

УДК 621.921.34-492.2:539.89:621.762.5

О. О. Бочечка, С. А. Клименко, доктори технічних наук; **Т. О. Куриляк**, інж.;
С. М. Назарчук, Ю. О. Мельнічук, кандидати технічних наук;
В. М. Ткач, д-р фіз.-мат. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074 м. Київ, Україна, e-mail: bochchka@ism.kiev.ua*

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ АЛМАЗНИХ НАНОЧАСТИНОК ЗВ'ЯЗКАМИ W–C НА СПІКАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПЗИТУ АЛМАЗ–КАРБІД ВОЛЬФРАМУ

Показано, що використання розчиненої солі вольфрамвокислого амонію як середовища для приготування вихідної суміші нанопорошків алмазу та WO_3 покращує спікання нанокмпозиту алмаз–карбід вольфраму. В структурі спеченого композиту відсутні ділянки, в яких би були присутні агломерати частинок алмазу або сполук вольфраму. Твердість даного композиту в 1,2 рази перевищує твердість нанокмпозиту, отриманого без застосування розчинної вольфрамвомісної речовини. Різальний інструмент, оснащений виготовленими зразками композиту, має високу працездатність при обробці виробів із алюмінієво-кремнієвих сплавів, силіфікованого графіту, твердих сплавів.

***Ключові слова:** алмазні нанопорошки, високий тиск, спікання, вольфрамвокислий амоній, різальний інструмент.*

Вступ

В ІНМ ім. В. М. Бакуля розроблено спосіб одержання нанокмпозиту алмаз–карбід вольфраму шляхом спікання в умовах високих тиску та температури алмазного нанопорошку з добавками наночастинок вольфраму [1]. Суміші алмазних нанопорошків з вольфрамом були приготовані перемішуванням суспензій нанопорошків алмазу та оксиду вольфраму WO_3 та відпалюванням в атмосфері водню продукту, отриманого після висушування суспензії алмаз – оксид вольфраму.

Введення добавки металічного вольфраму до алмазних нанопорошків вказаним способом дозволило досягти рівномірного розподілу добавки по всьому об'єму порошку, що забезпечило реакційне спікання вольфраму з алмазом по границях алмазних наночастинок з утворенням стійкого карбїду та практично загальмувало процес графітизації алмазу. Проте при виготовленні великого об'єму зразків приготування суспензій значно ускладнює технологію приготування сумішей. Для удосконалення технології необхідно, перш за все, провести пошук способу максимального заповнення пор між алмазними наночастинками вольфрамвомісною речовиною.

Встановлено, що в присутності вольфраму відбувається зменшення швидкості окиснення алмазного нанопорошку [2] в результаті хімічного модифікування вольфрамом поверхні алмазних наночастинок – утворенням зв'язків W – O і зв'язків W – C, ідентифікованих методом ІЧ – спектроскопії [3].

Для інтенсифікації процесу модифікування поверхні алмазних наночастинок зв'язками W–C як рідину для приготування вихідних сумішей для спікання використовували розчинену в дистильованій воді сіль амонію вольфрамвокислого з масовою концентрацією розчину 1,87 %.

В даній роботі описано вплив такого модифікування на процеси ущільнення під дією високого тиску і високої температури сумішей для одержання нанокompозиту алмаз – карбід вольфраму та на його фізико-механічні і експлуатаційні властивості.

Методика експерименту

Взаємодія нанодисперсних порошків вольфрамовмісної зв'язувальної речовини з рідиною приводить до утворення суспензії. Змішування одержаної суспензії з алмазним порошком забезпечує однорідний розподіл в рідині частинок алмазу та зв'язувальної речовини. Оптимальна концентрація розчину для утворення стабільної суспензії складає 1,87 %. При зменшенні кількості рідини, тобто при більшій концентрації розчину, він стає перенасиченим і відбувається випадання в осад і агломерація. Одне з основних завдань полягало в уникненні утворення агломератів на етапі приготування суміші. Як варіант, було запропоновано в момент приготування використовувати ультразвуковий вплив, тобто змішування порошків відбувалося не лише в рідинному середовищі, а й при одночасному ультразвуковому опроміненні.

