

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.4

УДК 621.923

Лаврінєнко В.І.¹, д.т.н., профєсор, 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

Ільницька Г.Д.¹, к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0001-5124-1646, e-mail: gil-ism@ukr.net

Смоквина В.В.¹, к.т.н., ORCID: 0000-0002-4181-7274, e-mail: v.smokvyna@gmail.com

Кашинський І.С.², асистент, ORCID: 0000-0001-9849-486X, e-mail: morbo92@gmail.com

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

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Lavrinenko Valerii¹, Doctor of technical sciences, Professor

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

Pnytska Halina¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Smokvyna Volodymyr¹, Candidate of Technical Sciences

Kashynskiy Ivan², assistant

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

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ НА ЗМІНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ АЛМАЗІВ І СУПУТНИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯД)

Тепловий вплив на поверхневий шар інструментальних матеріалів є одним з чинників зміни його властивостей та експлуатаційних характеристик. Через це дослідники приділяють особливу увагу у напрямку зміни спрямованості такого впливу для його зменшення (негативний вплив) і подальшого досягнення позитивних ефектів. В даному огляді приділяється увага найновішим сучасним розробкам (2023 року), в особливостях теплового впливу на вуглецеві матеріали, алмаз, сталі. Показані дослідження в напрямку спрямованої зміни поверхні алмазів: отримання поверхні ОН-алмазів та Н-алмазів, легування алмазу, та зміни контакту поверхні алмазу з Fe та W. Особлива увага приділена нанесенню різних захисних покриттів на поверхню алмазів та супутніх інструментальних матеріалів (сталей, керамік та твердих сплавів). Найбільша увага при цьому приділяється металевим та нітридним покриттям, тобто цей напрямок останнім часом є важливим і актуальним. Окрема увага приділена дослідниками еволюції покриттів в процесі експлуатації, що може бути цікавим з точки зору визначення «життєвого циклу» існування покриттів.

Ключові слова: тепловий вплив; алмаз; вуглецеві матеріали; тверді сплави; кераміка; металічне покриття; нітридне покриття; еволюція покриття; поверхневий шар.

The thermal effect on the surface layer of tool materials is one of the factors that change its properties and operational characteristics. Therefore, researchers constantly pay attention to this, and especially in the direction of changing the direction of such an influence, in order not only to reduce the negative impact, but also to achieve positive effects on the contrary. In this review, attention is focused on the newest modern developments, namely 2023, in the features of thermal effects on carbon materials, diamond, and steel. Studies are shown in the direction of directed changes in the surface of diamonds: obtaining the surface of OH-diamonds and H-diamonds, doping diamond, and changing the contact of the diamond surface with Fe and W. Special attention is paid to the application of various protective coatings on the surface of diamonds and related tool materials (steels, ceramics

and hard alloys). At the same time, the greatest attention is paid to metal and nitride coatings, that is, this direction has recently become important and relevant. Researchers have paid special attention to the evolution of coatings during operation, which can be interesting from the point of view of determining the "life cycle" of the existence of coatings.

Keywords: thermal effect; diamond; carbon materials; hard alloys; ceramics; metal coating; nitride coating; coating evolution; surface layer.

Постановка проблеми

Високотверді крихкі матеріали, особливо інструментальні, нині широко застосовуються у промисловості. Їх ефективна алмазна обробка є важливою для сучасного виробництва. Останнім часом набуває практичного застосування пластичний режим обробки крихких матеріалів, що частково описано нами в статті [1] для інструментальної кераміки. Разом з тим, нині в літературі обговорюються питання ефективної обробки таких крихких важкооброблюваних матеріалів, як моно- та полікристалічні алмази, в т.ч. CVD-алмазні плівки, сапфір та ін. Здебільшого така обробка стикається не тільки із питанням переходу процесу різання від крихкого до пластичного, а із питаннями теплового впливу на поверхню інструментального матеріалу; врахуванню дефектності алмазів, якими відбувається обробка; спрямованого впливу на поверхню таких алмазів; модифікуванням поверхні алмазів та супутніх інструментальних матеріалів.

Формулювання мети дослідження

Задача роботи полягає в аналізі теплового впливу на поверхневий шар інструментальних матеріалів (вуглецеві матеріали, алмаз, сталі), порівнянні покриттів цих матеріалів.

Виклад основного матеріалу

Останні дослідження в процесах алмазної обробки пов'язані із особливостями модифікації поверхні алмазів для спрямованої зміни їх властивостей [2]. Доведено позитивні ефекти від застосування в певній мірі дефектних пористих алмазів. Такі дослідження є цікавими з точки зору нанесення нітридних покриттів на дефектний пористий алмаз [3]. Доведена ефективна захисна (проти окислення) дія оксидів (B_2O_3 , TiO_2 та Al_2O_3) при модифікуванні поверхні алмазних зерен [4]. Помічено позитивні ефекти від багатшарового покриття із вмістом cBN [5]. Саме тому, в даному огляді основна увага і приділена викладенню сучасних розробок, пов'язаних із вказаними вище питаннями.

В роботі [6] вивчені морфологічні зміни поверхні мікрокристалів штучного алмазу кубооктаедричної форми при окислювальному травленні в кисні або повітрі при підвищених температурах (рис. 1). Встановлено, що на ранніх стадіях відбувається вибіркоче травлення фасеток {111}, внаслідок чого утворюються трикутні ямки травлення. Кристали, протравлені при 600—700 °C до високих степенів перетворення, відносяться до скелетного типу: в цих кристалах сильно протравлені грані {111}. При температурі вище 700 °C на гранях {100} починають з'являтися ямки травлення, які мають квадратну форму і ступінчасту морфологію. Окислювальне травлення при 900 °C призводить до утворення кристалів алмаза антискелетного типу при високих степенях перетворення (30—50 %). Ці дослідження підтверджують певні висновки зроблені в роботі [3].

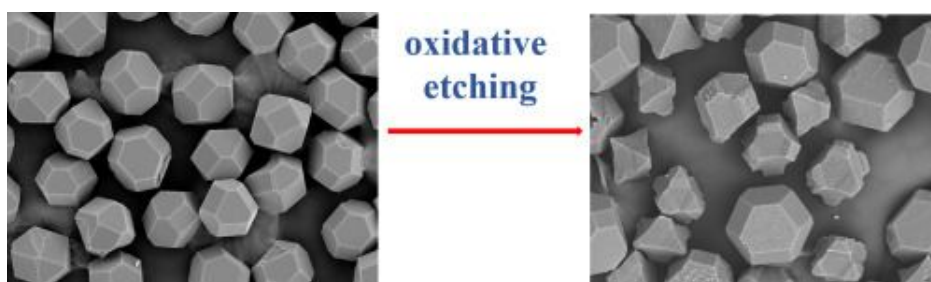


Рис. 1. Зміна морфології поверхні алмазів при їх окислювальному травленні [6]

Алмаз це вуглецевий матеріал (дослідження, викладені в статті [7]). При термічній обробці вуглецевих матеріалів нестабільні крайові ділянки можуть легко перетворюватися у структурно стійкі петльові структури. Відповідно, в даній роботі вуглецеві ребра фізично пасивуються за допомогою високотемпературної обробки в присутності атомів бора для прискорення утворення петель (рис. 2). Вуглецеві нановолокна з додаванням бору при високій температурі демонструють підвищену електропровідність з-за високої рухливості атомів бора в структурі вуглецю. Так, розробка петльових структур на вуглецевих краях може змінити загальну електрокаталітичну активність матеріалів на основі вуглецю, що доведено реакцією виділення водню (RHE), тобто тут пропонуються певні методи пасивації вуглецевих ребер.

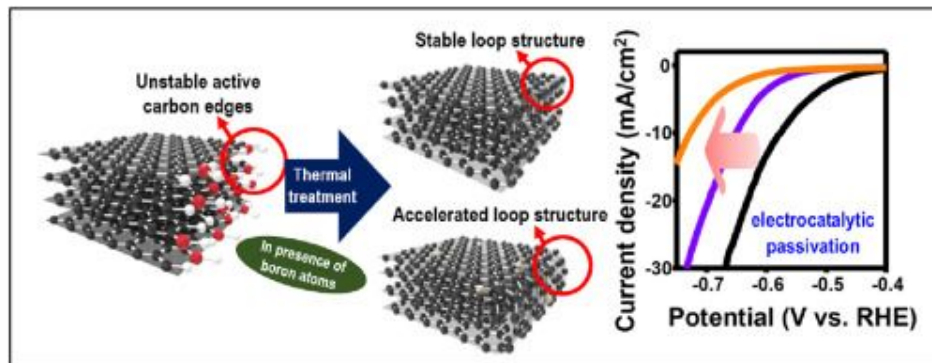


Рис. 2. До ілюстрації фізичного пасивування вуглецевих ребер за допомогою високотемпературної обробки в присутності атомів бора [7]

Тепловий вплив може змінити і структуру матеріалу, що показано в роботі [8] для вуглецевої сталі. Основними фазами сталі є аустеніт, цементит і ферит. Структура комплексу, що утворюється серед основних фаз, називається мікроструктурою, яка визначається трьома основними факторами: співвідношенням суміші, вмістом вуглецю та процесом термічної обробки. Мікроструктура, яка визначає природу вуглецевої сталі, визначається поєднанням заліза та вуглецю. Ферит і аустеніт відрізняються розташуванням атомів заліза, а також відрізняються від цементиту зв'язком заліза та вуглецю. У цій роботі термічний відпал проводився від кімнатної температури до 900 °C в камері надвисокого вакууму. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія засвідчила те, що хімічні стани змінювалися залежно від глибини від поверхні, а також те, що карбід перетворювався на фазу C-розчинених речовин при температурах між 300–600 °C (рис. 3). Ці висновки дають важливе розуміння тонкого балансу взаємодій, пов'язаних із властивостями сталі, які різняться між поверхневою та об'ємною фазами, пропонуючи нові можливості для розробки властивостей вуглецевої сталі.

