

Дослідження процесів обробки

УДК 621.9: 621.923

В. І. Лавріненко^{1,*}, В. В. Смоквина^{1,}, Г. Д. Ільницька^{1,***},
С. П. Старик¹, В. А. Тищенко²**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

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

*lavrinen52@gmail.com

**v.smokvyna@gmail.com

***gil-ism@ukr.net

Підтвердження наявності адсорбованої води на поверхні сучасних алмазних зерен невеликої міцності як чинника можливого подальшого впливу на контактну зону під час шліфування

Досліджено наявність адсорбованої води та гідроксильної групи на реальній поверхні сучасних алмазних шліфпорошків невеликої міцності (марок АС6–АС32). Встановлено, що попереднім розділенням алмазних шліфпорошків на магнітну, немагнітну і вихідну фракції можливо виділити фракцію, яка має найбільшу кількість води на поверхні алмазних зерен – магнітну. Показано, що композиційне покриття Ni–Al поверхні алмазу, а також покриття з добавками вуглецевих нанотрубок, сприяють утворенню більш розвиненої поверхні, ніж на вихідних зразках без покриття, про що свідчить і більша наявність води.

Ключові слова: зерна алмазу, адсорбована вода, гідроксильні групи, поверхня алмазних зерен, магнітна фракція, композиційне покриття.

ВСТУП

Відомо, що під час шліфування подача рідини не впливає на температуру в зоні різання [1]. Внаслідок високих тисків, що виникають в зоні контакту алмазу з оброблюваним матеріалом, рідина не попадає в цю зону і її охолоджувальна дія відбувається після проходження різального зерна, що знижує тільки середню температуру шліфування [1, 2]. За умов шліфування без охолодження важливим є забезпечення наявності води у зоні контакту. Для цього одним з варіантів може бути ефект попереднього поглинання води матеріалом, що обробляють. Більш детально цей ефект описано

© В. І. ЛАВРІНЕНКО, В. В. СМОКВИНА, Г. Д. ІЛЬНИЦЬКА, С. П. СТАРИК, В. А. ТИЩЕНКО, 2025

для інструментальної кераміки, яка, в якійсь мірі, є пористою [3]. Але коли матеріал, що обробляють, не є достатньо пористим, таке рішення реалізувати неможливо. Є ще одне рішення – доставляти воду в зону контакту саме на поверхню алмазу. Наявність адсорбованої води на поверхні порошків алмазу різних марок і зернистостей за різних умов насичення була доведена в [4] майже 40 років тому, але на даний час змінилася дефектність поверхні алмазних порошків, отриманих в нових технологічних умовах, присутність в них домішок і включень. Тому метою даної роботи було дослідження наявності адсорбованої води на поверхні сучасних алмазних порошків невеликої міцності.

Авторами зроблено аналіз подібних досліджень за останні 10 років. Поведінка необроблених поверхонь полікристалічного алмазу (ПКА) під час тертя є важливою для його застосування. В [5] було досліджено вплив на цей процес водного середовища і кількісно оцінено міжфазну капілярну силу зчеплення на контактних поверхнях та її вплив на реакцію тертя між колоїдною мікросферою та шорсткими плівками ПКА до і після електрохімічної корозії в умовах занурення у воду, низької відносної вологості та вологого повітря. Для контактів з кількома нерівностями продемонстровано, як електрохімічна корозія впливає на гідрофільність поверхонь ПКА і як капілярна сила зчеплення внаслідок конденсації води сприяє підвищенню сили тертя. Отримані результати переконливо вказують на те, що спостережуване збільшення сили тертя на корозійних (внаслідок електрохімічних процесів) поверхнях ПКА (для мікрокристалічного (МКА) та нанокристалічного (НКА) алмазу) регулюється посиленням капілярного ефекту на контактній поверхні, що саме і залежить від гідрофільності поверхні та вологості навколишнього середовища (рис. 1). Порівняно з МКА, поверхні НКА, які мають більшу площу міжкристалічних меж, зазнають більш інтенсивної електрохімічної корозії та демонструють вищу спостережувану силу тертя в результаті меншої шорсткості та більшої гідрофільності поверхні. Підвищена сила адгезії капілярів сприяє нормальному навантаженню та зменшує міжфазний зазор (збільшує площу контакту твердого тіла), і у такий спосіб збільшує силу тертя. Тобто наявність води за умов підвищеної вологості змінює умови контактування.

