

8. Zhang W. Q., Li Y., Zhang S., et al. (2024). Diamond parameter design and assessment of a novel 3D printed diamond grinding wheel with linear cooling channels. *Diamond and Related Materials*, 150, 111760.
9. Xu Y., He Y., Huang G., et al. (2024). Numerical simulation and experimental investigation of the molten pool evolution and defects formation mechanism of Selective laser melted CuSn20/Diamond composites. *Materials & Design*, 243, 113082.
10. Deja M., Zieliński D., Agebo S. W. (2024). Study on the wear characteristics of a 3D printed tool in flat lapping of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic materials. *Wear*, 556–557, 205515.
11. Bao Z., Fang C., Hu Z., Yan Z. (2024). Research on composite pattern design and lapping performance of fixed abrasive pads controlled by multi-physical fields. *Precision Engineering*, 91, 14–26.
12. Zhou W., Takase N., Dong M., et al. (2022). Elucidating the impact of severe oxidation on the powder properties and laser melting behaviors. *Materials & Design*, 221, 110959.
13. Zhang S., Ding M., Wang L., et al. (2022). Laser powder bed fusion of diamond/N6 MMCs enabled by Ni-Ti coated diamond particles. *Materials & Design*, 217, 110635.

УДК 621.923:621.715.2

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-314-329

**В.І. Лавріненко**, доктор технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, e-mail: lavrinen52@gmail.com*

## **СУЧАСНІ НАПРАЦЮВАННЯ В НАПРЯМКУ ЕФЕКТИВНОЇ ОБРОБКИ PCD, SCD ТА CVD АЛМАЗІВ ДЛЯ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В АЛМАЗНО-ГАЛЬВАНІЧНОМУ РОБОЧОМУ ШАРІ ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРАВЛЯЧОГО ІНСТРУМЕНТУ (ОГЛЯД)**

*В статті зупинена переважна увага на сучасних публікаціях, присвячених ефективній обробці поверхонь PCD, SCD та CVD алмазів стосовно умов їх застосування в прецизійному алмазному правлячому інструменті. В сучасній літературі досліджено спрямовані впливи на поверхню алмазів для покращення їх оброблюваності і показано, що до трьох найбільш відомих: теплового, лазерного та хімічного, останнім часом додаються дослідження з таких впливів, як плазмового, УФ-опромінення, оточуючого середовища та впливу наявної підкладки до алмазного шару. Для PCD з видаленим кобальтом встановлено, що процес попереднього видалення кобальту може ефективно інгібувати графітизацію алмаза при високій температурі. Підтверджено, що мікроструктура підкладки WC-Co, навіть при невеликих змінах в розмірі зерна WC, суттєво впливає на морфологію CVD-алмазного покриття, якість кристалів і міцність зчеплення. Перехідний метал перетворює зерна полікристалічних алмазних пластин в аморфний вуглець, що забезпечує їх швидке видалення. Для обробки полікристалічного алмазу в алмазні круги на основі смол додають Fe, Ti та Ni, причому Fe показав найкращі результати. В середовищі азоту коефіцієнт тертя між Fe та алмазом є нижчим, аніж на повітрі. Коефіцієнт тертя між алмазом та нітридом кремнію є низьким в повітрі і набагато вищим у вакуумному середовищі. Дослідження показали, що при обробці алмазного матеріалу методом зворотно-поступального ковзання видалення матеріалу відбувається у вигляді графіту, а не механічного сколювання у вигляді фрагментів алмазу. Було встановлено, що високої швидкості зносу вдається досягти за умови опромінення ультрафіолетовим (УФ) світлом, яке, імовірно, каталізує цей фазовий перехід.*

*Для досягнення високоякісної поверхні алмазу шляхом його перетворення в графіт також був розроблений комбінований метод. Він поєднує травлення індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-*

травлення) та подальшу поліровку динамічним тертям. Цей підхід дозволяє ефективно контролювати процес видалення матеріалу та отримувати поверхні з низькою шорсткістю.

**Ключові слова:** алмазно-абразивний гальванічний шар, полікристалічний PCD-алмаз, прецизійний правлячий інструмент, алмазна обробка.

### **Вступ**

Нині машинобудівні підприємства як України, так і за її кордонами, для правки сучасних абразивних кругів, особливо коли йдеться про радіусні ролики з високими вимогами до некруглості та точності виконання округлення вершини, починають використовувати правлячі ролики із суміщенням високоякісних алмазних синтетичних шліфпорошків та крупних вставок з полікристалічних PCD та CVD-алмазів, а також монокристалічних SCD-алмазів. Викликане це тим, що в процесі правки абразивних кругів традиційним алмазним інструментом диспергований абразивний матеріал активно вимиває зв'язку в місцях закладання синтетичних монокристалічних алмазів і останні випадають, не використавши свій ресурс. Для укріплення найбільш навантажених ділянок саме і застосовуються крупні вставки із вказаних вище PCD, CVD та SCD-алмазів. Разом з тим, виникає певна проблема з ефективною прецизійною обробкою таких вставок, тому аналіз сучасних розробок у напрямку вивчення особливостей обробки вказаних алмазних матеріалів є актуальним.

### **Мета статті**

Прецизійний алмазний інструмент для машинобудування вимагає сучасних підходів до формування його поверхневого шару у поєднанні із застосуванням нових алмазних матеріалів, що є одним з чинників підвищення його експлуатаційних характеристик. В даній статті нами зупинена увага на найновіших сучасних розробках 2024–2025 років у напрямку ефективною обробки вставок з полікристалічних PCD та CVD-алмазів, а також монокристалічних SCD-алмазів, стосовно їх застосування в алмазному інструменті.

### **Аналіз сучасних досліджень**

Свого часу нами була звернена увага на розробки, пов'язані із спрямованим впливом на поверхню алмазних зерен для покращення їх оброблюваності [1]. Так, в [2] досліджено гладеньку нанорозмірну поверхню полікристалічного алмазу без пошкоджень, відшліфовану крупнозернистим (D151) алмазним шліфувальним кругом на керамічній зв'язці. За допомогою електронної спектроскопії тут виявлено наявність після шліфування графітового шару товщиною  $\sim 15$  нм, який легко видаляється під час дряпання та високотемпературного окиснення. У [3] розроблено спосіб полірування монокристалічного алмазу без пошкоджень на атомному рівні, який було посилено індуктивно зв'язаною плазмою за атмосферного тиску. Полірування PCD із застосуванням синергії хімічного і механічного впливу розглянуто у [4], де виявлено та узагальнено три основні способи видалення матеріалу під час полірування зразка PCD: міжфазне механохімічне видалення, хімічно стимульоване механічне видалення і механохімічне перетворення алмазу. Як бачимо, застосовані як мінімум три спрямованих впливи на поверхню алмазів для покращення їх оброблюваності: тепловий, лазерний та хімічний. Разом з тим, сучасні розробки додають і інші варіанти такого впливу.

### **Виклад основного матеріалу**

Спочатку звернемо увагу на публікації, пов'язані із властивостями і поведінкою полікристалічних алмазів при різних умовах їх застосування.

Композит з алюмінієвою матрицею, армований частинками карбіду кремнію ( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ), широко застосовується в аерокосмічній промисловості, залізничному транспорті і

електронних компонентах завдяки своїм властивостям, таким як високі питома міцність і жорсткість, зносостійкість, втомна стійкість та гарна термічна стабільність. Але все це створює проблеми для процесу видалення матеріалу, оскільки призводить до швидкого зносу інструмента. Дослідження [5] зосереджено на вивченні механізму зносу при боковому фрезеруванні композитних матеріалів  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  різальними інструментами з полікристалічного кубічного нітриду бора (PCBN) і полікристалічного алмаза (PCD). Результати дослідження засвідчили, що знос бокової поверхні різця з полікристалічного PCBN характеризується утворенням тупого кінчика (закруглення) з подальшим швидким розширенням зони зносу. На противагу цьому, знос різця з PCD проявляється переважно у вигляді незначної виколки на різальній кромці з подальшим поступовим і рівномірним зносом бокової поверхні. Сила різання фрези PCBN є вищою, аніж у фрези PCD (середнє збільшення на 38 %). Фреза PCBN піддається поступовій і неперервній втраті матеріалу в процесі обробки, що призводить до ерозії і затуплення різальної кромки. В той же час, фреза PCD демонструє більш високу стійкість до ерозії і зберігає свою гостру різальну кромку навіть за умов нормального зносу. Тобто, саме PCD за вказаних умов є більш ефективним алмазним матеріалом.

