

Исследование процессов обработки

УДК 621.923

В. І. Лавріненко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*lavrinenko@ism.kiev.ua

Сучасні досягнення у розробці абразивних інструментів і дослідженні процесів алмазно-абразивної обробки (матеріалознавчий підхід). Огляд

Зроблено огляд сучасних досягнень у розробці абразивних інструментів і дослідженні процесів алмазно-абразивної обробки. Показано необхідність врахування процесів взаємодії між абразивним і оброблюваним матеріалом та впливу елементів оброблюваного матеріалу на знос абразивних зерен, а також важливість класифікації алмазів за формою, особливо у широкому діапазоні їх міцності. Наведено особливості застосування CVD-алмазів і способи зміни граничної зони алмаз–зв'язка для покращення утримання зерен.

Ключові слова: алмазно-абразивна обробка, матеріалознавство, алмаз, CVD-алмаз, зв'язка круга, взаємодія в зоні різання.

Сучасні зміни в освітній сфері та в концепціях підготовки аспірантів і здобувачів степені PhD свідчать про те, що матеріалознавчим питанням в дослідженні процесів механічної обробки необхідно приділяти більшу увагу. При дослідженні процесів створення й застосування інструменту з надтвердих матеріалів важливим є вивчення лезової [1] і алмазно-абразивної [2] обробки. Даний огляд присвячено досягненням вітчизняних і світових дослідників у цьому матеріалознавчому напрямку за останні десять років. В основному розглянуто публікації, в яких абразивний і оброблюваний матеріали були активними елементами впливу на процес оброблювання.

Сучасна абразивна обробка у машинобудуванні вже є не лише засобом отримання необхідної шорсткості оброблюваної поверхні виробів, а й одним з найбільш продуктивних методів обробки різноманітних матеріалів. На нинішній час у вітчизняній індустрії обсяг абразивної обробки складає більше 30 % усієї металообробки, а при обробці підшипників – за 70 %. В світовій практиці загальний обсяг абразивної обробки сягає 50 % [3]. Для ефективного застосування абразивних кругів необхідно обов'язково враховувати зернистість абразивного матеріалу і твердість круга. Водночас важливо враховувати

інші властивості абразивного матеріалу. Так, коефіцієнт шліфування кругів з нормального електрокорунду відрізняється від коефіцієнта шліфування кругів з білого електрокорунду у 0,8 разів, хромтитаністого і хромистого електрокорундів – у 1,2 рази, з монокорунду – у 1,5 разів, а коефіцієнт шліфування кругів з карбиду кремнію чорного відрізняється у 0,8 разів від коефіцієнта шліфування кругів з карбиду кремнію зеленого [3].

В [4] досліджено вплив оброблюваного матеріалу і матеріалу зв'язки абразивного круга на процес абразивної обробки. Так, хімічний склад металу, що обробляють відрізними кругами, суттєво впливає на якість процесу різання, степінь окиснення стружки і якість поверхонь, що розрізають. Наприклад, алюміній, кремній, нікель та інші матеріали здатні утворювати хімічно стійку плівку, що збільшує стійкість сплавів до окиснення. Навпаки, підвищення вмісту вуглецю знижує стійкість сплавів до окиснення і у такий спосіб сприяє утворенню стружки та полегшує її видалення з поверхні круга. Підвищення ступеня окиснення полегшує процес різання, а пониження – погіршує [4]. Такий результат співпадає з висновками у дослідженнях [2], що виконували в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (ІНМ).

В [4] також досліджено властивості зв'язки абразивного круга – активних наповнювачів. Наприклад, при використанні бакелітової зв'язки хімічно активні наповнювачі (пари сірки і/або галогенів) попадають в зону різання і полегшують різання неіржавіючих і легованих сталей. Для абразивних підприємств Євросоюзу розроблено нову 3S-технологію, що базується на застосуванні системи адаптивних наповнювачів і фенольних смол нового покоління. В комплексі наповнювачі регулюють процес різання за рахунок високоендотермічної реакції, яка допомагає при різанні розсіювати тепло із зони різання.

