

УДК 621.9.025.7

**В. І. Грицина¹, К. І. Кошевий¹, О. А. Опалєв¹,
О. М. Решетняк¹, В. Є. Стрельницький¹,
А. О. Лямцева², А. О. Чумак², С. А. Клименко^{2,*},
О. О. Бочечка², О. І. Чернієнко²**

¹Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, м. Харків, Україна

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

*atmu@meta.ua

Різальний інструмент, оснащений полікристалом синтетичного алмазу з полікристалічним алмазним CVD-покриттям

Запропоновано тонке захисне полікристалічне алмазне CVD-покриття для різальних інструментів, оснащених полікристалічним матеріалом з синтетичного алмазу, отриманим методом HP-HT. Відпрацьовано режими осадження покриття у плазмі тліючого розряду, що стабілізується магнітним полем. Покриття синтезували у воднево-метановій суміші за парціального тиску CH_4 в межах $(2,2-2,7) \cdot 10^2$ Па. Вивчено вплив температури підкладки з полікристалічного алмазу під час осадження на структуру синтезованого покриття. Показано, що за температури в межах 1060–1150 °С кристали алмазу в покриттях чітко ограновані з прямокутними або трикутними гранями мікрометрових розмірів. Подальше підвищення температури синтезу призводить до утворення на поверхні сформованих великих алмазних кристалів менш впорядкованих дрібних складових. За температури осадження 1110–1150 °С виготовлено дослідну партію різальних пластин, отриманих з полікристалічного алмазного матеріалу, з CVD-покриттям з полікристалічного алмазу товщиною 30 мкм та виконано дослідження впливу покриття на експлуатаційні властивості оснащених цими пластинами інструментів під час чистового безударного точіння алюмінієвого сплаву АК12М2МгН і технічної кераміки МК90. Показано, що наявність покриття на інструменті під час обробки алюмінієвого сплаву дозволяє отримати оброблені поверхні з меншою шорсткістю, а під час обробки технічної кераміки підвищити зносостійкість інструментів у 1,52–1,75 рази, що поширює область використання та забезпечує підвищення ефективності інструменту, оснащеного алмазними полікристалами. Встановлено обмеження темпера-

тури синтезу покриттів до 1175 °С, перевищення якої сприяє формуванню покриття з гіршими експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: алмаз, CVD-покриття, полікристал, точіння, знос інструменту.

ВСТУП

На сьогодні є великий попит на створення ефективних інструментів для обробки нових матеріалів, таких як кераміка, вуглепластик, композиційні матеріали, важкооброблювані сплави на основі кольорових металів, які широко використовують для виготовлення деталей авіаційної, космічної, ракетної, військової техніки та інших високотехнологічних виробів. Але такі матеріали важко піддаються обробці сталевими і твердосплавними інструментами, які швидко зношуються і не забезпечують задовільну якість оброблюваних поверхонь. Тому гостро стоїть питання подовження терміну служби та інших експлуатаційних можливостей інструментів для їхньої обробки різанням. Аналіз літературних джерел свідчить, що для високоякісної обробки різанням важкооброблюваних матеріалів найбільш перспективним є інструмент, оснащений надтвердими композитами на основі синтетичного алмазу [1]. Це пов'язано з тим, що алмаз є найтвердішим відомим матеріалом, він має надвисоку міцність на стиск, низький коефіцієнт тертя і найвищу теплопровідність, що забезпечує зносостійкість на два порядки вищу, ніж у інших матеріалів інструментального призначення [2–4].

Водночас, з врахуванням особливостей механічних властивостей алмазних композитів і вартості інструменту з їхнім використанням, питання підвищення працездатності такого інструменту набувають особливого значення.

Однією із основних тенденцій вдосконалення різальних інструментів є нанесення на їхні робочі поверхні захисних покриттів. Покриття наносять на інструменти із сталей, твердих сплавів, кераміки, надтвердих матеріалів [5].

Найбільш ефективним для інструментів є покриття, які забезпечують зменшення температури в зоні різання за рахунок мінімізації тертя на контактних ділянках, запобігають протіканню хімічних реакцій із оброблюваним матеріалом і утворенню з його компонентами хімічних сполук, мають низький рівень внутрішніх залишкових напружень, характеризуються високими трибологічними властивостями за рахунок комплексу фізико-механічних параметрів, мають низьку крихкість та підвищену пластичність для мінімізації механічного руйнування.

Зниження внутрішніх напружень термічного характеру в покритті досягають за рахунок використання у їхньому складі матеріалів, які близькі за своїм хімічним складом до інструментальної основи, що дозволяє зменшити різницю коефіцієнтів температурного розширення. У разі надтвердих матеріалів, це виконували стосовно системи “основа з полікристалічного кубічного нітриду бору – тонке покриття з аморфного нітриду бору” [5].

