

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923

В. І. Лавріненко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

lavrinen52@gmail.com

Сучасний стан досліджень особливостей алмазно-абразивної обробки твердих та крихких матеріалів (Огляд)

Розглянуто сучасний стан досліджень процесів алмазно-абразивної обробки твердих та крихких матеріалів, що присвячені відтворенню умов обробки в мікроскопічних масштабах із застосуванням приладів із високою роздільною здатністю. Звернено увагу на підвищене застосування пористих, шорстких та нанодвійникових (nt-D) алмазів. Методом термохімічної корозії отримано новий тип алмазу з шорсткою поверхнею, який має більшу площу поверхні та вищу електронегативність, ніж звичайний алмаз, що покращує адгезію на межі зв'язка–алмаз. Доведено, що моделювання методом молекулярної динаміки є ефективним способом аналізу механізмів абразивних процесів механічної обробки, таких як нанорізання, шліфування і полірування. Показано, що критична глибина шліфування, амплітуда вібрації і швидкість різання є важливими параметрами обробки, які визначають можливість переходу алмазно-абразивної обробки твердих і крихких матеріалів у пластичний режим. В останніх публікаціях хіміко-механічне полірування визначене як ефективний процес обробки таких твердих і крихких матеріалів, як карбід кремнію, монокремній, нанодвійниковий алмаз, леговані бором алмази тощо.

Ключові слова: алмазно-абразивна обробка, тверді та крихкі матеріали, пластичний режим обробки, алмаз з пористою та шорсткою поверхнею, моделювання, метод молекулярної динаміки, хіміко-механічне полірування.

Тверді та крихкі матеріали (сапфір, карбід кремнію, інструментальна кераміка) нині широко застосовують у промисловості. Їхня ефективна алмазно-абразивна обробка є важливою для сучасного виробництва. Останнім часом набуває практичного застосування перехід до пластичного режиму обробки крихких матеріалів, на що звернено увагу в попередньому огляді [1], а для інструментальної кераміки частково викладено у [2]. Разом з тим, нині в науковій літературі обговорюють способи ефективної обробки таких крихких важкооброблюваних матеріалів, як монокристалічні алмаз та

кремній, кераміка на основі оксиду лютетію, сапфір і карбід кремнію та ін. Здебільшого така обробка стикається не тільки з переходом процесу різання від крихкого до пластичного, а також із додатковим впливом на зону обробки, наприклад, застосуванням хіміко-механічного полірування, магнітореологічної обробки або динамічного фрикційного впливу, причому інформація за цими розробками швидко змінюється і доповнюється. Саме тому в даному огляді основну увагу приділено результатам сучасних досліджень особливостей алмазно-абразивної обробки твердих та крихких матеріалів.

СУЧАСНІ РОЗРОБКИ, ПОВ'ЯЗАНІ З МЕТОДИЧНИМИ ПІДХОДАМИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО РІЗАННЯ ТА СТАНУ КОНТАКТУЮЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ

Протягом багатьох років спільнота машинобудівників застосовувала значні зусилля для вивчення явища процесу видалення матеріалу в мікроскопічному масштабі. Останнім часом з'являються дослідження, присвячені відтворенню умов обробки в мікроскопічних масштабах із застосуванням приладів з високою роздільною здатністю. У [3] повідомлено про дослідницькі можливості, які можливо проводити із застосуванням *in-situ* сканувальних електронних мікроскопів або інших засобів візуалізації з високою роздільною здатністю, а також зроблено аналіз останніх досягнень у цій області (рис. 1): розуміння явищ, що відбуваються на поверхнях заготовки (субблоків) після механічної обробки під час проведення мікромеханічних випробувань з дуже високою роздільною здатністю (наприклад, стиск/згин) у певних зонах оброблених поверхневих шарів; вивчення механізмів видалення матеріалу на мікрOMETричному рівні із застосуванням звичайних або спеціальних інденторів, для зрозуміння, як матеріали заготовки (наприклад, групи/одиначні зерна) реагують на умови різання.

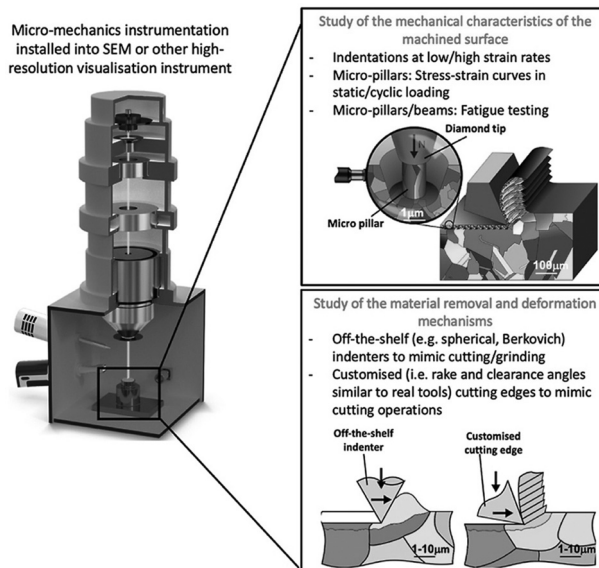


Рис. 1. Мікромеханічний інструментарій для відтворення процесів механічної обробки на макрорівні [3].

Наноалмаз є багатообіцяючим матеріалом для різальних інструментів (наприклад, для вказаних вище умов мікроскопічного дослідження) через його більш високу твердість та ударну в'язкість у порівнянні з монокристалічним

алмазом. У [4] реакцію нанодвійникових алмазів (nt-D) на дряпання вивчали із застосуванням моделювання методом молекулярної динаміки (надалі – ММД-моделювання). Показано, що в порівнянні з монокристалічними в нанодвійникових алмазах є більш вираженою пластична деформація. На відміну від монокристалічних алмазів, в яких дислокації переважно ковзають у площинах $\{111\}$, нахилених до напрямку дряпання, то для нанодвійникового алмазу було виявлено, що часткова дислокація є домінуючим типом дислокації та ковзання йде лише в $\{111\}$ площині, паралельній двійниковим границям. Тобто, двійники приводять до зміни механізму пошкодження nt-D від чистої аморфізації до суміші аморфізації і двійникування. Крім того, у разі дряпання в порівнянні зі sc-алмазом у nt-D, окрім аморфізму в процесі формування підповерхневих пошкоджень, спостерігають також і дедвінінг (рис. 2). Ці результати розширюють розуміння поведінки nt-алмазу під час дряпання і надають теоретичні передумови для застосування nt-алмазу.