Для модифікування алмазного нанопорошку статичного синтезу ACM5 0,1/0 використовували амоній вольфрамвокислий $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17} \times 2,5\text{H}_2\text{O}$. Дана речовина погано розчинна у воді, тому при приготуванні розчину даної солі у дистильованій воді її підігрівали. Приготування суміші із алмазу та WO_3 робили з одночасною ультразвуковою дією, але у якості середовища використовували розчинену сіль амонію вольфрамвокислого. При формуванні суміші використовували порошок триоксиду вольфраму, який попередньо пройшов седиментаційне осадження. Отримані шляхом седиментації частинки WO_3 мали розмір менше 500 нм. З вихідного матеріалу робили суміш шляхом перемішування в рідинному середовищі з одночасною дією ультразвукового випромінювання. Суміш мала пастоподібний характер. Суміш готували упродовж 1 години, після чого її висушували у сушильній шафі за температури 110°C.

Наступним етапом експерименту було формування компактів з отриманих сумішей. Їхнє пресування проводили в сталій прес-формі при кімнатній температурі.

Проведення десорбції газів, фізично адсорбованих поверхнею нанопорошків, здійснювали шляхом термообробки у вакуумі сформованих з них компактів упродовж двох годин за температури 500 °C до тиску залишкових газів 10^{-3} Па. Відповідно до [4] при такій температурі з поверхні нанодисперсних алмазних порошків практично цілком видаляються фізично адсорбовані вода і CO_2 . Після цього компакти поміщали в комірку високого тиску апарату високого тиску (АВТ) та здійснювали її механічну герметизацію.

Склад вихідних сумішей та види їхніх обробок перед спіканням композитів алмаз – карбід вольфраму наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Склад вихідних сумішей на основі алмазного нанопорошку ACM5 0,1/0 та види їхніх обробок перед спіканням композитів алмаз – карбід вольфраму

№ п/п	Фазовий склад добавки	Вміст за масою, %	Відпал в атмосфері водню	Вакуумна дегазація
1	WO_2, WO_3	28,2	+	+
2	$\text{W}, \text{W}_2\text{C}, \text{WC}$	28,1	–	+
3	WC_{1-x}	14,8	–	+
4	W	24,2	–	+
5	$\text{WO}_3, (\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17} \times 2,5\text{H}_2\text{O}$	35,7	+	+

Спикання тривалістю 2,3–90 с в інтервалі температур 1500–1950 °С проводили в АВТ типу «тороїд» при початковому тиску 8 ГПа.

Густину зразків вимірювали методом гідростатичного зважування в дистильованій воді. Масу визначали за допомогою аналітичних терезів з точністю 0,005 мг. Похибка визначення густини складає $\pm 0,01$ г/см³ при надійності 0,95.

Вивчення структури зразків одержаного алмазного нанокompозиту проводили на растровому електронному мікроскопі (РЕМ) Zeis EVO 50XVP.

З експериментальної партії спечених заготовок з композитів «алмаз-WC» було виготовлено круглі пластини інструментального призначення діаметром 7,0 мм. Пластини мали задній кут 0; 7 і 11°, товщину 3,18 та 3,97 мм.

Для проведення досліджень було виготовлено токарні різці з механічним кріпленням змінних різальних пластин з «алмаз-WC», які забезпечували установку пластин з різними значеннями заднього кута.

