

В.І. Лавріненко, д-р техн. наук

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

СУЧАСНІ РОЗРОБКИ В ФОРМУВАННІ ГАЛЬВАНІЧНИМ МЕТОДОМ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ШАРУ ІНСТРУМЕНТУ, ЗАСТОСУВАННІ CVD- І НРНТ-АЛМАЗІВ ТА ПРЕЦИЗІЙНІЙ ПРАВЦІ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДІЛЯНОК АЛМАЗНОГО ШАРУ

В статті переважна увага зупинена на сучасних публікаціях, присвячених алмазно-абразивному інструменту. Досліджено тертя та зношування двох типів PCD: HFCVD – гарячої нитки хімічного осадження з парової фази, та спеченого під високим тиском і високою температурою (НРНТ) по сталі та кераміці. У PCD як коефіцієнт тертя, так і швидкість зношування були загалом нижчими, за винятком зразка HFCVD. Тобто, полікристалічний CVD можливо розглядати як алмазний матеріал для правлячого інструменту. Показано, що лазерний метод чорнової правки кругів застосовується для швидкого видалення зайвого абразивного шару, а електроерозійна прецизійна правка не тільки підвищила точність профілю, але і реалізувала поновлення ріжучої здатності шліфувального інструменту. На наш погляд, на це треба звернути увагу, особливо при правці кругів із CVD-алмазами. Мікроструктурні CVD-алмазні шліфувальні інструменти набувають все більшої уваги в області прецизійного шліфування і мікрошліфування з-за їх переваг: низьких зусиль шліфування, високої точності обробки і гарної зносостійкості. Встановлено, що точність правки алмазних arc-shared шліфувальних кругів можливо значно підвищити за рахунок зменшення зносу алмазних частинок гальванічного правлячого інструмента.

***Ключові слова:** алмазно-абразивний гальванічний шар, НРНТ-алмаз, прецизійна правка, полікристалічний CVD-алмаз, зносостійкість.*

Вступ

На машинобудівних підприємствах України для правки сучасних абразивних кругів (при шліфуванні поверхонь обертання складнофасонних виробів) нині починають використовуватися імпортні правлячі ролики з CVD-алмазами. 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. Витягнута форма CVD-елементів і більша глибина закладання у зв'язці має стабілізувати їх утримання на робочій поверхні інструменту, а отже, збільшити ресурс правлячого інструменту. З іншого боку, використання лише одних CVD-алмазів обумовлює велику їх кількість на периферії інструменту з кінематичних міркувань, інакше абразивний матеріал круга, що піддається правці, підмиватиме зв'язку вже в місцях закладання CVD-алмазів, і вже вони випадатимуть не використавши свій ресурс. Тому аналіз сучасних розробок в виявленні особливостей формування гальванічного робочого шару, особливо з CVD-алмазами, є актуальним з точки зору розробок сучасного вітчизняного правлячого інструменту.

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. Тому цьому постійно приділяється увага дослідниками. В даній статті нами зупинена увага на найновіших сучасних розробках, переважно 2022–2023 років, в формуванні методом гальванопластики алмазно-абразивного шару інструменту, застосуванні CVD- і HPHT-алмазів та прецизійній правці складнопрофільних ділянок інструменту.

Аналіз сучасних досліджень

Свого часу нами була звернена увага на особливості і застосування CVD-алмазів в алмазному інструменті [1]. Наведено технологічні особливості отримання алмазних інструментів із робочим шаром з CVD-алмазів та застосування таких інструментів. Показані зразки полікристалічних CVD-алмазів для правлячого інструменту та особливості їх застосування в правлячих роликах. Для нас такі дослідження є цікавими як з точки зору застосування досконалих алмазних зерен [2], так і з точки зору алмазно-гальванічного покриття [3]. Саме тому в даному огляді основна увага приділена викладенню сучасних розробок, пов'язаних із вказаними вище питаннями.

Виклад основного матеріалу

Питання, пов'язані із прецизійним алмазним правлячим інструментом, можливо розділити на три основні групи: по-перше, це алмазні зерна, по-друге, гальванічний шар, по-третє, це питання, пов'язані безпосередньо із особливостями правки. Тому в даній роботі нами і були викладені матеріали відомих з літератури наукових публікацій саме у викладеному вище переліку важливих і актуальних напрямків.

Спочатку нами було звернено увагу на розробки, пов'язані із різними алмазними зернами та їх особливостями.

Трибологічна поведінка полікристалічних алмазів (PCD) проти різних матеріалів є фундаментальною для їх застосування в абразивній та підшипниковій промисловості. У статті [4] досліджено тертя та зношування двох типів PCD: гарячої нитки хімічного осадження з парової фази (HFCVD) та спеченого під високим тиском і високою температурою (HPHT) по сталі GCr15 та кераміці Si₃N₄. Вкажемо, що в літературі не обговорюється вплив шорсткості поверхні. Насправді під час відпалу початково гладка поверхня полірованого PCD може зазнати різкої зміни шорсткості через надмірне теплове розширення кобальту та відкол дрібних алмазних частинок. Крім того, вилуговування кобальту додатково сприятиме шорсткості поверхні PCD через наявність збільшеної пористості. Встановлено (рис. 1), що по-перше, коефіцієнт тертя (*COF*) зростає зі збільшенням шорсткості; по-друге, як *COF*, так і швидкість зношування (*k*) керамічних куль Si₃N₄ були загалом нижчими, ніж у сталевих куль GCr15, за винятком *COF* зразка HFCVD; по-третє, швидкість зношування (*k*) збільшувалася зі збільшенням розміру зерна PCD, що супроводжувалося зменшенням залишкового вмісту кобальту. Дослідники спостерігали перехідні плівки SiO₂ та його гідрату на межі тертя Si₃N₄/алмаз, які, як виявилось, згладжують тертя та знос. Крім того, на інтерфейсах GCr15/PCD і Si₃N₄/PCD були ідентифіковані вуглецеві перехідні плівки, які в основному каталізуються залишковим кобальтом у PCD, що призводить до фазового перетворення з sp³ на sp².