Компактні полікристалічні алмазні різці (PDC) є основними компонентами при бурінні сланцевого газу, і їх продуктивність суттєво впливає на ефективність його добутку. Однією з основних причин виходу з ладу різців є динамічна взаємодія між породою і різцем. В роботі [6] досліджуються кінетична реакція і поведінка пошкоджень PDC при ударах з низькою кінетичною енергією, щоби пояснити характеристики і механізми ударного зносу PDC. Результати свідчать, що сила удару коливається в залежності від удару через зміни стану інтерфейсу.

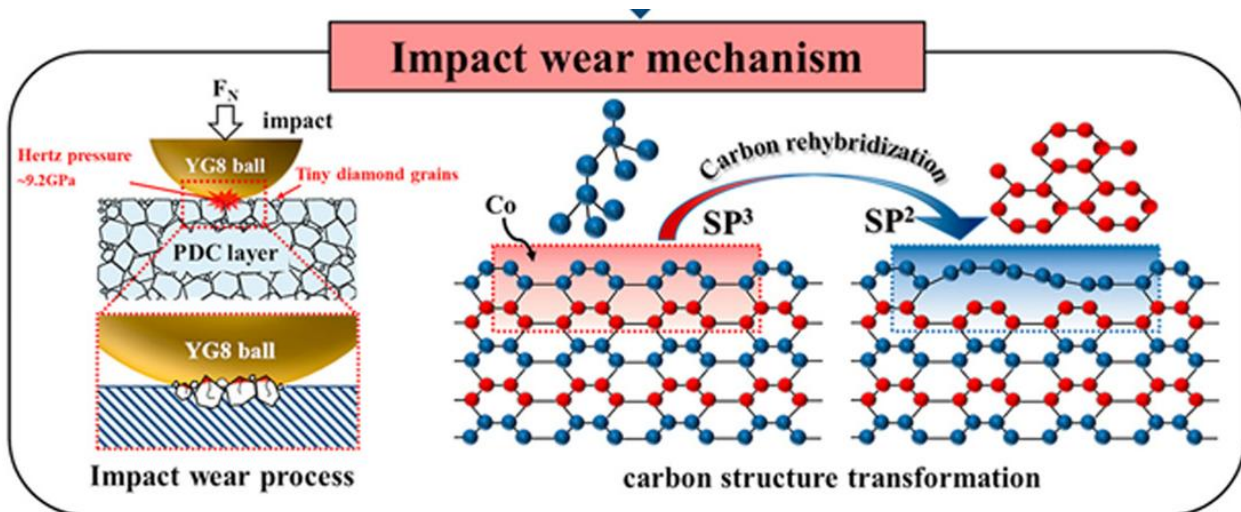


Рис. 1. Принципова схема, яка описує механізм ударного зношування PDC при низькокінетичному впливові [6]

Завдяки пружно-пластичним властивостям PDC 87 % кінетичної енергії витрачається на пластичну деформацію і руйнування. По-друге, час контакту і швидкість поглинання кінетичної енергії відносяться тільки до ударної маси. Час контакту позитивно корелює з масою, тоді як швидкість поглинання кінетичної енергії змінюється у протилежному напрямку. Крім того, руйнування алмаза відбувається при низькому накопиченні кінетичної енергії, всього 0,059 Дж. Було встановлено, що каталіз кобальту і вплив напружень одночасно викликають графітацію и регібридацію вуглецю під час ударного зношування (рис. 1). Зроблений висновок, що механізм ударного зношування PDC при низькокінетичному

впливові являє собою крихке руйнування із сполученням транскристалітного і міжкристалітного руйнування [6].

Ударний знос різців з полікристалічного алмазного компакту (PDC), викликаний переривчастим різанням під час процесу буріння, розглядався і в статті [7]. Різні стани інтерфейсу контакту удару PDC реалізуються шляхом вибору ударних спряжених матеріалів ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Результати свідчать, що кінетичний відклик і поведінка пошкоджень PDC корелюють з механічними властивостями спряженого матеріалу і фізико-хімічними змінами на інтерфейсі поверхні удару (рис. 2). Адгезія і заповнення, що виникає внаслідок сильних ковалентних зв'язків і ефектів заповнення, пом'якшують міжфазне напруження і знижують середню силу удару  $\text{SiC}$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Більш того, ефекти крихкого руйнування і заповнення збільшують споживання кінетичної енергії  $\text{SiO}_2$ , що приводить до поглинання енергії до 86 %. Крім того, сильні ефекти ковалентного зв'язку усугубили пошкодження інтерфейсів PDC, що призвело до внутрішнього руйнування алмазних частинок і відшарування на межах зерен.

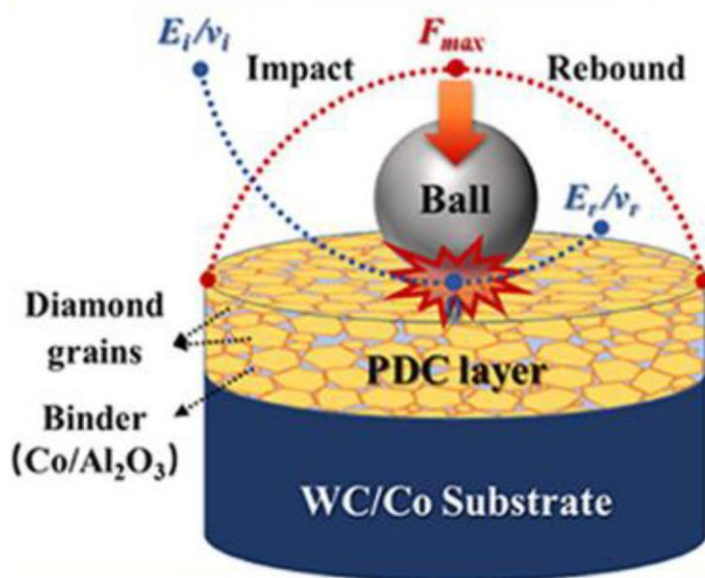


Рис. 2. Схема контактної взаємодії при моделюванні контактної зони удару між шаром PDC та спряженим матеріалом [7]

За умов високих температур тертя полікристалічний алмаз (PDC) може зношуватися через графітизацію. PDC з видаленим кобальтом (PDC-CR) та у якості пари тертя кульки з нітриду кремнію у статті [8] були відібрані для експериментів по фрикційному зносу при температурах 200, 300 та 400 °C відповідно (рис. 3). Результати засвідчили, що коефіцієнт тертя і швидкість зносу збільшуються із підвищенням температури. За результатами XRD не було знайдено графітової фази, що свідчить про те, що саме процес попереднього видалення кобальту може ефективно інгібувати графітизацію полікристалічного алмаза за високої температури. SEM images показали, що підвищення температури не сприяє утворенню фрикційної плівки, яка може підвищити зносостійкість матеріалів.