Результати дослідження та їх обговорення

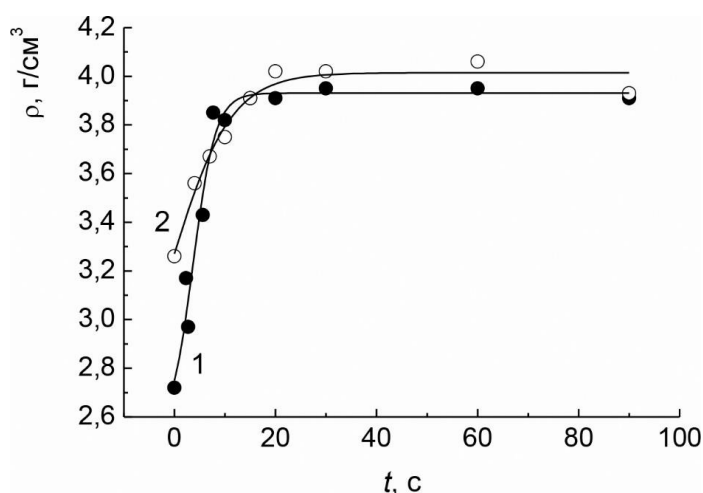


Рис. 1. Залежність від тривалості спікання густини зразків композитів, спечених в АВТ з сумішею алмазного нанопорошку ACM5 0,1/0 з нанопорошками вольфраму та його сполук: 1 – добавка № 2 в табл. 1, температура спікання 1880 °С; 2 – добавка № 5 в табл. 1, температура спікання 1900 °С

Було вивчено залежність густини зразків від тривалості спікання сумішей на основі алмазного нанопорошку статичного синтезу ACM5 0,1/0 з нанопорошками вольфраму, одержаними різними способами. (рис. 1).

На обох залежностях можна виділити два етапи: різке збільшення густини на першому і повільне ущільнення – на другому. При цьому пористість одержаних зразків зменшується (рис. 2) за експоненціальним законом, оскільки залежність логарифма пористості від часу описується лінійною функцією (рис. 3).

На нашу думку, основну роль в ущільненні вказаних сумішей відіграють процеси, пов'язані з переміщенням і деформацією

алмазних частинок, оскільки вміст добавок підібраний так, щоб зберігалися контакти алмаз – алмаз. Очевидно ці процеси суттєво не відрізняються від процесів, які відбуваються при спіканні в АВТ алмазних мікропорошків [5]. На першому етапі ущільнення упродовж 10–15 с відбувається різке зменшення пористості за рахунок взаємного ковзання частинок та розвитку процесів пластичної деформації, які викликають збільшення деформації ґратки. На другому етапі має місце повільне зменшення пористості. При цьому відбувається зниження рівня внутрішніх напруг у зразках алмазних полікристалів. Електронно-мікроскопічними дослідженнями виявлено, що пластична деформація частинок алмазу на першому етапі

проходить з утворенням скупчення дислокацій високої щільності, а також тонких двійників, що перетинаються.

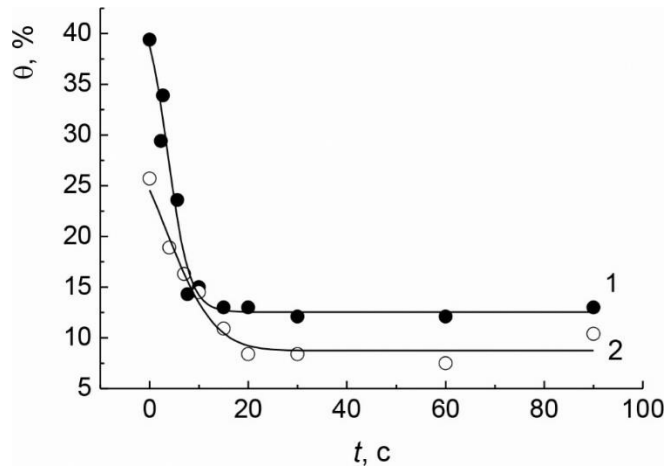


Рис. 2. Залежність від тривалості спікання пористості зразків композитів, спечених в АВТ з сумішею алмазного нанопорошку АСМ5 0,1/0 з нанопорошками вольфраму та його сполук: 1 – добавка № 2 в табл. 1, температура спікання 1880 °С; 2 – добавка № 5 в табл. 1, температура спікання 1900 °С