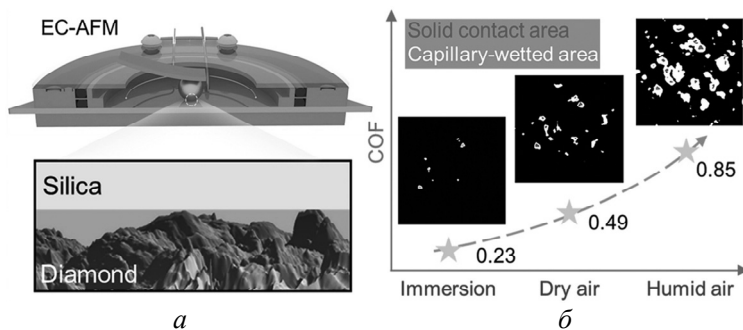


Рис. 1. Схема установки електрохімічно-атомно-силової мікроскопії (EC-ACM) в розрізі (а) та приклад зміни коефіцієнта тертя (COF) у стані занурення у воду (Immersion), за сухого (Dry) та вологого (Humid) повітря (б) [5].

На значення гідроксильних груп звернено увагу і у [6]. 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 гра-

фіту та алмазу відрізняються. У цьому дослідженні застосовували хіміко-механічне полірування (ХМП) для обробки поверхні Gradia окислювачем K_2FeO_4 . Хімічну реакцію в ХМП аналізували за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та моделювання методом реактивної молекулярної динаміки. Атоми вуглецю утворюють різноманітні хімічні групи з окисненням гідроксильних груп (рис. 2). Хімічна активність фази графіту була нижчою, ніж фази алмазу, що призвело до більшої кількості типів реакцій і більшого відсотка отриманих 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 під час абразивного процесу.

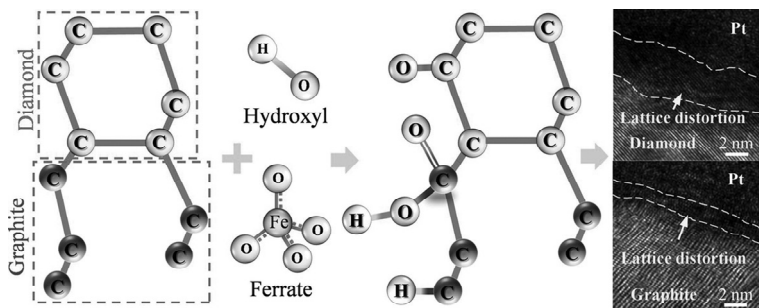


Рис. 2. Схема утворення атомами вуглецю хімічних груп з окисненням гідроксилів для фаз графіту і алмазу та приклади спотворення решітки цих фаз [6].

Дію гідроксильних груп досліджували у [7], де зроблено припущення, що механізм полірування алмазної плівки відповідає механізму ХМП діоксиду кремнію. В традиційному ХМП гідроксильні групи в полірувальній рідині реагують з поверхневими силосановими ($Si-O-Si$) зв'язками і створюють пасивуючий шар на основі силанолу ($Si(OH)_4$). Частинки кремнезему у полірувальній рідині надалі прикріплюються до гідратованих груп пасивуючого шару. Якщо полірувальна частинка виявиться достатньо шорсткою, на частинки кремнезему буде діяти сила зрушення, а якщо енергія цієї зрушувальної дії буде більшою, аніж енергія зв'язку, то молекула буде видалена, що і покладено в основу механізму полірування поверхні. У випадку алмазу ХМП приводить до загального окиснення міжфазної області, збільшення вмісту карбонілу ($CO=$) і гідроксильних груп ($-OH$) на поверхні. Оскільки міцність зв'язку $SiO-$, $OC-$, $-CC$ складає 800, 1077, 610 кДж/моль відповідно, то вважають, що у разі прикладення цієї сили зв'язок CC розірветься і буде відбуватися полірування поверхні алмазної плівки. Процес полірування постійно збільшує вміст кисню на поверхні алмазу, але рівень окиснення вуглецю, ймовірно, не змінюється у разі збільшення вмісту кисню, тому зв'язані молекулярні частинки можуть містити O і також може бути присутня адсорбована вода.