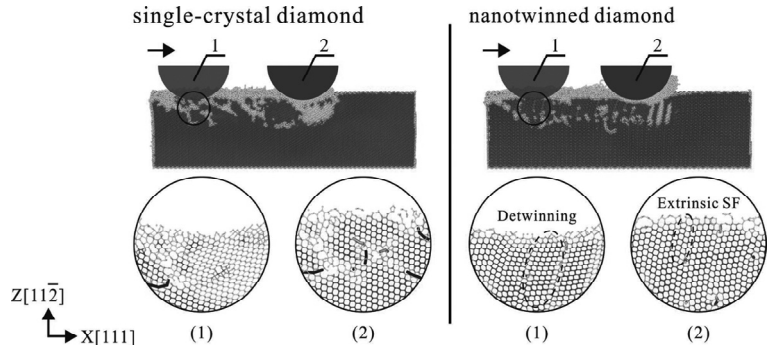


Рис. 2. Порівняння підповерхневого шару під час дряпання sc- та nt-алмазом: ММД-моделювання [4].

Зазвичай алмазні зерна в алмазному крузі необхідно гарно закріплювати у зв'язуючому матеріалі. У дослідженні [5] було експериментально перевірено модифікацію морфології поверхні алмазу для підвищення зносостійкості алмазно-гальванічного (АГ) покриття – Ni-алмаз. Водночас методом термохімічної корозії було отримано новий тип алмазу з шорсткою поверхнею, а композитне покриття Ni-алмаз виготовлено методом електроосадження на постійному струмі (рис. 3).

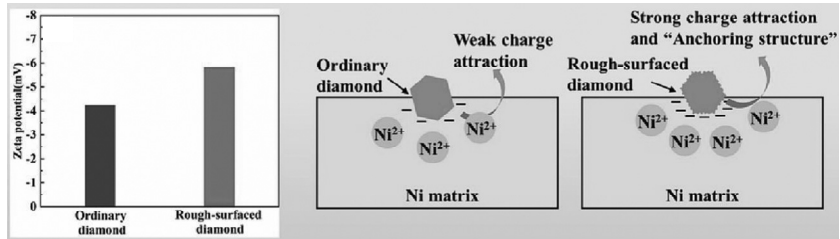


Рис. 3. Отримання АГ-покриття Ni-алмаз з шорсткою поверхнею. [5].

У дослідженні показано, що алмаз із шорсткою поверхнею має більшу площу поверхні та вищу електронегативність, ніж звичайний алмаз, що покращує адгезію між зв'язкою на основі Ni та алмазом із шорсткою поверхнею. Мікротвердість такого покриття було збільшено до 613 HV, а коефіцієнт тертя зменшено до 0,63. Завдяки синергетичному впливу підвищеної мікротвер-

дості та міцності з'єднання швидкість зношування АГ-покриття знизилася на 15,6 %. Тобто, застосування зерен алмазів з шорсткою поверхнею є важливим для отримання нових покриттів з високою зносостійкістю. На ці нові розробки з отримання шорстких та пористих алмазів було звернено увагу і в огляді [1].

Є й інші варіанти отримання шорсткого алмазу. Так, у [6] вивчено морфологічні зміни поверхні мікрокристалів синтетичного алмазу кубооктаедричної форми під час окислювального травлення в кисні або на повітрі за підвищених температур (рис. 4).

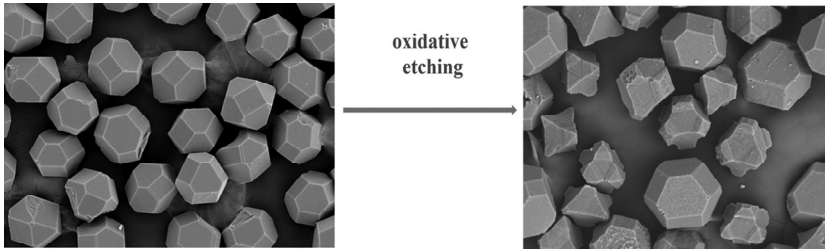


Рис. 4. Зміна морфології поверхні алмазів у разі окислювального травлення [6].

На ранніх стадіях утворюються трикутні ямки травлення. Кристали, протравлені за температури 600–700 °С до високих ступенів перетворення, відносяться до скелетного типу – у цих кристалах сильно протравлені грані $\{111\}$. За температури вище 700 °С на гранях $\{100\}$ починають з'являтися ямки травлення, які мають квадратну форму і ступінчасту морфологію. Окислювальне травлення за температури 900 °С призводить до утворення кристалів алмазу антискелетного типу за високої ступені перетворення (30–50 %).

Морфологія поверхні зерен є важливим показником для оцінки шліфувальної здатності шліфувального круга, а абразивні зерна і шліфувальна рідина впливають на формування шліфованої поверхні. Абразивні зерна, що застосовують у реальному шліфуванні, можуть мати неправильну геометрію, і їхній розподіл на шліфувальному крузі також є нерівномірним, що утруднює вивчення рельєфу поверхні. У [7] на основі фактичної геометричної форми абразивних зерен cBN наведено їхні відповідні геометричні особливості й визначено моделі зерен cBN. Через випадковість розподілу абразивних зерен і механізм видалення матеріалу було проведено моделювання шліфованої поверхні для прогнозування топографії поверхні. Було проведено відповідні експерименти по шліфуванню з охолодженням і без нього та шліфуванню з допомогою ультразвукової вібрації. Встановлено, що тангенціальне шліфування без охолодження з ультразвуковою вібрацією значно полегшує видалення матеріалу. Разом з тим, радіальне ультразвукове вібраційне шліфування більше впливає на оброблювану поверхню і, водночас, з'являються виколки і більша кількість мікротріщин, що послаблює міцність оброблюваного матеріалу. В експериментах зі шліфування з охолодженням шліфувальна рідина поліпшує умови різання в зоні шліфування і забезпечує кращу якість поверхні. Шорсткість поверхні за допомогою тангенціального шліфування з ультразвуковою вібрацією є найбільш низькою як за сухого шліфування, так і з охолодженням. За умов сухого радіального ультразвукового вібраційного шліфування шорсткість поверхні є нижчою, ніж під час шліфування з охолодженням, тоді як у разі шліфування з охолодженням – навпаки [7].

СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХОДУ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ У ПЛАСТИЧНИЙ РЕЖИМ

Критична глибина шліфування, яка відповідає пластично-крихкому переходу є важливим параметром обробки, що гарантує алмазно-абразивну обробку крихких матеріалів у пластичному режимі. Проте, важко передбачити цю критичну глибину шліфування, враховуючи взаємодію кількох зерен через випадковий розподіл зерен на поверхні круга. У [8] продемонстровано новий підхід у визначенні енергії подрібнення для прогнозування критичної глибини подрібнення з урахуванням випадкових взаємодій між декількома зернами, а також представлено експериментальні результати для монокристалічного кремнію. У цьому процесі взаємодія зерна із заготовкою досліджували за фактичною висотою виступу зерна та випадковим розподілом зерна. Показано, що пластичне скрайбування та крихке руйнування є домінуючими режимами видалення матеріалу під час подрібнення крихких матеріалів. На основі запропонованої моделі досліджено вплив умов шліфування на критичну глибину шліфування. Вона збільшується зі збільшенням швидкості шліфування і зменшується зі збільшенням швидкості подачі. Дослідженнями у [8] не тільки запропоновано новий метод для прогнозування критичної глибини шліфування, але також показано можливість покращення механізму пластично-крихкого переходу.

