

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.4

УДК 53.06:621.923:546.1

Лавріненко В.І.¹, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-2098-7992,
e-mail: lavrinen52@gmail.com

Солод В.Ю.², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-7516-9535, e-mail: v_solod@ukr.net

Тищенко В.А.², аспірант, ORCID: 0009-0001-6473-5909, e-mail: v.a.tischenko@gmail.com

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ

²Дніпровський державний технічний університет МОН України, м. Кам'янське

Lavrinenko Valerii¹, Doctor of technical sciences, Professor

Solod Volodymyr², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Engineering, first vice-rector

Tyshchenko Volodymyr², Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Engineering

¹V.Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine, Kyiv

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЛІРУВАННЯ КРИХКИХ ТА ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯД)

У статті проаналізовано сучасні розробки в технологіях полірування широкої гами сучасних крихких та пластичних матеріалів. Хіміко-механічне полірування (Chemical-mechanical polishing — CMP) є методом вирівнювання, який враховує як локальні, так і глобальні аспекти матеріалів, що забезпечує мікромасштабне видалення матеріалів за рахунок синергії поверхневих хімічних речовин, хімічної реакції і механічного впливу. Аналіз даних за методом CMP виробів з різних матеріалів дозволив встановити, що він базується на синергетичній дії зміненого абразиву, переважно на основі CeO_2 , та додання хімічних реакцій використанням рідких суспензій або твердофазних хімічних реакцій, а також на розробці нових мікрошліфувальних інструментів. Показано, що в цілому метод CMP з різними модифікаціями дозволяє отримати для матеріалів різної твердості майже однакові, фактично граничні за нижнім рівнем, показники шорсткості поверхні за параметром S_a : для плавленого кремнезему 0,124 нм, для кремнію 0,1 нм та — 0,1 нм для м'якої міді.

Ключові слова: хіміко-механічне полірування; оксид церію; рідкі суспензії; твердофазні хімічні реакції; мікрошліфувальні інструменти; шорсткість обробленої поверхні.

The article analyzes modern developments in polishing technologies for a wide range of modern brittle and plastic materials. Chemical-mechanical polishing (CMP) is a leveling method that takes into account both local and global aspects of materials, providing microscale material removal through the synergy of surface chemicals, chemical reaction, and mechanical action. The analysis of data by the CMP method of products made of various materials allowed us to establish that it is based on the synergistic action of a modified abrasive, mainly on the basis of CeO_2 , and the addition of chemical reactions using liquid suspensions or solid-phase chemical reactions, as well as on the development of new micro-grinding tools. It is shown that, in general, the CMP method with various modifications makes it possible to obtain for materials of different hardness almost the same, actually limiting at the lower level, indicators of surface roughness according to the parameter S_a : for fused silica 0.124 nm and for silicon 0.1 nm, and for soft copper — 0.1 nm.

Keywords: chemical-mechanical polishing; cerium oxide; liquid suspensions; solid-phase chemical reactions; micro-grinding tools; roughness of the treated surface.

Постановка проблеми

Сучасні технології в машино- та приладобудуванні потребують нових високотехнологічних матеріалів, обробка яких значно ускладнена, особливо, з точки зору досягнення якісних показників кінцевої поверхні виробу. Зазвичай для цього застосовуються технології полірування, але вони значно збільшують енергоємність процесу оброблення. Між тим, і на це ми вже звертали увагу [1], у порівнянні з іншими галузями промисловості саме металургія і машинобудування вирізняються високим рівнем енергоємності продукції і це має стійку тенденцію до подальшого збільшення. Останнє викликано в значній мірі тим, що досягнення необхідної точності та якості обробки вимагає відповідного збільшення величини питомої енергії обробки.

Так, в роботі [2] показано, що питома енергія, яка витрачається на шліфування та тока-рну обробку, складає $(5,1...7,5) \cdot 10^4$ Дж/см³ та $(1,7...2,5) \cdot 10^3$ Дж/см³ відповідно. Все це означає, що для збільшення ефективності процесу механічної обробки важливо приділяти увагу фінішній обробці, зокрема процесам полірування. Виходячи з цього, дану роботу присвячено аналізу новітніх розробок, що стосуються технології полірування широкої гами сучасних крихких та пластичних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Хіміко-механічне полірування (СМР) є методом вирівнювання профілю поверхні, який враховує як локальні, так і глобальні аспекти матеріалів, та забезпечує мікромасштабне видалення матеріалів за рахунок синергії поверхневих хімічних речовин, ініціації хімічної реакції та механічного впливу. В останніх публікаціях СМР визначено у якості ефективного процесу обробки таких твердих і крихких матеріалів, як карбід кремнію, монокремній, нанодвійниковий алмаз (nt-D), леговані бором алмази, інвар, тощо.

СМР відоме як технологія «чорного ящика» [3], причому практичний досвід засвідчив, що шлам та абразиви в ньому є ключовими факторами, що впливають на характеристики обробки. Вважається, що найбільш застосовані при СМР CeO_2 -абразиви впливають на швидкість зйому та якість поверхні оброблюваних матеріалів, завдяки їх мікроморфології, розмірам зерен, механічним властивостям і наявних в них дефектах. У роботі [3] серію абразивів $\text{Ce}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_2$ з різними системами легування та кількістю відповідних компонентів було виготовлено методом розплавленої солі. Для всіх типів легування морфологія абразивів змінюється від сферичної до октаедричної, причому розмір зерен безперервно зменшується зі збільшенням ступеня легування. Експерименти із застосуванням СМР показують, що легування значно підвищує ефективність абразивів. Підтверджено, що після полірування одержують поверхню SiO_2 -виробу без пошкоджень та з малою шорсткістю.

У статті [4] наведені відомості про розроблений екологічно чистий та високоефективний метод вже не хімічної, як викладено вище, а електрохімічного механічного полірування (electrochemical mechanical polishing — ЕСМР) — для обробки 4H-SiC (0001), що не потребує рідини, що містить агресивні хімічні речовини, та застосовує іонопровідну композитну прокладку, яка складається з твердого полімерного електроліту та CeO_2 частинок. Швидкість зйому матеріалу (Material removal rate — MRR) при цьому є майже у 10 разів є вищою, ніж під час хімічно-механічного полірування. Зазначений метод видаляє поверхневі пошкодження та створює гладку поверхню на усьому масиві пластини і може бути вигідним для екологічно чистого полірування пластин SiC.

У процесі виробництва інтегральних схем широко застосовується технологія надточного стоншення із застосуванням самообертального шліфування заготовки з подальшим СМР, що дозволяє з високою швидкістю зняття матеріалу отримувати надтонкі кремнієві пластини великого розміру та малою товщиною пошкодженого шару. У роботі [5] досліджуються контактні характеристики поверхні розділу пластина-прокладка та корозійна поведінка шліфованої кремнієвої пластини, зануреної в полірувальний розчин. Спочатку кремнієві пластини шліфуються за допомогою різних кругів, а потім поліруються.

Полірування є важливим методом отримання надгладких непошкоджених поверхонь на пластинках з оксиду лютецію. Між тим, серед алмазних абразивних зерен в полірувальних кругах існує багато зерен з гострими кутами і зміна форми зерен приводить до різної якості поверхні, отриманої поліруванням. У дослідженні [6] алмазні абразивні зерна різної форми та моделі

при механічному поліруванні монокристалу оксиду лютецію були враховані шляхом залучення методу молекулярної динаміки (molecular dynamics — MD), що дозволяє безпосередньо моделювати процес видалення матеріалу атомарного масштабу під час обробки. При цьому вершини та кромки багатограних абразивних зерен врізаються в заготовку легше, ніж сферичних абразивних зерен, тому багатогранні абразивні зерна сприяють кращому видаленню матеріалу.

Робота [7] розкриває механізм CMP-полірування сплаву інвар при змащуванні водою із застосуванням згаданого вище MD-метода. Результати свідчать про те, що при CMP відповідна товщина водяної плівки та швидкість полірування можуть значно зменшити шорсткість поверхні заготовки й усунути підповерхневі дефекти. Пасивний вплив води поліпшує якість поверхні канавки. Сферичні абразиви змінюють характер руху атомів у поверхневому шарі. Із підвищенням швидкості прокочування зміна шорсткості поверхні та товщини підповерхневих пошкоджень має тенденцію до повільного зменшення, а надалі — до стабілізації.

Формулювання мети дослідження

Наведені вище відомості про проведені дослідження свідчать про ефективність застосування при поліруванні хіміко-механічних методів та врахуванні при цьому особливостей абразивів, які застосовуються. На підставі цього, метою даної статті ставилося розгляд найновіших розробок, пов'язаних з поліруванням сучасних крихких та пластичних матеріалів, та визначення напрямків підвищення ефективності зазначеного способу фінішної обробки.

Виклад основного матеріалу

Найбільші проблеми, з якими стикаються виробничники, пов'язані з отриманням якісної поверхні твердих та крихких матеріалів.