Поверхня алмазу з кінцевими гідроксильними групами (ОН-алмаз) з хімічно функціоналізованими карбоксильними групами вигідна для силанізації. У [8] ОН-алмаз отримували обробкою гідроксид-іонами в деіонізованій воді за високих (до 3000 В) напруг. ОН-алмаз демонструє високу інтенсивність однократно окислених $C-$ вуглецевих зв'язків ($C-OH$ і $C-O-C$) та двічі окислених $C=$ вуглецевих зв'язків ($C=O$ або $O-C-O$), що визначають за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії. Водночас, валентні коливання $O-H$ і $C-O$ спостерігали у спектрах поглинання в інфрачервоній області.

Силанізації досягають за рахунок 3-амінопропил-триетоксисилана (APTES) на поверхні ОН-алмазу за допомогою реакції конденсації з поверхневими групами С–ОН.

У [9] показано ефективну дію гідрат-іонів, а для поліпшення дисперсії і сили зчеплення у полірувальному інструменті поверхню алмазних зерен було модифіковано за допомогою нанесення шару SiO_2 методом ізотермічного гідролізу. Результати свідчать, що завдяки наявності на поверхні алмазних зерен гідрат-іонів тонка плівка SiO_2 була рівномірно привита до поверхні алмазу.

Наведене вище було підтверджено і для інших поверхонь. Так, в [10] досліджено властивості та поведінку води на поверхнях твердого кремнезему. Використано комбінацію трансмісійної електронної мікроскопії, ядерного магнітного резонансу, мас-спектрометрії, інфрачервоної та комбінаційної спектроскопії для дослідження наявності води на поверхнях кремнезему та її характеристики. Виявлено стабільний нанорозмірний шар води на внутрішній поверхні силікатних трубок, який зберігається як за умов високого вакууму, так і за кімнатної температури. Цей шар багатий гідратованими іонами водню та має товщину, яка корелює з щільністю гідроксильних груп у кремнеземі. За допомогою додаткових експериментів продемонстровано, що зменшення щільності гідроксильних груп кремнезему змушує воду, пов'язану зі стінкою трубки, повертатися до рідкого стану, що підкреслює ключову роль гідроксильних груп у формуванні цього унікального шару води (рис. 3).

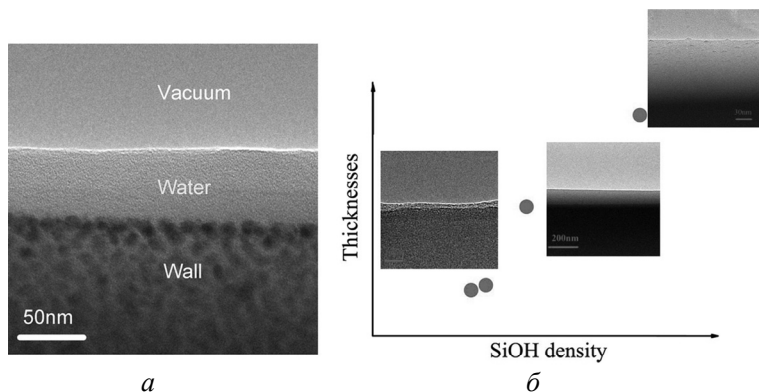


Рис. 3. Нанорозмірний шар води (а), багатий гідратованими іонами водню, товщиною, що корелює з щільністю гідроксильних груп у кремнеземі (б) [10].

Огляд сучасних досліджень свідчить про ефективну дію адсорбованої води та гідроксильних груп на поверхні різних матеріалів, у тому числі поверхні алмазних шліфпорошків. Тому авторами представленої роботи досліджено реальну поверхню зерен саме сучасних алмазних шліфпорошків невеликої міцності (марок АС6–АС32), наявність на них адсорбованої води і можливість впливати на її кількість.