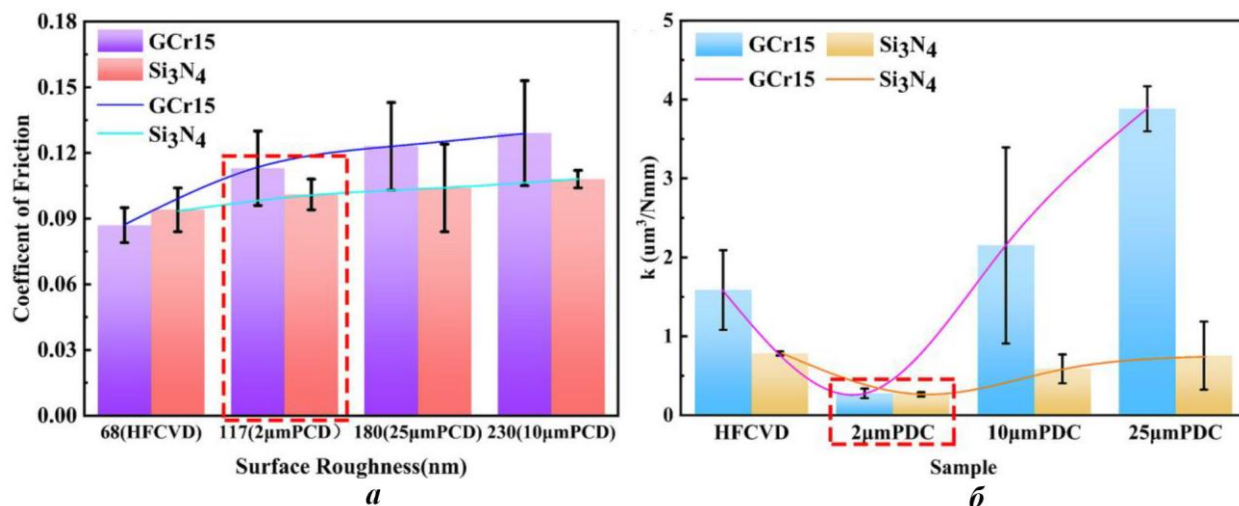


Рис. 1. Зміна коефіцієнту тертя (COF) зразків PCD та HFCVD зі збільшенням шорсткості (а) та зміна швидкості зношування (k) керамічних Si₃N₄ і сталевих куль GCr15 зі збільшенням розміру зерна PCD [4]

Оскільки в алмазному правлячому інструменті ми маємо справу з алмазами та нікелевим гальванічним шаром, то, на наш погляд, цікавими є дослідження, викладені в статті [5], де розглядаються алмази з нікелевим покриттям зерен (рис. 2).

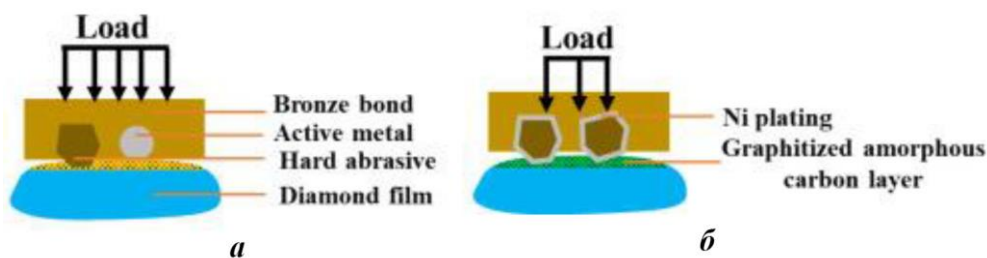


Рис. 2. Принципова схема, яка описує взаємодію алмазу без покриття (а) та алмазу з нікелевим покриттям (б) з оброблюваною алмазною поверхнею [5]

Досягнення ефективної обробки алмазів із низьким рівнем пошкоджень має велике значення, але алмаз має високу твердість і хімічну інертність, що ускладнює його обробку. Щоб вирішити це, алмазну плівку шліфували за допомогою шліфувального круга, що містить нікельовані (Ni) алмазні абразиви на основі механохімічного ефекту. Максимальна середня швидкість видалення матеріалу алмазної плівки досягла 2469 нм/хв при тиску шліфування 600 Н при швидкості 600 об/хв, а мінімальна середня шорсткість поверхні алмазної плівки досягла 3,93 нм при 500 Н 600 об/хв. Швидку реакцію видалення алмазної плівки можна пояснити каталітичним ефектом покриття Ni, що викликає графітизацію алмазної плівки в контактних точках розділу під дією високої температури, що створюється під час тертя; згодом її можна видалити механічною дією абразивів. Ця робота [5] має величезний потенціал для ефективного та малопошкодженого шліфування алмазних плівок.

Мікроструктурні алмазні шліфувальні інструменти, отримані хімічним осадженням з парової фази (CVD), отримують все більше уваги в області прецизійного шліфування і мікрошліфування з-за їх переваг: низьких зусиль шліфування, високої точності обробки і гарної зносостійкості. В статті [6] вперше була створена нова тривимірна модель топографії

поверхні оригінальних алмазних шліфувальних CVD-кругів на основі множин випадкових даних про форму, розмір, положення і розподіл алмазних зерен CVD. При цьому модель топографії поверхні круга моделювалася в залежності від моделі круга і кінематики шліфування. Були представлені мікроструктуровані моделі поверхні шліфувальних CVD-кругів, що сполучають різні форми мікроструктур (рис. 3).

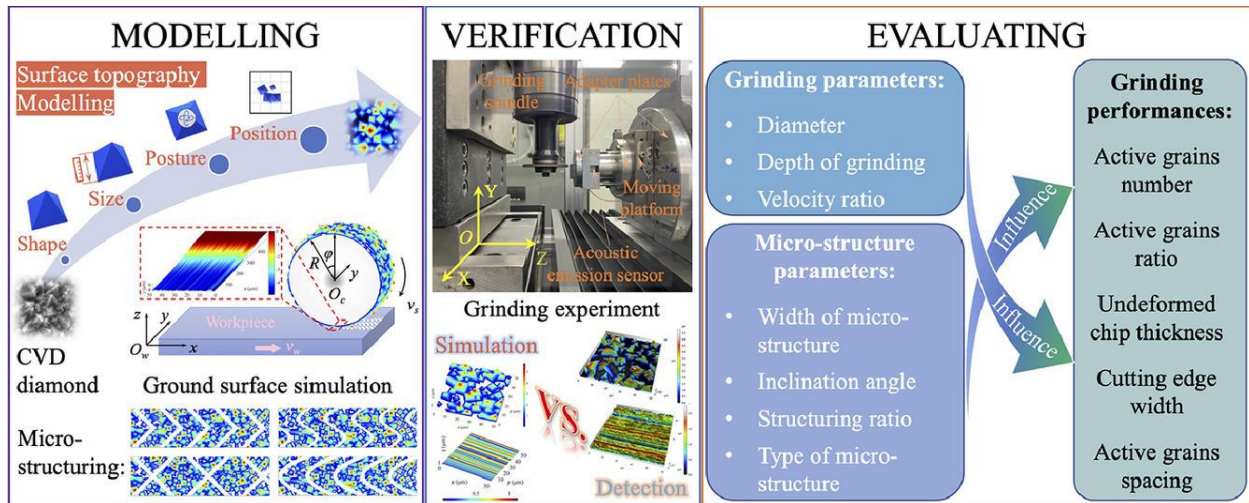


Рис. 3. Мікроструктуровані моделі поверхні шліфувальних CVD-кругів, що сполучають різні форми мікроструктур [6]

Моделюванню шліфувальної поверхні круга присвячена і стаття [7]. Надійний прогноз сил шліфування і морфології поверхні має вирішальне значення для проектування процесу шліфування. Але з-за складної мікроструктури шліфувального круга, який містить абразивні зерна довільного розміру і розподілені випадковим чином, практична модель прогнозування є недосяжною.