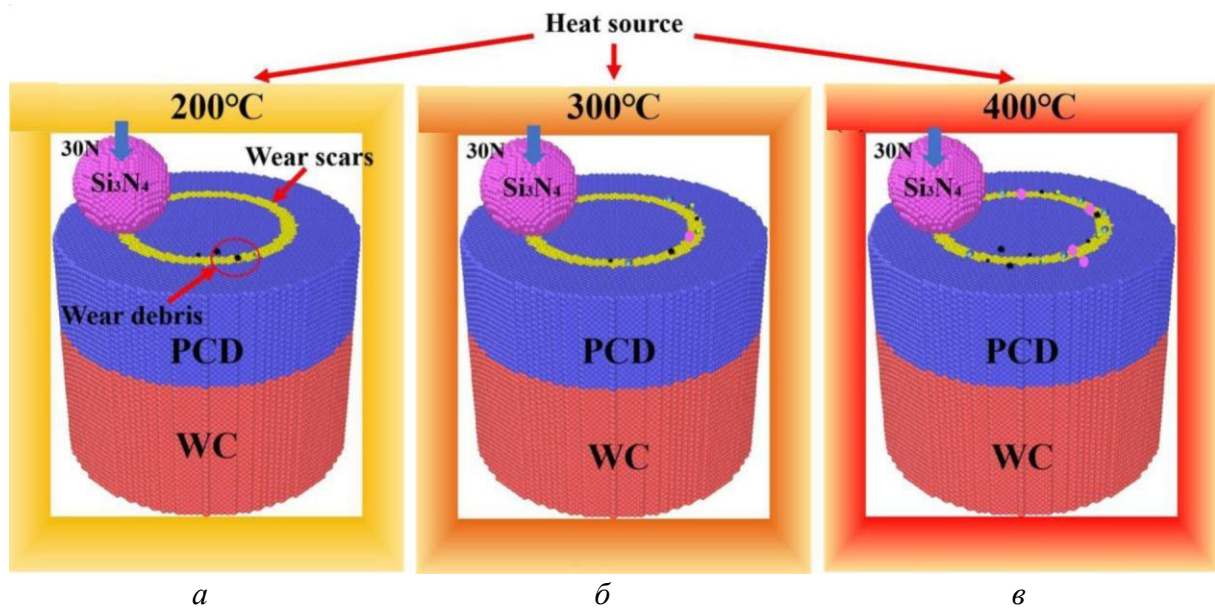


Рис. 3. Схема експериментів по фрикційному зносу та різниця в *wear debris* на *wear scars* [8]

Для підготовки полікристалічного алмазного компакту (PDC) з високою ударною міцністю розроблено новий PDC з двошаровою структурою робочого шару [9]. Робочий шар складався зі зносостійкого дворозмірного алмазного верхнього шару (80 % –12 мкм + 20 % за масою –1 мкм) та удароміцного крупнозернистого алмазного нижнього шару (20 мкм та 27 мкм) (рис. 4). Випробування засвідчили, що ця двошарова структура PDC може істотно поліпшити ударну в'язкість (68,8 % та 90,6 % відповідно) і при цьому зберегти задовільну абразивну стійкість. Результати мікроскопічних досліджень показали, що два шари з різними розмірами алмазних частинок були гарно зв'язані один з одним без обмеження. Значно більш тонкий перехідний шар, збагачений кобальтом, спостерігається поблизу інтерфейсу між шаром полікристалічного алмаза і підкладкою із цементованого карбїду, що привело до більш високої міцності зв'язку на межі поділу і пояснило високу удароміцність PDC.

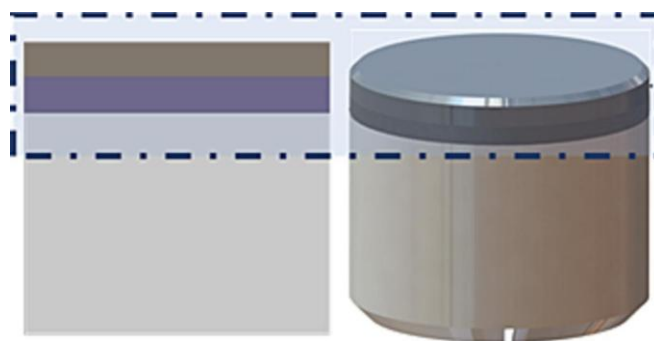


Рис. 4. PDC компакт з двошаровою структурою робочого шару [9]

Аналогічні алмазні компакти розглядаються і в статті [10], але тут та ж сама підкладка WC–Co, на яку нанесено вже CVD-алмазне покриття, і розглядається вплив саме підкладки. Вивчався вплив невеликих змін розміру зерна підкладки WC на морфологію, якість і адгезію алмазних покриттів. Покриття були охарактеризовані до допомогою СЕМ, спектроскопії Рамана, рентгенівської дифракції і випробувань на втиснення за Роквелом. Результати свідчать, що покриття на підкладці WC з більш дрібним зерном (# 1) більш гладенькі і

однорідні, з більш високою густиною зародкоутворення, в той час як покриття на підкладці WC з більш крупним зерном (# 2) більш грубі і з більш крупними кристалами алмаза (рис. 5). Покриття на підкладці WC з більш дрібним зерном показали більш низькі залишкові напруження і кращу адгезію. Аналіз Рамана показав, що покриття на підкладці WC з більш крупним зерном показали більш високу якість кристалів, але містили більше неалмазних фаз. Дослідження підтверджує, що мікроструктура підкладки, навіть при невеликих змінах в розмірі зерна WC, суттєво впливає на морфологію алмазного покриття, якість кристалів, чистоту фази і міцність зчеплення.

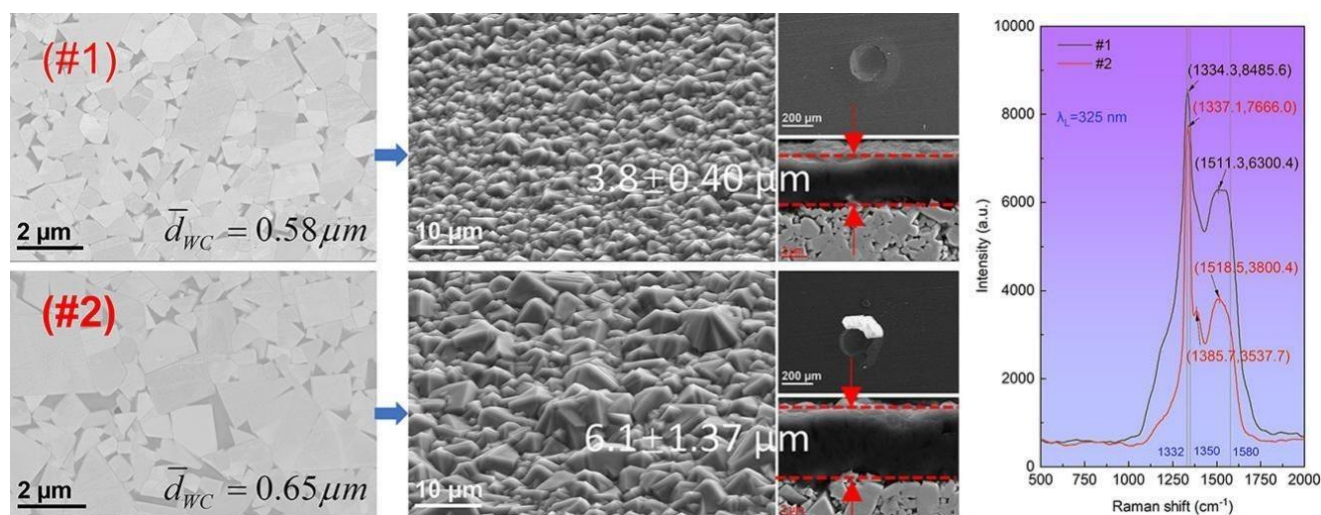


Рис. 4. CVD-алмазне покриття на підкладках WC з різною зернистістю [10]

Перейдемо безпосередньо до публікацій, присвячених особливостям ефективної обробки поверхні вказаних вище алмазних компактів.

Твердість та корозійна стійкість полікристалічних алмазних пластин утруднюють видалення поверхневих зерен, а крупні зерна можуть викликати концентрацію напружень, що може призвести до розтріскування. В дослідженні [11] використовується реакція між перехідними металами і алмазними пластинами для покращення швидкості видалення зерен поверхнього шару. Перехідний метал перетворює зерна полікристалічних алмазних пластин в аморфний вуглець, що забезпечує їх швидке видалення. Додавання реактивних абразивних добавок (Fe, Ti, Ni) до алмазно-смоляних кругів підвищує швидкість видалення матеріалу. Причому Fe помітно підвищує ефективність видалення і якість обробленої поверхні. Тобто, для обробки полікристалічного алмазу в алмазні круги на основі смол додавали Fe, Ti та Ni, причому Fe показав найкращі результати.