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводили на алмазних шліфпорошках марки АС20 вузької зернистості 100/90, отриманих в системі Ni–Mn–C [11]. Вихідні алмазні порошки було поділено у поліградієнтному магнітному полі з урахуванням різниці магнітних властивостей кристалів. Для розділення в магнітному полі використовували магнітний сепаратор 138-Т та класичну схему розділення,

яка передбачає стабільне збільшення меж розділення через зміну напруженості магнітного поля від 0 до 2 Т.

Фізико-механічні характеристики – міцність, визначали як показник міцності за статичного стиснення P , Н; методом Фарадея оцінювали питому магнітну сприйнятливості χ , м³/кг; стан поверхні, загальний вміст та елементний склад шліфпорошків алмазу визначали методами растрової електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу з програмно-цифровою обробкою зображення за допомогою електронного мікроскопу ZEISS EVO 50XVP (“Carl Zeiss”, Німеччина), укомплектованого аналізатором рентгенівських спектрів Ultim Max 100 (“Oxford Instruments”, Англія).

Шліфпорошки алмазу марки AC20 зернистості 100/90 металізували методом хімічного відновлення Ni (25 % (за масою)), потім порошки алмазу покривали методом обкатки в присутності спеціального зв’язуючого матеріала тонкодисперсним порошком алюмінію марки АСД крупністю –40 мкм. Кількість порошків з добавками вуглецевих нанотрубок (ВНТ) становила не більше 2 % (за масою). Висушені зразки спікали в печі у повітряному середовищі за температури 850 °С. Ступінь металізації алмазів з композиційним покриттям складав 70–75 % (за масою).

Для отримання інформації про стан поверхні шліфпорошків марки AC20 зернистості 100/80 вихідних та металізованих композиційним покриттям Ni–Al з добавками та без добавок ВНТ досліджували термодесорбційні спектри за допомогою мас-спектрометра МИ 1201 в інтервалі температур 20–1000 °С зі швидкістю нагрівання 10 град/хв. [12]. Принцип методу термодесорбції полягає в адсорбції реагентів на поверхні зразка за заданих умов, видаленні молекул вихідних сполук з газової фази (вакуумування зразка до 10⁻⁴ Па за кімнатної температури), наступним нагріванням зразка з постійною швидкістю та одночасним аналізом продуктів, що виділяються. За допомогою мас-спектрометра МИ 1201 проводили аналіз газів, десорбованих з поверхні алмазних зразків. Безперервна реєстрація фіксованих мас у пам’яті ЕВМ дозволяє будувати термодесорбційні криві для кожної сполуки окремо. Досліди проводили у кварцовій кюветі з вакуумуванням до 10⁻⁶ Па. Було побудовано залежності інтенсивності термодесорбційних спектрів від температури для усіх досліджуваних зразків.

Для реєстрації інфрачервоних (ІЧ) спектрів дифузного відбиття (DRIFT) від зразків порошків синтетичного алмазу було використано Фур’є-спектрометр Nicolet 6700 (“Thermo Fisher”, США). Проведено експериментальні спектрометричні дослідження в середньому ІЧ-діапазоні зразків порошків синтетичного алмазу марки AC32, що мали зернистість 200/160, вихідних та після їхньої термохімічної обробки протягом 10 хв в лужному розплаві за температури не більше 650 °С.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Фізико-механічні характеристики шліфпорошків алмазу марки AC20 зернистості 100/90 після розділення в магнітному полі наведено у таблиці.

Проведені дослідження властивостей порошків алмазу марок AC20 зернистості 100/90 підтвердили, що характеристики якості цих порошків, особливо магнітні та за міцністю, залежать від вмісту включень в кристалах алмазу.

Для оцінки поверхневих фізико-хімічних характеристик алмазних порошків магнітних, немагнітних і вихідної фракції проводили аналіз парів води, десорбованих з поверхні порошків [11] (рис. 4).