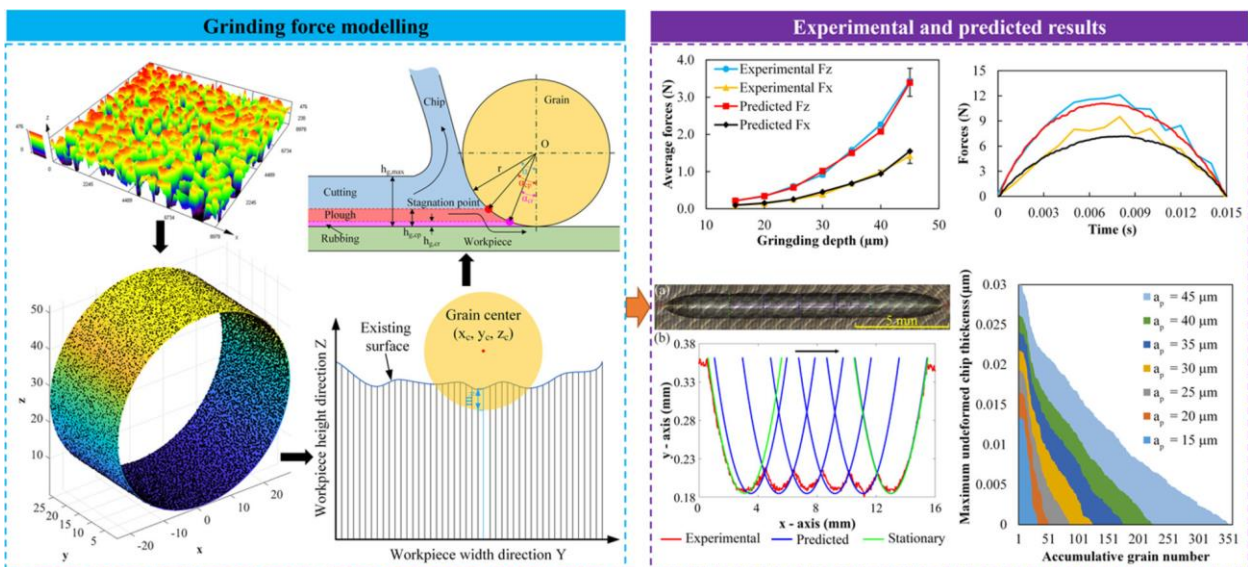


Рис. 4. Моделювання еволюції морфології шліфованої поверхні, товщини недеформованої стружки, взаємодії між абразивними зернами і механіки контакту зерна із заготовкою [7].

Метою статті [7] була розробка нової стохастичної моделі, що враховує випадковий характер розміру абразивних зерен і їх розподілу в шліфувальному крузі і, відповідно, більш точного прогнозування сил шліфування. Крім того, в моделюванні інтегровані еволюція морфології шліфованої поверхні, товщина недеформованої стружки, взаємодія між абразивними зернами і механіка контакту зерна із заготовкою (рис. 4).

Як теоретично, так і експериментально доведено, що створена стохастична модель може надійно прогнозувати зусилля шліфування, а також може бути застосована для виявлення механізмів, що знаходяться в основі процесів подрібнення. Тепер розглянемо публікації, присвячені особливостям формування і подальшого застосування гальванічного робочого шару в інструменті.

В статті [8] розглянуті дослідження, пов'язані із застосуванням гальванічних інструментів з КНБ при плоскому торцевому шліфуванні. Зниження ефективності обробки з плином часу, характерне для обробки гальванічним інструментом з-за його зносу, утруднює моделювання зменшення висоти виступання зерен. В статті також представлена нова спроба вивчення характеристик зносу і систематизації процесу обробки гальванічними кругами з КНБ, пов'язана з переходом процесу від двочасткового (шліфування) до тричасткового абразивного стирання (вільна абразивна обробка) для конкретних товщин покриття. Процес проводився по кінематичній схемі, схематично поданий на рис. 5. Тримач заготовки і інструмент мали незалежні приводи, що дозволяли точно встановлювати необхідні швидкості обертання n_t та n_w відповідно. Сталеві поверхні оброблялися при контакті з робочою поверхнею інструментів з частинками КНБ двох розмірів: В107 та В64 в гальванічному покритті різної товщини.

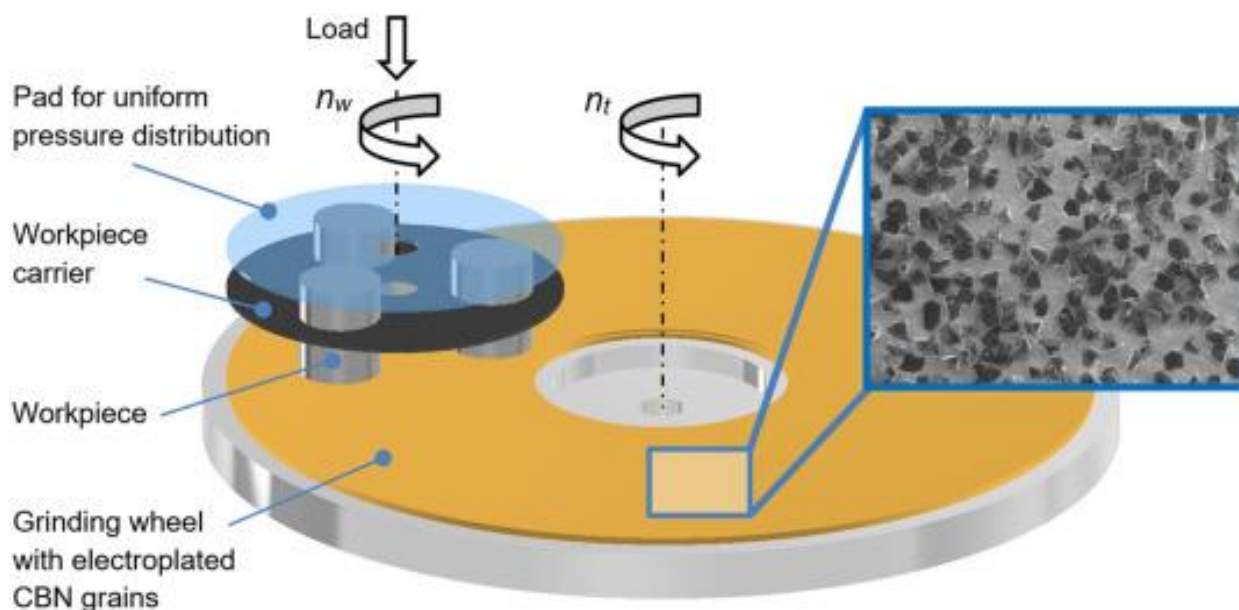


Рис. 5. Схематичне зображення процесу з кінематикою однодискової притирки з основними елементами виконавчої системи і кінематичними параметрами [8]