Дослідження [12] визначало проблеми, що виникають при наномасштабній шліфовці полікристалічних алмазів за допомогою алмазних кругів на смоляній зв'язці. Експериментальні результати виявили сильний вплив орієнтації зерен на парадигму видалення матеріалу, так що певна орієнтація алмаза показала деякі «брижі» як поверхневі структури, які не могли бути згладжені навіть за допомогою операції плазми після шліфування. Експериментальний аналіз *in situ*, а також додаткове моделювання молекулярною динамікою запропонували нове розуміння механізму «утворення брижів» і зв'язків C–C, що спостерігаються на поверхні алмаза з орієнтацією (110) (рис. 5). Крім того, експерименти по спостереженню *in situ* показали, що хвилеобразна структура має періодичну повторюваність,

що дозволяє припустити, що швидкість видалення матеріалу в процесі шліфування періодично змінюється повторним чином.

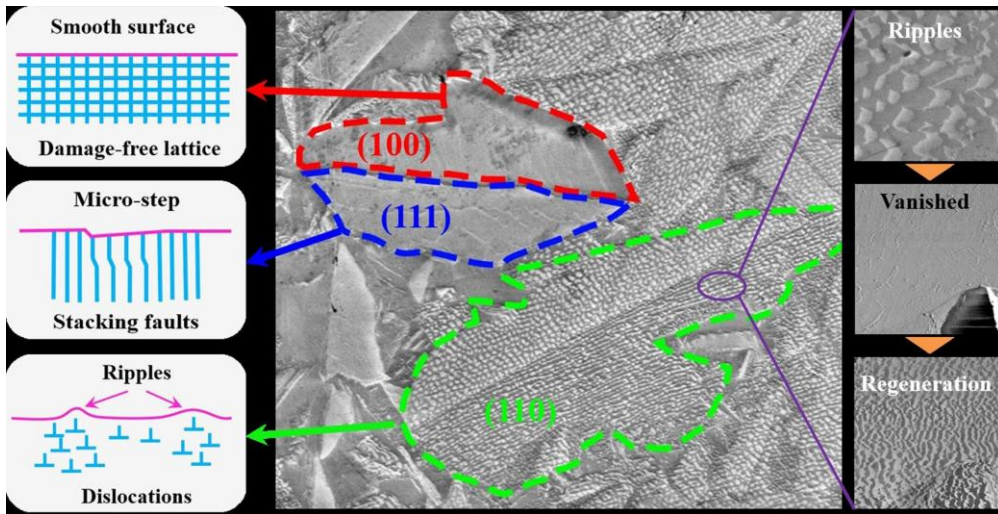


Рис. 5. Формування поверхневих структур на поверхні полікристалічних алмазів при шліфуванні алмазним кругом на смоляній зв'язці [12]

У [13] були досліджені взаємодія інтерфейсу і продукти тертя між алмазом і залізом, з упором на основні фактори, що впливають на фазові переходи алмаза шляхом регулювання атмосфери тертя. Як на повітрі, так і в азоті, коефіцієнт тертя (CoF) зменшується із збільшенням навантаження, але значення CoF відносно є нижчим в середовищі азоту. Крива тертя алмаза по залізу стабілізувалася після початкової тенденції до зниження, досягнувши мінімального CoF 0,08 в азоті при навантаженні 15 Н (рис. 6). Механізм тертя пояснюється переносом матеріалу, продуктами тертя, фазовим переходом, утворенням трибошару і взаємодією інтерфейсів. Передбачається, що в азоті, навіть якщо на поверхні заліза утворюється невелика кількість оксиду, залізо залишається в контакт з алмазом, генеруючи велику кількість карбиду заліза і викликаючи графітизацію алмаза, що буде грати роль змазки. Навпаки, в повітрі атоми кисню неперервно взаємодіють із залізом, утворюючи щільну оксидну плівку на границі тертя, яка перешкоджає постійному контакту вуглецю з атомами заліза і обмежує утворення карбиду заліза.

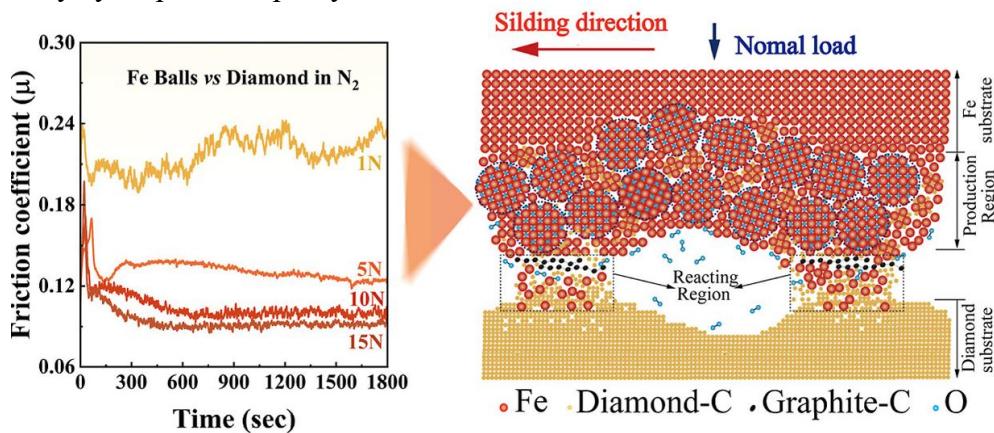


Рис. 6. Зміна значень коефіцієнту тертя між алмазом і залізом у середовищі азоту та схематичне представлення зони контакту [13].

Отже, середовище, в якому відбувається взаємодія між алмазом і матеріалом, має вирішальне значення. Детальний аналіз цього впливу буде проведено далі в наступних публікаціях.

Трибологічна поведінка PDC за умов високих і низьких температур, що чергуються, у вакуумному середовищі оцінювалася за допомогою трибометра «кулька на диску» [14]. Результати показали, що коефіцієнт тертя (CoF) був доволі низьким і стабільним в умовах атмосферної кімнатної температури, в той час як він був набагато вищим і коливався у вакуумному середовищі за умов високої і низької температури, що чергувалися. В атмосферному середовищі з кімнатною температурою неперервне утворення адсорбованих плівок на контактній поверхні зберігало хімічний склад пари тертя практично незмінним, а механізм зносу являв собою комбінацію помірного абразивного зносу і окислювального зносу. У вакуумному середовищі з високими і низькими температурними умовами, що чергувалися, адсорбована плівка на контактній поверхні десорбувалася і не могла продовжувати формуватися, а адгезія матеріалів  $\text{Si}_3\text{N}_4$  відбувалася на області зносу, і утворювалися зв'язки Si-C. Крім того, поєднання високої теплоти тертя, локалізованої спалахової температури та присутності  $\text{Co}$  як зв'язуючої речовини призводило до графітизації алмаза. Механізм зносу являв собою комбінацію абразивного зносу і адгезійного зносу. Приведені вище результати показали, що адгезія  $\text{Si}_3\text{N}_4$  і зв'язків Si-C призводила до високої сили тертя, в той час як явище графітизації ослабляло силу зв'язку між алмазними зернами і робило їх більш схильними до від'єднання під час ковзання. Це основні причини сильного зносу у вакуумному середовищі з високими і низькими температурними умовами, що чергуються.

Висока твердість, гарні зносостійкість і хімічна інертність PCD призводять до низької ефективності обробки і незадовільної якості обробленої поверхні. В статті [15] було застосоване вже хімічне середовище. Хімічно допоміжна до механічної поліровка на основі фотореакції Фентона (рис. 7) забезпечує ефективну обробку PCD і високу якість поверхні.