Водночас, роботи з нанесення тонких покриттів з алмазу на основу з алмазного матеріалу авторам невідомі.

Потрібно відмітити, що інформація для інструментів, оснащених надтвердими композитами на основі синтетичного алмазу з покриттям, взагалі відсутня. Водночас, на думку авторів, нанесення покриття на інструменти з композита на основі синтетичного алмазу є перспективним методом підвищення надійності та стійкості інструменту за рахунок зниження впливу високої крихкості композита.

З врахуванням вказаного вище комплексу вимог до покриттів, для випадку інструменту з композитів на основі синтетичного алмазу найбільш перспек-

тивними є тонке полікристалічне алмазне покриття, осаджене методом Chemical Vapor Deposition (CVD), яке характеризується високими значеннями твердості, модулю пружності, теплопровідності, низьким коефіцієнтом тертя, хімічною інертністю, термічною стійкістю [6, 7]. Нанесення на поверхні інструменту такого покриття може дозволити не тільки зміцнити поверхню, але завдяки утворенню суцільного алмазоподібного шару покращити стабільність роботи інструменту в цілому. Оскільки покриття не містить сторонніх зв'язувальних матеріалів, воно дозволяє наблизити фізико-механічні властивості поверхневого шару інструменту, оснащеного композитним матеріалом, до характеристик алмазу. Використання у даному випадку основи та покриття близьких хімічних складів забезпечує мінімізацію залишкових напружень у покритті. Крім того, існує можливість керувати структурою та кінцевим рівнем шорсткості поверхні робочих елементів із алмазного композита, які використовують в інструменті.

Алмазне покриття формується з газової суміші водню з вуглеводнем в області термодинамічної стабільності графіту. Ключову роль в зростанні алмазу відіграють атомарний водень і метил-радикали. Для їхнього утворення необхідно активувати газову суміш, для чого найчастіше використовують НВЧ розряд за допомогою досить дорогого і складного в експлуатації обладнання. Подальший розвиток промислових технологій синтезу, направлений на забезпечення найкращого співвідношення ціна/якість завдяки збільшенню швидкості росту алмазних покриттів і площі осадження, зниженню енергоємності процесу і витрат газу, а також досягненню стабільності і відтворюваності процесу синтезу [6]. Ведуться дослідження щодо використання інших методів активації. Одним із таких методів активації газової суміші є тліючий розряд у різних його модифікаціях, що дозволяє істотно спростити і здешевити процес синтезу [8–14].

Метою даної роботи було визначення умов формування CVD-покриття з полікристалічного алмазу у тліючому розряді постійного струму, що стабілізується поперечним магнітним полем, на основі з полікристалічного алмазу, отриманого методом НР-НТ, дослідження покращення працездатності різального інструменту, оснащеного полікристалічним алмазом, за рахунок нанесення тонкого алмазного покриття.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Інструменти оснащено круглими змінними різальними пластинами RNUN070300 зі зразків алмазних полікристалів, спечених за високого тиску з алмазного порошку, синтезованого в системі Mg-Zn-C . У [15] було показано, що спікання за температури 1800 °С та тиску 8 ГПа суміші алмазних порошків (крупнодисперсного з розміром зерен ~ 100 мкм та дрібнодисперсного з розміром зерен < 40 мкм), синтезованих в цій системі, дозволяє зменшити в 2,5 рази залишкову пористість у порівнянні зі спіканням за такого ж тиску алмазних порошків, синтезованих в системах на основі металів групи заліза. Твердість одержаного полікристала, визначена за навантаження на індентор Кнупа 9,8 Н, становила 50,7 ГПа, що складає 67 % від твердості монокристала природного алмазу типу Ia (грань (100)).

Заготовки пластин для нанесення покриття було отримано за допомогою спікання упродовж 20 с за тиску 8 ГПа та температури 1750 °С сумішей різних фракцій алмазного порошку, вирощеного у ростовій системі Mg-Zn-C . Склад сумішей за розмірами наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Склад вихідного алмазного порошку для спікання полікристалів

№	Вміст фракцій, % (за масою)			
	< 40 мкм після ситової класифікації продукту синтезу	100/80	125/100	> 125 мкм
1	100	—	—	—
2	60	25	11,1	3,9

Два типи спечених полікристалів і одержаних з них пластин було застосовано як підкладки для нанесення покриттів.