Отримати поверхню плавного кремнезему на атомарному рівні з високим MRR за допомогою CMP є складним завданням. Для вирішення цього була розроблена нова суспензія для CMP на основі олеату калію та деіонізованої води з використанням абразиву CeO_2 , покритого гексагональним нітридом бору (h-BN), який зменшує тертя в зоні контакту [8]. Завдяки цьому покриттю, за допомогою церієвих абразивів реалізували нову функцію надзмащування під час CMP, запобігаючи пошкодженням і досягаючи надгладкої поверхні (рис. 1).

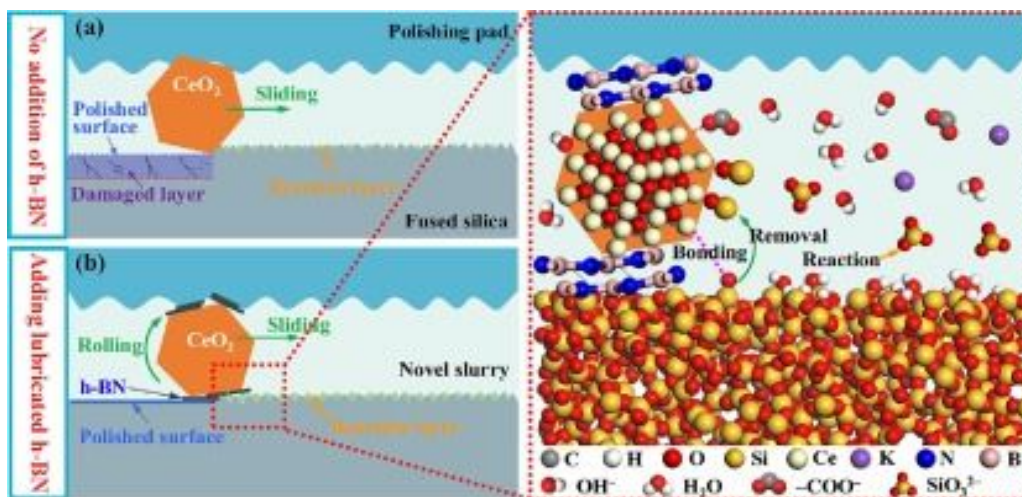


Рис. 1. Схематичне представлення механізму надзмащування за допомогою h-BN під час CMP плавного кремнезему [8].

Дослідження [8] підтвердили, що товщина пошкодженого під час CMP шару не перевищує 2,7 нм. MRR при цьому складає $31,92 \text{ мкм} \cdot \text{год}^{-1}$, а шорсткість поверхні (S_a) становить 0,124 нм. Такі результати дають можливість досягти нових підходів до отримання для крихкого матеріалу поверхні на атомарному масштабі з високим MRR за допомогою синергічного ефекту абразивів.

Новий графіт/алмазний композит (Gradia) має напівпровідникові характеристики з контрольованим питомим опором. Довершена поверхня відіграє вирішальну роль у використанні Gradia. Однак контрольоване видалення поверхневого шару Gradia є складним, оскільки фізичні та хімічні властивості компонентів графіту та алмазу відрізняються. У дослідженні [9] для обробки поверхні Gradia було реалізовано СМР шляхом використання окислювача K_2FeO_4 . Субнаномасштабна шорсткість поверхні Gradia була досягнута, в першу чергу, застосуванням оптимізованих параметрів полірування. Під час дослідження підповерхневого шару встановлено, що не аморфізація, а спотворення решітки графіту та алмазу стало основним механізмом його пошкодження. Хімічну реакцію в СМР аналізували за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та моделювання методом реактивної МД. Атоми вуглецю утворювали різноманітні хімічні групи з окисненням гідроксилу (рис. 2). Хімічна активність фази графіту була вищою, ніж фаза алмазу, що призвело до більшої кількості типів реакцій і більшого відсотка продуктів. На етапі видалення матеріалу експериментальні спостереження та симуляційний аналіз показали, що алмаз з sp^3 -вуглецю перетворюється на sp^2 -вуглець, розм'якшується та згодом видаляється разом із графітом шляхом абразивного процесу.

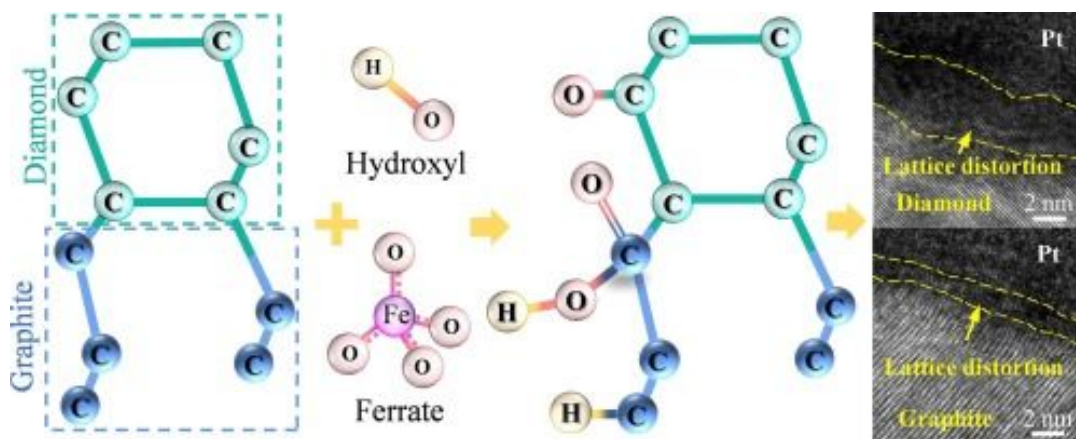


Рис. 2. Схематичне представлення процесу СМР

У статті [10] доведено, що вже ультразвукове вібраційне хіміко-механічне полірування (ultrasonic vibration chemical-mechanical polishing — UV-CMP) забезпечує найкращі характеристики полірування поверхні сапфіру. Було досліджено вплив матеріалу та структури притиру, абразивного матеріалу та розміру зерен, а також рН суспензії на показники UV-CMP, у першу чергу, швидкість зйому матеріалу та шорсткість полірованої поверхні. Встановлено, що підповерхневий пошкоджений шар сапфіру після UV-CMP (123 нм) є набагато тоншим і одноріднішим, аніж після СМР (199 нм). Хімічні продукти при UV-CMP сапфіру — у порівнянні з СМР — є більш м'якшими.

Для отримання високоякісної поверхні та підповерхні шліфованих кремнієвих пластин у роботі [11] розроблено метод хіміко-механічного шліфування (chemical-mechanical grinding CMG) кремнію шляхом ініціації під час шліфування хімічних реакцій. У даній роботі досліджено механічну дію м'яких абразивів у CMG шляхом проведення тестів нанодряпання за допомогою індентора з SeO_2 . Для порівняння також були проведені експерименти по нанодряпанню кремнію алмазним індентором. У цьому випадку хімічний ефект абразивів може бути незначним і механізми деформації кремнієвих пластин під дією абразивів SeO_2 можна зрозуміти. Експериментальні дослідження та результати моделювання свідчать, що механічний вплив індентора SeO_2 не спричиняє очевидного видалення матеріалу кремнію або серйозного пошкодження підповерхневих шарів, оскільки знос індентора SeO_2 зумовлює зняття напружень на кремнії.

У статті [12] реалізовано механічно-механохімічну синергетичну технологію мікрошліфування плавненого кремнезему та задіяні комбіновані абразивні мікрошліфувальні інструмен-

ти. Спочатку для досягнення вимог до геометричної точності провадиться шліфування алмазними абразивами. Наступною є твердофазна хімічна реакція із заготовкою по механохімічній реакції на основі оксидних абразивів (з добавками) за умов фрикційно-термічного зв'язку. Поверхневий шар заготовки розм'якшують, а потім — для досягнення якісної поверхні — видаляють шліфуванням. Схему механічного та механохімічного синергетичного процесу мікропідбилення наведено на рис. 3.

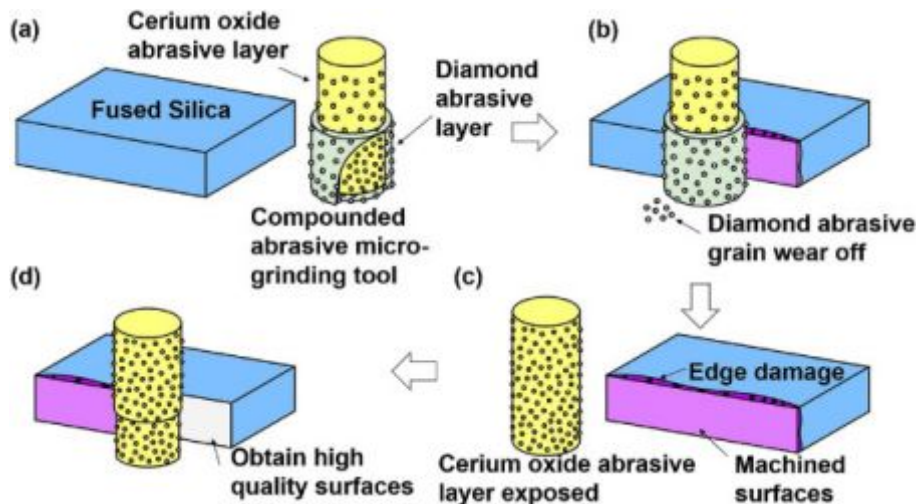
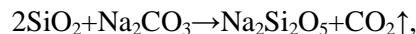


Рис. 3. Принципова схема синергетичного мікрошліфування, що містить: (а) початковий етап шліфування, (б) механічне швидке видалення припуску на обробку, (с) дефекти на поверхні, (д) механохімічне шліфування для отримання високоякісної поверхні [12]

Шаруваті композиційні абразивні мікрошліфувальні інструменти складаються із зовнішнього шару з алмазним абразивом та внутрішнього шару з оксидним абразивом (рис. 3,а). Після зношування зовнішнього шару алмазного абразиву при високопродуктивному шліфуванні (рис. 3,б) оголюється шар оксидного абразиву (з добавками) (рис. 3,с). Надалі, для усунення мікро- і наномасштабних пошкоджень після попереднього механічного шліфування, виконується процес механохімічного шліфування (рис. 3,д). Було зроблено припущення, що наступні дві твердофазні хімічні реакції існували під час обробки одночасно.

