modifying the synthetic. *Diam. Surf. Sci. Innov.* 2024. Vol. 20, no. 1. P. 3–14.
20. Лавріненко В.І., Солод В.Ю., Ільницька Г.Д., Смоквіна В.В., Кашинський І.С. Дослідження теплового впливу на зміну поверхневого шару алмазів і супутніх інструментальних матеріалів (огляд). *Зб. наук. праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2023. Т. 2, № 43. С. 39–55.
21. Edtmaier C., Weber L., Tavangar R. Surface modification of diamonds in diamond/al-matrix composite. *Adv. Mater. Res.* 2009. Vol. 59. P. 125–130.
22. Li J.-W., Fang W.-J., Wan L., Liu X.-P., Hu W.-D., Cao D., Han K., Li Y.-Y., Yan Y.-G. Research on the bonding properties of vitrified bonds with porous diamonds and the grinding performance of porous diamond abrasive tools. *Diam. Relat. Mater.* 2022. Vol. 123, art.108841.
23. Lavrinenko V.I., Poltoratskyi V.G., Pasichnyi O.O., Solod V. Yu. Using diamond grinding powders with combined coatings on diamond grain surfaces in abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46. P. 238–243.
24. Tokura H., Yoshikawa M. Heat treatment of diamond grains for bonding strength improvement. *Jour. Mater. Sci.* 1989. Vol. 24. P. 2231–2238.
25. Smokvyna V.V., Lavrinenko V.I., Ilnytska H.D. Defectiveness of low strength synthetic diamond grains: negative and positive aspects in case of using them in a grinding tool. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 4. P. 306–315.
26. Лавріненко В.І., Смоквіна В.В., Солод В.Ю. Новітні напрацювання в отриманні та застосуванні шорстких та пористих алмазів (Огляд). *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: зб. наук. праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю*. Житомир, 9–10 лист. 2023 р.
27. Богатырева Г.П., Никитин Ю.И., Панова А.Н., Полторацкий В.Г. Влияние модифицирования поверхности на термостойкость и термопрочность шлифпорошков из синтетических алмазов. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2006. Вып. 9. С. 293–297.
28. Ni P., Zhao Zh., Yang W., Deng X., Wu Sh., Qu Zh., Jin F.. Effect of feedstock diamond powder property on microstructure and mechanical properties of polycrystalline diamond compacts. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2023. Vol. 111, art. 106102.
29. Ke X., X Yang., Prasad V., Ivankovic A., Murphy N., Rezvani E., Zhang Y. Effect of diamond grain roundness on mechanical properties of PDC. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2025. Art. 107308.
30. Nikitin Yu.I., Petasyuk G.A. Specific surface area determination methods, devices, and results for diamond powders. *J. Superhard Mater.* 2008. Vol. 30, no. 1. P. 58–70.
31. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, Surface Area and Porosity. 2nd ed. London: Academic Press, 1982. 303 p.
32. 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.
33. ДСТУ 3292–95 Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Введ. 01.01.96.
34. YUMPU DialInspect.OSM DialInspect.OSM – Vollstaedt-Diamant GmbH. <https://www.yumpu.com>
35. Vollstaedt H., List E. Controlling the stability of superabrasive powders. *Proc. 4th Zhengzhou Int. Superhard Mater. Rel. Prod. Conf. (4th ZISC)*, Zhengzhou, P.R. China, 2003.
36. Никитин Ю.И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. Киев: Наук. думка, 1984. 264 с.

Надійшла до редакції 28.11.25

Після доопрацювання 15.01.26

Прийнята до опублікування 22.01.26