Звичайні алмазні шліфувальні круги мають такі проблеми, як незадовільне самозаточування і труднощі досягнення якісної обробки в пластичній області у разі обробки твердих і крихких матеріалів, що знижує ефективність обробки. У [9] представлено новий шліфувальний круг, що містить пористі алмази, згадані вище, для покращення надточної обробки. Термохімічне травлення застосовують для отримання пористих алмазних зерен з різною мірою корозії, а механізми різання і зносу цих зерен досліджено за допомогою ММД-моделювання і випробувань на дряпання окремими зернами. У порівнянні зі звичайними алмазними зернами пористі алмазні зерна з підвищеною кількістю мікрокромов ефективно зменшують силу різання і тепловиділення. Цікаво, що розміри корозійних пор у діапазоні від 2 до 5 мкм зменшують їхнє пошкодження під час різання. Звичайні алмазні зерна в першу чергу пошкоджуються через графітизацію поверхні кристала і дроблення блоків, тоді як пористі алмазні абразивні зерна пошкоджуються переважно в процесі мікродроблення і мікроруйнування. Випробування під час фінішного шліфування 4H-SiC показали, що звичайні алмази тут дають тріщини і виколки на шліфованій поверхні. Між тим, алмази з корозійними порами розміром 2 мкм демонстрували переважно пластичне видалення з мінімальною кількістю тріщин та виколок. Алмазні абразивні матеріали з корозійними порами розміром 5 мкм також продемонстрували задовільні характеристики.

Монокристалічний кремній має гарні властивості для поліпшення характеристик оптичних систем, але точне і ефективне виготовлення виробів з нього залишається складною задачею через його крихкість. У [10] продемонстровано оброблюваність у пластичному режимі кремнію з мідним покриттям у процесі застосування еліптичної вібраційної алмазної різки. Було експериментально досліджено вплив мідного покриття на пластичну оброблюваність кремнію у разі застосування звичайної алмазної різки, засвідчено, що критична глибина різання для в'язко-крихкого переходу збільшилася з 118 до 418 нм завдяки мідному покриттю. Це забезпечило наявність гідростатичного тиску в режимі мікрорізання і зусилля під час стиснення на підповерхневі дефекти для уникнення розповсюдження тріщини. У подальшому випробування в процесі нарізання канавок на покритому і непокритому міддю кремнію провадили із засто-

суванням еліптичної вібраційної різки (ЕВР). Через малу товщину миттєво незрізаної стружки в кожному циклі вібрації критична глибина різання під час ЕВР для непокритого кремнію збільшилася до 459 нм. Водночас, у разі застосування процесу покриття міддю критична глибина різання під час ЕВР для кремнію з покриттям збільшилася до ~ 988 нм. Тобто, оброблюваність кремнію в пластичному режимі була ефективно поліпшена внаслідок поєднання ЕВР і процесу нанесення покриття. Крім того, у [10] було докладно вивчено вплив амплітуди вібрації і швидкості різання на оброблюваність кремнію, що дало можливість оптимізувати умови пластичної обробки кремнію.

В [11] було досліджено також твердий і крихкий матеріал сапфір. Еволюцію зносу алмазного інструменту на металічній зв'язці під час шліфування сапфіру досліджували із застосуванням нової конструкції шліфувальної установки. Характеристики зносу алмазних зерен і металічної зв'язки вивчали у фіксованій зоні шліфувального інструменту. Крім того, оцінювали еволюцію процесу шліфування, зусилля шліфування, коефіцієнт шліфування і цілісність поверхні сапфіра (рис. 5). У процесі шліфування, по мірі збільшення об'єму зішліфованого матеріалу, кількість алмазних зерен, що брали участь у зніманні матеріалу, частка алмазних зерен з мікротріщинами і середня висота виступу алмазних зерен збільшуються. Водночас у процесі шліфування зменшується частка заново оголених алмазних зерен і звужується розподіл висоти виступу алмазних зерен. Відтак, більш високого коефіцієнта шліфування, стабільного зусилля шліфування і цілісності шліфованої поверхні досягають, коли знос алмазного інструменту на металічній зв'язці переходить з початкової стадії в стабільну зі збільшенням об'єму матеріалу, що знімали, до 3600 мм³.

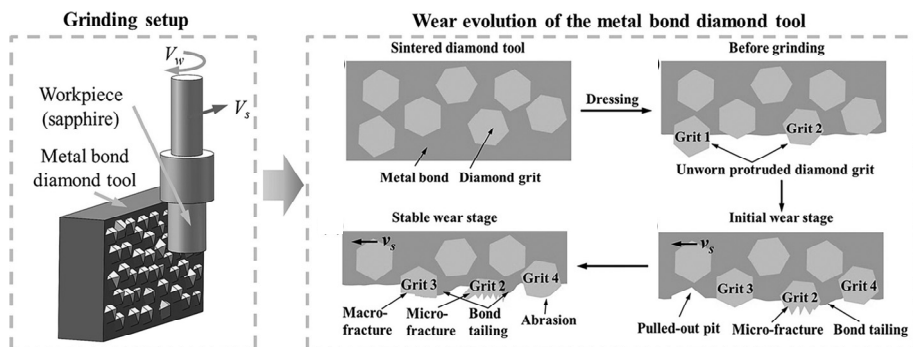


Рис. 5. Схема шліфування та еволюція зносу алмазного круга на металічній зв'язці під час шліфування сапфіру [11].

Водночас, на якість обробленого поверхневого шару сапфіру можуть вплинути і на його анізотропні властивості, що було виявлено в [12] під час скрайбування R-площини сапфіра алмазним нано-PCD різцем. Було проведено експерименти із заглибленням під час різання для виявлення глибини переходу від пластичного до крихкого (ППК) режиму. Топографія та профілі канавок показують, що глибина ППК у напрямку обробки, перпендикулярного до площини А (тип PER), може досягати 200 нм, тоді як глибина ППК у напрямку обробки, паралельного площині А (тип PAR), становить < 143,51 нм (рис. 6). Однак ТЕМ-зображення показують тріщину глибиною 560 нм, яка існує на підповерхневій поверхні канавки типу PER, хоча її поверхня демонструє пластичні характеристики. Крім того, результати дослідження за допомогою просвітлюючого електронного мікроскопа високої роздільної здатності показали, що дислокаційні дефекти визначають глибину ураженого шару для канавки типу PER, тоді

як дефекти двійникування домінують у глибині ураженого шару для канавки типу PAR. Крім того, експерименти свідчать, що сила різання типу PER більша, ніж сила різання типу PAR. Результати ММД-моделювання засвідчили, що глибина пластичної деформації для канавки типу PER є вищою, ніж для канавки типу PAR.