Першою є реакція за рівнянням:



механізм видалення матеріалу показано на рис. 4. Відносно тертя між абразивним шаром оксиду церію та заготовкою створює високу температуру та тиск, тому добавка починає контактувати з заготовкою, як показано на рис. 4 (а) і (б).

Коли навколишнє середовище стає здатним забезпечити енергію активації, необхідну для твердофазної хімічної реакції, добавка Na_2CO_3 (що утворюється з NaHCO_3) в абразивах реагує з SiO_2 з утворенням $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, як показано на рис. 4,с. Оскільки отриманий силікат є м'якшим за оксид церію, продукт видалявся оксидом церію. Згодом нова поверхня плавленого кремнезему оголюється та вступає в контакт з поверхнею абразивного шару оксиду церію, як показано на рис. 4,д. Вищевказаний процес дозволяє досягти низького пошкодження обробки плавленого кремнезему. Тобто, оксид церію діє як м'який абразив для механічного видалення розм'якшеного силікатного шару без пошкодження поверхні.

Другим рівнянням реакції є $\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ce}_2\text{SiO}_5$, а механізм видалення матеріалу наведено на рис. 5.

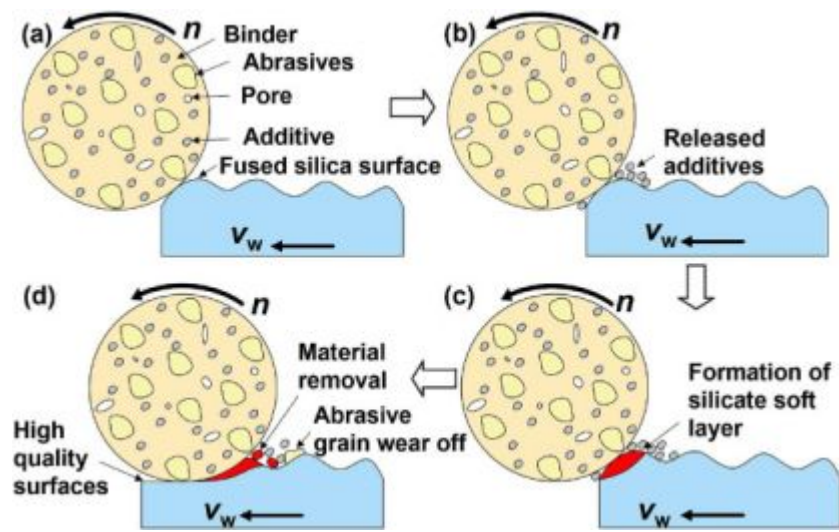


Рис. 4. Механізм реакції видалення між добавками мікрошліфувальних інструментів і деталлю: (а) поверхневе тертя за умови твердофазної реакції, (б) добавки контактують та активують поверхні, (с) активована частина стає м'якою, (д) розм'якшений шар механічно видаляється для отримання високоякісної поверхні [12]

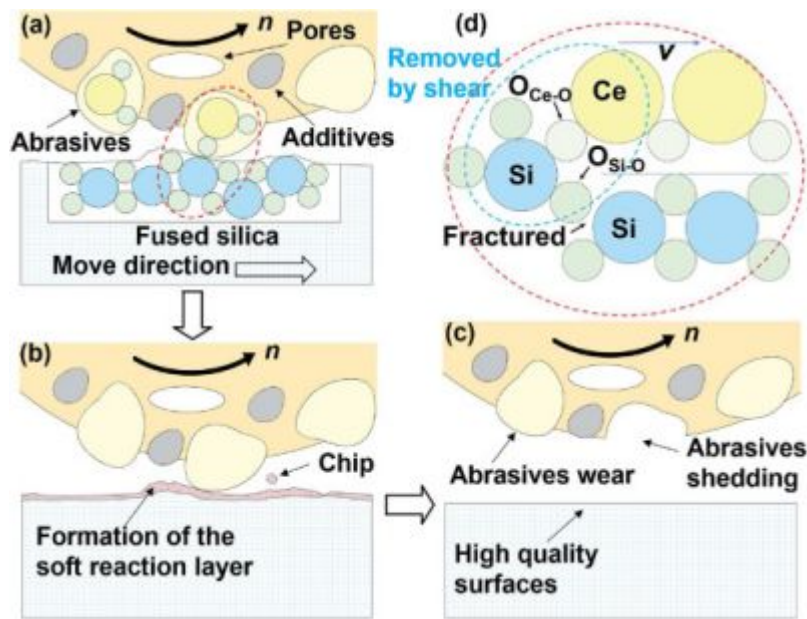


Рис. 5. Механізм реакції видалення між зернами мікрошліфувальних інструментів і заготовкою: (а) реакція почалася, (б) шар пом'якшення був утворений і видалений з поверхні заготовки шар за шаром, (с) попередня стадія повторюється до отримання високоякісної поверхні, (д) збільшене зображення розриву та утворення хімічних зв'язків під час реакції [12]

Дослідження показали [12], що унікальна електронна структура $4f^{15}d^{16}s^2$ церію робить елемент три- та чотиривалентним. Зазвичай у CeO_2 велика кількість вакансій O. Деякі йони Ce представлені орто-тривалентними. Таким чином, CeO_2 набуває здатності реагувати з SiO_2 під час подрібнення. Коли вимога до твердофазної хімічної реакції досягається, атом Si об'єднується з атомом O_{Ce-O} у зв'язку Ce-O_{Ce-O}, щоб утворити зв'язок Ce-O_{Ce-O}-Si, як показано на рис. 5(a) і (d). Енергія новоутвореного зв'язку Ce-O_{Ce-O}-Si була більшою, ніж у

зв'язку Si–OSi–O–Si. Під дією тангенціальної сили Si–OSi–O спочатку розривається, а потім видаляється. Подібним чином, як показано на рис. 5(b), поверхня була розм'якшена та видалена шар за шаром. Оксид церію використовувався не тільки як зерна для видалення хімічних реагентів, але — що важливіше — як реагент, який безпосередньо бере участь у твердофазній хімічній реакції. Тобто добавки були каталізаторами хімічних реакцій [12].

Тепер розглянемо особливості полірування твердих сплавів, які хоч і є твердими, але не такими крихкими, як матеріали, наведені вище.

Обробка поверхні твердого сплаву до атомарного рівня є давньою задачею в сфері виробництва й обробки матеріалів [13]. Для отримання якісних виробів з цементованого карбіду складної форми в даній статті пропонується новий процес «хімічної полірування з потовщенням зрушенням» (chemistry enhanced shear thickening polishing — C-STP)) із застосуванням реагенту Фентона для отримання кінцевої поліровки розміром меншим 10 нм зі швидкістю, що вдвічі перевищує швидкість звичайного STP. Хоча швидкість видалення матеріалу виявилася чутливою до концентрації реагенту Фентона, проте шорсткість поверхні (S_a) виявилася нечутливою. Електрохімічні експерименти засвідчили, що реагент Фентона може ефективно знижувати корозійну стійкість сплаву карбіда вольфраму з кобальтом. Дослідження полірованих сплавів за допомогою рентгенівської фотоелектронної (XPS) та енергодисперсійної (EDS) спектроскопії виявило, що кобальтова зв'язка видаляється переважно під час C-STP, що пояснює, чому швидкість видалення матеріалу при цьому методі стає вдвічі вищою, аніж при звичайному STP. На рис. 6 показано схему процесу C-STP, де хімічний реагент у полірувальній суспензії через свою високу хімічну спорідненість дифундує на поверхню заготовки та реагує з заготовкою (сплав карбіду вольфраму та кобальту). Поверхневий матеріал заготовки окислюється до реакційного шару, який легко видаляється завдяки одночасному механічному впливу зерен.