Введення активних наповнювачів стимулювало ще один напрямок в абразивному інструменті, а саме створення високопористих абразивних інструментів [5, 6], які нині досить активно просуваються на ринок України [7]. Суттєвим недоліком високопористих інструментів є їх недостатня міцність. Крім того, надлишки зв'язки, що оточують поверхню зерен, зменшують розміри пор і збільшують тертя при шліфуванні. В [5] для вирішення цих недоліків запропоновано наступні шляхи: по-перше, вводити нарівні з алмазними порошками основної зернистості, ще і більш дрібні – для збільшення числа точкових контактів зерен між собою, а по-друге, вводити додатковий пороутворювач, який збільшує поруватість і, що важливо, в момент формування витісняє зв'язку з поверхні зерен. Аналогічний підхід наведено в [6] і для створення високопористих кругів із кубічного нітриду бору. Абразивними наповнювачами у цьому разі були зерна мікрокристалічного корунду, виготовленого за SG-технологією, розміром на два порядки меншим, ніж розміри зерен cBN, а у якості пороутворювачів застосовували мікросфери з алюмосилікату розміром від 5 до 560 мкм і частинки подрібнених фруктових кісточок розмірами, що були аналогічними розміру зерен cBN. Як наслідок, такі круги можна ефективно застосовувати при шліфуванні загартованих сталей без охолодження або з мінімальним охолодженням масляним туманом.

Наведене вище свідчить про те, що важливим вихідним параметром абразивного матеріалу в інструменті є його зернистість. Водночас в [8–10] показано, що однією з основних причин зниження ефективності шліфування є виготовлення інструменту зі шліфувальних зерен довільної форми. При врахуванні цього фактору і цілеспрямованому варіюванні форми зерен можна добитися більшого ефекту від застосування кожного одиничного зерна, класифікованого за формою [8]. Цей фактор було враховано в [9], де використо-

ували нові методи вимірювання й опису форми алмазних частинок, що змінювалась з абразивним зношуванням. Форма зерен алмазу, разом з їх механічними властивостями, є важливим чинником в оцінці ефективності абразивного процесу. Особливо це є актуальним для одношарового алмазного інструменту, де форма зерна не спотворена внаслідок процесів пресування і спікання, що зазвичай застосовуються для отримання багатошарового алмазного інструменту.

В [9] показано, що розмір і форма є нероздільними поняттями при опису частинок, у яких чітко не визначено форму (тобто не сферичні, не кубічні та ін.). Найбільш важливими для оцінки алмазних зерен є діаметр (мінімальний, середній і максимальний), співвідношення діаметрів, опуклість, периметр і точність форми. Ці параметри є основою для всебічної характеристики алмазних зерен і контролю їх якості. Такий аналіз зерен алмазів широко застосовано в [11], а також в [10], де було проаналізовано дані по формі алмазних зерен в широкому діапазоні їх міцності (від АС15 до АС100) і зміну показників продуктивності шліфування зразків природного каменю 3-ї групи оброблюваності. В [10] показано, що при зростанні міцності зерен від АС15 до АС80 продуктивність шліфування пропорційно зростає і коефіцієнт шліфування для АС80 збільшується в 1,88 разів відносно АС15 (коефіцієнт шліфування дорівнює 1,0), надалі (для АС100) він майже не зростає (1,92), тобто логічно припустити, що форма зерен змінюється вже не суттєво. Важливо провести дослідження з оцінки вказаних вище характеристик форми алмазних зерен у широкому діапазоні їх міцності й визначити закономірності їх зміни при цьому, оскільки в публікаціях таких даних не було знайдено.

Останнім часом більшу увагу почали приділяти електролітичним композитним покриттям, насамперед нікелевим [12–14]. В таких одношарових інструментальних покриттях є можливість реалізації відносно нескладного способу упорядкованого розташування алмазних зерен [12], досягнення необхідної орієнтації навіть частково покритих алмазів [13] й отримання алмазних магнітних абразивів [14]. Тому для таких покриттів варто використовувати алмази, які отримують при хімічному синтезі за допомогою методу Chemical Vapour Deposition (CVD) з різними засобами активації газової фази [15–18]. Перевагою CVD-алмазів є те, що вони за своїми фізико-механічними властивостями наближаються до природних алмазів і мають теплопровідність в межах 900–1200 Вт/(м·К) [15]. CVD-алмази можуть бути застосовані у тонкошаровому покритті (наприклад, на різальних інструментах, в [16] описано технологію заточування інструменту з алмазним CVD-покриттям з одночасним контролем стану різальної кромки) і товстошаровому покритті (для абразивного інструменту [17, 18]). Крім того, перспективним є застосування CVD-алмазів в алмазних правлячих інструментах [15].

Технологію отримання CVD-алмазного шару шліфувального інструменту детально описано в [17]. Такий алмазний шар може складатися з багатьох кристалітів і мати товщину від одного до декількох десятків мікрометрів (рис. 1).