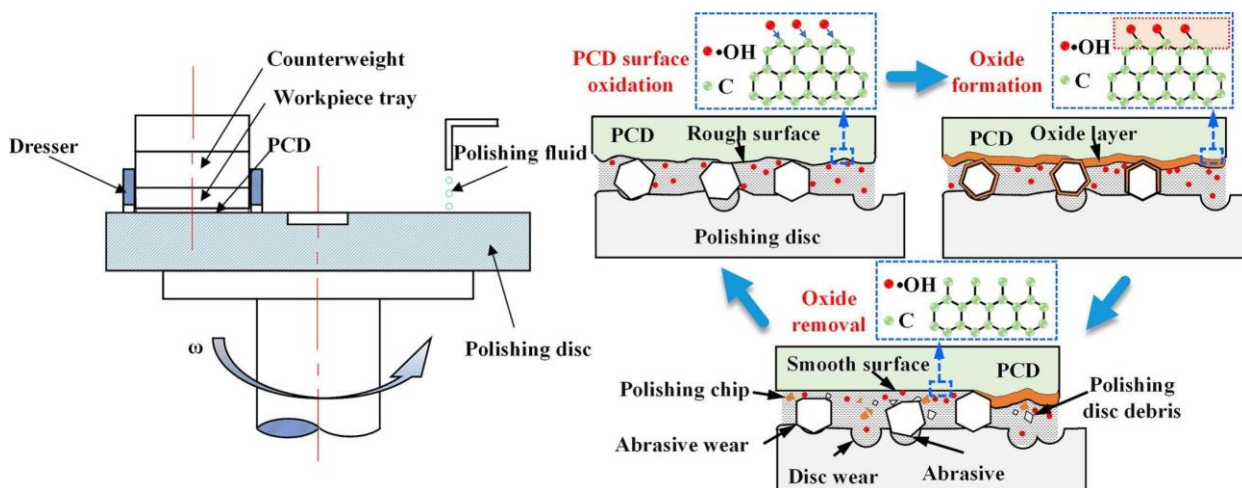


Рис. 7. Механізм полірування з фотореакцією Фентона на PCD [15]

Результати показали, що вплив тиску поліровки, концентрації абразиву при поліровці і концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$  на швидкість зйому матеріалу був статистично значимим. Крім того, статистично значимими виявилися також ефекти тиску поліровки, концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$ , концентрації абразиву і інтенсивності світла на шорсткість поверхні. Оптимальними параметрами процесу були визначені інтенсивність світла  $150 \text{ мВт/см}^2$ , концентрація  $\text{H}_2\text{O}_2$  15 %

за масою, тиск поліровки 0,89 МПа і концентрація абразиву 5 % за масою. Ці параметри забезпечили швидкість видалення матеріалу до 666,9 нм/ч і шорсткість поверхні Ra 2,58 нм. Механізм полірування фотореакції Фентона на РСД можливо описати наступним чином: фотореакція Фентона виробляє •ОН, який потім окислює поверхню РСД, утворюючи оксидний шар. Цей шар в подальшому видаляється механічною дією абразиву, а окислення і механічне видалення продовжує відбуватися на відкритій новій поверхні РСД. Було показано, що при умові балансу між механічною і хімічною дією можливо отримати кращу якість поверхні.

В дослідженні [16] запропоновано новий механізм видалення матеріалу, викликаний розривом зв'язку С–С, для високоефективної поліровки алмаза. Експерименти з лінійним зворотно-поступальним ковзанням показали, що алмазний матеріал видаляється у вигляді графіту, а не сколюється у вигляді фрагментів алмаза, і висока швидкість зносу досягається в умовах низького тиску газу і ультрафіолетового (УФ) опромінення. На основі цього був запропонований новий метод поліровки із застосуванням УФ-випромінення при низькому тиску газу у якості високоефективного підходу до поліровки алмаза. Була досягнута висока швидкість видалення матеріалу 15,8 мкм/год, і висока ефективність була підтверджена швидким зниженням шорсткості поверхні з 465,5 до 3,7 нм протягом 70 хв. Надалі було проведено моделювання методом молекулярної динаміки *ReaxFF* для виявлення механізму атомного видалення (рис. 8). Атомне стирання супроводжувалося розривом зв'язків С–С, а перетворення алмаза в графіт активувалося великою кількістю розривів зв'язків С–С, і це має важливе значення для досягнення високої швидкості видалення матеріалу.

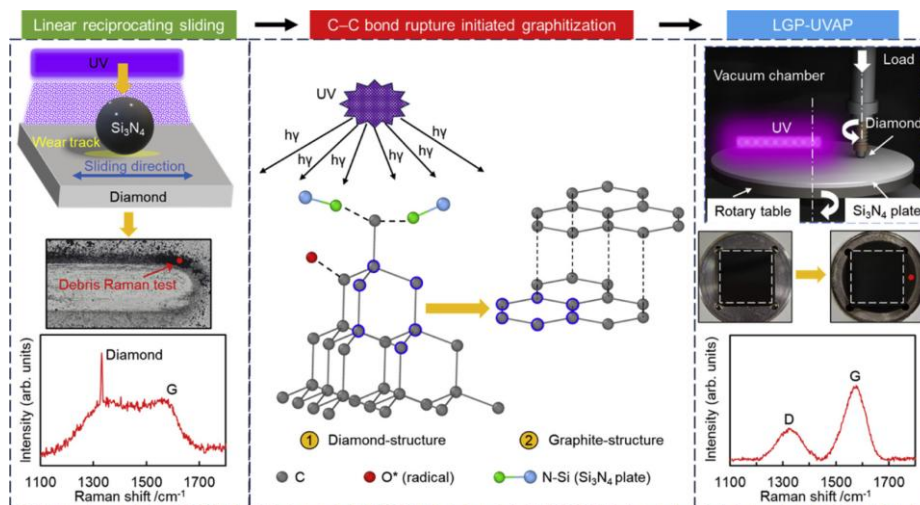


Рис. 8. Моделювання механізму атомного видалення при поліровці з перетворенням алмазу в графіт застосуванням УФ-випромінення [16].

В статті [17] наведено інший варіант переходу алмазу в графіт, де для досягнення високої якості поверхні монокристалічного алмаза (SCD) було розроблено комбінований метод застосування травлення індуктивно зв'язаною плазмою (ICP) і полірування динамічним тертям (DFP). Показано, що більша кількість  $sp^2$  С генерується на поверхні монокристалічного алмаза після обробки плазмою  $O_2$ , а надалі DFP, є можливість отримати високоплощинну алмазну поверхню. При оптимізації параметрів травлення ICP и DFP,  $Ra$ , вимірний за допомогою атомно-силового мікроскопа (*AFM*) при області сканування  $10 \times 10$  мкм, складає всього 0,185 нм. Крім того, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (*XPS*) і спектроскопія Рамана

застосовувалися для характеристики вихідної поверхні, поверхні, протравленої плазмою, і полірованої поверхні зразків алмаза. Зроблено висновок, що цей метод може продукувати більше аморфного вуглецю на грубій поверхні алмаза, і аморфний вуглець легше видаляється поліровкою, і, як наслідок, досягається високоплощинна алмазна поверхня (рис. 9).

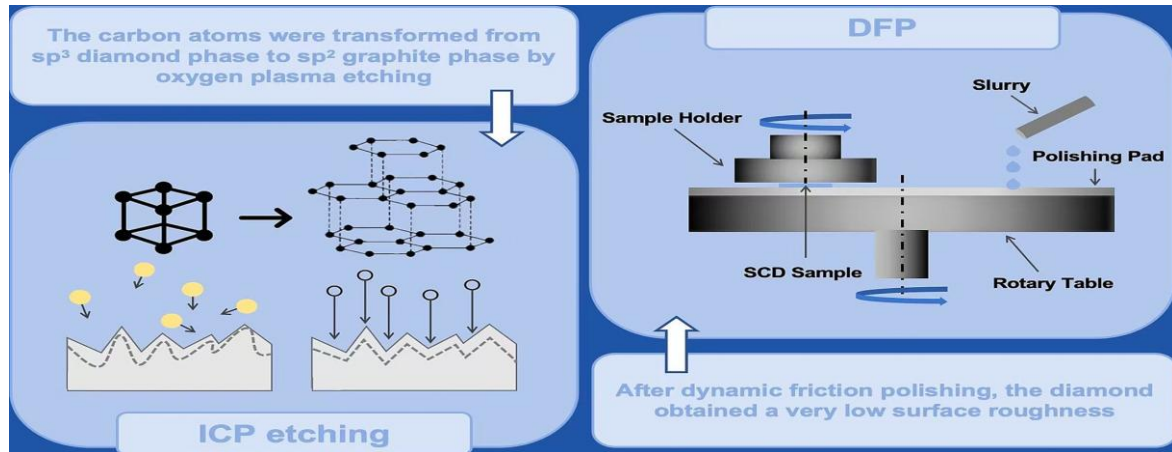


Рис. 9. Наукове обґрунтування методу травлення індуктивно зв'язаною плазмою і поліровкою динамічним тертям [17]

У дослідженні [18] для поліровки PCD застосовується мікрохвильова плазмова поліровка (MW-PAP) із використанням кремнієвої полірувальної пластини. Поверхні як кремнієвої пластини, так і підкладки PCD модифікуються гідроксильними радикалами (\*OH), які продукує мікрохвильова плазма на основі аргону, що містить водяний пар, який ініціює реакцію дегідратаційної конденсації (рис. 10).