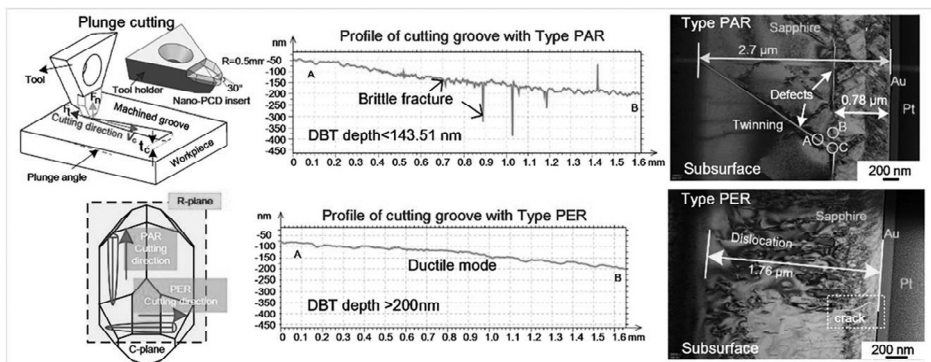


Рис. 6. Профілі канавок у напрямку обробки, перпендикулярному до площини А (тип PER), та в напрямку, паралельному площині А (тип PAR) [12].

В процесі магнітореологічного полірування сапфіра абразивами “серцевина/оболонка” типу $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ хімічні реакції відбуваються на поверхні сапфіру, внаслідок чого утворюється шар хімічних продуктів, який легко видаляється через його низьку твердість. У [13] конкретний механізм механічного видалення цього шару хімічних продуктів було досліджено за допомогою аналізу морфології подряпин і сил скрайбування, отриманих завдяки комп’ютерному моделюванню і експерименту з дряпання. Результати засвідчили, що тангенціальна сила грає основну роль у процесі видалення матеріалу, а зрушувальна дія абразивів домінує в процесі видалення шару хімічних продуктів на поверхні сапфіру. У процесі скрайбування шар хімічних продуктів спочатку пластично деформується, а надалі видаляється, коли напруження зрушення перевищує межу текучості його матеріалу. Матеріали по обидві боки від подряпини пластично витікають назовні та утворюють “гребні” в процесі неперервної екструзії. Матеріал на дні подряпини руйнується і видаляється в результаті неперервного інтенсивного процесу екструзії і зрушення, що призводить до нерівної “зубчастої” морфології. І нормальні, і тангенціальні сили нерівномірно зростають зі збільшенням довжини скрайбування, а середня глибина і ширина подряпини збільшуються зі швидкістю скрайбування (рис. 7). Тобто, механізм видалення матеріалу сапфіра в процесі магнітореологічного полірування є комбінацією хімічної реакції поверхневого матеріалу та спільної дії пластичної деформації і зсувного видалення шару хімічних продуктів.

Основною метою в [14] була розробка алмазного шліфувального круга, який міг би забезпечити тривалий термін служби та гарну якість поверхні під час процесу шліфування сапфірових підкладок. Алмазний шліфувальний композит Ni–Al з інтерметалічним зв’язком виготовляли за допомогою швидкого гарячого пресування з використанням вихідних порошків і попередньо легованих газорозпиленних Ni–Al порошків. Інтерметаліди Ni–Al, а особливо NiAl, Ni_3Al та Ni_5Al_3 , отримали переважну увагу завдяки високим температурам плавлення, відносно низькій густині, гарній стійкості до корозії та окислення. Дослідження свідчать, що на поверхні алмазу є багато незв’язаних атомів вуг-

лецю. Елемент Al в інтерметалічних сполуках може реагувати з цим ненасиченим вуглецем і утворювати зв'язок Al–C під час процесу високотемпературного спікання, що призводить до наявності зв'язку між інтерметалевим зв'язком Ni–Al та алмазом (рис. 8). Отже, алмазний шліфувальний круг Ni–Al з інтерметалічним зв'язком теоретично може покращити утримання алмазів. Крім того, Cu_3Sn з низькою температурою плавлення додавали в алмазний шліфувальний блок для зниження температури спікання та термічного пошкодження алмазу. Алмазний шліфувальний композит Ni–Al з інтерметалічним зв'язком, що містить 5 % (за масою) Cu_3Sn , з міцністю на вигин 89 МПа та пористістю 0,67 % демонструє найкращу продуктивність шліфування для сапфіру.

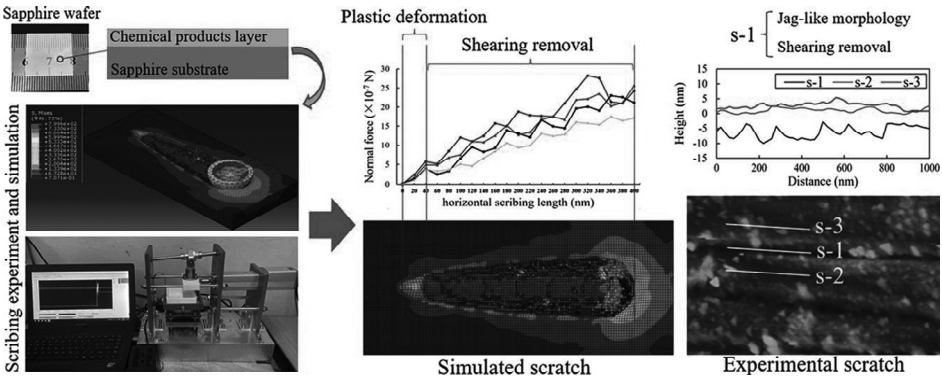


Рис. 7. Механізм видалення матеріалу сапфіру в процесі магнітореологічного полірування [13].

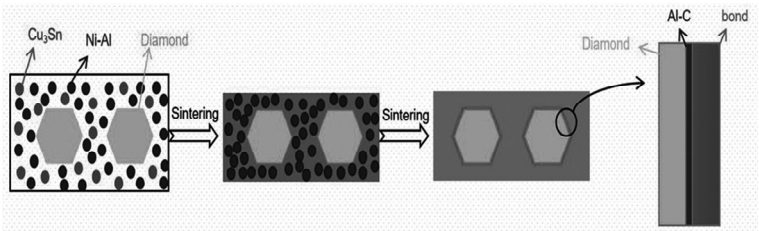


Рис. 8. Утворення зв'язку Al–C під час процесу високотемпературного спікання, що призводить до посилення зв'язку між зв'язкою Ni–Al та алмазом [14].