При хімічному осадженні кристали алмазу спочатку ростуть у всіх напрямках (рис. 1, а), але при збільшенні до таких розмірів, за якими вже торкаються один одного, зростання відбувається, головним чином, у вертикальному напрямку. Поверхня такого шару CVD-алмазів формується з кристалітів, які мають пірамідальну або чотиригранну форму (рис. 1, б). Надалі деякі кристаліти зростають швидше, аніж інші, їх розмір зростає, а кількість кристалітів на поверхні відповідно зменшується зі збільшенням товщини поверхневого шару (рис. 1, в).

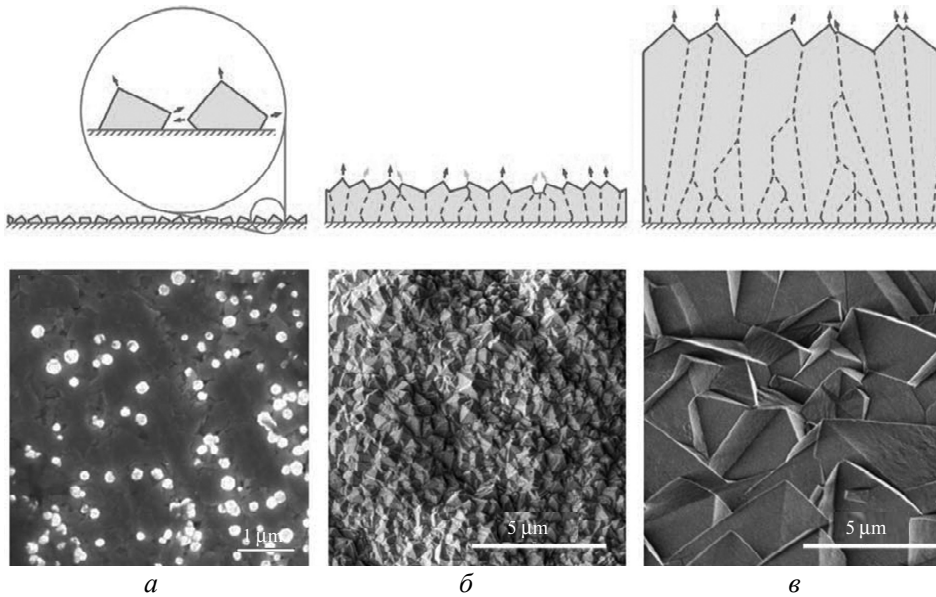


Рис. 1. CVD-алмазний шар: початок зростання (а), тонкий шар (б), товстий шар (в) [17].

В залежності від терміну витримки формується шар певної товщини і шорсткості [17]. Хімічне осадження відбувається у вакуумній камері у газовій суміші водню і 0,5–2 % (за масою) метану за тиску 100 ГПа і швидкості газового потоку 1 л/хв. Активації газової фази було досягнуто завдяки підігріву електричним струмом через танталові елементи. Час осадження за температури інструменту ~ 800 °С становив 15–80 год в залежності від розміру інструменту і необхідної товщини покриття. Отриманий алмазний інструмент з мікрористалічними CVD-алмазами розміром від 0,5 до 25 мкм може бути застосовано для прецизійного й ультра-прецизійного шліфування кераміки, твердих сплавів і скла. На рис. 2 наведено шліфувальний круг прямого профілю діаметром 80 мм під час осадження і після його закінчення. Корпус диску зроблено з нітриду кремнію [17].

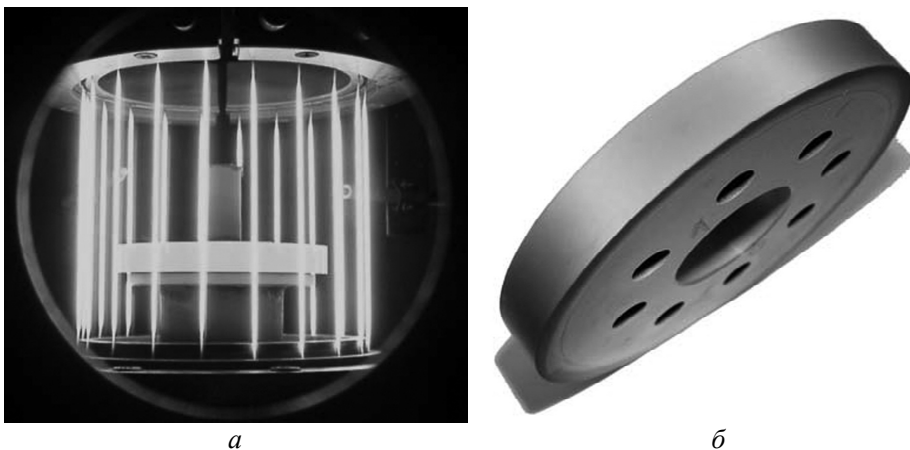


Рис. 2. CVD-алмазний шліфувальний круг діаметром 80 мм під час (а) і після (б) нанесення покриття CVD [17].