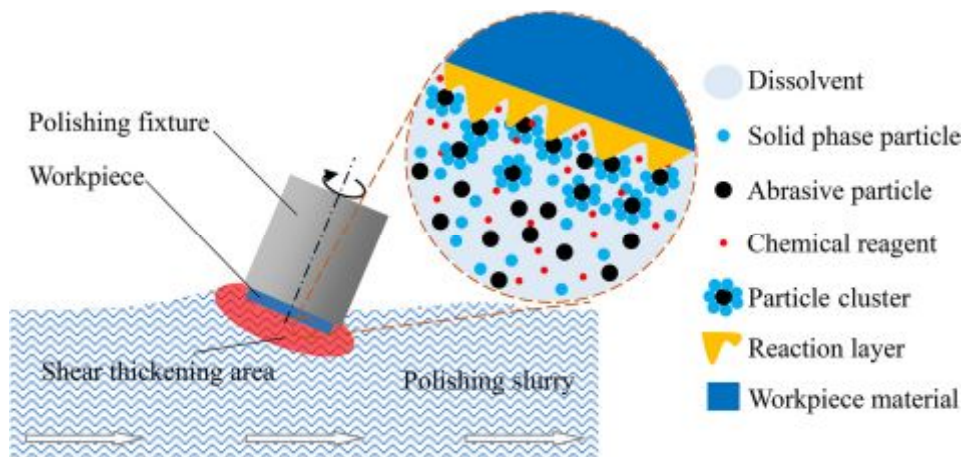


Рис. 6. Схематичне зображення процесу C-STP [13]

Виходячи з результатів EDS та XPS аналізу, на рис. 7 наведено механізм видалення матеріалу з поверхні зразка зі сплаву карбід вольфраму-кобальту із суспензією Fenton під час C-STP процесу. На першому етапі елемент Co з поверхневого шару зразка спочатку окислюється до $\text{Co}(\text{OH})_2$ за рахунок сильного окислювача OH, оскільки він має більш низький реакційний потенціал, аніж WC. В подальшому деяка частка WC окислюється до WO_3 . Крім того, реакційний шар, що утворюється на верхній поверхні, є рихлим. Це означає, що його легше видалити, аніж сплав карбіду вольфраму та кобальту. На другому етапі ефект потовщення при зрушенні утворює кластер частинок, що містить абразивні частинки, і $\text{Co}(\text{OH})_2$ з поверхневого шару твердого сплаву швидко видаляється. На третьому етапі видаляється елемент Co, який є зв'язувальним у твердому сплаві. Між твердою фазою WC зникають зв'язки, тому зерна WC та його рихлі оксиди відносно легко видаляються абразивними частинками. Як наслідок, свіжа поверхня знову оголяється, що може прискорити реакцію окиснення, а синергія як хімічної, так і механічної дії підвищує ефективність полірування твердого сплаву.

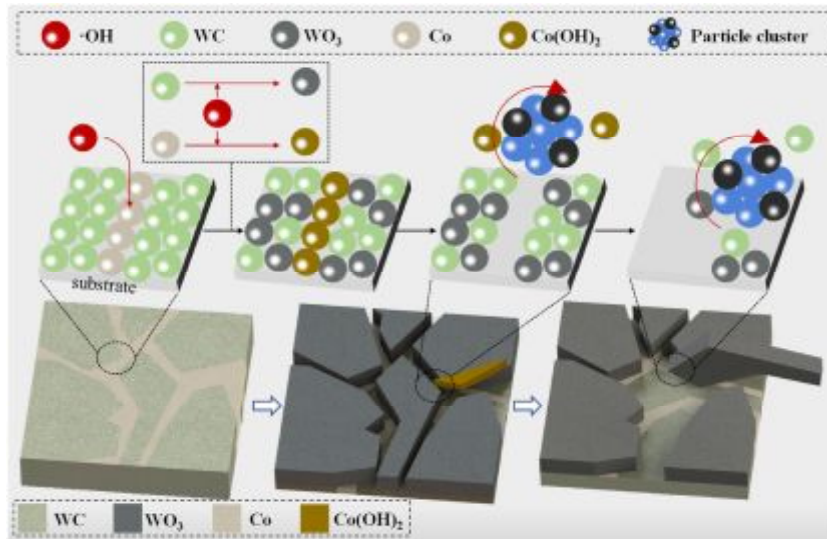


Рис. 7. Механізм видалення матеріалу зі сплаву карбіда вольфраму з кобальтом методом C-STP з реагентом Фентона [13]

Взаємозв'язок між шорсткістю поверхні та тривалістю полірування для зразків твердого сплаву суспензією C-STP та традиційною STP показано на рис. 8.

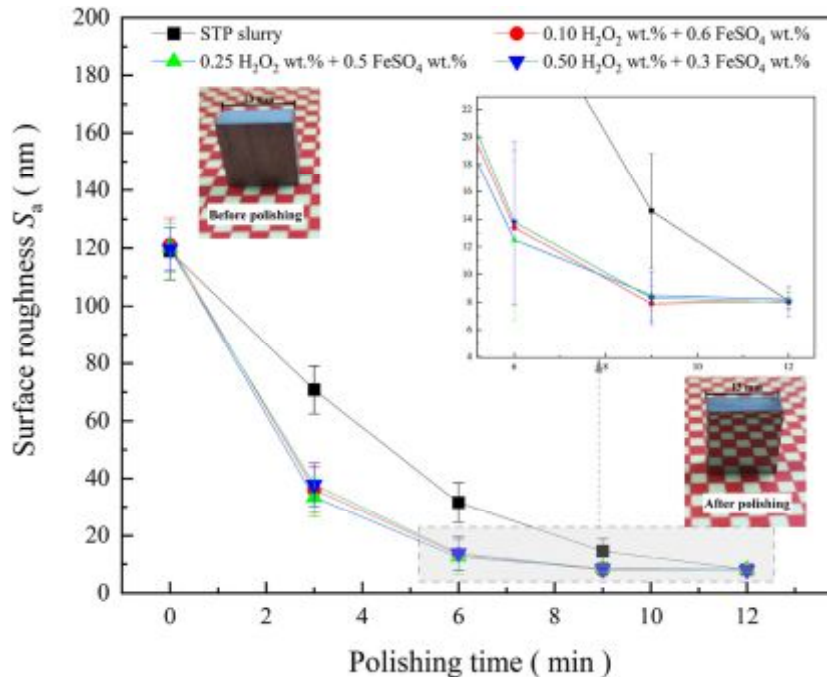


Рис. 8. Залежність між шорсткістю поверхні та часом обробки карбід-кобальтового сплаву різними суспензіями [13].

Для процесу C-STP було вибрано співвідношення H₂O₂ та FeSO₄, яке відповідало найбільшому MRR (0,1 мас. % H₂O₂ з 0,6 мас. % FeSO₄, 0,25 мас. % H₂O₂ з 0,5 мас. % FeSO₄ або 0,5 мас. % H₂O₂ з 0,3 мас. % FeSO₄). Встановлено, що реагент Фентона може ефективно знижати шорсткість поверхні, а три комбінації реагенту Фентона з різними співвідношеннями, протестовані в ході цієї роботи, показали незначний вплив на тенденцію до зменшення шорсткості

поверхні. Мікросвердла (Shenzhen Jinzhou Precision Technology Co., Китай) з твердого сплаву YG-6 були обрані для перевірки ефективності застосування С-СТР з реагентом Фентона. На рис. 9 (а) представлена структура форми кромки мікросвердла діаметром 0,4 мм після шліфування, на різальній кромці якого чітко спостерігаються численні дефекти.

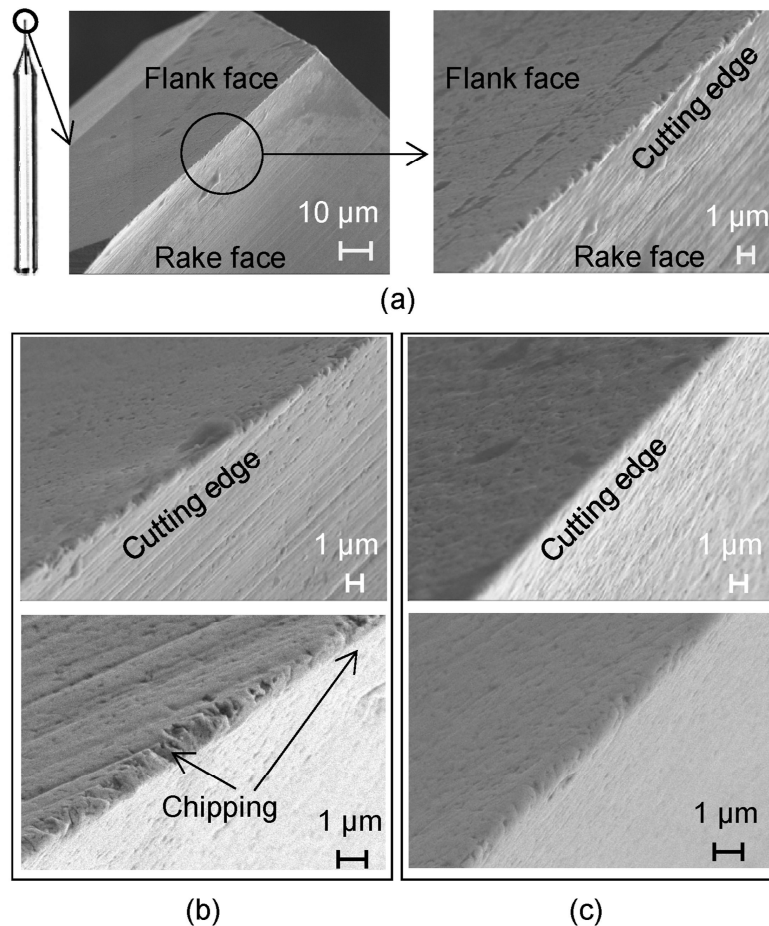


Рис. 9. Порівняння різальної кромки мікросвердла: (а) різальна кромка без полірування, (б) після полірування суспензією STP, (с) після полірування суспензією С-СТР [13]