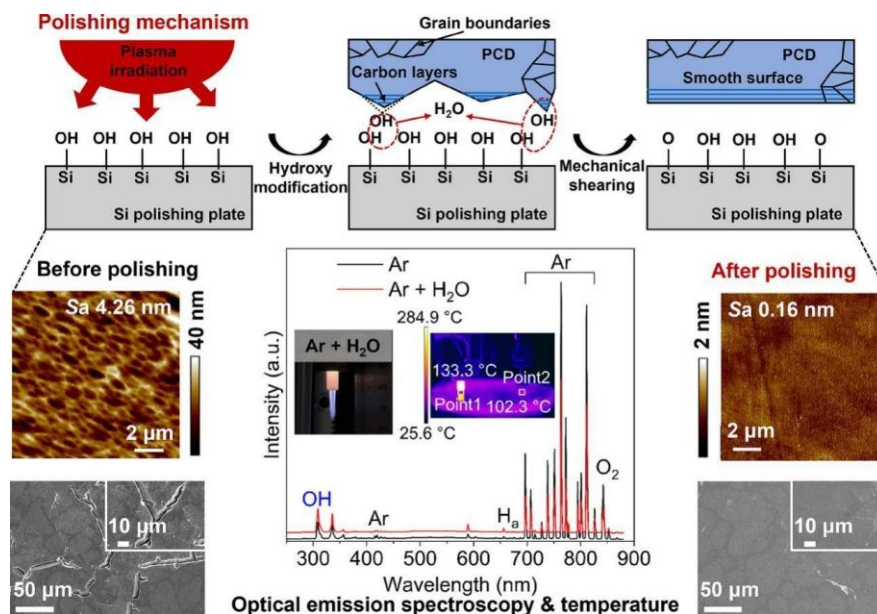


Рис. 10. Схематичне представлення мікрохвильової плазмової поліровки PCD із використанням кремнієвої полірувальної пластини [10]

Надалі поверхневі атоми на PCD видаляються внаслідок механічного зрушення під поліруючим навантаженням 3 Н. При застосуванні MW-PAP отримується гладенька поверхня PCD із шорсткістю  $Sa$  10,7 нм ( $300 \times 300$  мкм<sup>2</sup>) та 0,16 нм ( $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>) за швидкості видалення матеріалу 441 нм/год. MW-PAP ефективно запобігає забрудненню домішками і графітизації шляхом видалення шарів атомів карбону під час процесу поліровки, що приводить до малопошкодженої поверхні PCD.

В статті [19] проведено експерименти вже по комбінованій лазерній і шліфувальній обробці мікрокінцевої фрези PCD, а також вивчено і проаналізовано характеристики морфології поверхні і різальної кромки фрези. Комбінована лазерна і шліфувальна обробка є ефективним методом виготовлення мікроінструментів PCD, але пошкодження при обробці важко контролювати. Експериментальні результати свідчать, що висока температура лазера є основним фактором, який викликає пошкодження, що призводить до плавлення і окислення матеріалу поверхні, а також до утворення мікротріщин, ямок і окислених наростів на фрези PCD. Крім того, фазова трансформація алмаза і надмірне видалення шару, багатого кобальтом, також призведуть до графітизації і мікротріщин на поверхні фрези. В процесі шліфування різальна кромка руйнується під впливом круга, що призводить до утворення мікронадрізів, мікроямок і мікротріщин. Розширення міжзеренних тріщин матеріалу PCD і руйнування алмазних частинок сколюванням є основними причинами появи мікротріщин і мікроямок на поверхні фрези. Тобто застосування лазерної обробки необхідно там, де необхідним є підвищений термічний вплив.

В дослідженні [20] якраз і розглядаються проблеми, пов'язані із внутрішніми розмірами і точністю профілю при профілюванні крупнозернистих алмазних шліфувальних інструментів із вгнутою поверхнею, з особливим акцентом на вирішення проблем термічного пошкодження під час лазерної правки і значного зносу і неефективності, пов'язаних з обертальною правкою. Запропоновано новий комбінований метод невідхиляючої лазерної грубої правки, відхиляючої лазерної напівточної правки і обертальної прецизійної правки (рис. 11).

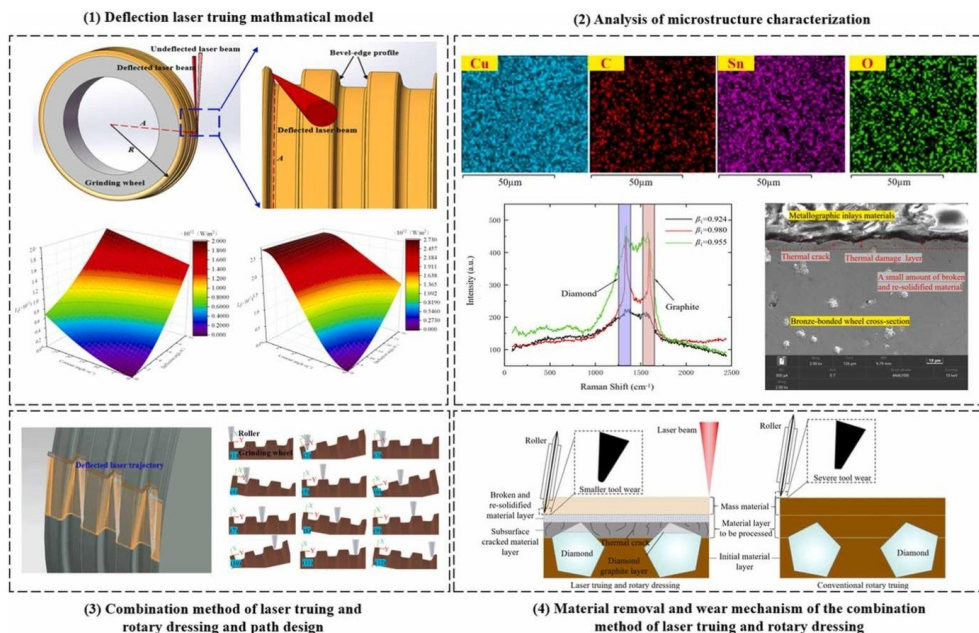


Рис. 11. Наукові принципи, покладені у основу комбінованого методу лазерної правки і ротаційної правки [20]

Вперше створена математична модель для відхиляючої лазерної правки, яка має вирішальне значення для оптимізації процесу правки. Із застосуванням шліфувального круга, призначеного для інструментів для різки нафтопроводів, як тестовий випадок, був проведений комбінований експеримент лазерної правки і обертальної правки. Результати свідчать, що товщина графітового шару алмаза і шару термічного пошкодження бронзової зв'язки складає менше 5 мкм при вказаних параметрах лазерної правки згідно з аналізом поверхневих і підповерхневих матеріалів. А ротаційна правка ефективно видаляє шар термічного пошкодження і графітовий шар при налаштуванні на різні глибини правки. Математична модель підтверджує, що відхиляючий лазер є ефективним у компенсації втрат густини потужності, викликаних змінами контуру шліфувального круга. Комбінований експеримент свідчить, що лазер може досягати контрольованого припуску матеріалу приблизно у 10 мкм. Термічне пошкодження на крузі може бути усунене припуском ротаційної правки у 10 мкм. Комбінований метод лазерної правки і ротаційної правки значно мінімізує знос інструмента і дає суттєві переваги з точки зору ефективності правки і точності правки.