В роботі [9] показано це і для умов шліфування. Відомо, що технологія зміцнення при шліфуванні у сполученні із прецизійною механічною обробкою і процесом термообробки з загартуванням поверхні приводить до градієнтної модифікації мікроструктури із подрібненням зерна і фазовим перетворенням при сильному термомеханічному зв'язку. Кількісно проаналізовані градієнтні мікроструктури деформаційно-зміцненого шару, які складаються з шару подрібнених зерен, викликаного динамічною рекристалізацією і жорсткою пластичною деформацією. Результати свідчать про те, що технологія зміцнення при шліфуванні застосовує механізми подрібнення зерна і фазового перетворення для створення зміцненого шару градуїваної мартенситної структури з високою мікротвердістю і залишковим напруженням стиску, що потенційно може забезпечити вирішення проблеми невідповідності міцності і ударної в'язкості та поліпшити зносостійкість і динамічні характеристики статичного контакту деталей.

У наступних роботах досліджено, як впливає контакт алмазів з різними металами, або його легування металами, на його графітизацію чи окислення.

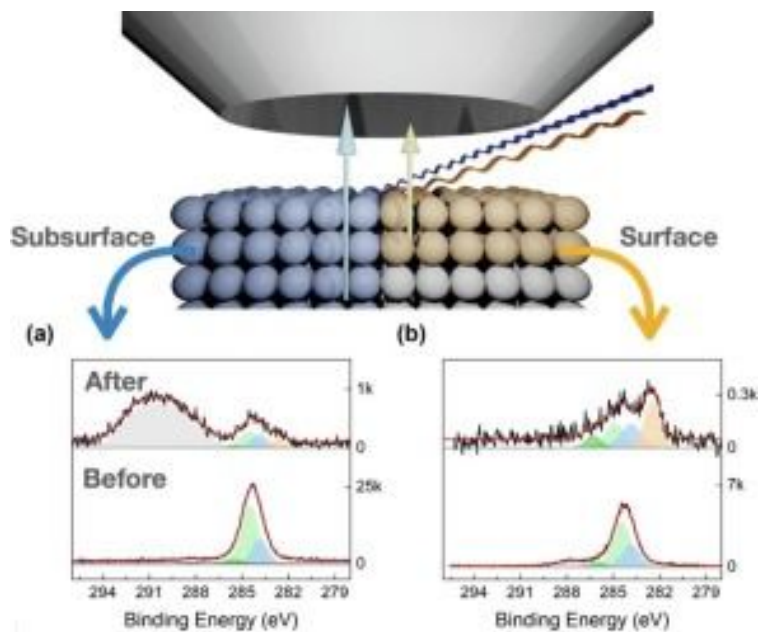


Рис. 3. Процес відпалу викликав трансформацію об'ємної та поверхневої структур: рентгенограми вуглецевої сталі «After» показують наявність низької кристалічності феритової фази, рентгенограма зразка вуглецевої сталі «Before» показує утворення фази фериту

Так в статті [10] розглянуто механізм індукованої Fe графітизації алмазних (110) поверхонь (Dia-(110)-Surf) шляхом розрахунків з перших принципів (рис. 4). Встановлено, що атоми Fe, адсорбовані на порожнистих ділянках, можуть набувати найбільш стабільної конфігурації на Dia-(110)-Surf. Тим часом адсорбований атом (адатом) Fe може змінювати міжшарову енергію зв'язку C–C. Зі збільшенням кількості атомів Fe ефект ослаблення/посилення зв'язків C–C стає більш очевидним. У результаті адатоми Fe не тільки змінили міжшарову енергію зв'язку C–C, але також вплинули на напрямок дисоціації мікроструктури поверхні. Ослаблені зв'язки C–C можуть спровокувати сплюснення шестикратної кільцевої структури атомів C. Напрямок розтягування кільцевої конструкції змінився з горизонтального на похилий, що призвело до усунення бічного напруження стиску. Це може бути причиною індукованої Fe графітизації Dia-(110)-Surf. Крім того, була вивчена міграційна поведінка атома Fe. Зроблений висновок, що енергія активації міграції та напрямок руху адатомів Fe були пов'язані зі швидкістю видалення матеріалу.

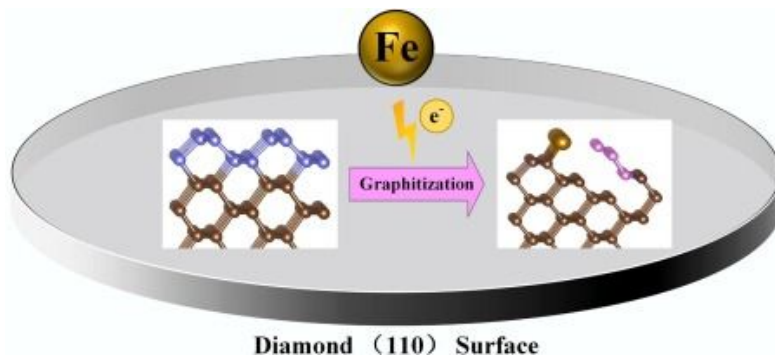


Рис. 4. До пояснення механізму індукованої Fe графітизації алмазних (110) поверхонь [10]

У наступній роботі розглянута дія вольфраму (W). У сфері надточної обробки W є перспективним матеріалом як полірувальний диск для обробки алмазу, яким легше отримати високоякісні алмазні поверхні, аніж при застосуванні чавуну. Механізмом видалення алмазу при високошвидкісному поліруванні є поверхнева графітизація. У роботі [11] механізм графітизації алмазу, індукований вольфрамом, розкривається за допомогою теорії функціоналу густини (density functional theory - DFT). Результати показують, що атоми W можуть активувати міжшарові зв'язки C-C, спричиняючи роз'єднання поверхневих атомів вуглецю. Зокрема, перенесення електронів атомів W і звуження структури поверхні алмазу викликають графітизацію.

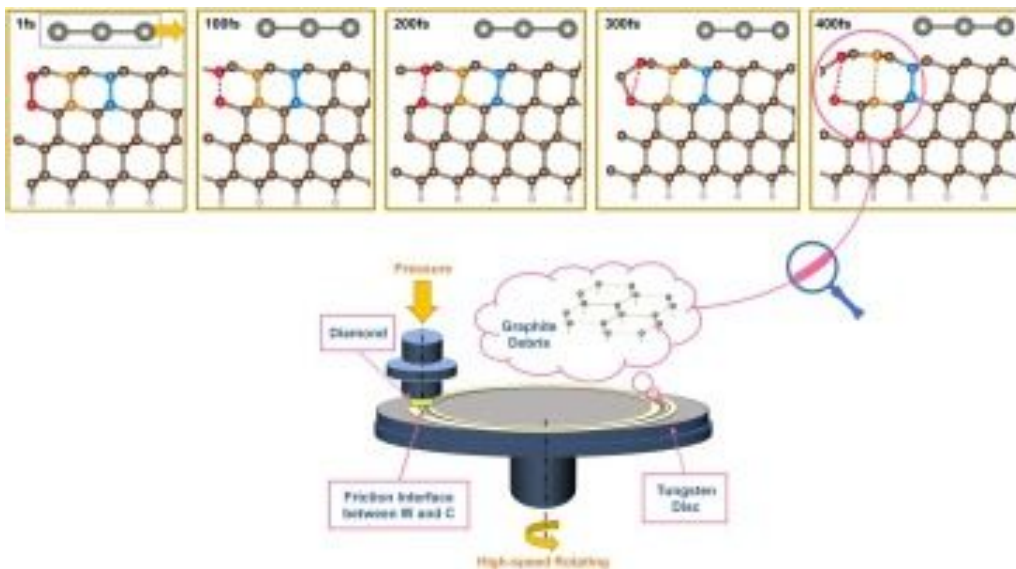


Рис. 5. До дослідження структурної еволюції та графітизації поверхні розділу між поверхнею вольфраму та алмазу (111) [11]

Різні місця адсорбції W на поверхні відіграють різну роль у сприянні графітизації алмазу. Поатомні спостереження дають суттєве розуміння процесу графітизації алмазної (111) поверхні, індукованої атомами W (рис. 5). Перехід алмазу в графіт пояснюється активацією каталізатора атомами W, звуженням структури поверхні алмазу та механічним напруженням розтягу зв'язків W-C [11].