В [12, 13] досліджено питання, пов'язані з утриманням алмазних зерен, що важливо для електролітичних композитних одношарових зв'язок, але ще більш актуально для високотемпературних багатшарових металевих зв'язок при утриманні в них зерен високої міцності. Також такі дослідження було проведено в [19], де в систему Fe–Cu–Ni–Sn додавали домішку CrB₂ для зменшення графітизації на границі поділу алмаз–металічна зв'язка і створення в ній відповідних наноструктур, а відтак, покращення утримання алмазних зерен. Для системи Fe–Cu–Co–Sn ці питання розглянуто в [20], де показано, що графіт накопичується на границі між алмазним зерном і зв'язкою (рис. 3) і погіршує адгезію між ними.

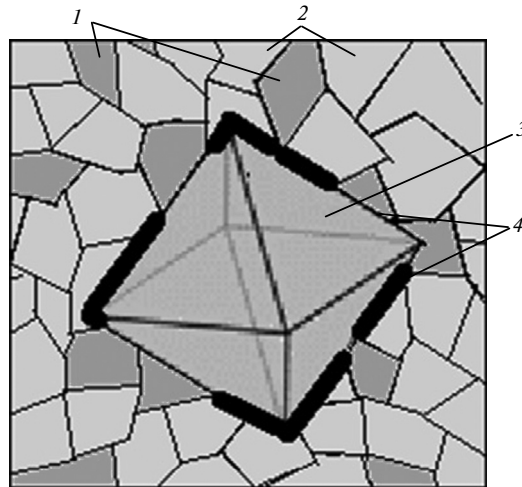


Рис. 3. Схема графітизації алмазу в зв'язці згідно з [20]: 1 – Cu-фаза, 2 – Fe-фаза, 3 – алмаз, 4 – графіт,

Вказану проблему досліджували в [20] при введенні в систему Fe–Cu–Co–Sn добавок нанопорошків Mo, WC і ZrO₂. Було встановлено, що у присутності нанопорошків Mo і ZrO₂ процес графітизації посилюється, а додавання нанопорошку WC зменшує графітизацію на 25–30 %. Позитивну роль домішки WC в [20] пов'язують з посиленням (до 70 %) блокування поверхні алмазного зерна, це покращує адгезію зв'язуючої речовини до алмазних зерен і, відповідно, збільшується термін експлуатації абразивних інструментів [20].

Розглянемо інше актуальне питання, а саме взаємодію алмазного зерна з різними сучасними матеріалами при мікрорізанні. Особливості мікрорізання свого часу вивчали досить активно. Але нині з'явилися нові матеріали, для яких такі особливості не вивчено. Так, в [21] представлено результати дослідження мікрорізання алмазним інструментом твердих сплавів марки “Вол-Кар” з нанорозмірними зернами монокарбіду вольфраму. Встановлено, що товщина зрізу зерном для таких матеріалів має бути не менше 0,3 мкм, оскільки за меншої товщини значно підвищується викришування мікрокренок алмазного зерна, тобто вказаний нанорозмірний матеріал більш активно опирається мікрорізанням. В [22] досліджено особливості мікрорізання при ультра-прецизійному шліфуванні монокристалічного кремнію. За проведеними розрахунками і експериментальними дослідженнями показано, що для досягнення умов пластичного режиму оброблення максимальна глибина різання одиничним зерном не повинна перевищувати 0,221 мкм. За цих умов буде досягнуто найменшу глибину дефектного шару на обробленій поверхні монокристалічного кремнію [22]. В [23] досліджено особливості мікрорізання