Синтез полікристалічних алмазних покриттів на поверхні різальних пластин здійснювали методом CVD на оригінальному обладнанні, розробленому у Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут” [16, 17]. Схему обладнання наведено на рис. 1. Покриття отримували у воднево-метановій суміші за концентрації метану 2 % (за масою). Для активації робочого газу використовували тліючий розряд постійного струму, стабілізований поперечним магнітним полем. Струмовий канал виникає між катодом і кільцевим анодом і завдяки наявності магнітного поля на нього діє сила, що викликає обертання каналу відносно осі катод-анод. Обертання струмового каналу в магнітному полі дозволяє забезпечити високу щільність струму ($> 1 \text{ А/см}^2$) і дає можливість наносити плівки товщиною від кількох до сотень мікрометрів на досить великі площі. Різальні пластини для формування покриття розташовують на аноді. Площу зростаючого алмазного покриття обмежують розміри електродів і потужність джерела живлення.

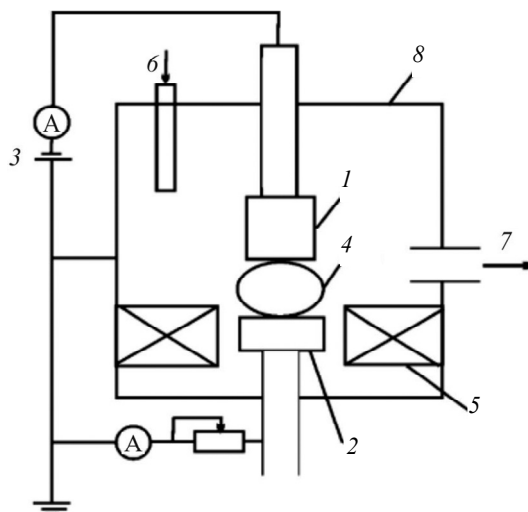


Рис. 1. Схема установки для CVD-синтезу алмазних покриттів: 1 – циліндричний катод, що охолоджується водою; 2 – тримач пластин; 3 – джерело живлення; 4 – розряд; 5 – кільцевий постійний магніт; 6 – напуск газу; 7 – відкачування газу; 8 – вакуумна камера.

За різних параметрів осадження відпрацьовано процеси синтезу і виготовлено партію різальних пластин з покриттями. Процес нанесення покриттів проходив за значень тиску робочого газу від 11,3 до 13,7 кПа, тобто парціальний тиск метану (p_{CH_4}) змінювали в межах $(2,2\text{--}2,7) \cdot 10^2$ Па. Потужність тліючого розряду W знаходилась в межах від 2,9 до 3,3 кВт. Температуру

синтезу покриттів T , яку вимірювали оптичним пірометром “Промінь”, варіювали від 1060 до 1175 °С. Товщина отриманих покриттів знаходилась в межах 20–30 мкм.

Фазовий склад покриттів контролювали методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3. Морфологію вихідної поверхні різальних пластин у вихідному стані та поверхні алмазного покриття досліджували за допомогою оптичного мікроскопа МЕТ-1.

Випробування зносостійкості інструментів, оснащених різальними пластинами без покриттів і з покриттями проводили з використанням токарно-гвинторізного верстата ФТ11 у Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. Точіння заготовки з алюмінієвого сплаву АК12М2МгН (твердість 90 МПа, границя міцності під час розтягування 189 МПа) і технічної кераміки на основі Al_2O_3 – МК90 (твердість – 13,7 ГПа, модуль Юнга – 320 ГПа, границі міцності під час стискання та згинання – 2000 і 280 МПа відповідно) виконували за режимами обробки: подача $S = 0,1$ мм/об; глибина різання $t = 0,1$ мм; швидкість різання під час обробки алюмінієвого сплаву – 5 м/с, кераміки – 3,5 м/с. Для кожного різця виконували по три проходи вздовж оброблюваних зразків по 60 с. До і після обробки фіксували мікроскопічні зображення робочих поверхонь інструменту. З використанням оптичного мікроскопа МБ9 визначали ширину фаски зносу інструменту по задній поверхні.

Шорсткість обробленої поверхні визначали з використанням профілометра-профілографа мод. 170311.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Під час визначення оптимальних режимів процесу CVD-синтезу алмазних покриттів у плазмі тліючого розряду на різальні пластини з полікристала синтетичного алмазу для оснащення інструменту слід дотримати баланс між забезпеченням високої швидкості осадження покриття і його якістю. Крім того, під час осадження покриття на пластини з алмазного полікристала слід брати до уваги наявність домішок із компонентів ростової системи, які можуть впливати на процес синтезу, що потребує певної попередньої обробки поверхонь перед нанесенням покриття [6, 18]. Дійсно, на етапі нагрівання заготовок різальних пластин за допомогою тліючого розряду у водневому середовищі, з’ясувалося, що за температури 600 °С тліючий розряд переходить у дуговий. Це обумовлено випаровуванням домішок, наявних у полікристалі, що провокує утворення мікродуг, тому процес формування покриття потрібно проводити з попередньої термічної обробкою заготовок різальних пластин за допомогою тривалого відпалу за поступового підвищення тиску в камері та температури до робочих параметрів осадження, не допускаючи їхнього перегрівання.