Стійкість алмазних плівок до окислення є необхідною для підтримання їх працездатних характеристик при високих температурах. Хоча численні експерименти засвідчили, що легування може поліпшити властивості стійкості алмазних плівок до окислення, теоретичне пояснення все ще потребує обговорення. В роботі [12] вказаний вище метод DFT застосовується для виявлення механізму впливу багаторазового легування, в том числі легування елементами B, N та Si, на стійкість до окислення алмазних плівок і отримання легованих алмазних плівок з оптимальним опором окисленню. Розглянуті різні моделі легованого алмаза, місця адсорбції атомів O на різних його поверхнях і наступний процес реакції O₂ молекули з атомом C. Результати засвідчують, що мультилегована модель алмаза має найбільшу енергію активації, що відбиває кращі властивості стійкості до окислення. Так, на кремнієвій підкладці були виготовлені вісім видів алмазних плівок і оцінена їх втрата ваги при високих температурах, тобто стійкість до окислення, які вказують на те, що багаторазове легування може ефективно знизити швидкість високотемпературного окислення алмазних плівок, а експериментальні результати узгоджуються з теоретичними розрахунками.

Функціоналізований алмаз є перспективним для застосування і у біосенсорах. Поверхня алмаза з кінцевими гідроксильними групами (ОН-алмаз) з хімічно функціоналізованими карбоксильними групами є необхідною для іммобілізації білків та ДНК. Але виготовлення високоякісної поверхні ОН-алмаза все ще утруднене. В роботі [13] ОН-алмаз отримують обробкою

гідроксидіонами в деіонізованій воді при високих напругах до 3000 В (рис. 6). ОН-алмаз демонструє високу інтенсивність однократно окислених C_I вуглецевих зв'язків (C–OH і C–O–C) та двічі окислених C_{II} зв'язків (C=O або O–C–O), що визначається за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії. Крім того, силанізація досягається за рахунок 3-амінопропілтриетоксисилана (APTES) на поверхні ОН-алмаза за допомогою реакції конденсації з поверхневими групами C–OH.

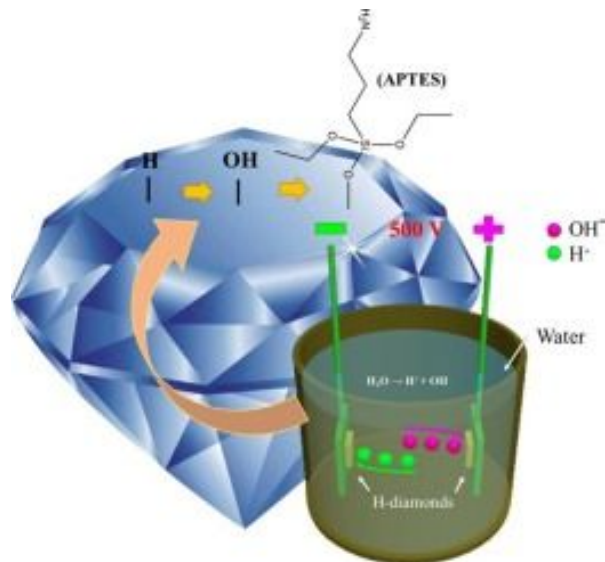


Рис. 6. ОН-алмаз отримують обробкою гідроксид-іонами в деіонізованій воді при високих напругах [13]

Розглянемо безпосередньо вплив покриттів.

Сухе різання, є перспективним виробничим процесом, однак сильне тертя за таких умов посилює знос інструменту та зменшує його термін служби. Різучі інструменти, що самозмащуються, демонструють чудові переваги. Складний процес, низька ефективність і невелика товщина покриття обмежують виробництво та використання сучасних самозмащувальних ріжучих інструментів традиційними методами. Для посилення змащувального ефекту та стимулювання розробки методів виготовлення самозмащувальних ріжучих інструментів, порошки на основі Ni, дисперговані частинками MoS_2 та Al_2O_3 , попередньо наносили на підкладку інструменту. В роботі [14] самозмащувальні покриття були нанесені за допомогою лазерного порошкового плавлення адитивного виробництва (AM) з наносекундним волоконним лазером для різання. Характеристики тертя та різання інструментів AM із самозмащувальним покриттям (SLC) оцінено за допомогою випробувань тертя ковзання та за умов сухої обробки. Результати показують, що розроблені інструменти SLC зменшили коефіцієнт тертя на 8,8—11,7 %, сили різання на 17,6—29,6 %, а потужність різання на 17,3—22,0 % порівняно зі звичайними різальними інструментами зі швидкорізальної сталі (HSS). Також було значно зменшено нарост на кромці та знос інструменту. Спостережувані механізми пояснювали вивільненням частинок MoS_2 з покриттів, які утворювали мастильну плівку на межі інструменту та стружки, тоді як частинки Al_2O_3 підвищували твердість поверхні.

Композитні покриття на основі Ni знайшли широке застосування в автомобільній, поліграфічній та аерокосмічній сферах. У дослідженні [15] експериментально перевірено модифікацію морфології поверхні алмазу для підвищення зносостійкості композитних покриттів Ni-алмаз. Застосуванням методу термохімічної корозії отримано новий тип алмазу з шорсткою поверхнею, а композитне покриття Ni-алмаз (№ 2) і композиційне покриття Ni-алмаз з шорсткою поверхнею (№ 3) виготовлено методом електроосадження на постійному струмі (рис. 7). Дослідження свідчить, 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. Порівняно з покриттям № 2 мікротвердість покриття № 3 було збільшено до 613 HV, а коефіцієнт тертя зменшено до 0,63. Завдяки синергетичному впливу підвищеної мікротвердості та міцності з'єднання швидкість зношування композитного покриття № 3 знизилася на 15,6 %. Застосування алмазів з шорсткою поверхнею відкриває новий напрямок для розробки нових покриттів з високою зносостійкістю з широкими перспективами застосування. Ця робота підтверджує висновки роботи [3] про позитивний результат від застосування алмазів з шорсткою поверхнею.

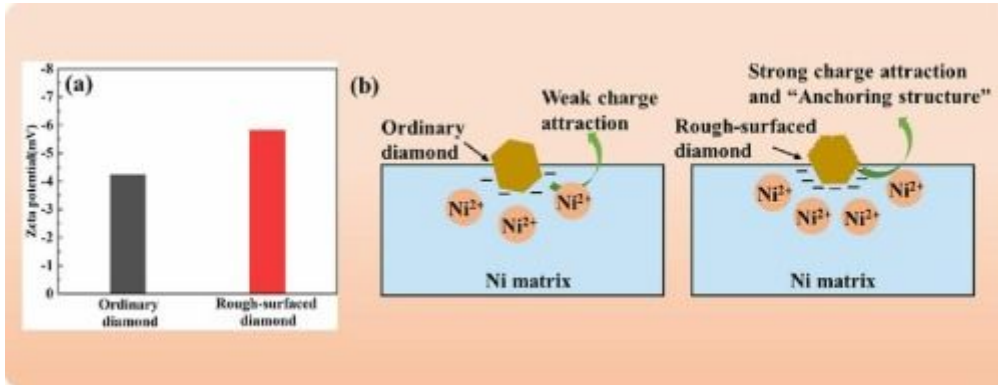


Рис. 7. Отримання композиційного покриття Ni-алмаз на алмаз з шорсткою поверхнею [15]

У роботі [16] досліджено вплив дифузії вуглецю на ранній стадії на мікроструктури карбідів хрому, утворених у твердотільній (S/S) реакції розділу між площиною (100) CVD алмазу та напиленним Cr за допомогою методів XPS та TEM. Доведено, що каталітично перетворений невпорядкований вуглець (DC) був першою фазою, що утворилася на ранній стадії реакції S/S. Аномальна дифузія C у розпиленому Cr спостерігалася вперше, що пов'язано з ефектом закріплення поверхні Cr на дифузію C і, отже, впливає на міжфазові мікроструктури. Було досліджено поведінку утворення карбідів Cr_7C_3 і $Cr_{23}C_6$, і було виявлено, що останній є домінуючою фазою, що утворюється в реакції на межі розділу S/S при 500 і 600 °C (рис. 8).