алмазним матеріалом – синтетичним алмазом з підвищеним вмістом азоту (марка “алмазот”). Було вивчено особливості зношування такого алмазу при різанні абразивного матеріалу, а саме шліфувального круга з електрокорунду 25А. В [23] показано, що механізмом зносу кристалів алмазоту (як і звичайних синтетичних алмазів) є крихке руйнування, що превалює в умовах мікро-різання абразивного матеріалу. Разом з тим, підвищення температури в зоні контакту алмазоту з абразивним матеріалом, утворення дефектного поверхневого шару на алмазоті, переніс зв’язуючого абразивного матеріалу на поверхню кристалу алмазоту приводять до зміни механізму зносу на адгезійний. Адгезійна взаємодія (і механізм зносу) алмазоту з оброблюваним абразивним матеріалом проявляється через переніс зв’язки (оксидного скла) останнього на поверхню зерна алмазоту. Оксидне скло при підвищеній температурі в зоні різання знаходиться у в’язко-пластичному стані, тому змочує поверхню алмазоту і взаємодіє з нею. Як наслідок, частинки скла, що знаходяться у мікротріщинах і порах поверхні площинок зносу, в умовах динамічного контакту з поверхнею абразивного круга змінюють механізм зносу зерна алмазоту [23].

Враховуючи викладені вище особливості зносу зерен, особливу увагу приділяють дослідженню стану (топографії) різальної поверхні алмазних кругів. Так, в [24] визначали знос різальної поверхні алмазного шліфувального круга при дослідженні його 3D-топографії. Відбувалося топографічне вимірювання і 3D-візуалізація як вихідної робочої поверхні круга, так і після шліфування твердосплавних пластин. Відомо, що працездатність поверхонь тертя інструментів функціонально пов’язана з площею їх опорної поверхні, саме тому в [24] значення опорної і відносної опорної довжини профілю слугувало параметром характеристики поверхні, що досліджували. Оцінку зносу поверхні круга при шліфуванні рекомендовано проводити по параметру Rpk , який відповідає за знос вершин алмазних зерен, зменшення цього параметру свідчить про більший знос цих вершин. В [25] розглянуто методологію отримання 3D-моделі рельєфу робочої поверхні шліфувальних кругів, придатної для аналізу її характеристик в системі морфологічного аналізу триангуляційних моделей, яку було розроблено в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”. Модель було створено за допомогою набору знімків ділянок робочої поверхні круга, які різняться між собою орієнтацією простору, що досліджують у процесі зйомки. Основною перевагою запропонованого методу є можливість отримання адекватних 3D-моделей поверхонь шліфувальних кругів при відносно невеликій складності реалізації. В [26] топографії робочої поверхні круга моделювали математично з урахуванням траєкторії руху зерен на основі кінематичного відношення між кругом і заготовкою. Для зерен, випадковим чином розподілених на поверхні круга, враховували форму, розмір, орієнтованість, щільність розподілу по поверхні круга. Виявлено, що топографія поверхні шліфувального круга має вплив на формування топографії поверхні, що оброблюють, надано приклади обрахунку такої поверхні при ультра-прецизійному шліфуванні монокристалічного кремнію.

Водночас оцінка топографії різальної поверхні круга повинна враховувати те, що в процесі шліфування з оброблювальною поверхнею контактує не вся поверхня круга, а лише її частина, що викликано хвильовими формозмінами на поверхні круга. На таке неповне контактування вказували раніше в [27], а на хвильові формозміни – в [28]. Це підтверджується і сучасними дослідженнями [29], де вказано на утворення хвиль на робочій поверхні круга. Це означає, що

при оцінці топографії робочої поверхні треба враховувати, на якій саме частині робочої площі круга знаходиться та ділянка, що оцінюється. В [28] вказано на переміщення хвилі по робочій поверхні круга і нерівномірність цього переміщення. Як наслідок, відбувається циклічність в процесі шліфування. На циклічність у поновленні різальної здатності круга звернуто увагу і в сучасних дослідженнях зміни показників шорсткості [30] або періодичності зміни висоти виступання зерен і зносостійкості круга [31]. Це явище можна використати для підвищення ефективності процесу шліфування твердосплавних виробів [30] або виробів з полікристалічних надтвердих матеріалів [31].

Останнім часом стає актуальним шліфування точних фасонних поверхонь на спеціальних верстатах із застосуванням алмазних кругів невеликого діаметру і робочим шаром з алмазами малої зернистості. Вище було розглянуто круги з CVD-алмазами, що завдяки вказаним вище їх властивостям можна успішно застосовувати для сухого шліфування виробів з полікристалічних алмазів (PCD), а саме прецизійної радіусної частини в інструментах з PCD [18]. В [32, 33] показано на прикладі, як на операціях полірування застосовують алмазні круги на полімерних зв'язках, наприклад, при багатокординатній обробці імплантів з оксидної кераміки (рис. 4) [32].