Такий крихкий матеріалу, як карбід кремнію (SiC), стає все більш важливим для використання в оптоелектронній промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Дослідники нині намагаються розробити високоефективні і недорогі абразивні процеси, такі як шліфування, притирання та полірування підкладок і пластин SiC. Деякі технічні рішення вже комерціалізовано. Наприклад, технологія Smartcut застосовує модифікацію поверхні і термічне окислення пластин карбіду кремнію, що дозволяє отримувати тонкі пластини. Це дозволяє отримати 500 пластин/зливку, що мали шорсткість обробленої поверхні після полірування за параметром $Rq < 2 \text{ \AA}$. Динамічний AGE-вплив, який поєднує відпал, планаризацію, епітаксію і термічне травлення, може знизити щільність дислокацій базисної площини в отриманих епітаксialьних шарах до $< 1/\text{cm}^2$. Разом з тим, досягнення високої точності під час обробки SiC є проблемою, і розуміння мікроскопічних і динамічних механізмів, що зумовлюють цей процес, є вирішальним. У дослідженні [15] використовували ММД-моделювання для дослідження цих механізмів за допомогою аналізу різних інтервалів вида-

лення частинок зносу SiC під час моделювання процесу шліфування. Застосоване ММД-моделювання мало чотири різні форми мультизернистості (кубічної, октаедричної, кубооктаедричної та сферичної), а остаточні шліфовані поверхні було отримано за допомогою імітації шліфування (рис. 9).

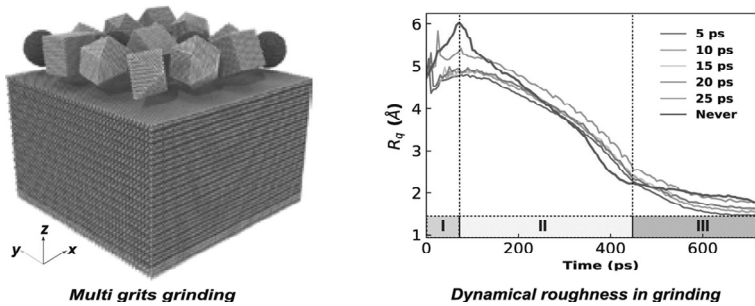


Рис. 9. Форми мультизернистості (кубічної, октаедричної, кубооктаедричної та сферичної) і зміни шорсткості шліфованої поверхні за часом, отримані за допомогою імітації шліфування [15].

Дослідження особливостей обробки алмазних пластин, які знаходять широкий спектр застосування в багатьох технічних областях, таких як надточні інструменти для обробки, інфрачервоні вікна і напівпровідникові пристрої в екстремальних умовах, таких як високі температура і тиск. Але для цих умов поверхня алмазів не має бути шорсткою, тобто необхідним є процес полірування. Надвисока швидкість полірування є необхідною умовою звичайного динамічного полірування тертям, яке неминуче спричиняє багато обмежень і ризиків для безпеки. У [16] було запропоновано нову технологію динамічного фрикційного полірування алмазів із низькою швидкістю обертання за допомогою ультрафіолетового опромінення. Цей метод заснований на поєднанні впливу ультрафіолетового випромінювання на поверхню алмазу та тертя між алмазом і металічним диском для реалізації видалення матеріалу. Процес фазового перетворення та окислення, яким сприяє ультрафіолетове світло, є основним механізмом для досягнення ефективного видалення матеріалу за низької швидкості обертання (рис. 10). Тобто, під синергічним ефектом ультрафіолетового світла і фрикційного нагріву алмаз може зазнавати окислення і взаємодії із залізом за низької (8 м/с) швидкості обертання і, насамкінець, це дозволяє отримати надгладеньку поверхню алмазу з шорсткістю поверхні $Rq = 0,26$ нм та $Ra = 0,18$ нм. Нова технологія полірування алмазів, представлена в [16], застосована саме на зниженні швидкості під час тертя, оскільки це збільшує можливість отримання пластичного режиму обробки [17].

СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХІМІКО-МЕХАНІЧНОГО ВПЛИВУ ПІД ЧАС АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ТВЕРДИХ ТА КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ

Відомо, що хіміко-механічне полірування (надалі – ХМП) є методом, що забезпечує мікромасштабне видалення матеріалів за рахунок синергії поверхневих хімічних речовин, хімічної реакції і механічного впливу. ХМП відома як технологія “чорної скриньки”, причому практичний досвід [18] засвідчив, що шлам і абразиви в ньому є ключовими факторами, що впливають на характеристики ХМП. Як приклад, абразиви CeO_2 широко застосовують у ХМП для обробки у виробництві оптичних лінз і напівпровідників. Вважають, що CeO_2 -абразиви спричиняють вплив на швидкість знімання і якість поверхні

оброблюваних матеріалів завдяки їхній мікроморфології, розмірам зерен, механічним властивостям, кристалічній структурі і наявних у них дефектів. За допомогою моделі контактної зони виявлено, що сферичні абразиви CeO_2 меншого розміру забезпечують краще видалення шорсткого матеріалу через збільшення загальної площі контакту з підкладкою. Тобто тут механічний контакт утворюється між підкладкою та композитними абразивами зі структурою серцевина/оболонка. Вважають, що пружний ефект органічного сердечника може ефективно регулювати стан контакту між абразивами і заготовкою, що знижує пошкодження матеріалів твердими абразивами. У [18] серію абразивів $\text{Ce}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_2$ різних типів та кількості легування було виготовлено методом розплавленої солі. Для всіх типів легування морфологія абразивів змінюється від сферичної до октаедричної, їхній розмір безперервно зменшується зі збільшенням легування. Концентрація Ce^{3+} на поверхні абразиву CeO_2 також збільшується за рахунок легування. Теорія функціоналу густини вказує на те, що енергія утворення вакансій в системах CeO_2 зменшується у разі легування. Експерименти ХМП показують, що легування значно підвищує ефективність абразивів. Швидкість знімання матеріалу (ШЗМ) абразивів CeO_2 , легованих Y^{3+} , La^{3+} і Pr^{3+} , збільшилася відповідно на 56, 40 і 44 % порівняно з чистим. Підтверджено, що після полірування отримана поверхня підкладки SiO_2 майже не має пошкоджень і має малу шорсткість.