Характеристика шліфпорошків алмазу марки АС20 зернистості 100/90 після розділення в магнітному полі

Фракція	$\chi \cdot 10^8, \text{ м}^3/\text{кг}$	$P, \text{ Н}$	$K_{\text{одн.міц.}}, \%$	Загальний вміст включень, % (за масою)
Немагнітна	4,2	16,4	69,4	1,141
Магнітна	30,7	23,0	71,5	1,505
Вихідна	18,7	18,1	65,1	0,765

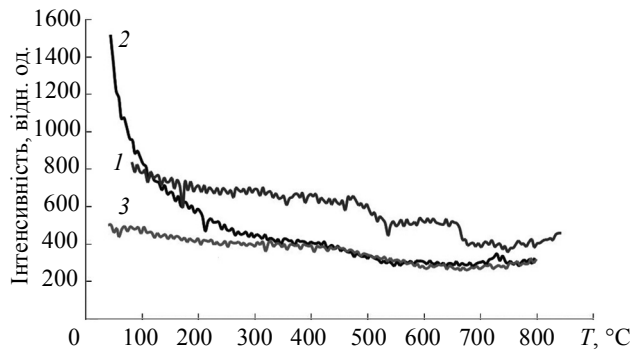


Рис. 4. Термодесорбційні криві парів води на поверхні алмазних порошків марки АС20 100/90 магнітної (1), вихідної (2) і немагнітної (3) фракцій [11].

Дослідження засвідчили наявність парів води, десорбованих з поверхні порошків, причому магнітна фракція алмазного порошку має підвищену інтенсивність парів води. Тобто, в результаті проведених досліджень встановлено, що поверхня всіх зразків алмазу (магнітної, немагнітної і вихідної фракцій) повністю покриті великою кількістю ОН-груп, які десорбуються в складі молекул води. Термодесорбційні піки води спостерігали в усьому досліджуваному температурному інтервалі. За температури 100 °С вони відповідають десорбції фізично сорбованої води, а після 150 °С починає активно виділятися вода, яка присутня в пористій структурі зразків, що було підтверджено даними ІЧ-спектроскопії (див. рис. 4).

На рис. 4 представлено ІЧ-спектри дифузного відбивання зразків порошків синтетичного алмазу у вихідному стані та після їхньої термохімічної обробки. У спектрах дифузного відбивання спостерігали смуги поглинання 1700–2700 см^{-1} , притаманні коливанням вуглецевої ґратки синтетичного алмазу, які не змінюються після температурної обробки. Наявність смуг поглинання азоту, наприклад, 1136 і 1344 см^{-1} , є типовими для дисперсного одноатомного азоту в алмазі типу Ib. Спектр вихідного порошку (див. рис. 4, крива 1) містить сильно виражену смугу поглинання в широкому частотному діапазоні 3000–3800 см^{-1} , яка відповідає коливанням розтягу (або валентним коливанням) О–Н-зв'язку, що свідчить про наявність гідроксильних функціональних груп на поверхні алмазу, які значно послаблюється після термохімічної обробки алмазного порошку. Це свідчить про видалення води з поверхні алмазу, тобто після термохімічної обробки відбувається процес дегідратації алмазу.

Також було досліджено можливість отримання поверхні алмазних порошків із різним вмістом води за рахунок наявності на їхній поверхні різних покриттів. Раніше дослідження композиційних покриттів на шліфпорошках алмазу АС20 100/80 проводили для одиничних покриттів із Ni або Cu та пок-

риттів з Ni–Al та Cu–Al (подвійних) [13]. В результаті виконаних досліджень встановили, що поверхня алмазів, металізованих як одинарним покриттям, так і подвійними покриттями, також повністю вкрита більшою кількістю ОН-груп. Підтвердженням даного факту є аналогічні термодесорбційні піки, отримані для даної групи зразків.

Присутність води в порошках алмазу тісно пов'язана з їхньою питомою площею поверхні [11]. У магнітній фракції присутній більший вміст води (див. рис. 4, крива 1), що відповідає більшому значенню питомої площі поверхні алмазу. Тобто, дані рис. 5 свідчать про те, що за попереднім розділенням наважки алмазного порошку на різні фракції, можна отримати порошки зі збільшеним вмістом води на їхній поверхні. Алмази, що були металізовані подвійними покриттями, збільшують питому площу поверхні шліфпорошку у порівнянні з металізованими шліфпорошками з одинарним покриттям Ni і Cu і вихідними шліфпорошками алмазу без металізованих покриттів.