Процес механічної обробки для трьох висот зарощення нікелем зерна $H_{b1} > H_{b2} > H_{b3}$ схематично поданий на рис. 6. Велике початкове виступання зерен (рис. 6, а) сприяє їх видаленню з фрагментацією, що зменшує їх обнаженість H_e і відстань між інструментом і заготовкою (рис. 6, б).

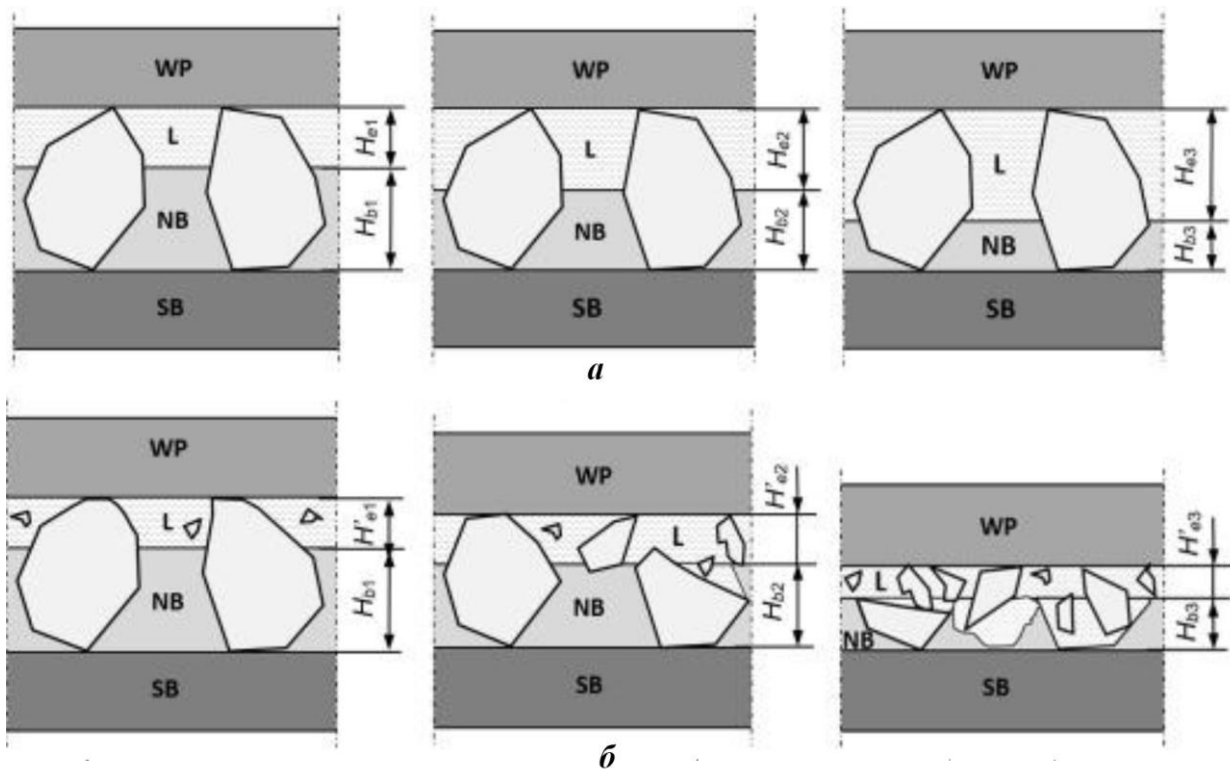


Рис. 6. Вплив товщини покриття зерна ($H_{b1} > H_{b2} > H_{b3}$) на хід механічної обробки і характеристики зношування: а) початкове (максимальне) і б) знижене виступання зерна після обробки гальванічним інструментом : **WP** – заготовка, **L** – змазка, **NB** – нікелева зв’язка, **SB** – сталева основа [8]

Кількість активних частинок підвищується із збільшенням часу обробки, але максимальні та середні навантаження на одну активну частинку зменшуються. Процес розглядався від шліфування у вигляді двостороннього стирання із найбільш товстою зв’язкою ($T_b = 65\%$), через шліфування для проміжної зв’язки ($T_b = 50\%$), до традиційної притирки, яка розглядається як трьохстороннє стирання, що є характерним для найтоншої зв’язки ($T_b = 35\%$). Тобто, тут зерна з часом руйнуються на більш дрібні шматочки. Більш тонке покриття допомогло видалити зерна і розбити їх на більш дрібні частинки, збільшуючи їх концентрацію по площі і кількість активних зерен. Це зменшило глибину проникнення абразивних частинок в обробну поверхню і, в свою чергу, призвело до зниження шорсткості поверхні [8].

В статті [9] для дослідження характеристик і зносу інструменту при ультразвуковому вібраційному фрезеруванні-шліфуванні композитів з керамічною матрицею SiC_f/SiC були застосовані і вивчені чотири типа інструментів, включаючи гальванічний. Полікристалічний алмазний компакт (PDC) виготовлявся із застосуванням технології (HPHT) високих тисків (6 ГПа) і температур (1500 °C). Як показано на рис. 7, шар PDC товщиною 1 мм був виготовлений на верхній частині стрижня з твердого сплаву WC K20.