Згідно з результатами рентгенівської дифрактометрії за обраних параметрів CVD-процесу в синтезованих покриттях формується полікристалічний алмаз (просторова група кубічна $Fd3m$). Ці дані підтверджуються характерними мікроскопічними зображеннями поверхні сформованих зразків, на яких видно чітко ограновані кристали алмазу. На поверхні різальних пластин синтезується суцільне покриття товщиною до 30 мкм, яке має однорідну структуру, як на краях, так і в центрі пластини. Подібність морфології дуже важлива, оскільки існування температурних градієнтів під час зростання може поставити під загрозу бажану однорідність кінцевого алмазного покриття [19]. Середній розмір кристалів алмазу у площині покриття знаходиться в межах 5–30 мкм. З’ясовано, що середній розмір кристалів алмазу в покритті в

першу чергу визначається структурою застосованої полікристалічної алмазної заготовки різальної пластини. Мікроскопічні зображення поверхні зразків покриття (рис. 2) ілюструють вплив морфології поверхні різальних пластин на середній розмір кристалів алмазу в покритті.

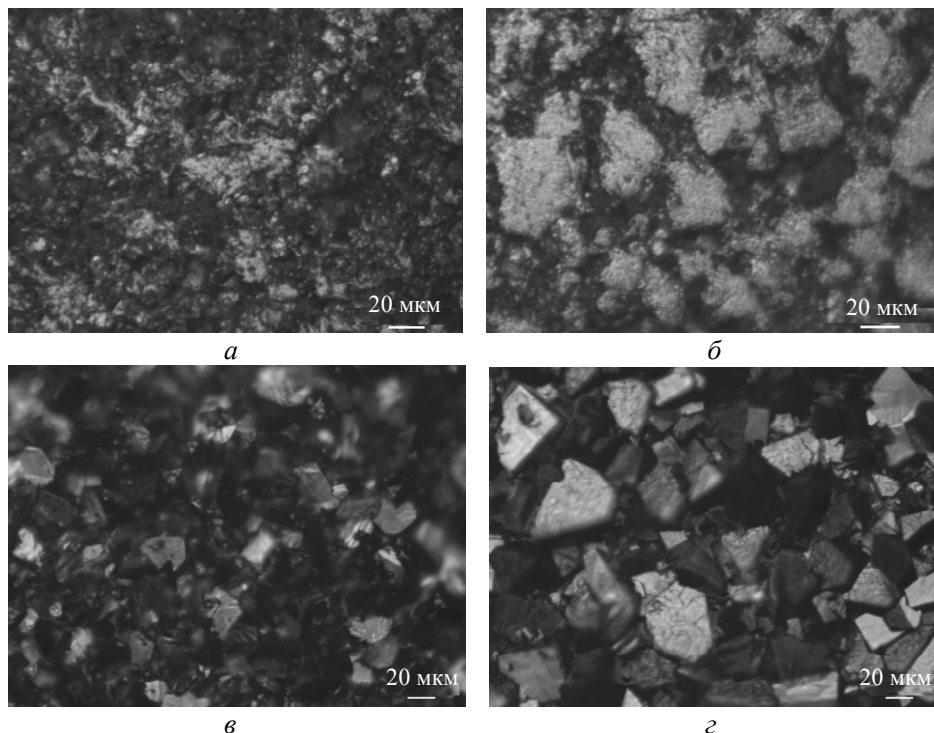


Рис. 2. Вихідні поверхні різальних пластин (*а, б*) та поверхні осаджених на них полікристалічних алмазних CVD-покриттів (*в, з*).

На рис. 2 *а, б* показано морфологія двох типів застосованих різальних пластин, а на рис. 2 *в, з* наведено відповідні структури покриттів, які були синтезовані на їхніх поверхнях. Видно, що для заготовки різальної пластини, яка сформована з більш крупних частинок (див. рис. 2, *б*), розмір алмазних зерен в покритті значно більший (див. рис. 2, *з*). Це цілком зрозуміло, оскільки морфологія алмазного покриття визначається можливістю епітаксійного росту алмазу на кристалах поверхонь різальних пластини. Використання полікристала синтетичного алмазу усуває найповільніший етап зростання алмазу у покритті – процес утворення двовимірних зародків і необхідність попередньої обробки поверхні росту з метою посилення нуклеації [12, 13, 20].