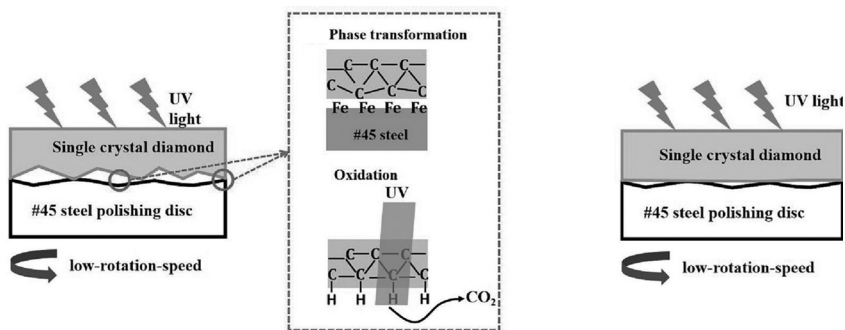


Рис. 10. Ілюстрація механізму досягнення ефективного полірування алмазу в разі застосування ультрафіолетового випромінювання [16].

Карбід кремнію (SiC) є перспективним матеріалом для використання у високопродуктивних силових електронних пристроях. Разом з тим, пластина SiC є дорогавартісною частково через труднощі механічної обробки її поверхні. Крім того, тривалий процес полірування потребує значної кількості ресурсів, що збільшує вплив процесу виробництва пластин на оточуюче середовище. У [19] наведено відомості про розроблений екологічно чистий і високоефективний метод вже не хімічного, як викладено вище, а електрохімічно-механічного полірування (ЕХМП) для 4H- SiC (0001), який не потребує рідини, що містить агресивні хімічні речовини, і застосовує іонопровідну композитну прокладку, що складається з твердого полімерного електроліту та частинок CeO_2 . Поверхню SiC , оброблену запропонованим способом, аналізували за допомогою рентгеноструктурного аналізу, спектроскопії комбінаційного розсіяння, атомно-силової мікроскопії і рентгеноадсорбційних вимірів тонкої структури. Високу ШЗМ, яка склала ~ 15 мкм/год, що майже в 10 разів є вищою, ніж у разі хімічно-механічного полірування, було досягнуто запропонованим методом ЕХМП за густини струму 25 мА/см^2 і механічних умов $2,3 \cdot 10^3 \text{ кПа/хв}$. Запропонований метод, який може видалити поверхневі пош-

кодження і створити гладеньку поверхню на усьому масиві пластини з високою ШЗМ без рідкого електроліту, може бути вигідним для екологічно чистого полірування пластин SiC.

У процесі виробництва інтегральних схем широко застосовують технологію надточного витончення із застосуванням самообертального шліфування заготовки з подальшим ХМП, що дозволяє з високою швидкістю знімання матеріалу отримувати надтонкі кремнієві пластини великого розміру та малою товщиною пошкодженого шару. У [20] досліджували контактні характеристики поверхні розділу пластини–прокладка та корозійну поведінку шліфованої кремнієвої пластини, зануреної в полірувальний розчин. Спочатку кремнієві пластини шліфували за допомогою різних кругів, а потім полірували. Глибину видалення матеріалу вимірювали протягом усього процесу ХМП. Метод скінченних елементів використовували для оцінки стану контакту, викривлення зміщення та розподілу напружень в області контакту між прокладкою та поверхнею шліфованої пластини.

Нанодвійниковий алмаз (nt-D) з надвисокою твердістю і в'язкістю є перспективним інструментальним матеріалом для надточного різання важкооброблюваних матеріалів [4]. Високоякісний nt-D інструмент для використання в надточному різанні матеріалів було виготовлено у [21]. Для того, щоби отримати мінімальне пошкодження поверхні та гострі кромки, було запропоновано двоетапну техніку полірування для розробки високоякісного різального nt-D інструменту (рис. 11). Дослідження засвідчили, що відбувалося пошкодження поверхні аморфізацією, а незадовільна ріжуча кромка була пов'язана з випаданням зерен nt-D. Тому спочатку було застосовано механічне полірування для фінішної обробки поверхні nt-D інструменту, а кінцеву обробку проводили методом ХМП. Результати показали, що було усунуто аморфізацію і утворилася надгостра різальна кромка з радіусом 13,1 нм. Загалом для обробки nt-D інструменту було використано процес хіміко-механічного полірування з використанням реагенту Фентона як окислювача та Al_2O_3 як абразиву, що дозволяє отримати дзеркальну поверхню. Випробування в процесі різання твердого сплаву показали, що зносостійкість nt-D інструменту була кращою, ніж у комерційного алмазного інструменту [21].

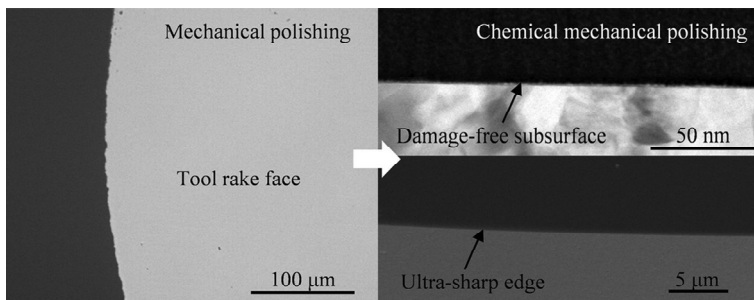


Рис. 11. Двоетапна техніка полірування для розробки високоякісного різального nt-D інструменту [21].

У дослідженні [22] зроблено комплексне порівняння вирощених і ХМП полірованих ультратонких (≤ 500 нм) легованих бором алмазних (BDD) електродів з різним вмістом бору – $(0,58\text{--}4,4) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, нанесених з В/С 500–8000 ppm. Для порівняння морфологічних змін і підтвердження зменшення шорсткості до ≤ 2 нм використовували атомно-силову та сканувальну електронну мікроскопію. Високоякісне ХМП спричинило дифракцію зворотного розсіювання елек-

тронів, що дозволило оцінити розподіл зерна за розміром (середнє значення – 0,3 мкм) і бажаної текстури зерна – $\{011\}$. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія підтвердила збільшення вмісту бору на поверхні ХМП-полірованих електродів у результаті опромінення атомів бору, включених в об'єм для високолегованих електродів BDD₄₀₀₀ і BDD₈₀₀₀. Крім того, поліровані електроди BDD методом ХМП мають рівномірний розподіл провідності, що підтверджено сканувальною електронною мікроскопією (рис. 12).