Під час прецизійного шліфування лінз Френеля з карбіду кремнію застосовують полімерні алмазні шліфувальні круги з доведеною різальною кромкою для досягнення необхідних вимог. В останні роки лінзи Френеля широко використовують в сонячних елементах, інфрачервоних системах нічного бачення та у мікромедичних пристроях через їх відмінні оптичні показники. Разом з тим, їх обробка є складною через твердість і крихкість карбіду кремнію. Вирішується це шліфуванням на верстатах з високою точністю застосуванням алмазних шліфувальних кругів з алмазами невеликого діаметру на полімерних зв'язках із системою прецизійного правлення кромки круга (рис. 5) [33].

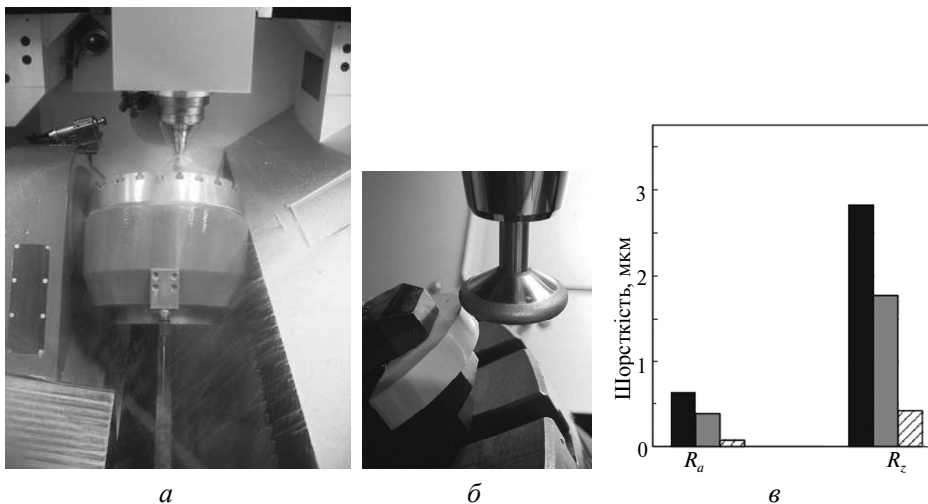


Рис. 4. 5-ти координатна алмазна обробка імплантів з оксидної кераміки: *a* – процес шліфування (швидкість обертання круга – 30 м/с, глибина шліфування – 0,02 мм, подача – 1000 мм/хв, діаметр круга – 30 мм радіусом 2,5 мм, розмір зерна – 46 мкм, зв'язка гальванічна і керамічна); *б* – процес полірування (швидкість обертання круга – 6,4 м/с, глибина шліфування – 0,4 мм, подача – 100 мм/хв, діаметр круга – 12,2 мм, розмір зерна – 20 мкм, зв'язка резинова); *в* – показники шорсткості поверхні імплантату після шліфування гальванічним (чорний колір), керамічним (сірий колір) і полірування резинним (заштриховано) кругом [32].

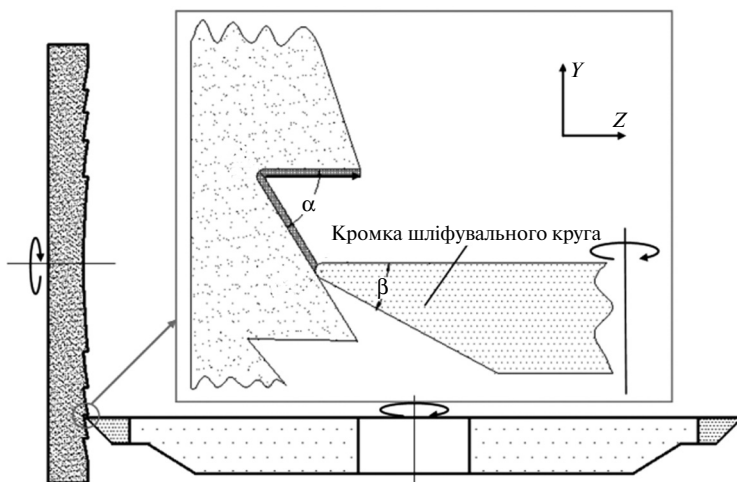


Рис. 5. Принципова схема для шлифування лінзи Френеля [33].

В даному огляді зроблено аналіз досягнень у розробках алмазного інструменту і дослідженні процесів алмазно-абразивної обробки з врахуванням як складу алмазно-абразивних зерен, так і зв'язки, що їх утримує, а також особливості їх взаємодії з оброблюваним матеріалом, тобто з врахуванням матеріалознавчого підходу в дослідженні процесів алмазно-абразивної обробки.