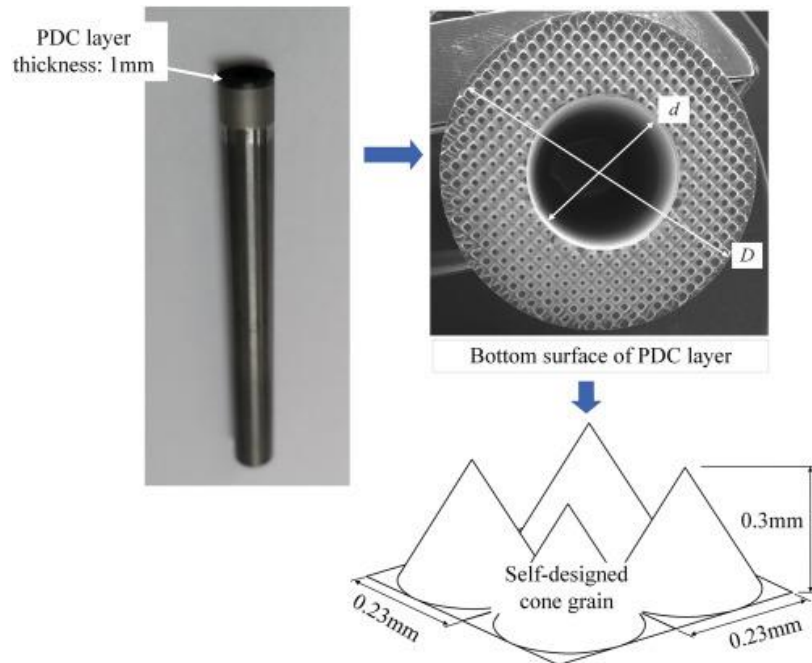


Рис. 7. Схема конструкції інструмента і конусного зерна фрезерно-шліфувального інструмента PDC [9]

Для порівняння характеристик PDC-інструменту (алмазне зерно розміром 230 мкм) він був порівняний з трьома типами фрезерно-шліфувального інструмента: один гальванічний алмазний інструмент (маркування 100# EDT, середній розмір зерна 150 мкм), два напресованих алмазних інструмента (маркування 50#BDT, середній розмір зерна 300 мкм; маркування 200#BDT, середній розмір зерна 75 мкм) (рис. 8) при однакових умовах обробки.

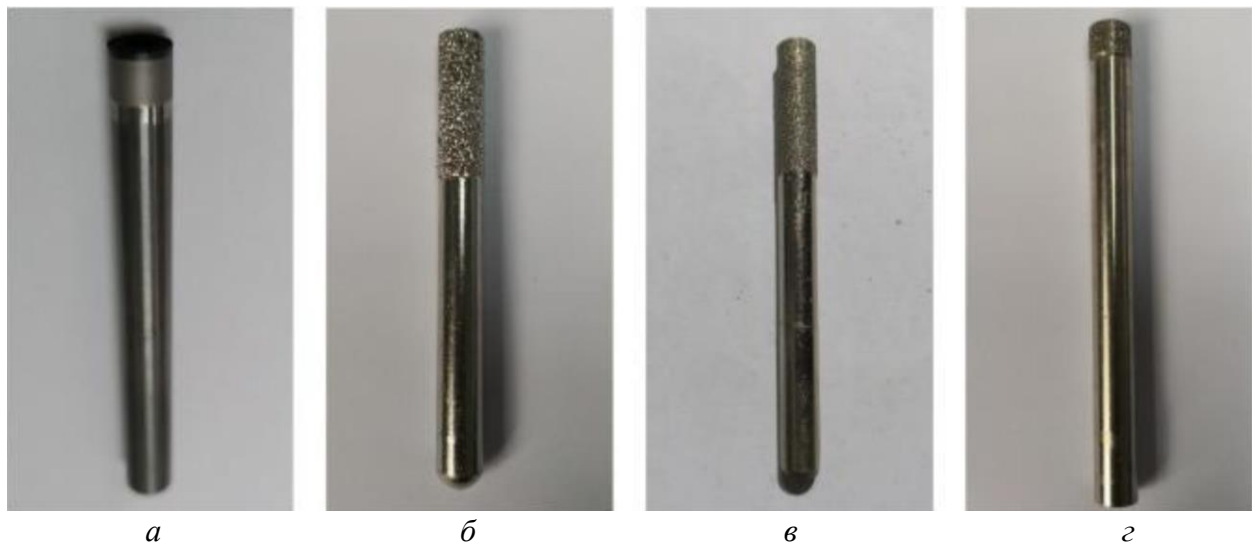


Рис. 8. Фрезерно-шліфувальний інструмент, використаний в роботі [9]: а – PDC; б – 50#BDT; в – 200#BDT; г – 100#EDT

Оскільки знос зерен такого інструменту важко обчислити та виміряти, об'єм видалення матеріалу інструментів до зношування за однакових умов обробки розглядався як стандарт

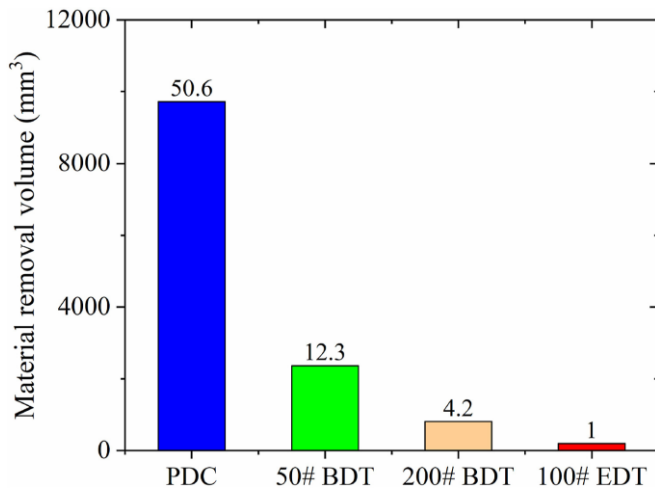


Рис. 9. Порівняльний аналіз обсягу знімання матеріалу (стійкість інструменту) цих чотирьох фрезерно-шліфувальних інструментів [9]

довговічності інструменту в цьому дослідженні. На рис. 9 показано обсяги знімання матеріалу чотирма інструментами (термін служби інструменту). Зрозуміло, що PDC має найдовший термін служби серед цих чотирьох інструментів. Об'єм знімання матеріалу для PDC, 50# BDT, 200# BDT і 100# EDT становив 9720 мм³, 2362,5 мм³, 810 мм³ і 192 мм³, а коефіцієнт довговічності інструменту становив 50,6:12,3:4,2:1. З точки зору довговічності інструменту, серед цих чотирьох інструментів 100# EDT все ще непридатний для фрезерування-шліфування керамічного композиту SiC_f/SiC із застосуванням

ультразвукової вібрації, тому слід рекомендувати PDC і 50# BDT.

Тепер, на закінчення даного огляду, розглянемо публікації, присвячені питанням, які безпосередньо відносяться до технології правлення.