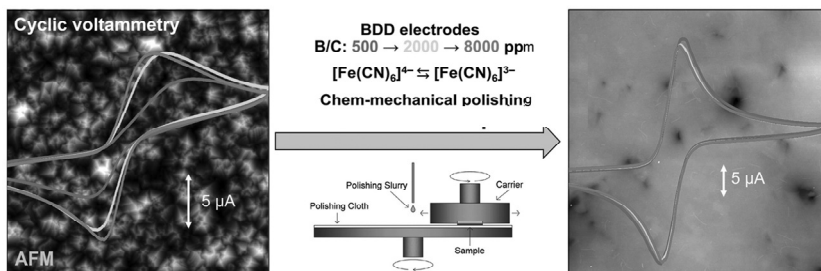


Рис. 12. Вплив хіміко-механічного полірування на зміну кінетики переносу електронів на прикладі відновлюваних маркерів $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ та $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ [22].

Монокристал оксиду лютетію є чудовим кристалічним матеріалом, що має низьку енергію фононів, високу теплопровідність і високий поріг пошкодження лазерним випромінюванням. Полірування є важливим методом отримання надгладеньких, непошкоджених поверхонь пластин з оксиду лютетію. Між тим, у полірувальних кругах серед алмазних абразивних зерен є різні за формою та з гострими кутами зерна, що призводить до різної якості полірованої поверхні. У дослідженні [23] алмазні абразивні зерна різної форми і різні моделі механічного полірування монокристалу оксиду лютетію було враховано в ММД-моделюванні, яке дозволяє безпосередньо моделювати процес видалення матеріалу атомарного масштабу під час полірування, а також проводити розрахунки таких параметрів, як сили полірування і напруження, які неможливо виміряти в експериментах. У [23] ММД-моделювання застосовували для моделювання процесу полірування монокристалу оксиду лютетію поліедричними алмазними абразивними зернами різної форми, а також аналізували силу полірування, підповерхневе пошкодження і видалення матеріалу. Результати свідчать, що напруження стиску і товщина обробленого аморфного шару в підповерхневому шарі є мінімальними в положенні вершинного контакту і максимальними в положенні контакту з торцем. Під час видалення матеріалу багатогранні і сферичні абразивні зерна спричиняють розпушувальну дію в процесі видалення матеріалу. Водночас вершини і кромки багатограних абразивних зерен легше врізаються в заготовку, ніж сферичних абразивних зерен, тому багатогранні абразивні зерна сприяють кращому видаленню матеріалу в певних умовах [23].

У [24] розкрито механізм ХМП-полірування сплаву інвар у разі змачування водою із застосуванням згаданого вище ММД-моделювання. Результати [24] свідчать про те, що за механізмом ХМП-полірування відповідна товщина водяної плівки і швидкість полірування можуть значно зменшити шорсткість поверхні заготовки і усунути підповерхневі дефекти (рис. 13). Пасивний вплив води поліпшує якість поверхні канавки. Сферичні абразиви змінюють характер руху атомів у поверхневому шарі. З підвищенням швидкості прокочування зміна шорсткості поверхні та товщини підповерхневих пошкоджень має тенденцію до повільного зменшення, а наділі до стабілізації. Крім

того, із підвищенням товщини плівки води в приповерхневій області утворювалося більше дефектів через більші поверхневі напруження, хоча шорсткість може бути зменшена завдяки збільшенню кількості пасивованих водою атомів на поверхні заготовки.

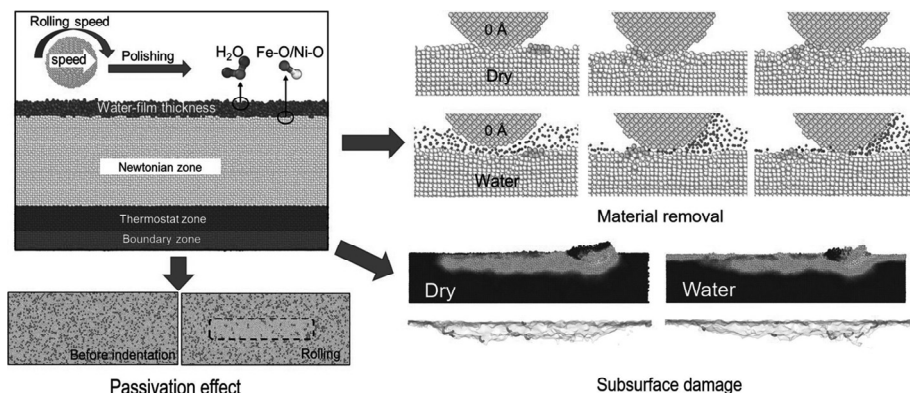


Рис. 13. Порівняння механізмів ХМП-полірування сплаву інвару за наявності води та за її відсутності з використанням ММД-моделювання [24].

ВИСНОВКИ

У сучасних публікаціях, присвячених дослідженню умов обробки в мікроскопічних масштабах із застосуванням приладів з високою роздільною здатністю, доведено, що їх можна проводити із застосуванням *in-situ* сканувальних електронних мікроскопів.

В огляді звернено увагу на збільшення застосування пористих, шорстких та нанодвійникових алмазів. У порівнянні зі звичайними алмазними зернами пористі алмазні зерна із підвищеною кількістю мікрокромов ефективно зменшують силу різання і тепловиділення. Так, звичайні алмази дають тріщини і виколки на шліфованій поверхні, а алмази з корозійними порами 2 мкм демонструють переважно пластичне видалення з мінімальною кількістю тріщин та ямок. За допомогою метода термохімічної корозії отримано новий тип алмазу з шорсткою поверхнею, який має більшу площу поверхні та вищу електронегативність, ніж звичайний алмаз, що покращує адгезію на межі зв'язка–алмаз. Встановлено, що в порівнянні з монокристалічними алмазами нанодвійникові мають більш виражену пластичну деформацію.

Позитивні особливості шорсткого і пористого алмазу досліджено фахівцями Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України в [25], де показано, що пористі монокристали можна застосовувати в алмазному інструменті для покращення якості обробленої поверхні та продуктивності обробки через контрольовані процеси їхньої підготовки та сепарації.

Моделювання методом молекулярної динаміки є важливим методом аналізу механізмів нанорозмірних процесів механічної обробки, таких як нанорізка, шліфування і полірування. Нині ММД-моделювання, що широко застосовують у дослідженнях механізму обробки на атомному рівні, дозволяє проводити розрахунки таких параметрів, як зусилля і напруження, які неможливо виміряти в експериментах.

Показано, що критична глибина шліфування, амплітуди вібрації і швидкості різання пластично-крихкого переходу є важливими параметрами обробки, які гарантують алмазно-абразивну обробку крихких матеріалів у пластичному режимі.

Хіміко-механічне полірування 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. В останніх публікаціях його визначено як ефективний процес обробки таких твердих і крихких матеріалів, як карбід кремнію, монокремній, нанодвійниковий алмаз (nt-D), леговані бором алмази, інвар, тощо.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не фінансувалася із зовнішніх джерел.