### **Висновки**

В сучасній літературі досліджені спрямовані впливи на поверхню алмазів для покращення їх оброблюваності і показано, що до трьох найбільш відомих: теплового, лазерного та хімічного, останнім часом додаються дослідження з таких впливів, як плазмового, УФ-опромінення, оточуючого середовища та впливу наявної підкладки до алмазного шару.

За умов високих температур тертя полікристалічний алмаз (PDC) може зношуватися через графітизацію. Для PDC з видаленим кобальтом (PDC-CR) встановлено, що процес попереднього видалення кобальту може ефективно інгібувати графітизацію полікристалічного алмаза при високій температурі. Підтверджено, що мікроструктура підкладки WC-Co, навіть при невеликих змінах в розмірі зерна WC, суттєво впливає на морфологію CVD-алмазного покриття, якість кристалів і міцність зчеплення. Показано, що покриття на підкладці WC з більш крупним зерном має більш високу якість кристалів.

Перехідний метал перетворює зерна полікристалічних алмазних пластин в аморфний вуглець, що забезпечує їх швидке видалення. Для обробки полікристалічного алмазу в алмазні круги на основі смол додавали Fe, Ti та Ni, причому Fe показав найкращі результати. В середовищі азоту коефіцієнт тертя між Fe та алмазом є нижчим, аніж на повітрі. Припускається, що в азотному середовищі навіть незначне утворення оксиду заліза на поверхні не перешкоджає його прямому контакту з алмазом. Цей контакт призводить до інтенсивного утворення карбіду заліза та сприяє графітизації алмазу. У свою чергу, графіт виконує роль твердого мастила. Доведено, що коефіцієнт тертя між алмазом та нітридом кремнію є доволі низьким в повітрі і набагато вищий у вакуумному середовищі.

Дослідження процесу обробки зі зворотно-поступальним ковзанням показало, що видалення алмазного матеріалу відбувається шляхом його графітизації, а не шляхом утворення сколених фрагментів. Окремо було встановлено, що високої швидкості зносу можна досягти за допомогою ультрафіолетового опромінення. Для переходу алмазу в графіт з метою отримання високоякісної поверхні був розроблений комбінований метод, який поєднує травлення індуктивно-зв'язаною плазмою та полірування динамічним тертям.

V.I. Lavrinenko

V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

**CURRENT DEVELOPMENTS INTO THE DIRECTION OF EFFECTIVE PROCESSING OF PCD, SCD AND CVD DIAMONDS FOR THEIR APPLICATION IN THE DIAMOND-HALVANIC WORKING LAYER OF A PRECISION RULING TOOL (REVIEW)**

The article focuses on modern publications devoted to the effective surface treatment of PCD, SCD and CVD diamonds, with regard to the conditions of their application in precision diamond cutting tools. In modern literature, directed effects on the surface of diamonds have been studied to improve their machinability and it has been shown that in addition to the three most well-known: thermal, laser, and chemical, studies have recently been added on such effects as plasma, UV radiation, the environment, and the effect of the existing substrate on the diamond layer. For PCD with cobalt removed, it was found that the cobalt pre-removal process can effectively inhibit diamond graphitization at high temperature. It was confirmed that the microstructure of the WC-Co substrate, even with small changes in WC grain size, significantly affects the morphology of the CVD diamond coating, crystal quality and bond strength. The transition metal converts the grains of polycrystalline diamond plates into amorphous carbon, which ensures their rapid removal. For processing polycrystalline diamond, Fe, Ti and Ni are added to resin-based diamond wheels, with Fe showing the best results. In a nitrogen environment, the friction coefficient between Fe and diamond is lower than in air. The friction coefficient between diamond and silicon nitride is low in air and much higher in a vacuum environment. In reciprocating sliding machining, it has been found that the diamond material is removed as graphite rather than chipped off as fragments, and a high wear rate is achieved under ultraviolet irradiation. Another option for the transition of diamond to graphite to achieve high quality diamond surfaces is a combined method using inductively coupled plasma etching and dynamic friction polishing.

**Key words:** diamond-abrasive electroplated layer, polycrystalline PCD diamond, precision cutting tool, diamond processing.

**Література**

1. Lavrinenko V.I. Recent developments in diamond processing and surface modification techniques for tailoring properties of diamond grains: a review. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, N 6. P. 462–461.
2. Lu Y., Wang B., Mu Q., Yang K., Li H., Rosenkranz A., Jiang N., Zhou P. Nanoscale smooth and damage-free polycrystalline diamond surface ground by coarse diamond grinding wheel. *Diamond and Related Materials*. 2022. V. 125. P. 108971.
3. Luo H., Ajmal Kh.M., Liu W., Yamamura K., Deng H. Atomic-scale and damage-free polishing of single crystal diamond enhanced by atmospheric pressure inductively coupled plasma. *Carbon*. 2021. Vol. 182. P. 175–184.
4. Xiao Ch., Hsia F.-Ch., Sutton-Cook A., Weber B., Franklin S. Polishing of polycrystalline diamond using synergies between chemical and mechanical inputs: A review of mechanisms and processes. 2022. *Carbon*. V. 196. P. 29–48.
5. Peng J., Xu Z., Zhou R., Wang R., Li G., Yao X., Zhao B., Ding W., Xu J. Wear mechanisms of superhard cutting tools in machining of SiC<sub>p</sub>/Al composites. *Wear*. 2025. Vol. 564–565. P. 205695.
6. Guo Y., Meng D., Cai Z., Yue W. Dynamic response and damage behavior of impact wear for polycrystalline diamond compact under low kinetic energy impact. *Carbon*. 2024. Vol. 226. P. 119166.
7. Guo Y., Meng D., Cai Z., Wang C., Yue W. New insights on impact wear of polycrystalline diamond compact: Effect of interface state on kinetic response and damage behavior. *Carbon*. 2024. Vol. 230. P. 119661.

8. Gou R., Zhao J., Luo X. Tribological behavior of PDC-CR at different temperatures. *Diamond and Related Materials*. 2024. Vol. 144. P. 110950.
9. Wang X., Tu J., Liu B. High-impact-resistant polycrystalline diamond compact cutters with double working layers. *Diamond and Related Materials*. 2025. V. 152. P. 111906.
10. Wang X., Wu X., Lu K., Ye J. Influence of cemented carbide substrate microstructure on CVD diamond coating characteristics. *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 152. P. 111886.
11. Li Z., Lu J., Xin Y., Luo Q., Li C., Ke C., Xu X., Xu S. Study on removal mechanism of polycrystalline diamond wafer by grinding containing transition metals. *Diamond and Related Materials*. 2024. Vol. 148. P. 111366.
12. Lu Y., Wang B., Wang Y., Nishimura K., Jiang N., Zhou P., Goel S. Novel surface characteristics observed during grinding of polycrystalline diamond. *Applied Surface Science*. 2025. Vol. 684. P. 161883.
13. Chen L., Liu Y., Shi D., Zhang X., Bai C., Zhang J. Controllable phase transition process of polycrystalline diamond surface for low friction via suppressing oxygen involved tribochemical reactions. *Carbon*. 2024. Vol. 230. P. 119629.
14. Sun X., Liu B., Zhang S., Wang X., Zhao S., Dai W., Tu J. Tribological behavior of polycrystalline diamond compacts under alternating high and low temperature conditions in vacuum environment. *Tribology International*. 2025. V. 203. P. 110404.
15. Li H., Lu J., Cai W., Hu D., Yan Q. Optimisation of chemically assisted mechanical polishing process parameters for polycrystalline diamond based on photo-Fenton reaction. *Diamond and Related Materials*. 2024. Vol. 150. P. 111750.
16. Liu N., Lei L., Lu H., Jiang H., Zhang Y., Xiao J., Zhang J., Chen X., Xu J. C–C bond rupture initiated graphitization achieves highly efficient diamond polishing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2025. Vol. 287. P. 109958.
17. Yu J., Liu X., Xu R., Yu D. Single crystal diamond polishing assisted by inductively coupled plasma etching. *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 152. P. 111978.
18. Li X., Xiao Y., Wang Y., He Q., Zhang Y., Deng H. Microwave plasma-assisted polishing of polycrystalline diamond. *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 152. P. 111907.
19. Du Y., Liang Z., Su Z., Ma Y., Zhao X., Liu Z., Xiao Y., Huang H., Yuan H., Zhou T., Wang X. Machining damage in the fabrication of polycrystalline diamond micro end mill with laser and grinding combined processing method. *Diamond and Related Materials*. 2024. Vol. 148. P. 111454.
20. Zhou W., Chen G., Duan S., Mei F., Tao N., Wei Y. Laser efficient truing and rotary precision dressing of concave-surface coarse-grained diamond grinding tools. *Journal of Materials Processing Technology*. 2025. Vol. 337. P. 118726.