Для вирішення цієї проблеми для полірування мікросвердла були використані методи STP та С-СТР. Час обробки склав 3 хв. Як показано на рис. 9 (б), після STP на різальній кромці все ще залишається деяка стружка та сліди шліфування на передній поверхні. Мікросвердло після С-СТР (із застосуванням реагенту Фентона: 0,1 мас. % H_2O_2 , 0,6 мас. % $FeSO_4$) показане на рис. 9 (с), де видно, що різальна кромка повністю зглажена, а сліди шліфування на передній поверхні усунені. Менш ніж за 9 хв. С-СТР процес допоміг знизити шорсткість поверхні твердого сплаву з початкового значення $Sa\ 120\pm 10$ нм до $8,4\pm 0,5$ нм. Таке стало можливим завдяки присутності реагента Фентона, який спричиняє посилення ефекту потовщеного зрушення під час полірування. Усунення мікрodefektів на різальній кромці дозволяє знизити інтенсивність її зношування та підвищити надійність і продуктивність процесу різання.

Авторами статті [14] розроблено абразивний круг для твердофазного хіміко-механічного полірування (solid-phase chemical-mechanical polishing — SPCMP) та ефективного заточування різальної кромки твердосплавного інструменту (WC-Co). Вимірювання методом дифракції рентгенівських променів і дифракції зворотного розсіяння електронів показали, що метод SPCMP видаляє приховані подряпини на поверхні матеріалів WC-Co-зразків, нанесені алмазним кругом. Вимірювання дифракції рентгенівських променів із застосуванням синхрот-

ронного світла показали, що технологічна деформація на поверхнях Ti-6Al-4V та Inconel 718, оброблених різальним інструментом WC-Co з використанням SPCMP, була надзвичайно малою у порівнянні з технологічною деформацією без SPCMP. На рис. 10 показано взаємодію між різальним інструментом і заготовкою під час різання. Електронною мікроскопією виявлено, що різальні кромки комерційних інструментів мають істотні нерівності, що збільшує площу контакту із заготовкою, опір різанню та підвищує температуру під час обробки. Поверхня заготовки при цьому піддається підвищеній деформації, що ще більше збільшує нерівність обробленої поверхні. Запропонований у згаданій роботі спосіб заточування різальної кромки покликаний зменшити площу контакту із заготовкою та опір різанню, а відтак зменшує механічну деформацію обробленої поверхні.

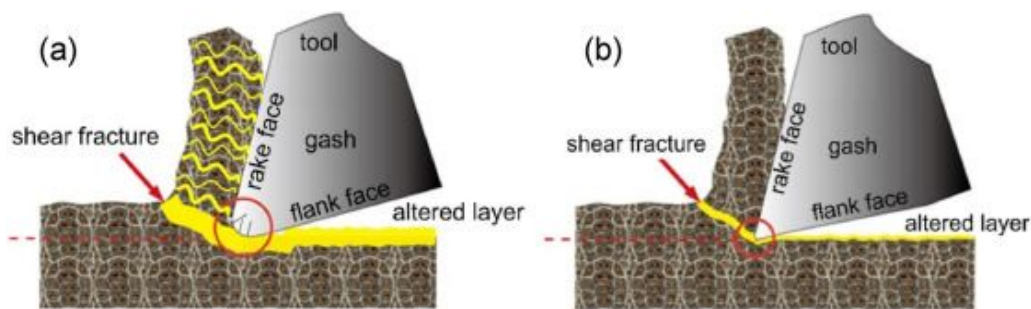


Рис. 10. Різання комерційним інструментом (а) та інструментом з кромкою, заточеною за запропонованою у дослідженні [14] технологією (б): (а) заготовка суттєво змінюється інструментом в процесі різання, (б) заготовка демонструє незначні зміни під час різання

Розроблений шліфувальний круг для SPCMP діаметром 100 мм було виготовлено при температурі 150 С і тискові 10^3 кГ/см² на фенольному зв'язуючому із застосуванням зеленого карбиду кремнію (GC) у якості абразивної складової [14]. Зазначений шліфувальний круг був виготовлений таким чином, щоби уникнути при обробці твердого сплаву переходу з фази WC в фазу W₂C, а спровокувати окислення фази WC та її видалення за допомогою GC. Основною функцією круга SPCMP було отримання гострих різальних кромок твердосплавних інструментів (WC-Co). При різанні інструментами WC-Co з різальними кромками, заточеними обробкою SPCMP, опір різанню був низьким, а степінь зносу зменшилася. Крім того, швидкість різання інструментів WC-Co при різанні Ti-6Al-4V і Inconel 718 після заточки різальної кромки кругом SPCMP була приблизно в два рази вищою, аніж до SPCMP. Встановлено, що різання жароміцних сплавів інструментом WC-Co з гострою різальною кромкою призводить до структурних дефектів тільки поблизу поверхні, а кристалічна структура зберігається на певній глибині від поверхні [14].

Карбід вольфраму без зв'язуючого (B-WC) є твердим і крихким керамічним матеріалом, який в основному використовується для виготовлення точних прес-форм у галузі оптики, він незадовільно піддається точному та високоефективному поліруванню. У статті [15] для вирішення цього обмеження застосовано інструмент з напівжорсткою кришкою (SRB) радіусом 40 мм. Структуру SRB показано на рис. 11 (а). Він складається з трьох шарів. Зовнішній та внутрішній шари є гумовими мембранами з твердістю за Шором 75 HA. Середній шар виконано з листа неіржавіючої сталі товщиною 0,3 мм, що дозволяє підвищити жорсткість інструмента та зберегти певну гнучкість. Зовнішня гумова плівка вкрита полірувальною подушечкою (рис. 11 (б)).

У роботі [15] з метою демонстрації можливостей SRB на підкладках B-WC були проведені експерименти з утворення плям полірування та рівномірного полірування. Виконувався аналіз цілісності поверхні та підповерхневого шару підкладки B-WC до та після обробки. Виріб з B-WC 30×30 мм після рівномірного полірування показано на рис. 12(а). Відзначається, що шорстка поверхня перетворилася на дзеркальну вже після 2,5 хвилин обробки, а шорсткість поверхні за параметром Sa була зменшена з 104 нм в середньому до 3,7 нм, рис. 12(б). Крім того, глибокі сліди від шліфувального інструменту були ефективно видалені, залишилися лише

нанометричні подряпини від полірувального абразиву, як показано на 3D-контурі шорсткості поверхні, рис. 12(b). Результати свідчать, що SRB є ефективним для швидкого полірування В-WC з гарною якістю поверхні та підповерхневого шару.

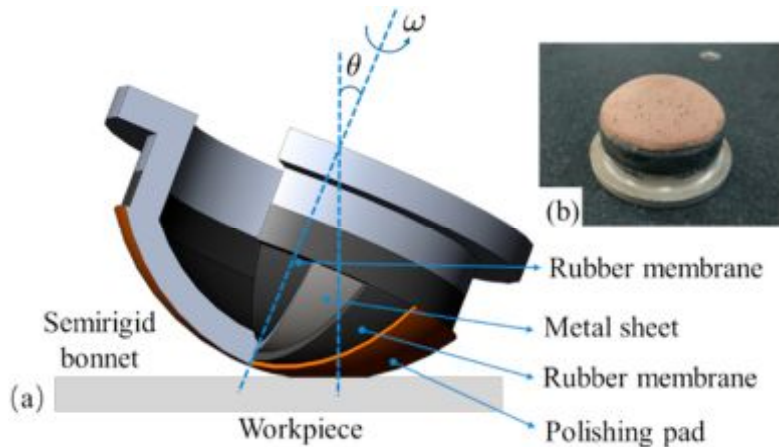


Рис. 11. Інструмент з напівжорсткою кришкою (SRB), застосований в дослідженні [15]: (а) конструкція та (б) зовнішня гумова плівка, вкрита полірувальною подушечкою.