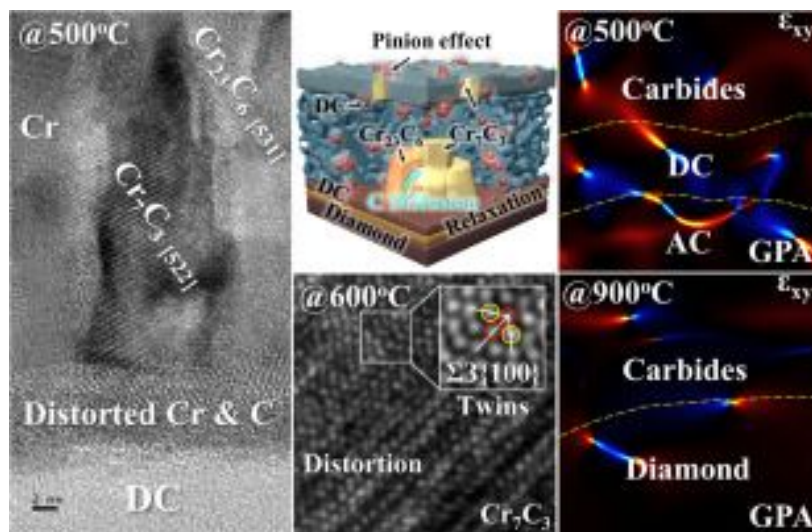


Рис. 8. До питання утворення невпорядкованого вуглецю та карбідів Cr_7C_3 і $Cr_{23}C_6$ при напиленні Cr на поверхню CVD алмазу [16]

Концентрацію внутрішньої деформації на межі розділу алмазу та карбідів у процесі дозрівання оцінювали квазікількісно за допомогою методу геометричного фазового аналізу з перетворюванням Фур'є [16]. Було виявлено, що концентрація внутрішньої деформації значною мірою зменшилася, коли між алмазом і карбідами хрому утворилася когерентна межа розділу. Результати, представлені в цій роботі, мають фундаментальне значення для розуміння механізмів зв'язування алмазу та дозволяють оптимізувати параметри процесу для досягнення мікроструктури композитних матеріалів з металевою матрицею із бажаними властивостями.

У роботі [17] обговорюється вплив армування наноалмазом (ND) покриттів NiAl, нанесених плазмовим напиленням. Три різні пропорції частинок ND (від 0,1 до 1,0 % за масою), зміцнені NiAl, були успішно виготовлені на сталевій підкладці AISI 1020 за допомогою технології плазмового напилення. Було виявлено, що відносна щільність покриттів збільшилася з 91,34 % до 97 % при простому додаванні 1 % за масою ND внаслідок збільшеного плавлення порошків під впливом ND. Результати показали (рис. 9) значне підвищення твердості на 18 % і модуля пружності на 34,8 %, а також значне зменшення втрати об'єму зносу (41,96 %), швидкості зношування (42,5 %) і коефіцієнта тертя (COF — 80 %). Покращені властивості покриттів обумовлені винятково високими механічними властивостями, армованого ND, а також його сферичною морфологією, ефектом самозмащення та високою щільністю покриття.

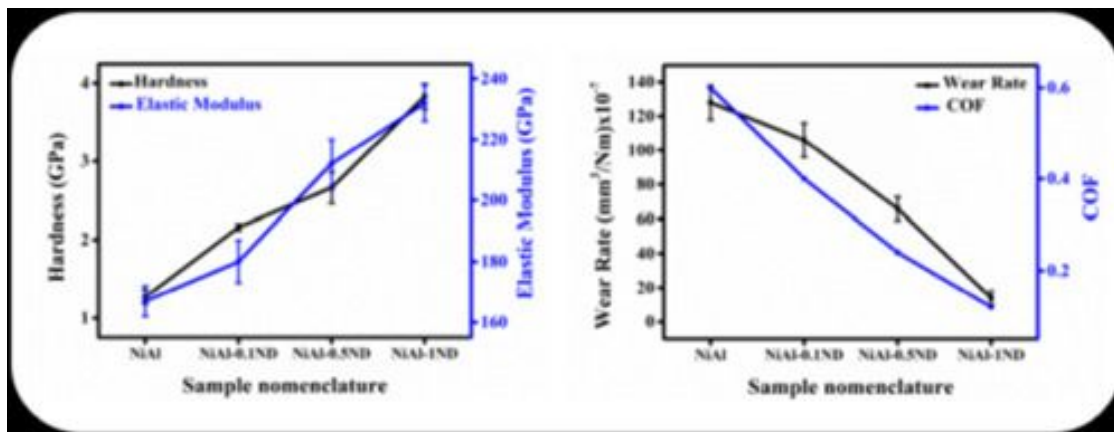


Рис. 9. Зміна твердості, модуля пружності, швидкості зношування та коефіцієнту тертя композиційних покриттів Ni-Al з різним вмістом наноалмазу [17]

Алмаз має великий потенціал для ефективного розсіювання тепла завдяки його надвисокої теплопровідності. В роботі [18] метод нерівноважної молекулярної динаміки з урахуванням таких параметрів, як тип наностовпчиків, що чергуються, їх розмір і висота, був застосований для вивчення впливу наностовпчиків на тепловий граничний опір (TBR) на межах розділу AlN/алмаз (рис. 10). TBR оптимального інтерфейсу AlN/алмаз наностовпчатих структур може бути зменшений на 28 % у порівнянні з плоским інтерфейсом. Аналіз коливальної густини станів (VDOS) як AlN, так і алмаза на кожній стороні інтерфейсу може показати, що посилення фонових проміжної частоти AlN і зрушення VDOS алмаза в бік більш низької частоти можуть сприяти оптимізації міжфазного теплового переносу. Відповідно ця робота може забезпечити більш глибоке розуміння впливу наноструктур на міжфазний переніс тепла, а також може стати основою для ефективного керування температурою за рахунок введення наноструктур на гетерогенних межах розділу.

Так званий ОН-алмаз ми вже розглянули вище, тепер розглянемо Н-алмаз. Слабка ван-дер-ваальсова (vdW) взаємодія між гексагональним нітридом бора (hBN) і алмазом з водневими кінцевими групами (Н-алмаз) забезпечує основу для введення кута закручування як нової ступені вільності для модуляції властивостей гетероструктур. В роботі [19] вплив чотирьох конкретних кутів закручування на поведінку носіїв і вирівнювання зон гетероструктур Н-алмаз (111) / hBN vdW було досліджене на основі теорії функціоналу щільності у сполученні з мето-

дом нерівноважної функції Гріна (рис. 11). Результати засвідчили, що додаткові вільні орбіталі, які утворюються внаслідок спонтанної релаксації hBN при великій деформації, викликаній скручуванням, можуть посилити vdW-зв'язок між hBN і Н-алмазом, що і буде сприяти переносу заряду на межі розділу, тим самим послабляючи поверхневе розсіювання домішок і збільшуючи накопичення дірок на поверхні Н-алмаза. Ця робота свідчить про позитивний вплив нітриду в вигляді hBN за зміну поверхні алмазу.

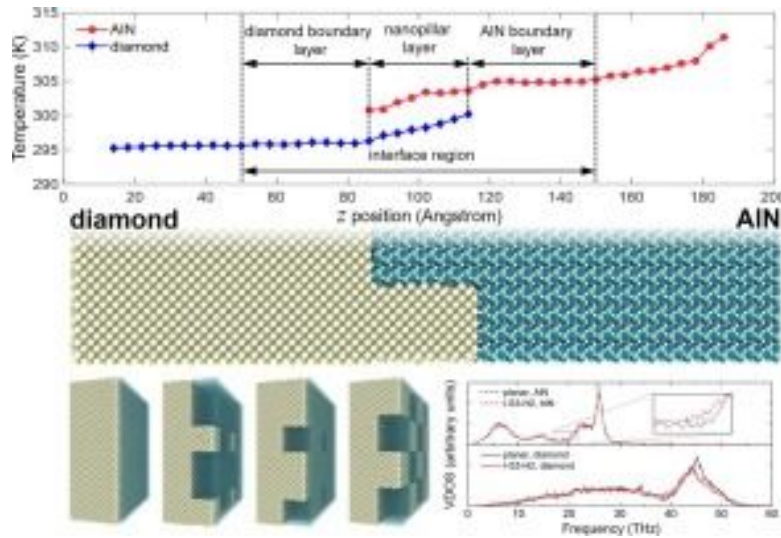


Рис. 10. Наукові принципи зміни міжфазного теплового переносу у поєднанні AlN/алмаз [18]

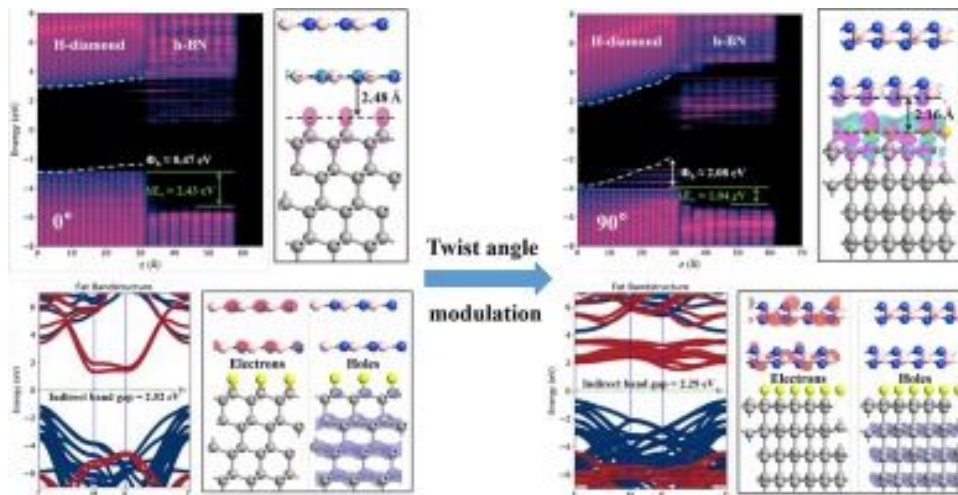


Рис. 11. Наукові принципи застосування слабкої ван-дер-ваальсової (vdW) взаємодії між гексагональним нітридом бора (hBN) і алмазом з водневими кінцевими групами (Н-алмаз) [19]