В статті [10] детально досліджені характеристики зносу алмазних правлячих кругів з гальванічним покриттям, які застосовуються для прецизійної правки дугоподібних пошарових (arc-shaped) алмазних кругів. Досліджувалася топографія зносу, висота виступання алмазів, а також механізм зношування металічної матриці. Звернемо увагу (рис. 10) на те, що профіль arc-shaped алмазних кругів до правки є хвилеподібним (profile before truing) із підвищеним радіальним биттям. Тобто, в процесі попередньої алмазної обробки алмазний круг набуває хвилювального зносу, на що ми вже неодноразово звертали увагу як на закономірний процес зношування [11].

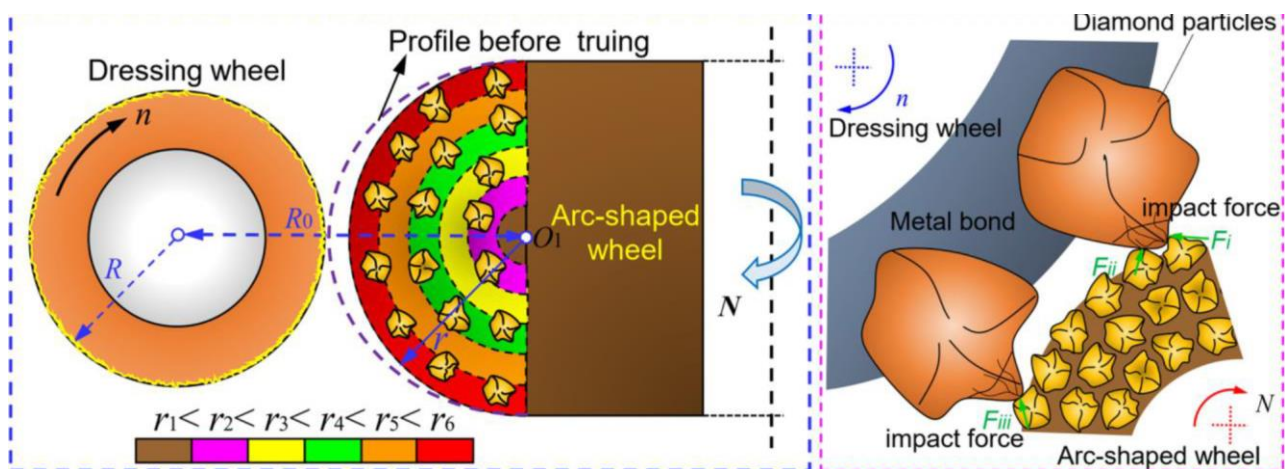


Рис. 10. Схема правлення arc-shaped алмазних кругів [10]

Як бачимо, і в статті [10] це підтверджується. Встановлено, що точність правки алмазних arc-shaped шліфувальних кругів можливо значно підвищити за рахунок зменшення зносу алмазних частинок гальванічного правлячого інструмента. В правлячому крузі з великою зернистістю алмазних частинок з'являється графітизація, і швидкість зносу алмазу буде прискорена. Як приклад, правлячий круг з розміром зерна D213 мкм успішно знижує погрішність радіального биття arc-shaped алмазного круга з гібридною зв'язкою від 35 мкм до 1,9 мкм. А це вказує на те, що висота хвилі на поверхні круга при алмазній обробці складала 35 мкм [10], що вкладається в ті межі, які наведені нами в [11].

В статті [12] для досягнення високопродуктивної і точної правки вказаних вище arc-shaped алмазних шліфувальних кругів застосовується вже комбінований метод правки із застосуванням лазерної чорнової правки і електророзрядної (ED) прецизійної правки (рис. 11).

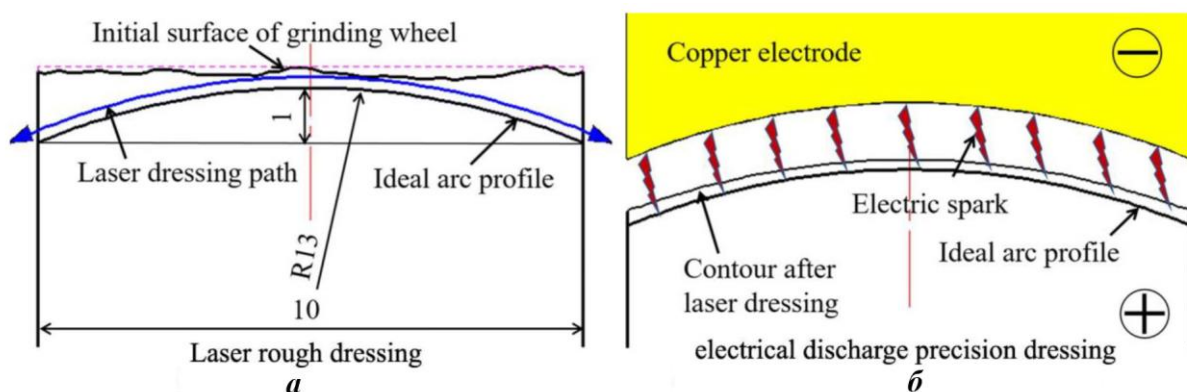


Рис. 11. Правлення алмазних кругів: лазерне (а) та електророзрядне (б) [12]

Розмір п'ятна лазерного променя і енергія лазера, яка випромінюється на поверхню шліфувального круга, змінюються в часі в залежності від шляху правки, що утруднює реалізацію високоточної правки. Тому лазерний метод чорнової правки застосовується для швидкого видалення зайвого абразивного шару, а електроерозійна прецизійна правка не тільки підвищила точність дугоподібного контуру, але і реалізувала поновлення ріжучої здатності шліфувального круга. Профіль arc-shaped кругів радіусом 13 мм отримували на алмазному крузі з зернистістю алмаза D120. Радіус остаточно обробленого профілю складав 13 007 мкм, а значення похибки профілю склало 10,67 мкм. Встановлено, що алмазні зерна на поверхні круга є в певній мірі графітованими. Степень пошкодження алмазних зерен при лазерній правці була значно більшою, ніж при електророзрядній. Разом з тим, більша частина графітового шару на поверхні алмазних частинок надалі може бути видалена при шліфовці алюмооксидної кераміки [12].

На закінчення цієї частини огляду звернемо увагу на те, що хоча у літературі є багато робіт із застосування акустичної емісії (АЕ) для шліфування і правки шліфувальних кругів, але декілька фундаментальних взаємозв'язків АЕ ще не встановлені. Це [13]: 1) зв'язок між енергією правки і вимірним сигналом АЕ; 2) як різні режими контакту алмаз/зерно (руйнування, пластична деформація, тертя і т.п.) впливають на енергію АЕ; 3) як це можливо застосувати для кількісної оцінки ефективності правки, гостроти зерен круга і викликаного зносом зміни форми алмаза. В статті [13] описані дослідження вказаних вище фундаментальних взаємозв'язків і введений новий параметр – *питома енергія акустичної емісії правки*, який може бути застосований для кількісної оцінки ефективності правки і ріжучої здатності круга. Також досліджено застосування інтенсивності АЕ для оцінки зносу

алмазів, що дозволяє оператору оцінити розмір зношеної поверхні і коли необхідні зміни, щоб уникнути припалу обробної поверхні (рис. 12).