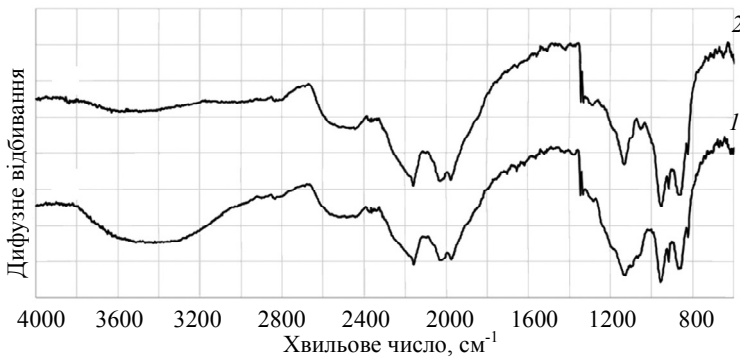


Рис. 5. ІЧ-спектри дифузного відбивання зразків шліфпорошків синтетичного алмазу у вихідному стані (1) та після їхньої термохімічної обробки (2).

Представляло інтерес дослідити вплив наявності добавки порошоків нанотрубок ВНТ у складі покриттів Ni–Al.

Як видно на рис. 6 і 7, на зернах алмазу металізованих композиційним покриттям Ni–Al без добавок та з добавками ВНТ сформована щільна структура, водночас у разі додавання ВНТ у структурі покриття видно скелетну структуру вуглецевих нанотрубок (див. рис. 7).

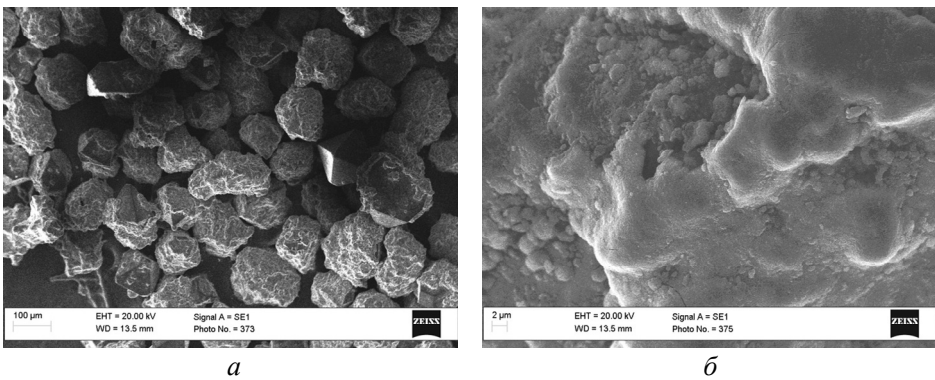


Рис. 6. Електронно-мікроскопічне зображення структури поверхні алмазу марки AC20 100/80, металізованого композиційним покриттям Ni–Al, за збільшення 250× (а) та 5000× (б).

На рис. 7 наведено термодесорбційні спектри парів води на поверхні алмазу марки AC20 зернистості 100/80 вихідної фракції, металізованої композиційним покриттям Ni–Al та металізованої композиційним покриттям Ni–Al з добавками ВНТ.

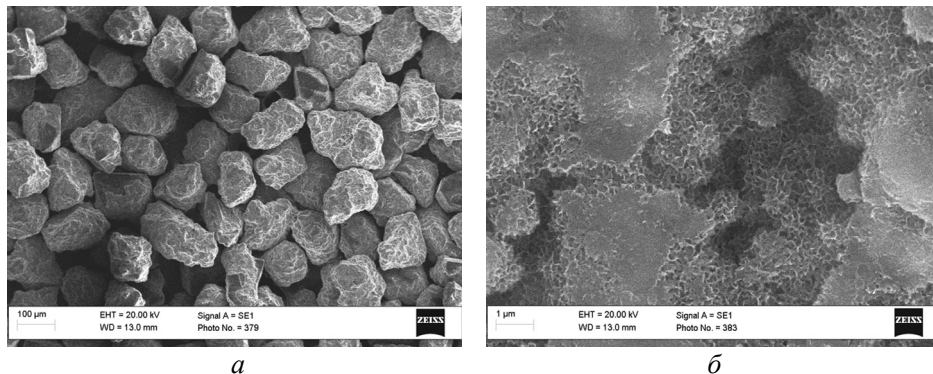


Рис. 7. Електронно-мікроскопічне зображення структури поверхні алмазу марки AC20 100/80, металізованого композиційним покриттям Ni–Al з добавками ВНТ, за збільшення 250× (а) та 10000× (б).