Низький ефективний тепловий граничний опір (TBR_{eff}) на межі GaN/алмаз є дуже важливим для розробки потужних, високочастотних та високотемпературних пристроїв GaN-на-алмазі. Зародження і ріст алмазу є ключовими процесами для модуляції TBR_{eff} . В роботі [20] багат шарові композити GaN/SiN_x/алмаз виготовлялися за технологією MPCVD при різних напругах зміщення (400–700 В). Багатшаровий композит GaN/SiN/алмаз, виготовлений при 600 В, мав товстий змішаний перехідний шар, що містив багатфазні структури і шорсткі межі розділу внаслідок ефективною підповерхневої іонної імплантації, що привело до високого TBR. GaN/SiN/алмаз,

отриманий за умов зародження при зміщенні 700 В (рис. 12), мав найменшу ефективність TBR ($26 \pm 10 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{ГВт}$), тоді як багатошаровий композит GaN/SiN_x/алмаз при зміщенні 600 В мав найбільш високий TBR_{eff} ($83 \pm 18 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{ГВт}$). Тобто, при 700 В більш тонка зона зародкоутворення та більш гладка поверхня розділу приводять до найменшого значення TBR_{eff}. Ця робота продемонструвала можливість регулювання TBR_{eff} на межі розділу GaN/алмаз за допомогою метода зародкоутворення, посиленого зміщенням, для модуляції процесів зародження і росту алмазу.

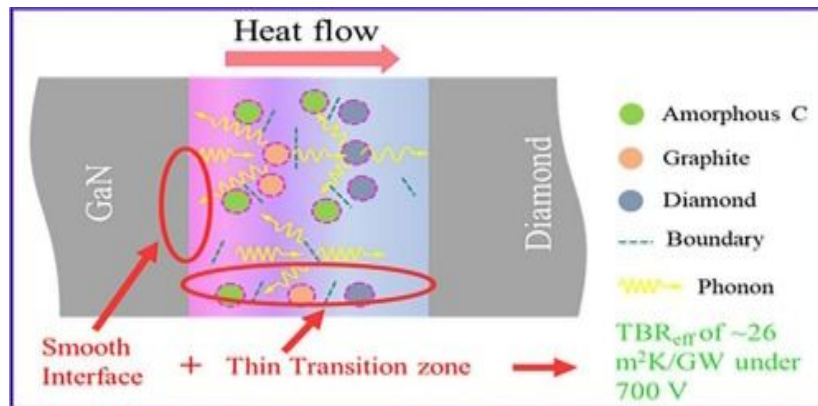


Рис. 12. Приклад, як при 700 В більш тонка зона зародкоутворення та більш гладенька поверхня розділу приводять до найменшого значення TBR_{eff} [20]

Крім алмазу покриття наносяться і на інші інструментальні матеріали, що і розглянемо нижче.

В статті [21] структурні зміни інструментальних вставок з покриттям Ti_{1-x}Al_xN, застосовуваних для токарної обробки нержавіючої сталі 316L, були досліджені за допомогою рентгенівської спектроскопії XANES (рис. 13). Для крупнозернистих покриттів Ti_{1-x}Al_xN з ГЦК-структурою при $0 \leq x \leq 0,62$ спектр XANES змінюється в залежності від вмісту алюмінію. Лінійне сканування Ti по передній поверхні зношених зразків показує, що домени, збагачені TiN, утворювалися під час точіння в Ti_{0,47}Al_{0,53}N і Ti_{0,38}Al_{0,62}N зразків внаслідок спінодального розпаду. Спектри XANES показують місця на інструменті, в яких сформувалися домени з найбільшим вмістом TiN, а це засвідчує, яка частина області контакту інструмента зі стружкою піддавалася найбільшій температурі під час точіння. Зміни предкраєвих особливостей в спектрах XANES засвідчують, що структурні зміни відбуваються також і в фазі w-TiAlN в дрібнозернистому Ti_{0,38}Al_{0,62}N при токарній обробці. Показано, що Cr і Fe з сталі прилипають до передньої поверхні інструменту під час обробки. Спектри Cr і Fe XANES свідчать, що Cr окислюється в кінці довжини контакту, в той час як налиплий Fe зберігає ту ж ГЦК-структуру, що і нержавіюча сталь 316L.

Інструменти з PVD-покриттям застосовуються переважно в металорізальних операціях. У процесі обробки температура інструмента може досягати 1000 °C. Дослідження [22] спрямоване на оцінку впливу температури на трибологічну поведінку покриття TiSiN/AlCrN CAE/PVD на твердосплавних WC-Co дисках, що піддавалися впливу високих температур. Дослідження на зношування провадилися методом ковзання кульки по диску. Зразки з покриттям випробували при 20, 500 та 800 °C. Результати засвідчили зміну механізму зношування при підвищенні температури до 800 °C. Випробування вказують на абразивне зношування при випробуваннях зразків при 20 і 500 °C. З іншого боку, зразки, випробувані при температурі 800 °C, показали окислювальний механізм зносу. Тобто, механізм зносу був ідентифікований як окислювальний, а не абразивний, при високій температурі. Окислювальний знос значно підвищує швидкість зносу у порівнянні з абразивним, незважаючи на зниження коефіцієнта тертя з-за утворення оксиду титана. Вимірювання комбінаційного розсіювання світла свідчить, що оксид титану діє як трибошар. Твердість шару грає незначну роль, коли система покриття TiSiN/AlCrN випробується на знос при високій температурі.

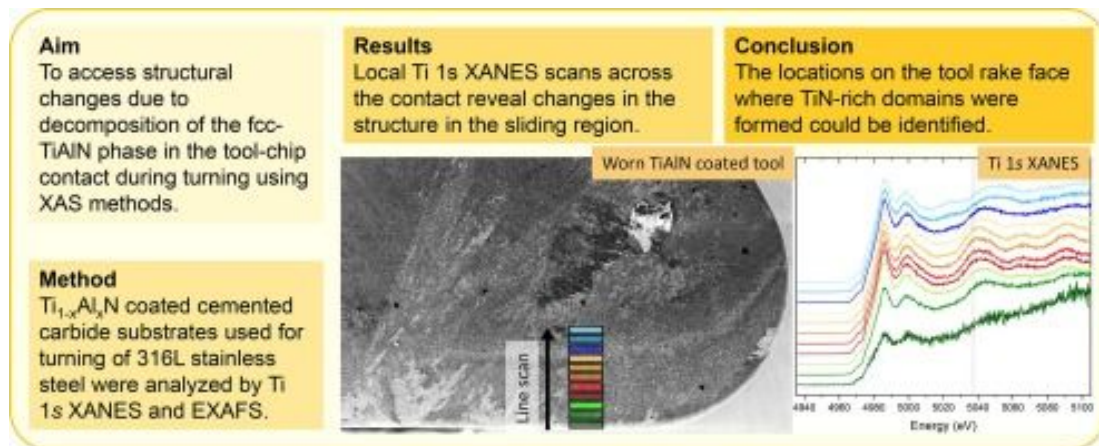


Рис. 13. Структурні зміни вставок з покриттям $Ti_{1-x}Al_xN$, застосовуваних для токарної обробки нержавіючої сталі 316L [21]

В дослідженні [23] термічно стабільні покриття SiAlN товщиною 0,4 мкм, 0,8 мкм і 1,6 мкм з проміжними шарами Mo були нанесені на підкладки з титану, які слугують у якості захисного бар'єрного шару для застосування в авіаційних двигунах. Після 50 г (10 циклів) витримки при 800 °C в повітрі покриття SiAlN товщиною 0,4 мкм, 0,8 мкм витончувалися до десятків нанометрів і надалі утворювали оксидні луски, тоді як покриття SiAlN товщиною 1,6 мкм зберігало товщину 0,5 мкм. Залишковий шар SiAlN спостерігається без помітного окислення. Виснаження покриття SiAlN викликане чисто міжфазною дифузією/реакціями з підкладкою, що знаходиться нижче. Після виснаження до товщини у декілька десятків нанометрів, тобто близького до повного витончення, покриття SiAlN починає окислюватися разом із зміною елементного складу залишкового SiAlN. Механізм деградації покриття SiAlN визначається його виснаженням, на відміну від мікроструктурної зміни залишкового покриття, викликані міжфазною реакцією.