Сделан обзор современных достижений в разработке абразивных инструментов и исследовании процессов алмазно-абразивной обработки. Показана необходимость учитывать процессы взаимодействия между абразивным и обрабатываемым материалом, влияние элементов обрабатываемого материала на износ абразивных зерен, а также важность классификации алмазов по форме, особенно в широком диапазоне их прочности. Приведены особенности использования CVD-алмазов и способы изменения граничной зоны алмаз-связка для улучшения удержания зерен.

Ключевые слова: алмазно-абразивная обработка, материаловедение, алмаз, CVD-алмаз, связка круга, взаимодействие в зоне резания.

The paper reviews the latest advances in the development of abrasive tools and investigation of diamond abrasive machining processes. The review demonstrates the necessity of taking into account the interaction between abrasive and workpiece materials as well as the influence of elements of a workpiece material on wear of abrasive grains; also, it shows the importance of sorting diamond grains by shape, especially within a wide range of their strength. Special features of application of CVD diamonds and the methods for changing the diamond-bond interface zone in order to improve grain retention are discussed.

Keywords: diamond abrasive machining, materials science, diamond, CVD diamond, wheel bond, interaction in the cutting zone.

1. Клименко С. А., Подчерняева И. А., Береснев В. М. и др. Ионно-плазменное покрытие $\text{AlN}-(\text{TiCr})\text{B}_2$ для режущего инструмента из поликристаллического сверхтвёрдого материала на основе кубического нитрида бора // Сверхтв. материалы. – 2014. – № 3. – 85–97.
2. Лавріненко В. І., Солод В. Ю. Окислення або оксидні матеріали в зоні обробки кругами з НТМ як чинник впливу на показники процесу шлифування // Там же. – 2016. – № 6. – 52–60.
3. Эсмантович С. Н. Выбор характеристик шлифовальных кругов. Оптимизация процесса выбора в реальных условиях предприятий // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2016. – № 5. – С. 16–19.
4. Эсмантович С. Н. Отрезные круги. Применение адаптивных наполнителей // Там же. – 2016. – № 2. – С. 32–38.

5. Крюков А. Ф., Крюков С. А., Грибач А. Е. Инновационно-технологическое обеспечение структурных и прочностных характеристик высокопористых абразивных инструментов // Междунар. науч.-техн. конф. "Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009": Сб. ст. – Волгоград: ВолГАСУ, 2010. – С. 19–21.
6. Старков В. К. Высокопористые круги из кубического нитрида бора для шлифования без охлаждения // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 56–62.
7. Ларшин В. П., Лиценко Н. В., Рябченко С. В. и др. Шлифование зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами из монокристаллического корунда // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2017. – № 2. – С. 26–28.
8. Байдакова Н. В., Байдакова Т. А. Влияние формы абразивного зерна на эксплуатационные свойства инструментов для шлифования // Междунар. науч.-техн. конф. "Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009": Сб. ст. – Волгоград: ВолГАСУ, 2010. – С. 21–22.
9. De Pellegrin D. V., Gorbin N. D., Baldoni G., Torrance A. A. The measurement and description of diamond particle shape in abrasion // 2nd Int. Industrial Diamond Conf., Rome, Italy, 19–20 April, 2007.
10. Пегловский В. В., Сидорко В. И., Ляхов В. Н. Исследование зависимости производительности шлифования природного камня от марки синтетических алмазов в рабочем слое алмазного инструмента // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – Вып. 79. – С. 192–198.
11. Петасюк Г. А. Системно-аналоговий метод ідентифікації геометричної форми проєкції зерен абразивних порошків // Сверхтв. материалы. – 2016. – № 4. – С. 74–89.
12. Ishizuka H., Sung J. C., Tsai M. Y., Sung M. PCD pad conditioners for electrolytic chemical mechanical planarization of integrated circuit with nodes of 45 nm and smaller // 2nd Int. Industrial Diamond Conf., Rome, Italy, 19–20 April, 2007.
13. Zhang Yu, Tani Yasuhiro, Kawahata Yuji, Kirino Okiharu. Proposal of partially ni-coated diamond abrasives for improving grindabilities of diamond tools // 6th Int. Conf. Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2015), Harbin, China, 15–20 Aug., 2015.
14. Bin Yang, Wenzhuang Lu, Wei Feng et al. Adsorption and deposition of micro diamond particles in preparing diamond magnetic abrasives by electroless composite plating // Diamond Relat. Mater. – 2017. – 73. – P. 137–142.
15. Пыжов И. Н., Васильев А. В., Клименко В. Г. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – Вып. 80. – С. 226–235.
16. Yoshiko Sato, Junki Kawamura, Takashi Nagase et al. Sharpening of CVD diamond coated tools by 0.5–10 keV Ar⁺ ion beam // Diamond Relat. Mater. – 2011. – 73, N 7. – P. 954–959.
17. Gabler J., Pleger S., Schafer L. CVD diamond layers with a controlled roughness enable high-precision and micro grinding tools // 2nd Int. Industrial Diamond Conf., Rome, Italy, 19–20 April, 2007.
18. Takuya Semba, Yoshifumi Amamoto, Hirokazu Fujiyama. Reactive ion etching of microgrinding tool made of polycrystalline diamond // 6th Int. Conf. Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2015), Harbin, China, 15–20 Aug., 2015.
19. Бондаренко М. О., Мечник В. А., Супрун М. В. Особливості усадки і її швидкості в системі С_{алмаз}-Fe-Cu-Ni-Sn-CrB₂ при гарячому пресуванні зразків, попередньо отриманих вільним спіканням // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 4. – С. 29–39.
20. Sidorenko D. A., Zaitsev A. A., Kirichenko A. N. et al. Interaction of diamond grains with nanosized alloying agents in metal-matrix composites as studied by Raman spectroscopy // Diamond Relat. Mater. – 2011. – 38. – P. 59–62.
21. Стрельчук Р. М. Работоспособность алмазных зерен при микрорезании твердых сплавов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2014. – Вып. 84. – С. 211–214.
22. Yujie Niu, Yifan Dai, Chaoliang Guan et al. Study on the technology of ultra-precision grinding for aspheric mirror of monocrystalline silicon // 6th Int. Conf. Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2015), Harbin, China, 15–20 Aug., 2015.
23. Кузей А. М., Лебедев В. Я. Механизмы изнашивания алмазота в однокристалльном инструменте при правке абразивных кругов // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2014. – Вып. 84. – С. 145–152.