Термодесорбційні піки води (рис. 8) мають симетричну форму, їх спостерігали в усьому досліджуваному температурному інтервалі. Піки на кривих до 150 °С свідчать про наявність води на поверхні всіх зразків, після 150 °С починає активно виділятися вода, яка присутня в пористій структурі зразків. Вихідний зразок має найменший вміст води і меншу питому площу поверхні порошків алмазу (див. рис. 8, крива 1).

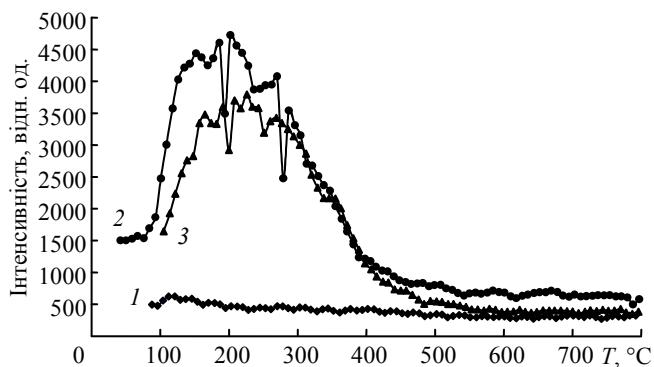


Рис. 8. Термодесорбційні криві парів води на поверхні алмазу марки AC20 зернистості 100/80 вихідної фракції (1), металізованої композиційним покриттям Ni–Al (2) та композиційним покриттям Ni–Al з добавками ВНТ (3).

Отже, попереднє розділення алмазних шліфпорошків з вилученням магнітної фракції та створенням на поверхні алмазів покриттів, сприяють утворенню на їхній поверхні адсорбованої води у більший кількості, аніж на вихідних зразках без покриття. Як наслідок, це дає можливість за необхідності доносити до зони різання алмазом необхідні для зміни контактних процесів речовини, наприклад, активний гідроксил або воду, яка навіть у разі інтенсивної зовнішньої подачі в зону контакту під час шліфування не потрапляє. Тобто, в даній роботі відзначено напрямок, обґрунтований літературними та

власними даними авторів, про наявність води на поверхні сучасних алмазних зерен невеликої міцності та визначено умови для шліфувального інструменту, де можуть бути застосовані такі зерна (див. рис. 8). Це круги на полімерних зв'язках, де температура їхнього спікання не перевищує 200 °С, або круги, робочий шар яких можна отримати за технологією “Rapid Prototyping”. Такі дослідження виходять за рамки даної статті і є предметом окремого подальшого дослідження.

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел і власних даних авторів свідчить про ефективну дію адсорбованої води на поверхнях полікристалічного ПКА (мікрокристалічного МКА та нанокристалічного НКА) композита [4], графіт/алмазного композита (Gradia) [5], алмазної плівки [6], та модифікованих алмазних зерен [7], твердого кремнезему [10], коли наявність води змінює умови контактування під час обробки та процеси модифікування поверхні зерен.

Встановлено, що попереднім розділенням алмазних шліфпорошків на магнітну, немагнітну і вихідну фракцію можна виділити магнітну фракцію, яка має найбільшу кількість адсорбованої води на поверхні алмазних зерен.

Показано, що створення на поверхні алмазу композиційного покриття Ni–Al з добавками ВНТ та без них сприяє утворенню більшій кількості адсорбованої води, ніж на вихідних зразках без покриття.