Насамкінець цього огляду розглянемо статтю [24], яка присвячена питанню як зношується покриття. Чавун з ущільненим графітом (CGI) є одним з чотирьох найбільш часто застосованих чавунів і часто використовується у якості матеріалу для блоків дизельних двигунів, головок циліндрів і тормозних дисків для високошвидкісних силових агрегатів. CGI має вищу зносостійкість, міцність, модуль пружності та майже вдвічі більшу міцність на втому, ніж сірий чавун, але ті самі позитивні властивості роблять CGI важчим для обробки. В роботі [24] під час сухого чистового торцевого фрезерування важкооброблюваного чавуну CGI EN-GJV-450 з вмістом 90—95 % перліту застосовувався у якості інструменту твердий сплав із багатшаровим CVD-покриттям $Ti(C,N)-Al_2O_3$. При швидкості різання 150 м/хв. було видалено 3126 см³ матеріалу після 190 проходів, тоді як 1645 см³ було видалено після 100 проходів у разі 250 м/хв. Крім того, була досліджена рання деградація інструментів при різних рівнях зносу, включаючи 5, 10, 25 і 100 % повного терміну служби інструменту (рис. 14). Вивчення еволюції зносу за різних рівнів продемонструвало прискорене хімічне зношування верхнього покриття Al_2O_3 через його реакцію з включеннями, які містять MgO, що створює м'якший продукт реакції шпінелі $(Mg,Fe,Mn)Al_2O_4$, яка стирається та видаляється за допомогою потоку стружки. В той час як включення MgO викликають небажану деградацію шару покриття Al_2O_3 , відкладення включень MgO і SiO_2 на відкритому цементованому карбіді діє як антиадгезійний засіб для адгезії CGI, що в цілому знижує швидкість зносу відкритого шару WC-Co. Шар покриття $Ti(C,N)$ на передній поверхні зношується за рахунок дифузійного розчинення і стирання. Шар $Ti(C,N)$ на боковій поверхні піддається переважно механічній деградації за рахунок стирання, відшаровування та наявності мікротріщин. Тобто шар покриття $Ti(C,N)$ зазнає механізмів дифузійного та механічного (стирання, розрив зв'язку, мікроруїнування) зносу. Оголення підкладки з цементованого карбіду призводить до її швидкого зношування у вигляді кратерів і масивної втрати матеріа-

лу на боковій поверхні, а це в кінцевому підсумку спричиняє поломку інструменту. Налипання CGI на WC-Co сприяє дифузійній втраті вуглецю та вольфраму з зерен WC. Вуглець реагує із залізом на межі розділу, утворюючи карбід заліза, тоді як залишковий вольфрам легує його, утворюючи $(Fe_x, W_{1-x})_3C$. Ця фаза може зменшити швидкість зношування, оскільки вона діє як дифузійний бар'єр, але її висока крихкість дозволяє періодично видаляти її шляхом адгезійного зношування. Дифузія кобальту назовні також була активним механізмом зношування, який полегшує подальшу дифузію вуглецю та вольфраму, але також послаблює зв'язок WC із зерном, ще більше сприяючи адгезійному зносу потоком CGI. Осадження оксидних включень на оголоному WC-Co працює як засіб проти прилипання для адгезії CGI і, таким чином, зменшує швидкість зношування. В тих випадках, коли відбувається налипання CGI, частіше всього на задній поверхні інструмента, починається швидка втрата матеріалу інструмента, що робить знос задньої поверхні основною причиною виходу інструмента з ладу. Зовнішня дифузія C, W і Co з цементованого карбіду в налипщій CGI призводить до ослаблення меж зерен і утворення $(Fe_x, W_{1-x})_3C$ на поверхні розділу цементованого карбіду і CGI на задній поверхні. Ця взаємодія локально погіршує механічні властивості інструмента, а більш крупні фрагменти матеріалів інструмента періодично видаляються за механізмом адгезійного зносу.

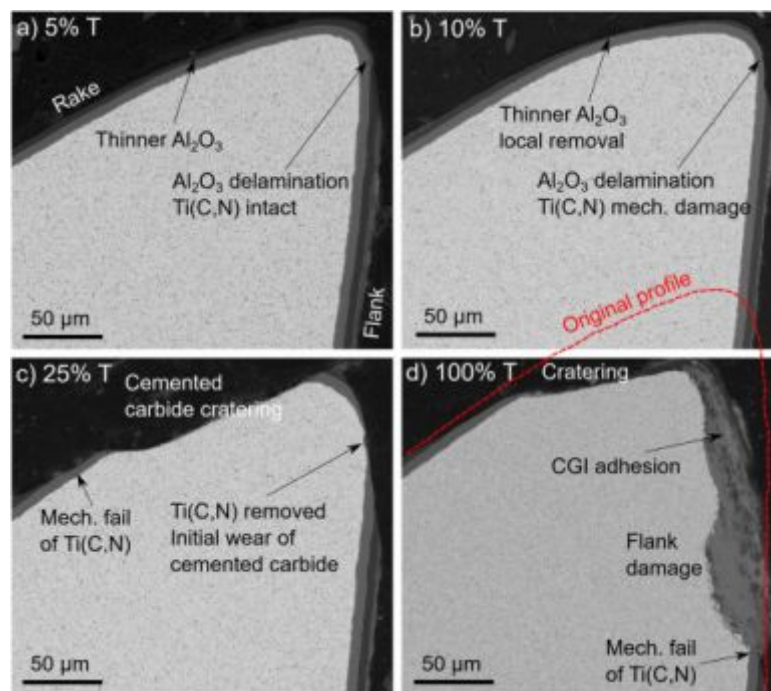


Рис. 14. Зображення SEM-BSE зношених інструментів в поперечному перерізі, оброблених при $v_c = 150$ м/хв. при 5 %, 10 %, 25 % і 100 % стійкості інструменту T [24]

Висновки

В результаті проведеного огляду встановлене наступне:

1. Адсорбований атом (адатом) Fe може змінювати міжшарову енергію зв'язку C–C. Зі збільшенням кількості атомів Fe ефект ослаблення/посилення зв'язків C–C стає більш очевидним. Адатами Fe не тільки змінили міжшарову енергію зв'язку C–C, але також вплинули на напрямок дисоціації мікроструктури поверхні. Це може бути причиною індукованої Fe графітизації поверхні (110) алмазу. Також виявлено, що атоми W можуть активувати міжшарові зв'язки C–C, спричиняючи роз'єднання поверхневих атомів вуглецю. Зокрема, перенесення електронів атомів W і звуження структури поверхні алмазу викликають графітизацію.

2. Розглянуті різні моделі легованого алмаза, місця адсорбції атомів O на різних його поверхнях і наступний процес реакції O_2 молекули с атомом C. Результати засвідчують, що му-

льтилегована модель алмаза має найбільшу енергію активації, що відбиває кращі властивості стійкості до окислення.

3. ОН-алмаз отримують обробкою гідроксидіонами в деіонізованій воді при високих напругах до 3000 В. ОН-алмаз демонструє високу інтенсивність однократно окислених C_1 вуглецевих зв'язків (C–OH і C–O–C) та двічі окислених C_{11} зв'язків (C=O або O–C–O).

4. Для посилення змашувального ефекту порошки на основі Ni, дисперговані частинками MoS_2 та Al_2O_3 , попередньо наносяться на підкладку інструменту, причому ефективні механізми пояснені вивільненням частинок MoS_2 з покриттів, які утворювали мастильну плівку на межі інструменту та стружки, тоді як частинки Al_2O_3 підвищували твердість поверхні.

5. Дослідження свідчить, 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.

6. Вивчено вплив типу наностовпчиків, що чергуються, їх розміру і висоти на тепловий граничний опір (TBR) на межах шорсткого розділу AlN/алмаз та показано, що TBR оптимального інтерфейса AlN/алмаз наностовпчатих структур може бути зменшений на 28 % у порівнянні з плоским інтерфейсом.

7. Результати засвідчили, що додаткові вільні орбіталі, які утворюються внаслідок спонтанної релаксації hBN при великій деформації, викликаній скручуванням, можуть посилити vdW-зв'язок між hBN і Н-алмазом, що і буде сприяти переносу заряду на межі розділу, тим самим послабляючи поверхневе розсіяння домішок і збільшуючи накопичення дірок на поверхні Н-алмаза, а це свідчить про позитивний вплив нітриду в вигляді hBN за зміну поверхні алмазу.

8. Механізм зносу системи покриття TiSiN/AlCrN ідентифікований як окислювальний, а не абразивний, при високій температурі. Окислювальний знос значно підвищує швидкість зносу у порівнянні з абразивним, незважаючи на зниження коефіцієнта тертя з-за утворення оксиду титана. Вимірювання комбінаційного розсіювання світла свідчить, що оксид титану діє як трибошар. Твердість шару грає незначну роль, коли система покриття TiSiN/AlCrN випробується на знос при високій температурі.