Головними параметрами, які визначають процес росту та структуру CVD-покриття, є тиск газової суміші, потужність збудження (яка визначає температуру газу), частка вуглеводнів у газовій суміші і температура підкладки [6–8, 21]. Аналіз морфології покриттів на поверхні різальних пластин показав, що в залежності від параметрів осадження середній розмір та переважна орієнтація кристалів алмазу в покритті дещо змінюються, причому зміна температури впливає сильніше, ніж парціальний тиск метану. За температури поверхонь різальних пластин 1060–1150 °С кристали алмазу в покриттях більш чітко ограновані з прямокутними або трикутними гранями мікрометрових розмірів (рис. 3, *а*). Внаслідок підвищення температури синтезу вище 1150 °С

великі кристаліти оточуються менш впорядкованими дрібними складовими (рис. 3, б), що може бути пов'язано як із вторинним зародкоутворенням алмазу, так і формуванням графітних форм вуглецю [9, 18].

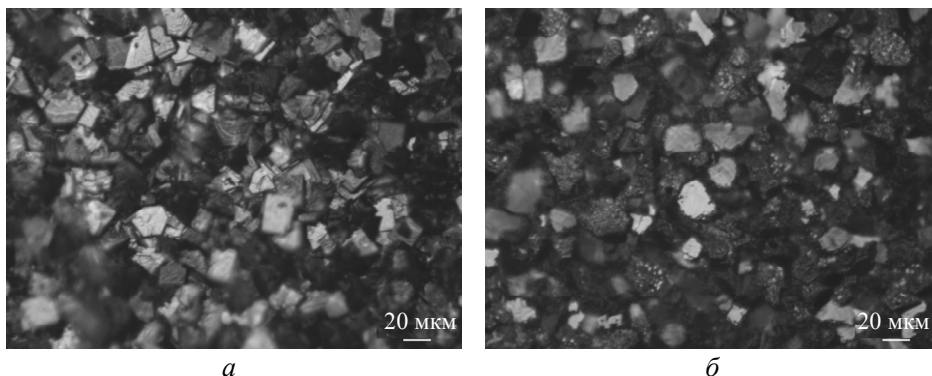


Рис. 3. Поверхні алмазних покриттів, отриманих за температури 1070 (а) та 1175 (б) °С.

Для проведення випробувань на зносостійкість було обрано зразки різальних пластин з алмазним покриттям товщиною біля 30 мкм з різною морфологією: крупнокристалічною (див. рис. 2, з, зразок 1), дрібнокристалічною (див. рис. 2, в, зразок 2) та дрібнокристалічною з вторинними зародками (див. рис. 3, б, зразок 3). Параметри осадження покриттів наведено у табл. 1.

Було проведено порівняння зносу інструменту, оснащеного різальними пластинами без покриття і пластинами з нанесеними на їхні робочі поверхні CVD-покриттями.

Під час точіння алюмінієвого сплаву не було визначено величину зносу інструменту як у разі наявності покриття, так і для інструменту без покриття. Ймовірно, це пов'язано з суттєво більш високими механічними σ , має місце різний стан контактних ділянок інструменту (рис. 4) – в області робочої кромки інструменту без покриття формується виражений шар перенесеного оброблюваного матеріалу, що обумовлено різницею морфології поверхонь вихідних різальних пластин і алмазного покриття. Різальний інструмент з покриттям дозволяє отримати меншу шорсткість обробленої поверхні виробів $Ra = 1,2$ і $1,9$ мкм для інструменту з покриттям та без покриття відповідно.

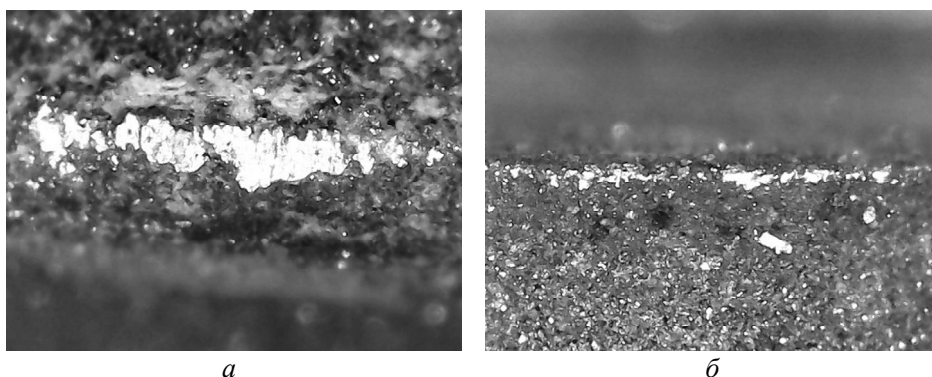


Рис. 4. Задні поверхні інструменту, оснащеного різальними пластинами без покриття (а) та з алмазним покриттям (б), після обробки алюмінієвого сплаву.