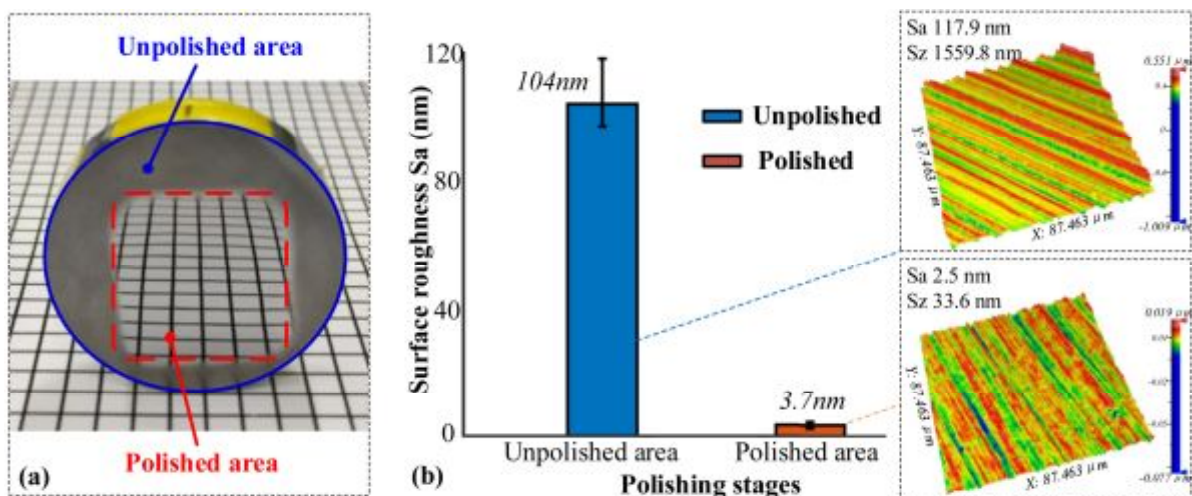


Рис. 12. Фотографії та шорсткість поверхні зразка В-WC: (а) фотографії ділянки до та після полірування та (б) шорсткість поверхні ділянки до та після полірування [15]

Наприкінці цієї частини огляду розглянемо особливості СМР-полірування пластичного матеріалу на прикладі міді.

Токсичні та корозійні суспензії широко застосовуються при традиційній СМР, що призводить до забруднення оточуючого середовища. Відтак, отримання ангстремної поверхні із застосуванням не забруднюючого «зеленого» СМР є складною задачею. Щоб вирішити цю проблему для полірування міді (Cu) було розроблено новий «зелений» СМР, що містить всього чотири інгредієнти [16]. Діоксиди церію та кремнію застосовуються у якості композитних абразивів. Винну кислоту додали для доведення значення рН отриманої «зеленої» суспензії до 6,5. Після СМР шорсткість поверхні, виміряна методами атомно-силової мікроскопії на площі 5×5 мкм, складає 0,1 нм. Нині це найнижча шорсткість поверхні, яку зареєстровано на такій великій площі виміру. Просвітлювальна електронна мікроскопія підтверджує, що товщина пошкодженого шару після СМР варіюється від 0,4 до 2 нм. Спочатку поверхня міді окислялася

перекисом водню, далі розчинялася іонами водню і, насамкінець, хелатувалася гідроксильними групами винної кислоти (рис. 13). Ці результати забезпечують новий підхід і нові ідеї для досягнення поверхні рівня ангстрема з метою потенційного застосування міді у пристроях.

На закінчення огляду з полірування звернемо увагу на особливості новітніх методів із застосуванням додаткового впливу на оброблювану поверхню.

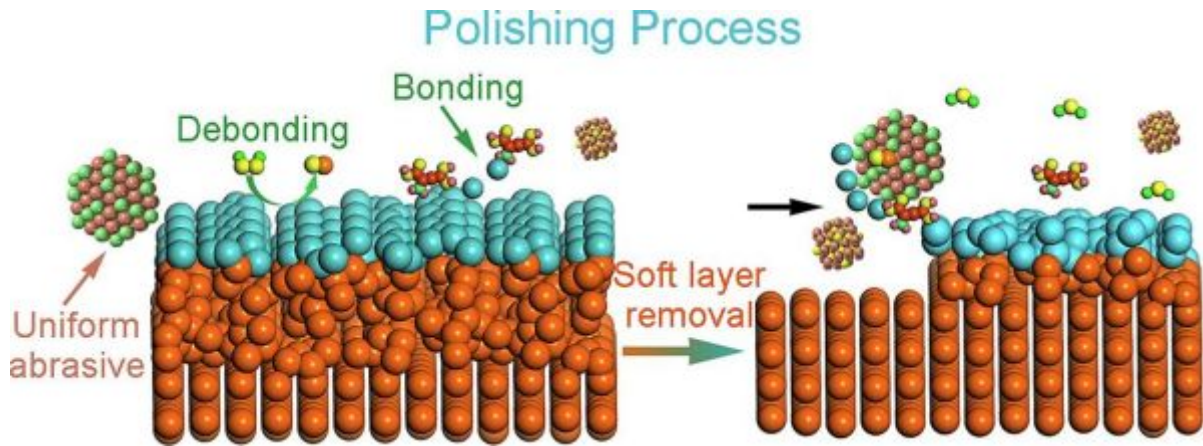


Рис. 13. Схематичне представлення процесу «зеленого» CMP міді [16].

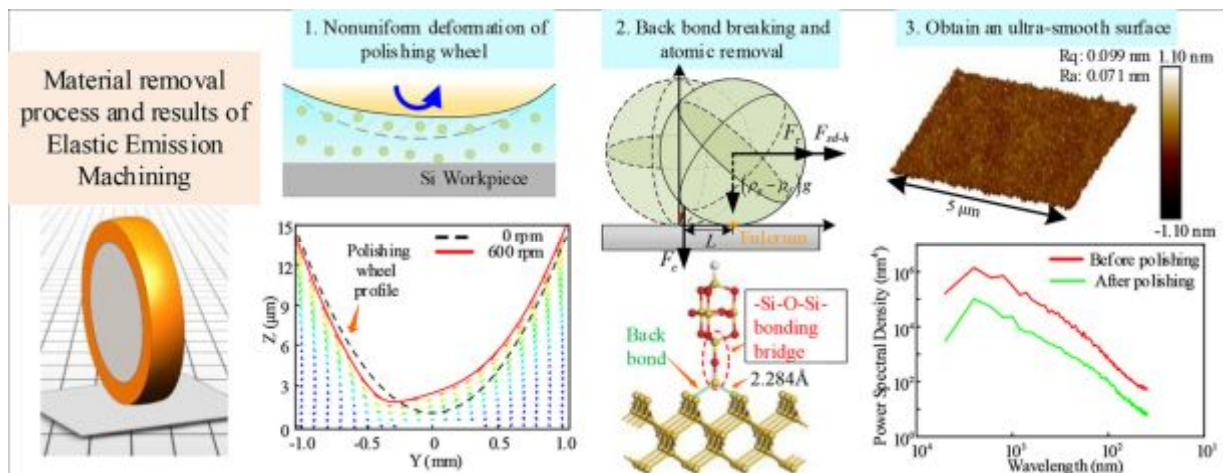


Рис. 14. Схематичне представлення процесу Elastic Emission Machining (EEM) [17]

Пружно-емісійна обробка (Elastic Emission Machining — EEM) — одна з найбільш ефективних технологій отримання надгладкої поверхні. Полірувальна частинка подається у певне місце на поверхні деталі за допомогою полірувального круга та вступає в хімічну реакцію із заготовкою, забезпечуючи неруйнівне видалення матеріалу (рис. 14). Проте взаємодія полірувального круга і суспензії, а також механізм видалення атомів залишаються неясними. В дослідженні [17] динамічна взаємодія між полірувальним кругом і суспензією розглядаються у тривимірному стані, а модель кочення розробляється для аналізу передачі енергії у процесі видалення атомів. Рух рідини та частинок розраховується за допомогою обчислювальної гідродинаміки, а енергія, необхідна для видалення атомів, розраховується на основі моделювання методом молекулярної динаміки (MD). Ефективність моделі кочення перевіряється шляхом порівняння профілю зйому матеріалу, отриманого в результаті експериментів, і моделі кочення. Модель кочення пояснює, як частинка може розірвати зворотній зв'язок атомів на поверхні заготовки, щоб добитися видалення матеріалу. Результати дослідження свідчать, що енергія, необ-

хідна для видалення атомів, постачається переважно рідиною. Таке розуміння джерела енергії дає цінну інформацію для пропозицій щодо методів підвищення швидкості видалення матеріалу. Насамкінець, в експерименті з полірування поверхні застосування ЕЕМ зумовило отримання надгладкої поверхні із середньоквадратичною шорсткістю 0,1 нм. Це демонструє чудову здатність ЕЕМ ефективно зменшувати шорсткість поверхні [17].