24. *Бабенко Е. А., Фадеев В. А., Федорович В. А., Фидлер Ф.* Определение износа режущей поверхности алмазного шлифовального круга путем исследования его 3D топографии // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2011. – Вып. 80. – С. 15–21.
25. *Доброскок В. Л., Шпилька А. Н., Котляров В. Б.* Получение триангуляционной модели рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2014. – Вып. 84. – С. 85–92.
26. *Wang Qiuyan, Liang Zhiqiang, Wang Xibin, et al.* Modeling surface topography in ultra-precision grinding process // 6th Int. Conf. Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2015), Harbin, China, 15–20 Aug., 2015.
27. *Линенко-Мельников Ю. П.* Метод исследования кинетики контактного взаимодействия в системе инструмент–заготовка при шлифовании // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 6. – С. 40–43.
28. *Лавриненко В. И.* Формоизменение режущей поверхности круга как фактор процесса шлифования // Там же. – 2000. – № 5. – С. 45–52.
29. *Кудрявцева Н. Н., Орлова Т. Н.* Влияние вязко-упругих свойств модифицированной органической связки на снижение интенсивности автоколебаний при шлифовании // Междунар. науч.-технич. конф. “Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009”: Сб. ст. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. – С. 168–171.
30. *Дитиненко С. А., Крюк А. Г.* Прецизионная алмазно-абразивная обработка цилиндрических твердосплавных изделий // Фізичні та комп’ютерні технології. Матеріали XXIII науково-технічної конференції, 21–22 груд. 2017 р. – Харків–Одеса: ОНПУ, 2018. – С. 122–129.
31. *Грабченко А. И., Дюбнер Л. Г., Пыжов И. Н.* Повышение эффективности обработки ПСТМ на основе использования явления периодичности процесса шлифования // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2011. – Вып. 80. – С. 43–55.
32. *Denkena B., Reichstein M., van der Meer M.* Machining ceramic surfaces with adaptable diamond tools for complex implants // 2nd Int. Industrial Diamond Conf., Rome, Italy, 19–20 April, 2007.
33. *Yongcheng Pan, Bing Guo, Qingliang Zhao.* Precision grinding of fresnel molds on silicon carbide using resin-bonded diamond grinding wheels with sharp edge // 6th Int. Conf. Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2015), Harbin, China, 15–20 Aug., 2015.

Надійшла 12.02.18