Після точіння керамічного зразка на задній поверхні інструменту спостерігали фаску зносу значної величини (табл. 2). Типові мікроскопічні зображення задньої поверхні інструментів наведено на рис. 5. Аналіз зображень контактних ділянок інструментів після випробувань свідчить про ідентичний характер зносу всіх зразків – рівномірний, однорідний без сколів та викришування. Інструменти з покриттям за межами контактної ділянки зберігають свою цілісність без тріщин або сколів, що свідчить про достатню міцність покриттів та їхню адгезію до поверхонь різальних пластин з полікристала синтетичного алмазу.

Таблиця 2. Параметри осадження та результати випробувань на зносостійкість інструменту із алмазним покриттям різної морфології

Зразок	Параметри осадження			Морфологія покриття	Ширина фаски зносу по задній поверхні інструменту h_3 , мм	
	P_{CH4} , 10^2 Па	W , Вт	T , °C		без покриття	з покриттям
1	2,2	3,0	1110	крупнокристалічна	0,98	0,56
2	2,7	3,3	1150	дрібнокристалічна	0,87	0,57
3	2,2	3,0	1175	дрібнокристалічна з вторинними зародками	0,77	0,83

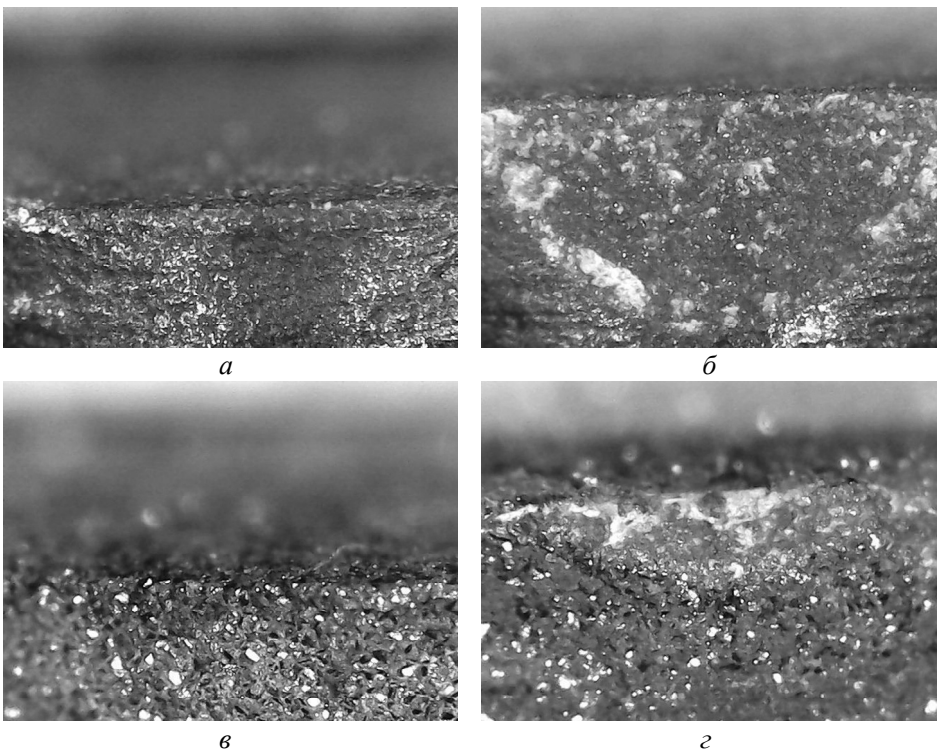


Рис. 5. Задні поверхні різального інструменту без покриття (*a*, *в*) та з алмазним покриттям (*б*, *г*) до (*a*, *б*) і після (*в*, *г*) точіння кераміки.

Середні значення ширини фаски зносу по задній поверхні інструменту наведено рис. 6.

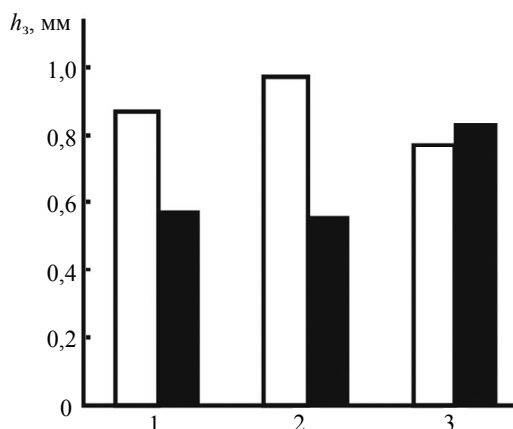


Рис. 6. Діаграма середніх значень зносу інструментів після точіння кераміки без покриття (□), з покриттям (■).