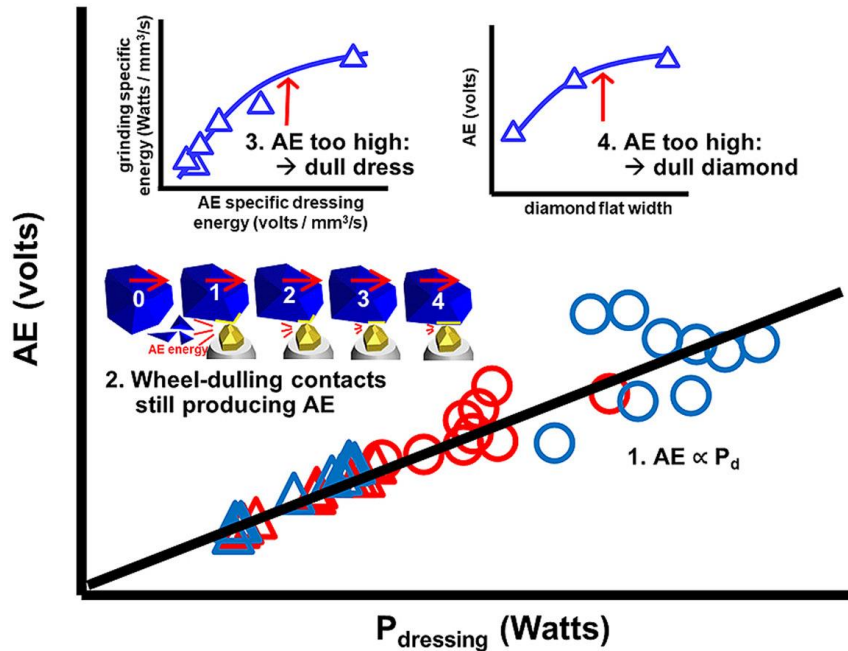


Рис. 12. Наукові принципи, покладені у основу механізму AE при правці [13]

Висновки

Досліджено тертя та зношування двох типів PCD: гарячої нитки хімічного осадження з парової фази (HFCVD) та спеченого під високим тиском і високою температурою (HPHT) по сталі GCr15 та кераміці Si_3N_4 . У PCD як коефіцієнт тертя, так і швидкість зношування були загалом нижчими, за винятком коефіцієнту тертя зразка HFCVD. Тобто, полікристалічний CVD можливо розглядати як алмазний матеріал для правлячого інструменту.

Показано, що лазерний метод чорнової правки кругів застосовується для швидкого видалення зайвого абразивного шару, а електроерозійна прецизійна правка не тільки підвищила точність профілю, але і реалізувала поновлення ріжучої здатності шліфувального інструменту. На наш погляд, на це треба звернути увагу, особливо при правці кругів із CVD-алмазами.

Мікроструктурні CVD-алмазні шліфувальні інструменти набувають все більшої уваги в області прецизійного шліфування з-за їх переваг: низьких зусиль шліфування, високої точності обробки і гарної зносостійкості.

Встановлено, що точність правки алмазних arc-shaped шліфувальних кругів можливо значно підвищити за рахунок зменшення зносу алмазних частинок гальванічного правлячого інструмента. В правлячому крузі з великою зернистістю алмазних частинок з'являється графітизація, і швидкість зносу алмазу буде прискорена.

V.I. Lavrinenko

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

MODERN DEVELOPMENTS IN THE FORMATION OF THE DIAMOND ABRASIVE LAYER OF THE TOOL BY THE GALVANIC METHOD, THE APPLICATION OF CVD- AND HPHT-DIAMONDS AND THE PRECISION TREATMENT OF COMPLEX PROFILE SECTIONS OF THE DIAMOND LAYER

The article focuses mainly on modern publications devoted to diamond abrasive tools. Friction and wear of two types of PCD were studied: HFCVD – hot filament chemical vapor deposition, and *the one* sintered under high pressure and high temperature (HPHT) on steel and ceramics. In PCD, both the friction coefficient and the wear rate were generally lower, except for the HFCVD sample. That is, polycrystalline CVD can be considered as a diamond material for a dresser tool. It is shown that the laser method of rough grinding of wheels is used for quick removal of an excess abrasive layer, and electroerosion precision grinding not only increased the accuracy of the profile, but also realized the renewal of the cutting ability of the grinding tool. In our opinion, attention should be paid to this, especially when dressing wheels with CVD diamonds. Microstructured CVD diamond grinding tools are gaining more and more attention in the field of precision grinding and microgrinding due to their advantages: low grinding effort, high processing accuracy and good wear resistance. It has been established that the accuracy of straightening diamond arc-shaped grinding wheels can be significantly increased by reducing the wear of diamond particles of the galvanic dresser tool.

Key words: diamond-abrasive galvanic layer, HPHT-diamond, precision dressing, polycrystalline CVD-diamond, wear resistance.

Література

1. Lavrinenko V.I. CVD diamonds in diamond tools: features and properties, peculiarities of processing, and application in modern diamond tools (Review). *Journal of Superhard Materials*. 2022. Vol. 44, N 6. P. 65–87.
2. Lavrinenko V.I., Ilnitskaya G. D., Sheiko M. N., Dobroskok V. L., Ostroverkh Ye. V., Solod V. Yu. Improving the performance characteristics of synthetic diamond for high-precision diamond dressing tool. *Science and innovation*. 2021. Vol.17, N 6. P. 72–82.
3. Lavrinenko V.I., Lubnin A.G., VTKach.M., Fesenko I.P., Smokvyna V.V. Features of the structural organization of a single-layer diamond-galvanic coating for the ruling tool. *Journal of Superhard Materials*. 2021. Vol. 43, N 2, P. 145–150.
4. Cui X., Qin Y., Han X., Chen H., Ruan X., Zhang H., Jiao C., Mao R., Hao J., Zhao S., Hou S., Pian X., Wang Y., Nishimura K., Deng L., Jiang N. Comparing the tribological behavior of polycrystalline diamonds against steel GCr15 and ceramic Si₃N₄: friction and wear. *Diamond and Related Materials*. 2024. Vol. 141. 110550.
5. Zhou Y., Wang Y., Su S., Zhao L., Zhao M., Yuan Y., Zang J., Lu J., Xu X., Zhang P. Rapid grinding diamond film using a grinding wheel containing nickel-plated diamond abrasives based on mechanochemical effect. 2023. *Diamond and Related Materials*. Vol. 139. 110389.
6. Guo Z., Guo B., Wu G., Xiang Y., Meng Q., Jia J., Zhao Q., Li K., Zeng Z. Three-dimensional topography modelling and grinding performance evaluating of microstructured CVD diamond grinding wheel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 244. 108079.
7. Wu Z., Zhang L. Analytical grinding force prediction with random abrasive grains of grinding wheels. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 250. 108310.
8. Deja M. The use of Preston equation to determine material removal during lap-grinding with electroplated CBN tools. *Wear*. 2023. Vol. 528–529. 204968.