V. I. Lavrinenko

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Modern developments in the study of the peculiarities

of diamond-abrasive processing of hard and brittle materials

(Review)

Modern developments in the study of the processes of diamond-abrasive processing of hard and brittle materials are considered. There are studies dedicated to the reproduction of processing conditions on a microscopic scale using high-resolution devices. Attention is drawn to the increased use of porous, rough and nano-twin (nt-D) diamonds. Using the thermochemical corrosion method, a new type of diamond with a rough surface was obtained, which has a larger surface area and higher electronegativity than ordinary diamond, which improves adhesion at the bond-diamond interface. Attention is paid to molecular dynamics modeling, which is an effective approach to the analysis of the mechanisms of abrasive machining processes, such as nanocutting, grinding and polishing. It is shown that the critical grinding depth, vibration amplitude and cutting speed are important processing parameters that determine the possibility of transferring diamond-abrasive processing of hard and brittle materials to the plastic mode. In recent publications, chemical-mechanical polishing is defined as an effective process for processing such hard and brittle materials as silicon carbide, monosilicon, nano-twin diamond, boron-doped diamonds, etc.

Keywords: *diamond-abrasive processing, hard and brittle materials, plastic mode of processing, diamond with a porous and rough surface, molecular dynamics modeling, chemical-mechanical polishing.*

1. Lavrinenko V.I. Recent developments in diamond processing and surface modification techniques for tailoring properties of diamond grains: A review. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 6. P. 462–481.
2. Lavrinenko V., Solod V. Determining the conditions for achieving the plastic regime of diamond grinding of ceramics from the standpoint of estimating energy costs of processing. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 1. P. 65–71.
3. Axinte D., Huang H., Yan J., Liao Zh. What micro-mechanical testing can reveal about machining processes. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2022. Vol. 183, art. 103964
4. Chen J., Zhang W., Tong K. Effect of twins on scratching behavior of nanotwinned diamond: A molecular dynamics simulation. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 616, art. 156545.
5. Hong Q., Zhou R., Guo X., Wang Z., Yin S. A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 137, art. 110093.
6. Bokhonov B.B., Gerasimov K.B., Mikhailenko M.A. Morphological features of synthetic diamond microcrystals subjected to oxidative etching. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 136, art. 109934.
7. Yang Z., Zou P., Zhou L., Wang X., Usman M.M. Modeling and experimental analysis of surface topography generation mechanism during ultrasonic vibration-assisted grinding. *Precis. Eng.* 2023. Vol. 80. P. 30–44.

8. Zheng Z., Huang K., Lin C., Zhang J., Wang K., Sun P., Xu J. An analytical force and energy model for ductile-brittle transition in ultra-precision grinding of brittle materials. *Int. J. Mech. Sci.* 2022. Vol. 220, art. 107107.
9. Li W., Hu X., Long G., Shang A., Guo B. Grain wear properties and grinding performance of porous diamond grinding wheels. *Wear*. 2023. Vol. 530–531, art. 204993.
10. Zhang J., Shen Z., Li X., Yuan H., Zhang J., Chen X., Xiao J., Xu J. Investigation on the machinability of copper-coated monocrystalline silicon by applying elliptical vibration diamond cutting. *Precis. Eng.* 2023. Vol. 82. P. 25–32.
11. Peng J., Zhang F., Wu Y., Zhou Y., Tang H. Wear evolution of metal bond diamond tool in grinding of sapphire. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 137, art. 110131.
12. Wang Y., Liang Z., Zhao W., Wang X., Wang H. Anisotropic cutting mechanisms on the surface quality in ultra-precision machining of R-plane sapphire. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 622, art. 156868.
13. Zhai Q., Zhai W., Deng T. Removal mechanism of the chemical products layer on single-crystal sapphire surface in magneto-rheological polishing with $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ core-shell abrasives. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 619, art. 156778.
14. Chen Sh., Kang X., He Y. Study on the preparation of Ni–Al intermetallic-bonded diamond grinding block and grinding performance for sapphire. *Diam. Relat. Mater.* 2022. Vol. 130, art. 109490.
15. Huang Y., Zhou Y., Li J., Zhu F. Understanding of the effect of wear particles removal from the surface on grinding silicon carbide by molecular dynamics simulations. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 137, art. 110150.
16. Jiang X., Wu G., Guan S., Mao Y., Yang Z., Long X., Zhao L., Qi Q., Tan Z. A novel low-rotation-speed dynamic friction polishing of diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 136, art. 109932.
17. Lavrinenko V. Phenomenon of lagging in the values of grinding wheel performance characteristics due to the radial transformation of the cutting surface of a wheel under abrasive diamond treatment. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 6. P. 460–465.
18. Ma J., Xu N., Hu J., Luo Y., Lin Y., Pu Y. Doping strategy on properties and chemical mechanical polishing performance of CeO_2 Abrasives: A DFT assisted experimental study. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 623, art. 156997.
19. Murata J., Hayama K., Takizawa M. Environment-friendly electrochemical mechanical polishing using solid polymer electrolyte/ CeO_2 composite pad for highly efficient finishing of 4H-SiC (0001) surface. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 625, art. 157190.
20. Tao H., Zeng Q., Liu Yu., Zhao D., X Lu. Effects of grinding-induced surface topography on the material removal mechanism of silicon chemical mechanical polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 631, art. 157509.
21. Jin T., Han X., Chen J., Li K., Zhao J. Polishing of ultrahard nanotwinned diamond tool for producing nearly damage-free tool surface and highly sharp cutting edge. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 136, art. 109924.
22. Zelenský M., Fischer J., Baluchová S., Klimša L., Kopeček J., Vondráček M., Fekete L., Eidenschink J., Matysik F.-M., Mandal S., Williams O.A., Hromadová M., Mortet V., Schwarzová-Pecková K., Taylor A. Chem-mechanical polishing influenced morphology, spectral and electrochemical characteristics of boron doped diamond. *Carbon*. 2023. Vol. 203. P. 363–376.
23. Bi G., Li Y., Lai M., Fang F. Mechanism of polishing lutetium oxide single crystals with polyhedral diamond abrasive grains based on molecular dynamics simulation. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 616, art. 156549.
24. Wang W., Hua D., Zhou Q., Li Sh., Eder S.J., Shi J., Wang Zh., Wang H., Liu W. Effect of a water film on the material removal behavior of Invar during chemical mechanical polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 616, art. 156490.
25. Smokvyna V.V., Lavrinenko V.I., Ilnytska H.D. Defectiveness of low strength synthetic diamond grains: negative and positive aspects in case of using them in a grinding tool. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 4. P. 306–315.

Надійшла до редакції 18.01.24

Після доопрацювання 23.02.24

Прийнята до опублікування 28.02.24