Для інструментів без покриттів ширина фаски зносу знаходиться в межах 0,77–0,98 мм. Для інструментів з покриттями (зразок 1 та 2) ширина фаски зносу складає 0,56 та 0,57 мм, відповідно, що менше ніж у інструментів без покриття у 1,52–1,75 рази. Для інструменту (зразок 3), застосуванні покриття практично не мають впливу на величину зносу різця. Це дозволяє заключити, що підвищення працездатності інструменту з полікристалів синтетичного алмазу під час точіння зразка з важкооброблюваної кераміки досягається завдяки нанесенню на різальні пластини, якими оснащений інструмент, покриттів, які мають чітко ограновані алмазні зерна, як з крупнокристалічною, так і з дрібнокристалічною морфологією. Ці покриття осаджуються за температури 1110–1150 °С. Підвищення температури синтезу покриттів до 1175 °С не дає подібного покращення зносостійкості інструменту.

ВИСНОВКИ

Досліджено процес CVD-синтезу покриття з полікристалічного алмазу на підкладці з полікристалічного алмазу, отриманого методом НР-НТ. Покриття синтезували у плазмі тліючого розряду постійного струму, що стабілізується поперечним магнітним полем, із воднево-метанової суміші за парціального тиску CH_4 в межах $(2,2\text{--}2,7) \cdot 10^2$ Па.

У процесі дослідження було виявлено, що за температури поверхні пластин в межах 1060–1150 °С формуються покриття з чітко огранованими кристалами алмазу мікрометрових розмірів з прямокутними або трикутними гранями. Внаслідок подальшого підвищення температури синтезу великі алмазні кристали оточуються менш впорядкованими дрібними складовими.

Проведено порівняльні випробування інструментів, оснащених різальними пластинами з полікристалічного синтетичного алмазу, у вихідному стані та з нанесеними алмазним покриттями. Алмазні покриття товщиною 30 мкм, осаджені на робочі поверхні різальних пластин за температури 1110–1150 °С забезпечують під час точіння алюмінієвого сплаву покращення якості оброблених поверхонь виробів, а для важкооброблюваної кераміки на основі Al_2O_3 – зменшення зносу у порівнянні з інструментом, оснащеним різальною пластинною з полікристала синтетичного алмазу у 1,52–1,75 рази, що поширює область використання та забезпечує підвищення ефективності використання інструментів із полікристалами алмазу. Підвищення температури синтезу

покриттів до 1175 °С сприяє формуванню покриття з гіршими експлуатаційними властивостями.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не фінансувалася із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

V. I. Gritsyna¹, K. I. Koshevoy¹, O. A. Opalev¹, E. N. Reshetnyak¹,
V. E. Strel'nitskij¹, A. O. Lyamtseva², A. O. Chumak²,
S. A. Klymenko², O. O. Bochechka², O. I. Chernienko²

¹National Scientific Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Cutting tool equipped with a synthetic diamond polycrystal with a polycrystalline diamond CVD coating

A thin protective polycrystalline diamond CVD coating for cutting tools equipped with polycrystalline synthetic diamond material obtained by the hp-ht method is proposed. The modes of deposition of the coating in a glow discharge plasma stabilized by a magnetic field were worked out. The coatings were synthesized in a hydrogen-methane mixture at a partial pressure of CH₄ in the range of (2.2–2.7)·10² Pa. The effect of the temperature of the polycrystalline diamond substrate during deposition on the structure of the synthesized coating was studied. It is shown that at temperatures in the range of 1060–1150 °C, the diamond crystals in the coatings are clearly faceted with rectangular or triangular faces of micrometer dimensions. A further increase in the synthesis temperature leads to the formation of less ordered small components on the surface of the formed large diamond crystals. At a deposition temperature of 1110–1150 °C, a pilot batch of cutting inserts made of polycrystalline diamond material with a CVD coating of polycrystalline diamond 30 μm thick was manufactured and the effect of the coating on the performance properties of tools equipped with these inserts during the finishing non-impact turning of aluminum alloy AK12M2MgN and technical ceramics MK90 was studied. It is shown that the presence of a coating on the tool during machining of an aluminum alloy allows obtaining machined surfaces with lower roughness, and during machining of technical ceramics, it increases the wear resistance of tools by 1.52–1.75 times, which extends the scope of use and provides an increase in the efficiency of tools equipped with superhard diamond polycrystals. The temperature of coating synthesis was limited to 1175 °C, exceeding which contributes to the formation of coatings with poorer performance properties.