9. Досліджені для умов сухого чистового торцевого фрезерування важкооброблюваного чавуну CGI EN-GJV-450 з вмістом 90–95 % перліту особливості еволюції зносу твердого сплаву із багатошаровим CVD-покриттям Ti(C,N)– Al_2O_3 . Шар покриття Ti(C,N) на передній поверхні зношується за рахунок дифузійного розчинення і стирання. Шар Ti(C,N) на боковій поверхні піддається переважно механічній деградації за рахунок стирання, відшаровування та наявності мікротріщин. Оголення підкладки з цементованого карбїду призводить до її швидкого зношування у вигляді кратерів і масивної втрати матеріалу на боковій поверхні, а це в кінцевому підсумку спричиняє поломку інструменту. В тих випадках, коли відбувається налипання CGI, частіше всього на задній поверхні інструмента, починається швидка втрата матеріалу інструмента, що робить знос задньої поверхні основною причиною виходу інструмента з ладу. Осадження оксидних включень на оголеному WC-Co працює як засіб проти прилипання для адгезії CGI і, таким чином, зменшує швидкість зношування.

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. Surface modification of synthetic grinding powders diamond with heat-resistant oxides and chlorides liquid phase application method / V.Lavrinenko, V. Poltoratskiy, O. Bochechka, V. Solod, Ye. Ostroverkh, V. Fedorovich. *Cutting&Tools in Technological System*, 2022, Edition 97. P. 39–58.

3. Smokvyna V.V., Lavrinenko V.I., Ilynska H.D. Defectiveness of low strength synthetic diamond grains: negative and positive aspects in case of using them in a grinding tool. *Journal of Super-hard Materials*, 2023, Vol. 45, No. 4, P. 306–315.
4. Enhancement of oxidation resistance via titanium boron carbide coatings on diamond particles / Youhong Sun, Chi Zhang, Jinhao Wu, Qingnan Meng, Baochang Liu, Ke Gao, Linkai He. *Diamond and Related Materials*. Volume 92, February 2019, P.74–80.
5. Effect of the modulation periods on the mechanical and tribological properties of cBN/NCD multilayer composite coating / Shuai Tian, Feng Xu, Zhenyu Ma, Qian Zhou, Yanchao Zhao, Zheng Li, Dong Wang, Guang Zeng, Dunwen Zuo. *Diamond and Related Materials*. Volume 132, February 2023, 109628.
6. Boris B. Bokhonov, Konstantin B. Gerasimov, Mikhail A. Mikhailenko Morphological features of synthetic diamond microcrystals subjected to oxidative etching. *Diamond and Related Materials*. Volume 136, June 2023, 109934.
7. Loops at carbon edges: Boron-assisted passivation and tunable surface properties of carbon nanofibers / Go Bong Choi, Jieun Park, Seungki Hong, Jueun Choi, Tae Hoon Seo, Hyungwoo Kim, Yoong Ahm Kim. *Carbon*. Volume 204, February 2023, P. 587–593.
8. In situ photoelectron spectroscopy for characterizing the chemical evolution of a carbon steel surface by heat-treatment / Youngseok Yu, Geonhwa Kim, Beomgyun Jeong, Ji-In Park, Hyun-Joon Shin, Kyong-Su Park, Jouhahn Lee, Ki-jeong Kim. *Applied Surface Science*. Volume 608, 15 January 2023, 155155.
9. Surface modification of 40Cr steel subjected to composite strengthening grinding process / Yunlong Yao, Shichao Xiu, Cong Sun, Yuan Hong, Zhuangzhuang Hou, Xiannan Zou. *Materials Characterization*. Volume 196, February 2023, 112590.
10. First-principles study of the microstructure evolution of the diamond (110) surface with the adsorption of Fe atoms / Hongchao Wang, Zhuji Jin, Xuehua Li, Tianxiang Wu, Xingchen Guo. *Applied Surface Science*. Volume 613, 15 March 2023, 156053.
11. Hongchao Wang, Zhuji Jin, Xuehua Li, Xingchen Guo. Exploring structural evolution and graphitization of the interface between tungsten and diamond (111) surface: A DFT study. *Applied Surface Science*. Volume 605, 15 December 2022, 154640.
12. Ming Lu, Dongdong Liu, Chuan Zhang, Fanghong Sun. DFT calculations and experiments of oxidation resistance research on B, N, and Si multi-doped diamond films. *Applied Surface Science*. Volume 612, 1 March 2023, 155865.
13. Fabrication of hydroxyl terminated diamond by high-voltage hydroxide ion treatments / F.N. Li, Y. Li, H.W. Bao, H.X. Wang, F. Ma. *Applied Surface Science*. Volume 622, 15 June 2023, 156909.
14. Assessment of self-lubricating coated cutting tools fabricated by laser additive manufacturing technology for friction-reduction / Youqiang Xing, Cheng Luo, Mingyu Zhu, Yanhua Zhao, Kornel Ehmann, Ze Wu, Lei Liu. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 318, September 2023, 118010.
15. A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification / Qiu Hong, Renchen Zhou, Xipeng Guo, Zhe Wang, Shaohui Yin. *Diamond and Related Materials*. Volume 137, August 2023, 110093.
16. Influences of early-stage C diffusion on growth microstructures in solid-state interface reaction between CVD diamond and sputtered Cr / Zhuo Liu, Wei Cheng, Dekui Mu, Yueqin Wu, Qiaoli Lin, Xipeng Xu, Han Huang. *Materials Characterization*. Volume 196, February 2023, 112603.
17. Microstructural, mechanical and tribological behavior of nanodiamonds reinforced plasma sprayed nickel-aluminum coating / Shubhendra Shivam Maurya, Krishna Kant Pandey, Swati Sharma, Sudha Kumari, Kamlesh Kumar Mirche, Deepak Kumar, Shailesh Mani Pandey, Anup Kumar Keshri. *Diamond and Related Materials*. Volume 133, March 2023, 109714.
18. AlN/diamond interface nanoengineering for reducing thermal boundary resistance by molecular dynamics simulations / Zijun Qi, Wei Shen, Rui Li, Xiang Sun, Lijie Li, Qijun Wang, Gai Wu, Kang Liang. *Applied Surface Science*. Volume 615, 1 April 2023, 156419.

19. Twist angle modulated electronic properties and band alignments of hydrogen-terminated diamond(111)/hexagonal boron nitride heterostructures / Boyu Wang, Jing Ning, Jincheng Zhang, Chi Zhang, Dong Wang, Yue Hao. *Applied Surface Science*. Volume 614, 30 March 2023, 156245.
20. Effect of bias-enhanced nucleation on the microstructure and thermal boundary resistance of GaN/SiN_x/diamond multilayer composites / Yiming Wang, Bing Zhou, Guoliang Ma, Jiaqi Zhi, Chao Yuan, Hui Sun, Yong Ma, Jie Gao, Yongsheng Wang, Shengwang Yu. *Materials Characterization*. Volume 201, July 2023, 112985.
21. Structural changes in Ti_{1-x}Al_xN coatings during turning: A XANES and EXAFS study of worn tools / L. Rogström, M. Moreno, J.M. Andersson, M.P. Johansson-Jöesaar, M. Odén, K. Klementiev, L.-Å. Näslund, M. Magnuson. *Applied Surface Science*. Volume 612, 1 March 2023, 155907.
22. Tribological characterization of PVD TiSiN/AlCrN coating: A comprehensive study on thermal effect / Carlos B.G. Pereira, Qianxi He, Paulo Soares, Michelle S. Meruvia, Gelson Biscaia de Souza, Fred L. Amorim, Jose M. De Paiva, Stephen C. Veldhuis, Ricardo D. Torres. *Materials Characterization*. Volume 203, September 2023, 113135.
23. Zhaohe Gao, Justyna Kulczyk-Malecka, Peter Kelly, Ping Xiao. Effects of interfacial depletion on the degradation of SiAlN coating. *Applied Surface Science*. Volume 611, Part A, 15 February 2023, 155576.
24. Degradation of multi-layer CVD-coated cemented carbide in finish milling compacted graphite iron / Rebecka Lindvall, Juan Manuel Bello Bermejo, Belén Cámara Herrero, Sebastian Sirén, Lena Magnusson Åberg, Susanne Norgren, Rachid M'Saoubi, Volodymyr Bushlya, Jan-Eric Ståhl. *Wear*. Volume 522, 1 June 2023, 204724.

RESEARCH OF THERMAL INFLUENCE ON THE CHANGE OF THE SURFACE LAYER OF DIAMONDS AND ASSOCIATED TOOL MATERIALS (REVIEW)

Abstract

Attention is drawn to the fact that the issues of effective processing of such fragile, difficult-to-process materials as mono- and polycrystalline diamonds are currently being discussed in the literature, including CVD diamond films, sapphire, etc. For the most part, such processing is faced with the issues of thermal impact on the surface of the tool material, taking into account the defects of the diamonds that undergo processing, directed impact on the surface of such diamonds, heat and modification of the surface of diamonds and accompanying tool materials.

In this review, attention is focused on the newest modern developments, namely 2023, in the features of thermal effects on carbon materials, diamond, and steel. Studies are shown in the direction of directed changes in the surface of diamonds: obtaining the surface of OH-diamonds and H-diamonds, doping diamond, and changing the contact of the diamond surface with Fe and W. Special attention is paid to the application of various protective coatings on the surface of diamonds and related tool materials (steels, ceramics and hard alloys). At the same time, the greatest attention is paid to metal and nitride coatings, that is, this direction has recently become important and relevant.