V. I. Lavrinenko, V. V. Smokvyna, H. D. Illytska, S. P. Starik,
V. A. Tyshchenko

¹Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Dniprovsky State Technical University,
the Ministry of Education and Science of Ukraine,
Kamianske, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

Confirmation of the presence of adsorbed water on the surface
of modern diamond grains of low strength as a factor of possible further
influence on the contact zone during grinding

The presence of adsorbed water and a hydroxyl group on the real surface of modern low-strength diamond grinding powders (grades AC6–AC32) was investigated. It was established that by preliminary separation of diamond grinding powders into magnetic, non-magnetic and initial fractions, it is possible to isolate the fraction that has the largest amount of water on the surface of the diamond grains – the magnetic fraction. It is shown that the Ni–Al composite coating of the diamond surface, as well as the coating with carbon nanotube additives, contributes to the formation of a more developed surface than on the initial samples without coating, as evidenced by the greater presence of water.

Keywords: diamond grains, adsorbed water, hydroxyl groups, surface of diamond grains, magnetic fraction, composite coating.

1. Бакуль В.Н., Гинзбург Б.И., Мишнаевский Л.Л., Сагарда А.А., Чеповецкий И.Х. Синтетические алмазы в машиностроении. Киев: Наук. думка, 1976. 351 с.
2. Ropyak L., Shihab T., Velychkovych A., Bilinskyi V., Malinin V., Romaniv M. Optimization of plasma electrolytic oxidation technological parameters of deformed aluminum alloy D16T in flowing electrolyte. *Ceramics*. 2023. Vol. 6, no. 1. P. 146–167.
3. Lavrinenko V.I. Porosity and water absorbability of tool composite materials as factors of improving wear resistance of superabrasive grinding wheels. Part 3. Cutting-tool ceramic composites. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no. 5. P. 360–363.

4. Алешин В.Г., Смехнов А.А., Богатырева Г.П., Крук В.Б. Химия поверхности алмаза. Киев: Наук. думка. 1990. 200 с.
5. Xiao Ch., Peng L., Leriche C., Hsia F.-Ch., Weber B., Franklin S. Capillary adhesion governs the friction behavior of electrochemically corroded polycrystalline diamond. *Carbon*. 2023. Vol. 205. P. 345–352.
6. Chen J., Lin Z., Jin T., Liu B., Nie A. Study on incompatible mechanism in chemical mechanical polishing of the novel graphite/diamond composite. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 641, art. 158500.
7. Thomas E.L.H., Nelson G.W., Mandal S., Foord J.S., Williams O.A. Chemical mechanical polishing of thin film diamond. *Carbon*. 2014. Vol. 68. P. 473–479.
8. Li F.N., Li Y., Bao H.W., Wang H.X., Ma F. Fabrication of hydroxyl terminated diamond by high-voltage hydroxide ion treatments. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 622, art. 156909.
9. Lu J., Xu Y., Zhang Y., Xu X. The effects of SiO₂ coating on diamond abrasives in sol-gel tool for SiC substrate polishing. *Diam. Relat. Mater.* 2017. Vol. 76. P. 123–131.
10. Wei-qing An, Xiang-an Yue, Ji-rui Zou, Li-juan Zhang, Rong-jie Yan. Direct observation of anomalous water at the solid-liquid boundary on silica surface. *Appl. Surf. Sci.* 2023. Vol. 638, art. 158096.
11. Lavrinenko V.I., Il'nitskaya G.D., Petasyuk G.A., Ishchenko E.V., Gaidai S.V., Pasichnyi O.O., Skryabin V.V., Shatokhin V.V., Zaitseva I.N., Kuz'menko E.F., Timoshenko V.V. A study of the potential of improving performance of AS20 diamond powders through altering their dimensional and physico-chemical characteristics. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 4. P. 274–281.
12. Іщенко О.В., Гайдай С.В., Беда О.А. Мас-спектрометрія: підручник. Київ: ВПЦ “Київський університет”, 2018. 244 с.
13. Пашенко Е.А., Лавриненко В.И., Петасюк Г.А., Ильницкая Г.Д., Шатохин В.В., Романко Л.А., Зайцева И.Н., Пасичный О.О., Смоквина В.В., Девицкий А.А., Ищенко Е.В., Гайдай С.В. Оценка качества покрытий металлизированных шлифпорошков синтетического алмаза. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины*. 2017. Вып. 20. С. 374–383.

Надійшла до редакції 09.02.24

Після доопрацювання 02.07.24

Прийнята до опублікування 04.07.24