9. Xiong Y., Wang W., Jiang R., Huang B., Liu C. Feasibility and tool performance of ultrasonic vibration-assisted milling-grinding SiC_f/SiC ceramic matrix composite. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 3018–3033.
10. Wang S., Zhao Q., Guo B. Wear characteristics of electroplated diamond dressing wheels used for on-machine precision truing of arc-shaped diamond wheels. *Diamond and Related Materials*. 2022. Vol. 129. 109372.
11. Pasichnyi O. O., Lavrinenko V.I. The influence of circumferential waviness of the diamond wheel working surface on the machined surface roughness. *Journal of Superhard Materials*, 2019, Vol. 41, N 4, P. 278–280.
12. Dai L., Chen G., Li M., Yuan S. Efficient and precision dressing of arc-shaped diamond grinding wheel by laser dressing and electrical discharge dressing. *Diamond and Related Materials*. 2022. Vol. 125. 108978.
13. Badger J., Murphy S., O'Donnell G. E. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 125. P. 11–19.

Надійшла 22.02.24

References

1. Lavrinenko V.I. (2022). CVD diamonds in diamond tools: features and properties, peculiarities of processing, and application in modern diamond tools (Review). *Journal of Superhard Materials*, 44(6), 65–87.
2. Lavrinenko, V.I., Ilnitskaya, G.D., Sheiko, M. N., et al. (2021). Improving the performance characteristics of synthetic diamond for high-precision diamond dressing tool. *Science and innovation*, 17(6). 72–82.
3. Lavrinenko, V.I., Lubnin, A.G, Tkach, V.M., at al. (2021). Features of the structural organization of a single-layer diamond-galvanic coating for the ruling tool. *Journal of Superhard Materials*, 43(2), 145–150.
4. Cui, X., Qin, Y., Han, X., et al. (2024). Comparing the tribological behavior of polycrystalline diamonds against steel GCr15 and ceramic Si₃N₄: friction and wear. *Diamond and Related Materials*, 141, 110550.
5. Zhou, Y., Wang, Y., Su, S., et al. (2023) Rapid grinding diamond film using a grinding wheel containing nickel-plated diamond abrasives based on mechanochemical effect. *Diamond and Related Materials*, 139, 110389.
6. Guo, Z., Guo, B., Wu, G., et al. (2023) Three-dimensional topography modelling and grinding performance evaluating of micro-structured CVD diamond grinding wheel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 244, 108079.
7. Wu, Z., & Zhang, L. (2023) Analytical grinding force prediction with random abrasive grains of grinding wheels. *International Journal of Mechanical Sciences*. 250, 108310.
8. Deja, M. (2023) The use of Preston equation to determine material removal during lap-grinding with electroplated CBN tools. *Wear*. 528–529, 204968.
9. Xiong, Y., Wang, W., Jiang, R., et al. (2022) Feasibility and tool performance of ultrasonic vibration-assisted milling-grinding SiC_f/SiC ceramic matrix composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 3018-3033.
10. Wang, S., Zhao, Q., & Guo, B. (2022). Wear characteristics of electroplated diamond dressing wheels used for on-machine precision truing of arc-shaped diamond wheels. *Diamond and Related Materials*, 129, 109372.

11. Pasichnyi, O. O., Lavrinenko, V.I. (2019). The influence of circumferential waviness of the diamond wheel working surface on the machined surface roughness. *Journal of Superhard Materials*, 41(4), 278–280.
12. Dai, L., Chen, G., Li, M., & Yuan, S. (2022). Efficient and precision dressing of arc-shaped diamond grinding wheel by laser dressing and electrical discharge dressing. *Diamond and Related Materials*, 125, 108978.
13. Badge, J., Murphy, S., & O'Donnell, G. E. (2018). Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 125, 11–19.

УДК 669.27-935.4

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-219-230

В. П. Бондаренко, член-корр. НАН України; **О. О. Матвійчук**, канд. техн. наук;
Л. М. Солодова, мол.наук.співроб.; **О. В. Євдокимова**, канд. техн. наук;
І. В. Савчук, наук. співроб.; **В. М. Ткач**, д-р фіз.-мат. наук

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

МІКРОКРИСТАЛИ WC, ВИРОЩЕНІ З WC–Co РОЗПЛАВІВ

Представлені результати дослідження росту мікрокристалів WC у сплавах WC – 10, 40, 50, 65 % мас.% Co за температури 1800 °C та ізотермічної витримки 10 хвилин, та охолодження в печі зі швидкістю 6 °C /хв. Показано, що найбільші кристали WC, розміром більше 1000 мкм, можна отримати лише з повністю розплавленого сплаву з вмістом атомів W, C і Co близьким до рівноважного. Мікрокристали розміром до 100 мкм можуть бути отримані зі сплавів WC – 40 та 50 % мас. Co за температури дозрівання вище лінії ліквідусу.

Ключові слова: мікрокристали карбіду вольфраму, вирощування, дозрівання, вольфрамо-кобальтові розплави.

Вступ

В роботі досліджується ріст крупних мікрокристалів WC з розміром частинок понад 200 мкм у вольфрамо-кобальтових розплавах. Отримання порошку крупних мікрокристалів WC є актуальним, тому що такі порошки використовуються як зносостійкі наповнювачі в алмазному буровому інструменті [1], композитах триботехнічного призначення [2], матеріалах для наплавки [3–5].

Ріст мікрокристалів WC досліджувався під час спікання твердих сплавів з часу їх появи. Мета таких досліджень неодноразово змінювалася: досліджувалася кінетика зростання середнього розміру зерна WC у твердих сплавах з різним вмістом зв'язуючого металу [6–15]; вплив вмісту вуглецю на розмір зерен WC [16–19]; причини та закономірності росту аномально великих зерен WC в спечених твердих сплавах [4–6]; вплив легуючих **добавок** на кінетику росту та граничні розміри мікрокристалів WC [20–22]; утворення особливо дрібних, аж до нанорозмірних зерен WC [23]. Значну увагу було приділено процесам одержання твердих сплавів з крупними (до 10 мкм) зернами [19].