Various models of doped diamond, places of adsorption of O atoms on its various surfaces, and the subsequent process of the reaction of the O₂ molecule with the C atom are considered. The results show that the multi-alloy diamond model has the highest activation energy, which reflects the best properties of oxidation resistance. Research shows that diamond with a rough surface has a larger surface area and higher electronegativity than normal diamond, which improves the adhesion between the Ni-based bond and the diamond with a rough surface.

References

- [1] Lavrinenko, V.I., Solod, V.Yu., Muzuchka, D.G. & Ostroverkh, Ye.V. (2023) Perekhid vid plastynohogo rezymu almaznogo shlifuvannia keramiku do plavlennia ta osoblyvosti plavlennia in-

- strumentalnuch keramik [Transition from the plastic mode of diamond grinding of ceramics to melting and features of the melting of instrumental ceramics]. *Zbirnyk naukovykh prats` Dniprjvskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu (tekhnichni nauky)*. Vypusk 1(42). P. 48–58. [In Ukrainian].
- [2] Lavrinenko, V., Poltoratskiy, V., Bochechka, O., Solod, V., Ostroverkh, Ye. & Fedorovich, V. (2022) Surface modification of synthetic grinding powders diamond with heat-resistant oxides and chlorides liquid phase application method. *Cutting&Tools in Technological System*, Edition 97. P. 39–58.
- [3] Smokvyna, V.V., Lavrinenko, V.I. & Ilnytska, H.D. (2023) Defectiveness of low strength synthetic diamond grains: negative and positive aspects in case of using them in a grinding tool. *Journal of Superhard Materials*, Vol. 45, No. 4, P. 306–315.
- [4] Youhong, Sun., Chi, Zhang., Jinhao, Wu., Qingnan, Meng., Baochang, Liu., Ke, Gao. & Linkai, He. (2019) Enhancement of oxidation resistance via titanium boron carbide coatings on diamond particles. *Diamond and Related Materials*. Volume 92, February, P. 74–80.
- [5] Shuai, Tian., Feng, Xu., Zhenyu, Ma., Qian, Zhou., Yanchao, Zhao., Zheng, Li., Dong, Wang., Guang, Zeng. & Dunwen Zuo. (2023) Effect of the modulation periods on the mechanical and tribological properties of cBN/NCD multilayer composite coating. *Diamond and Related Materials*. Volume 132, February, 109628.
- [6] Boris, B. Bokhonov., Konstantin, B. Gerasimov. & Mikhail A. Mikhailenko. (2023) Morphological features of synthetic diamond microcrystals subjected to oxidative etching. *Diamond and Related Materials*. Volume 136, June 2023, 109934.
- [7] Go Bong, Choi., Jieun, Park., Seungki, Hong., Jueun, Choi., Tae Hoon, Seo., Hyungwoo, Kim. & Yoong Ahm, Kim. (2023) Loops at carbon edges: Boron-assisted passivation and tunable surface properties of carbon nanofibers. *Carbon*. Volume 204, February. P. 587–593.
- [8] Youngseok, Yu., Geonhwa, Kim., Beomgyun, Jeong., Ji-In, Park., Hyun-Joon, Shin., Kyong-Su, Park., Jouhahn, Lee. & Ki-jeong, Kim. (2023) In situ photoelectron spectroscopy for characterizing the chemical evolution of a carbon steel surface by heat-treatment. *Applied Surface Science*. Volume 608, 15 January. 155155.
- [9] Yunlong, Yao., Shichao, Xiu., Cong, Sun., Yuan, Hong., Zhuangzhuang, Hou. & Xiannan, Zou. (2023) Surface modification of 40Cr steel subjected to composite strengthening grinding process. *Materials Characterization*. Volume 196, February. 112590.
- [10] Hongchao, Wang., Zhuji, Jin., Xuehua, Li., Tianxiang, Wu. & Xingchen, Guo. (2023) First-principles study of the microstructure evolution of the diamond (110) surface with the adsorption of Fe atoms. *Applied Surface Science*. Volume 613, 15 March. 156053.
- [11] Hongchao, Wang., Zhuji, Jin., Xuehua, Li. & Xingchen, Guo. (2022) Exploring structural evolution and graphitization of the interface between tungsten and diamond (111) surface: A DFT study. *Applied Surface Science*. Volume 605, 15 December. 154640.
- [12] Ming, Lu., Dongdong, Liu., Chuan, Zhang. & Fanghong, Sun. (2023) DFT calculations and experiments of oxidation resistance research on B, N, and Si multi-doped diamond films. *Applied Surface Science*. Volume 612, 1 March. 155865.
- [13] F.N. Li, Y. Li, H.W. Bao, H.X. Wang & F. Ma. (2023) Fabrication of hydroxyl terminated diamond by high-voltage hydroxide ion treatments. *Applied Surface Science*. Volume 622, 15 June. 156909.
- [14] Youqiang, Xing., Cheng, Luo., Mingyu, Zhu., Yanhua, Zhao., Kornel, Ehmann., Ze, Wu. & Lei, Liu. (2023) Assessment of self-lubricating coated cutting tools fabricated by laser additive manufacturing technology for friction-reduction. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 318, September. 118010.
- [15] Qiu, Hong., Renchen, Zhou., Xipeng, Guo., Zhe, Wang. & Shaohui Yin. (2023) A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification. *Diamond and Related Materials*. Volume 137, August. 110093.
- [16] Zhuo, Liu., Wei, Cheng., Dekui, Mu., Yueqin, Wu., Qiaoli, Lin., Xipeng, Xu. & Han, Huang. (2023) Influences of early-stage C diffusion on growth microstructures in solid-state interface

- reaction between CVD diamond and sputtered Cr. *Materials Characterization*. Volume 196, February. 112603.
- [17] Shubhendra Shivam, Maurya., Krishna Kant, Pandey., Swati, Sharma., Sudha, Kumari., Kamlesh Kumar, Mirche., Deepak, Kumar., Shailesh Mani, Pandey. & Anup Kumar, Keshri. (2023) Microstructural, mechanical and tribological behavior of nanodiamonds reinforced plasma sprayed nickel-aluminum coating. *Diamond and Related Materials*. Volume 133, March. 109714.
- [18] Zijun, Qi., Wei, Shen., Rui, Li., Xiang, Sun., Lijie, Li., Qijun, Wang., Gai, Wu. & Kang, Liang. (2023) AlN/diamond interface nanoengineering for reducing thermal boundary resistance by molecular dynamics simulations. *Applied Surface Science*. Volume 615, 1 April. 156419.
- [19] Boyu, Wang., Jing, Ning., Jincheng, Zhang., Chi, Zhang., Dong, Wang. & Yue, Hao. (2023) Twist angle modulated electronic properties and band alignments of hydrogen-terminated diamond(111)/hexagonal boron nitride heterostructures. *Applied Surface Science*. Volume 614, 30 March. 156245.
- [20] Yiming, Wang., Bing, Zhou., Guoliang, Ma., Jiaqi, Zhi., Chao, Yuan., Hui, Sun., Yong, Ma., Jie, Gao., Yongsheng, Wang. & Shengwang, Yu. (2023) Effect of bias-enhanced nucleation on the microstructure and thermal boundary resistance of GaN/SiN_x/diamond multilayer composites. *Materials Characterization*. Volume 201, July. 112985.
- [21] L. Rogström, M. Moreno, J.M. Andersson, M.P. Johansson-Jöesaar, M. Odén, K. Klementiev, L.-Å. Näslund & M. Magnuson. (2023) Structural changes in Ti_{1-x}Al_xN coatings during turning: A XANES and EXAFS study of worn tools. *Applied Surface Science*. Volume 612, 1 March. 155907.
- [22] Carlos B.G. Pereira., Qianxi, He., Paulo, Soares., Michelle S. Meruvia., Gelson Biscaia de Souza., Fred L. Amorim., Jose M. De Paiva., Stephen C. Veldhuis. & Ricardo D. Torres. (2023) Tribological characterization of PVD TiSiN/AlCrN coating: A comprehensive study on thermal effect. *Materials Characterization*. Volume 203, September. 113135.
- [23] Zhaohe, Gao., Justyna, Kulczyk-Malecka., Peter, Kelly. & Ping Xiao. (2023) Effects of interfacial depletion on the degradation of SiAlN coating. *Applied Surface Science*. Volume 611, Part A, 15 February. 155576.
- [24] Rebecka, Lindvall., Juan Manuel Bell,o Bermejo., Belén Cámara, Herrero., Sebastian, Sirén., Lena Magnusson, Åberg., Susanne, Norgren., Rachid, M'Saoubi., Volodymyr, Bushlya. & Jan-Eric, Ståhl. (2023) Degradation of multi-layer CVD-coated cemented carbide in finish milling compacted graphite iron. *Wear*. Volume 522, 1 June. 204724.

Надійшла до редколегії 17.11.2023