Монокристал оксиду лютецію є чудовим лазерним кристалічним матеріалом з перевагами низької енергії фононів, високою теплопровідністю та високим порогом пошкодження, викликаного дією лазера. У роботі [18] пропонується новий метод плазмового травлення (plasma-assisted etching — PaE) при атмосферному тиску, яким передбачається постпроцес полірування при низькому тиску (low-pressure polishing post process — PLPP) для отримання кристалів Lu_2O_3 з високою цілісністю поверхні та без підповерхневого пошкодження (subsurface damage — SSD) (рис. 15). Доцільність комплексного полірування під низьким тиском продемонстровано за допомогою квантово-хімічного моделювання. Швидкість модифікації у 136 нм/год можливо отримати шляхом одночасної оптимізації плазмового процесу. Отримана атомно-пласка поверхня з шорсткістю поверхні Sa 0,14 нм. Загальний час обробки скорочується вдвічі порівняно з поліруванням суспензією низького тиску. Новий метод ґрунтується на OH^* -опроміненні оксиду лютецію та перетворенні останнього в гідроксид, який швидко реагує з краплями 25 % сірчаної кислоти. Тобто, поверхня Lu_2O_3 була модифікована плазмою з утворенням гідроксидного шару, який потім був протравлений кислотою для отримання атомарно плоскої поверхні (рис. 15). Насамкінець, в ході процесу PaE швидко видаляються SSD, що виникли в результаті полірування під низьким тиском. Просвітлювальна електронна мікроскопія оброблених поверхонь з корекцією аберацій виявила усунення механічних пошкоджень. Тобто, цей нещодавно розроблений метод [18] може створювати чисті та атомарно гладкі поверхні Lu_2O_3 .

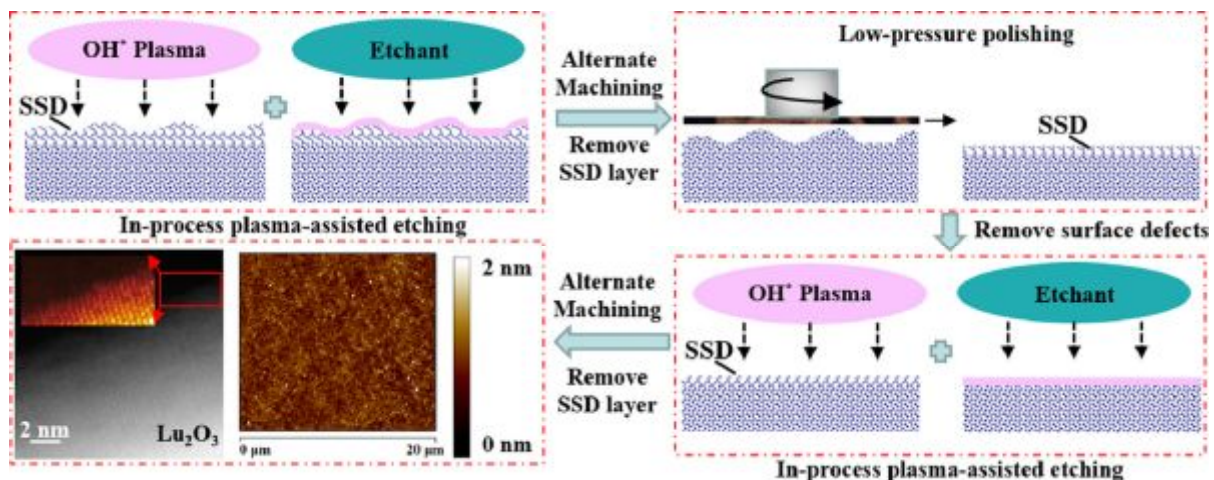


Рис. 15. Схематичне представлення процесу плазмового травлення (PaE), заснованого на поєднанні PaE з постпроцесом полірування при низькому тиску (PLPP) для отримання кристалів Lu_2O_3 з високою цілісністю поверхні [18]

Висновки

У результаті проведеного огляду встановлене наступне:

1. Метод хіміко-механічного полірування виробів з різних матеріалів базується на синергетичній дії зміненого абразиву, переважно на основі CeO_2 , та ініціації хімічних реакцій шляхом використання рідких суспензій [8, 13, 16—18] або твердофазних хімічних реакцій [12, 14], а також на розробці нових мікрошліфувальних інструментів [12, 14].

2. Прикладом такої синергетичної дії є розроблена в [12] нова механічно-механохімічна синергетична технологія мікрошліфування плавненого кремнезему та комбіновані абразивні мікрошліфувальні інструменти. Спочатку проводиться шліфування алмазними абразивами, а

потім відбувається твердофазна механохімічна реакція із заготовкою із залученням оксидних абразивів (з добавками) за умови фрикційно-термічного зв'язку. Тобто, оксид церію використовувався не тільки як зерна для видалення хімічних реагентів, але — що важливіше — як реагент, який безпосередньо бере участь у твердофазній хімічній реакції.

3. При реалізації технології пружно-емісійної обробки полірувальна частинка подається в певне місце на поверхні деталі за допомогою полірувального круга та вступає в хімічну реакцію із заготовкою, забезпечуючи неруйнівне видалення матеріалу [17]. Динамічна взаємодія між полірувальним кругом і суспензією розглядаються у тривимірному стані, а модель кочення розробляється для аналізу передачі енергії у процесі видалення атомів. Модель кочення пояснює, як частинка може розірвати зворотній зв'язок атомів на поверхні заготовки, щоб забезпечити видалення матеріалу. Результати дослідження [17] свідчать, що енергія, яка необхідна для видалення атомів, постачається переважно рідиною.

4. Аналіз шорсткості полірованої поверхні [8—18], засвідчив наступне:

- для технології комбінованого шліфування-полірування плавленого кремнезему спеціальним інструментом шорсткість склакла 38 nm [12];
- для технології ультразвукової вібраційної хіміко-механічного полірування сапфіру шорсткість склакла 27,5 nm [10];
- для поверхонь з твердого сплаву та карбиду вольфраму шорсткість за параметром Sa склакла: 8,4 nm [13], 3,7 nm [15] та 2,18 nm [14];
- для нового графіт/алмазного композиту (Gradia) технологією хіміко-механічного полірування досягнуто шорсткість поверхні за параметром Sa 0,9 nm [9];
- для поверхонь кремнієвих пластин шорсткість за параметром Sa 0,5 nm [11];
- новий метод плазмового травлення (РаЕ), який заснований на поєднанні РаЕ з постпроцесом полірування при низькому тиску, дозволяє отримати для кристалів Lu_2O_3 шорсткість поверхні за параметром Sa — 0,14 nm [18];
- в цілому метод хіміко-механічного полірування з різними модифікаціями дозволяє отримати для матеріалів різної твердості майже однакові, фактично граничні за нижнім рівнем, показники шорсткості поверхні за параметром Sa : для плавленого кремнезему 0,124 nm [8], для кремнію 0,1 nm [17] та для м'якої міді — 0,1 nm [16].

Список використаної літератури

1. Лаврінченко В.І., Солод В.Ю., Музичка Д.Г., Островерх Є.В. Перехід від пластичного режиму алмазного шліфування кераміки до плавлення та особливості плавлення інструментальних керамік. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)* № 1 (42) 2023. С. 48–58.
2. Гусарев В.С. Энергетическая эффективность технологических процессов. *Авиационно-космическая техника и технология, сб. научных трудов*. Харьков, ТАКУ им. Н.Е. Жуковского, 2000, вып. 14. С. 41–44.
3. Doping strategy on properties and chemical mechanical polishing performance of CeO_2 abrasives: A DFT assisted experimental study /Jiahui Ma, Ning Xu, Jinrong Hu, Yuxin Luo, Yu Lin, Yongping Pu. *Applied Surface Science*. Volume 623, 30 June 2023, 156997.
4. Junji Murata, Kenshin Hayama, Masaru Takizawa. Environment-friendly electrochemical mechanical polishing using solid polymer electrolyte/ CeO_2 composite pad for highly efficient finishing of 4H-SiC (0001) surface. *Applied Surface Science*. Volume 625, 15 July 2023, 157190.
5. Effects of grinding-induced surface topography on the material removal mechanism of silicon chemical mechanical polishing / Hongfei Tao, Qinyang Zeng, Yuanhang Liu, Dewen Zhao, Xinchun Lu. *Applied Surface Science*. Volume 631, 15 September 2023, 157509.
6. Guangyue Bi, Yuzhu Li, Min Lai, Fengzhou Fang. Mechanism of polishing lutetium oxide single crystals with polyhedral diamond abrasive grains based on molecular dynamics simulation. *Applied Surface Science*. Volume 616, 15 April 2023, 156549.