Keywords: diamond, CVD coating, polycrystal, turning, tool wear.

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. Москва: Машиностроение, 2014. 608 с.
2. Grzesik W. Cutting tool materials. *Adv. Mach. Process. Met. Mater.* 2017. Vol. 2. P. 35–63.
3. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2017. Vol. 18. P. 1–9.
4. Köpf A., Feistritzer S., Udier K. Diamond coated cutting tools for machining of non-ferrous metals and fiber reinforced polymers. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2006. Vol. 24(5). P. 354–359.
5. Манохін А.С., Клименко С.А., Береснев В.М., Клименко С.Ан., Копейкіна М.Ю., Столбовой В.О., Литовченко С.В. Різальні інструменти з композитів на основі кубічного нітриду бору з покриттям. Київ: Наук. думка, 2023. 175 с.
6. Сергейчев К.Ф. Алмазные CVD-покрытия режущих инструментов (обзор). *Успехи прикладной физики.* 2015. Т. 3, № 4. С. 342–376.

7. Balmer R.S., Brandon J.R., Clewes S.L., Dhillon H.K., Dodson J.M., Friel I., Inglis P.N., Madgwick T.D., Markham M.L., Mollart T.P. Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications. *J. Phys. Condens. Matter*. 2009. Vol. 21, no. 36, art. 364221.
8. Suzuki K., Sawabe A., Yasuda H., Inuzuka T. Growth of diamond thin films by dc plasma chemical vapor deposition. *Appl. Phys. Lett.* 1987. Vol. 50. P. 728–729.
9. Hartmann P., Haubner R., Lux B. Deposition of thick diamond films by pulsed d.c. glow discharge CVD. *Diam. Relat. Mater.* 1996. Vol. 5, no. 6–8. P. 850–856.
10. Sciortino S., Lagomarsino S., Pieralli F., Borchì E., Galvanetto E. Polycrystalline diamond synthesis by means of high power pulsed plasma glow discharge CVD. *Diam. Relat. Mater.* 2002. Vol. 11, no. 3–6. P. 573–578.
11. Opalev O.A., Pashnev V.K., Kovalchuk I.K., Strel'nitskij V.E., Belous V.A., Kolupaeva Z.I. Synthesis of diamond coatings in a glow discharge stabilized by a magnetic field. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2000. No. 4. P. 158–164.
12. Vyrovets I.I., Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnjak E.N., Strel'nitskij V.E. X-ray diffraction study of the structure and stress state of diamond coatings obtained in a glow discharge. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2008. No. 1. P. 142–146.
13. Vyrovets I.I., Gritsyna V.I., Opalev O.A., Reshetnjak E.N., Strel'nitskij V.E. Using micro- and nanodispersive diamond for deposition of polycrystalline diamond films in glow discharge. *Phys. Surf. Eng.* 2007. Vol. 5, nos. 1–2. P. 87–93.
14. Vyrovets I.I., Grytsyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnjak E.N., Strel'nitskij V.E. Surface morphology and structure of nanocrystalline diamond films deposited in CH₄/H₂/Ar glow discharge plasma. *Funct. Mater.* 2009. Vol. 16, no. 2. P. 155–160.
15. Бочечка О.О., Петасюк Г.А., Черніснко О.І., Куш О.В., Гаврилова В.С., Гнатенко І.О., Гаращенко В.В. Вплив складу та властивостей алмазних порошків, синтезованих в системі Mg–Zn–C, на формування з них полікристалів під час спікання за високого тиску. *Інструментальне матеріалознавство*. 2021. Вип. 24. С. 237–249.
16. Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Strel'nitskij V.E. Using DC glow discharge for diamond coatings synthesis. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2018. No. 1. P. 93–95.
17. Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskij V.E. Peculiarities of diamond film synthesis by the glow discharge. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2018. No. 1. P. 96–100.
18. Haubner R., Kalss W. Diamond deposition on hardmetal substrates. Comparison of substrate pre-treatments and industrial applications. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2010. Vol. 28. P. 475–483.
19. Mallik A.K., Bysakh S., Sreemany M., Roy S., Ghosh J., Roy S., Mendes J.C., Gracio J., Datta S. Property mapping of polycrystalline diamond coatings over large area. *J. Adv. Ceram.* 2014. Vol. 3, no. 1. P. 56–70.
20. Koshevoy K.I., Volkov Y.Ya., Strel'nitskij V.E., Reshetnyak E.N. Structure of polycrystalline diamond coatings deposited by CVD method in the plasma of glow discharge with the use of puls power supply. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2021. No. 2. P. 113–118.

Надійшла до редакції 07.08.24

Після доопрацювання 19.09.24

Прийнята до опублікування 26.09.24