Надійшла 25.03.25

### References

1. Lavrinenko, V. (2024). Recent developments in diamond processing and surface modification techniques for tailoring properties of diamond grains: a review. *Journal of Superhard Materials*, 46(6), 462–461.
2. Lu, Y., Wang, B., Mu, Q., et al. (2022). Nanoscale smooth and damage-free polycrystalline diamond surface ground by coarse diamond grinding wheel. *Diamond and Related Materials*, 125, 108971.

3. Luo, H., Ajmal, Kh. M., Liu, W., et al. (2021). Atomic-scale and damage-free polishing of single crystal diamond enhanced by atmospheric pressure inductively coupled plasma. *Carbon*, 182, 175–184.
4. Xiao, Ch., Hsia, F.-Ch., Sutton-Cook, A., et al. (2022). Polishing of polycrystalline diamond using synergies between chemical and mechanical inputs: A review of mechanisms and processes. *Carbon*, 196, 29–48.
5. Peng, J., Xu, Z., Zhou, R., et al. (2025). Wear mechanisms of superhard cutting tools in machining of SiC<sub>p</sub>/Al composites, *Wear*, 564–565, 205695.
6. Guo, Y., Meng, D., Cai, Z., Yue, W. (2024). Dynamic response and damage behavior of impact wear for polycrystalline diamond compact under low kinetic energy impact. *Carbon*, 226, 119166.
7. Guo, Y., Meng, D., Cai, Z., et al. (2024). New insights on impact wear of polycrystalline diamond compact: Effect of interface state on kinetic response and damage behavior. *Carbon*, 230, 119661.
8. Gou, R., Zhao, J., Luo, X. (2024). Tribological behavior of PDC-CR at different temperatures. *Diamond and Related Materials*, 144, 110950.
9. Wang, X., Tu, J., Liu, B. (2025). High-impact-resistant polycrystalline diamond compact cutters with double working layers. *Diamond and Related Materials*, 152, 111906.
10. Wang, X., Wu, X., Lu, K., Ye, J. (2025). Influence of cemented carbide substrate microstructure on CVD diamond coating characteristics. *Diamond and Related Materials*, 152, 111886.
11. Li, Z., Lu, J., Xin, Y., et al. (2024). Study on removal mechanism of polycrystalline diamond wafer by grinding containing transition metals. *Diamond and Related Materials*, 148, 111366.
12. Lu, Y., Wang, B., Wang, Y., et al. (2025). Novel surface characteristics observed during grinding of polycrystalline diamond. *Applied Surface Science*, 684(1), 161883.
13. Chen, L., Liu, Y., Shi, D., et al. (2024). Controllable phase transition process of polycrystalline diamond surface for low friction via suppressing oxygen involved tribochemical reactions. *Carbon*, 230, 119629.
14. Sun, X., Liu, B., Zhang, S., et al. (2025). Tribological behavior of polycrystalline diamond compacts under alternating high and low temperature conditions in vacuum environment. *Tribology International*, 203, 110404.
15. Li, H., Lu, J., Cai, W., et al. (2024). Optimisation of chemically assisted mechanical polishing process parameters for polycrystalline diamond based on photo-Fenton reaction. *Diamond and Related Materials*, 150, 111750.
16. Liu, N., Lei, L., Lu, H., et al. (2025). C–C bond rupture initiated graphitization achieves highly efficient diamond polishing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 287, 109958.
17. Yu, J., Liu, X., Xu, R., et al. (2025). Single crystal diamond polishing assisted by inductively coupled plasma etching. *Diamond and Related Materials*. Volume 152, February, 111978.
18. Li, X., Xiao, Y., Wang, Y., et al. (2025). Microwave plasma-assisted polishing of polycrystalline diamond / *Diamond and Related Materials*, 152, 111907.
19. Du, Y., Liang, Z., Su, Z., et al. (2024). Machining damage in the fabrication of polycrystalline diamond micro end mill with laser and grinding combined processing method. *Diamond and Related Materials*, 148, 111454.

20. Zhou W., Chen G., Duan S., et al. (2025). Laser efficient truing and rotary precision dressing of concave-surface coarse-grained diamond grinding tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 337, 118726.

УДК 519.688:536.2

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-329-339

**О. О. Матвійчук<sup>1</sup>, Н. В. Литошенко<sup>1</sup>**, кандидати технічних наук, **В. І. Шеремет<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, 04074 м. Київ, Україна, e-mail: lytnat@ukr.net*

<sup>2</sup>*Інститут матеріалознавства та зварюванням. Є. О. Патона, НТУУ «КПІ»  
вул. Політехнічна, 35, навчальний корпус 9, 03056, Київ, Україна*

### **ЗАЛИШКОВІ ТЕРМІЧНІ НАПРУЖЕННЯ В БАГАТОШАРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО ГРАДІЄНТНИХ СПЛАВАХ WC–Co**

*Завдання наукового дослідження полягає в тому, щоб оцінити рівень залишкових термічних напружень методом математичного моделювання в сплаві з тришаровою структурою WC–30%Co–TiC–WC–30%Co (об'ємних відсотків) та мікроградієнтом кобальта на границях шарів, а також розробити технологічні рекомендації для уникнення формозміни багатошарового композиту.*

*Встановлено, що величина залишкових термічних напружень першого і другого роду суттєво залежить від структурних і технологічних параметрів багатошарових градієнтних твердих сплавів.*

**Ключові слова:** *залишкові термічні напруження, багатошарові функціонально градієнтні тверді сплави WC–Co, мікроструктурні параметри, метод математичного моделювання.*

#### **Вступ**

Функціонально градієнтні матеріали є унікальними, оскільки забезпечують високу твердість і в'язкість руйнування завдяки поєднанню різних мікроструктур та властивостей у приповерхневому шарі та в об'ємі твердосплавного виробу [1]. Серед найбільш поширених підходів до отримання градієнтних твердих сплавів використовуються такі: створення вільного від  $\gamma$ -фази (кубічних карбонітридів) чи збагаченого нею приповерхневого шару, використання карбідів подвійних властивостей, моделювання двошарових твердих сплавів WC–Co чи макроградієнтних WC–Co завдяки міграції Co. Створені в такий спосіб композити знайшли застосування в різних видах інструменту. Серед них ударні свердла з двошаровою градієнтною твердосплавною головкою, які виготовляються фірмою Ceratizit шляхом пресування та спікання двох градуйованих порошків. Вставки для ударного свердління з функціонально градієнтних твердих сплавів WC–Co, отриманих за технологією, розробленою та впровадженою в Element Six Group, використовуються для покращення продуктивності і збільшення терміну служби інструменту. Інші типи промислових композитів, які позначаються в літературі як «марки DP», та GC80 були розроблені та запатентовані фірмою Sandvik для виробництва твердосплавного інструменту. Сійкі до зносу зовні та жорсткі у центрі бури використовуються при ударному бурінні для видобутку корисних копалин. Технологія, розроблена і впроваджена в університеті Юти, широко використовується при виготовленні вкладишів для гірничого інструменту та бурових доліт для буріння нафти і газу.