7. Effect of a water film on the material removal behavior of Invar during chemical mechanical polishing / Wan Wang, Dongpeng Hua, Qing Zhou, Shuo Li, Stefan J. Eder, Junqin Shi, Zhijun Wang, Haifeng Wang, Weimin Liu. *Applied Surface Science*. Volume 616, 15 April 2023, 156490.
8. Novel green chemical mechanical polishing of fused silica through designing synergistic CeO₂/h-BN abrasives with lubricity / Jie Liu, Zhenyu Zhang, Chunjing Shi, Zheng Ren, Junyuan Feng, Hongxiu Zhou, Zhensong Liu, Fanning Meng, Shuming Zhao. *Applied Surface Science*. Volume 637, 15 November 2023, 157978.
9. Study on incompatible mechanism in chemical mechanical polishing of the novel graphite/diamond composite / Junyun Chen, Zihao Lin, Tianye Jin, Bing Liu, Anmin Nie. *Applied Surface Science*. Volume 641, 30 December 2023, 158500.
10. Mufang Zhou, Yuanyao Cheng, Min Zhong, Wenhui Xu. Macro and micro-nano machining mechanism for ultrasonic vibration assisted chemical mechanical polishing of sapphire. *Applied Surface Science*. Volume 640, 15 December 2023, 158343.
11. Mechanical effect of abrasives on silicon surface in chemo-mechanical grinding / Yu Zhang, Renke Kang, Jiawei Ren, Hongye Lang, Shang Gao. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 257, 1 November 2023, 108544.
12. Novel designed mechanical-mechanochemical synergistic micro-grinding technology and compounded abrasive micro-grinding tools / Wei Li, Shiqiang Xie, Zhengyang Deng, Dongbo Zhou, Maojun Li, Xudong Guo, Wei Tang. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August 2023, Pages 3365-3381.
13. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, Yu Zhou, Yanfei Dai, Jinhu Wang, Qiankun He, Julong Yuan, Binghai Lyu. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August 2023, Pages 6865-6879.
14. Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu. Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 20, September–October 2022, Pages 606-615.
15. Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide / Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, Yongheng Yu, Tianyi Wang, Bo Zhong, Zhenzhong Wang, Jiang Guo, Chi Fai Cheung, Chunjin Wang. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 24, May–June 2023, Pages 1597-1611.
16. Angstrom surface on copper induced by novel green chemical mechanical polishing using ceria and silica composite abrasives / Dongdong Liu, Zhenyu Zhang, Hongxiu Zhou, Xingqiao Deng, Chunjing Shi, Fanning Meng, Zhibin Yu, Junyuan Feng. *Applied Surface Science*. Volume 640, 15 December 2023, 158382.
17. Weihao Ma, Jiahui Li, Xi Hou. Rolling model analysis of material removal in elastic emission machining. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 258, 15 November 2023, 108572.
18. Peng Lyu, Min Lai, Ze Liu, Fengzhou Fang. Atomic and close-to-atomic scale polishing of Lu₂O₃ by plasma-assisted etching. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 252, 15 August 2023, 108374.

MODERN TECHNOLOGIES FOR POLISHING SOFT AND PLASTIC MATERIALS

Abstract

Modern technologies in machine and instrument building require new high-tech materials, the processing of which is much more complicated, especially from the point of view of achieving quality indicators of the final surface of the product. All this means that it is important to pay attention to finishing, namely polishing processes, to increase the efficiency of the machining process. The researches known from the literature testify specifically to the effectiveness of the application of chemical-mechanical methods in polishing, taking into account the peculiarities of the abrasives used, therefore the purpose of this article was to investigate the latest (2022—2023) developments in polishing

technologies of a wide range of modern brittle and plastic materials and determine directions for improving the efficiency of such developments.

Analysis of data on the method of chemical-mechanical polishing of products from different materials allowed us to establish that it is based on the synergistic action of a modified abrasive, mainly on the basis of CeO_2 , and the addition of chemical reactions using liquid suspensions or solid-phase chemical reactions, as well as on the development of new micro-grinding tools. An example of such a synergistic action is the new mechanical-mechanochemical synergistic technology of micro-grinding of fused silica and combined abrasive micro-grinding tools. First, grinding with diamond abrasives is carried out, and the next step is a solid-phase chemical reaction with a workpiece based on a mechanochemical reaction based on oxide abrasives (with additives) under the conditions of friction-thermal connection. That is, cerium oxide was used not only as grains to remove chemical reagents, but more importantly, as a reagent that directly participates in a solid-phase chemical reaction.

It has been proven that, in general, the method of chemical-mechanical polishing with various modifications makes it possible to obtain, for materials of different hardness, almost the same, actually limiting at the lower level, indicators of surface roughness according to the Sa parameter: for fused silica 0.124 nm and for silicon 0.1 nm, and for soft copper — 0.1 nm.

References

- [1] Lavrinenko, V.I., Solod, V.Yu., Muzychka, D.G., Ostroverkh, Ye.V. (2023) Perekhid vid plastychogo rezhimu almaznogo shlifuvannia keramiku do plavlennia ta osobluvosti plavlennia instrumentalnich keramik [The transition from the plastic mode of diamond grinding of ceramics to melting and features of melting of instrumental ceramics] *Collection of scholarly papers of Dniprovsky State Technical University (Technical Science)* № 1 (42). P. 48–58.
- [2] Gusarev, V.S. (2000) Energeticheskaya effektivnost' tekhnologicheskikh protsessov // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, sb. nauchnykh trudov. Khar'kov, TAKU im. N.Ye. Zhukovskogo*, vyp. 14. P. 41–44.
- [3] Jiahui Ma, Ning Xu, Jinrong Hu, Yuxin Luo, Yu Lin, Yongping Pu. (2023) Doping strategy on properties and chemical mechanical polishing performance of CeO_2 abrasives: A DFT assisted experimental study. *Applied Surface Science*. Volume 623, 30 June, 156997.
- [4] Junji Murata, Kenshin Hayama, Masaru Takizawa. (2023) Environment-friendly electrochemical mechanical polishing using solid polymer electrolyte/ CeO_2 composite pad for highly efficient finishing of 4H-SiC (0001) surface. *Applied Surface Science*. Volume 625, 15 July, 157190.
- [5] Hongfei Tao, Qinyang Zeng, Yuanhang Liu, Dewen Zhao, Xinchun Lu. (2023) Effects of grinding-induced surface topography on the material removal mechanism of silicon chemical mechanical polishing. *Applied Surface Science*. Volume 631, 15 September, 157509.
- [6] Guangyue Bi, Yuzhu Li, Min Lai, Fengzhou Fang. (2023) Mechanism of polishing lutetium oxide single crystals with polyhedral diamond abrasive grains based on molecular dynamics simulation. *Applied Surface Science*. Volume 616, 15 April, 156549.
- [7] Wan Wang, Dongpeng Hua, Qing Zhou, Shuo Li, Stefan J. Eder, Junqin Shi, Zhijun Wang, Haifeng Wang, Weimin Liu. (2023) Effect of a water film on the material removal behavior of Invar during chemical mechanical polishing. *Applied Surface Science*. Volume 616, 15 April, 156490.
- [8] Jie Liu, Zhenyu Zhang, Chunjing Shi, Zheng Ren, Junyuan Feng, Hongxiu Zhou, Zhensong Liu, Fanning Meng, Shuming Zhao. (2023) Novel green chemical mechanical polishing of fused silica through designing synergistic $\text{CeO}_2/\text{h-BN}$ abrasives with lubricity. *Applied Surface Science*. Volume 637, 15 November, 157978.
- [9] Junyun Chen, Zihao Lin, Tianye Jin, Bing Liu, Anmin Nie. (2023) Study on incompatible mechanism in chemical mechanical polishing of the novel graphite/diamond composite. *Applied Surface Science*. Volume 641, 30 December, 158500.
- [10] Mufang Zhou, Yuanyao Cheng, Min Zhong, Wenhui Xu. (2023) Macro and micro-nano machining mechanism for ultrasonic vibration assisted chemical mechanical polishing of sapphire. *Applied Surface Science*. Volume 640, 15 December, 158343.

- [11] Yu Zhang, Renke Kang, Jiawei Ren, Hongye Lang, Shang Gao. (2023) Mechanical effect of abrasives on silicon surface in chemo-mechanical grinding. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 257, 1 November, 108544.
- [12] Wei Li, Shiqiang Xie, Zhengyang Deng, Dongbo Zhou, Maojun Li, Xudong Guo, Wei Tang. (2023) Novel designed mechanical-mechanochemical synergistic micro-grinding technology and compounded abrasive micro-grinding tools. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August, Pages 3365-3381.
- [13] Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, Yu Zhou, Yanfei Dai, Jinhu Wang, Qiankun He, Julong Yuan, Binghai Lyu (2023) Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August, Pages 6865-6879.
- [14] Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu. (2022) Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 20, September–October, Pages 606-615.
- [15] Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, Yongheng Yu, Tianyi Wang, Bo Zhong, Zhenzhong Wang, Jiang Guo, Chi Fai Cheung, Chunjin Wang (2023) Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 24, May–June, Pages 1597-1611.
- [16] Dongdong Liu, Zhenyu Zhang, Hongxiu Zhou, Xingqiao Deng, Chunjing Shi, Fanning Meng, Zhibin Yu, Junyuan Feng. (2023) Angstrom surface on copper induced by novel green chemical mechanical polishing using ceria and silica composite abrasives. *Applied Surface Science*. Volume 640, 15 December, 158382.
- [17] Weihao Ma, Jiahui Li, Xi Hou. (2023) Rolling model analysis of material removal in elastic emission machining. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 258, 15 November, 108572.
- [18] Peng Lyu, Min Lai, Ze Liu, Fengzhou Fang. (2023) Atomic and close-to-atomic scale polishing of Lu_2O_3 by plasma-assisted etching. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 252, 15 August, 108374.

Надійшла до редколегії 28.11.2024