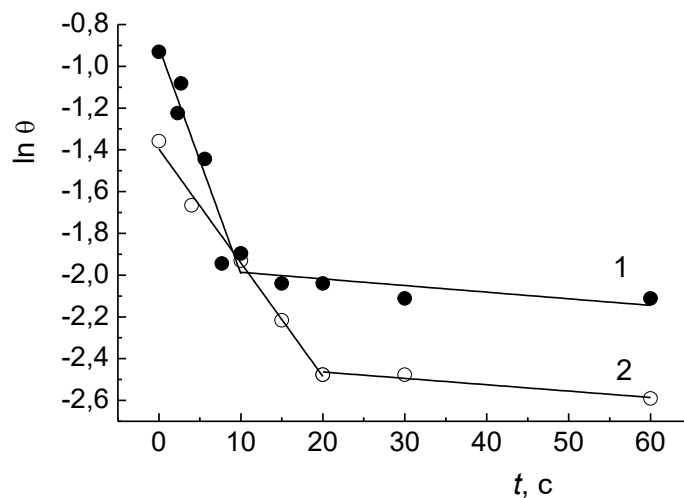


Рис. 3. Залежність від тривалості спікання логарифма пористості зразків композитів, спечених в АВТ з сумішею алмазного нанопорошку АСМ5 0,1/0 з нанопорошками вольфраму та його сполук: 1 – добавка № 2 в табл. 1, температура спікання 1880 °С; 2 – добавка № 5 в табл. 1, температура спікання 1790 °С

На другому етапі відбувається фазове перетворення алмаз→графіт в порах та в несучільних поверхнях контактів частинок, а також протікають процеси перебудови деформаційної субструктури в зернах шляхом взаємодії дислокацій та двійників [6].

Слід зазначити, що збільшення тривалості спікання до 90 с викликає деяке зменшення густини зразків композитів, (див рис. 3.11). Імовірно, це пов'язано з графітизацією алмазу після того, як вольфрам повністю прореагував як з алмазом, так і з оксигенвмісними

сполуками. Це викликає погіршення фізико-механічних характеристик композитів, тому застосування традиційних для порошкової металургії величин тривалості спікання від десятків хвилин до кількох годин для спікання композитів на основі алмазних нанопорошків недоцільне.

Як було показано в [1], показником ефективності добавок для покращення спікання алмазних нанопорошків є температурна залежність густини отриманих зразків. Так збільшення густини спечених композитів із збільшенням температури спікання в високотемпературній області спостерігається при спіканні нанопорошку УДА з добавкою вольфраму.

Виходячи з такого критерію та з отриманих температурних залежностей (рис. 4) для нанокompозитів алмаз – карбід вольфраму, спечених із сумішей, склад яких і способи обробки наведені в табл. 1, можна зазначити, що найбільш ефективно покращує спікання алмазного нанопорошку статичного синтезу введення до нього нанопорошку триоксиду вольфраму та розчинної вольфрамовмісної речовини в поєднанні з відпалом одержаної суміші в атмосфері водню.

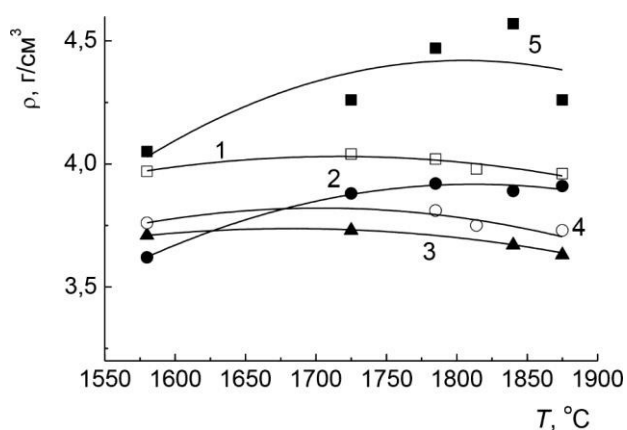


Рис. 4. Залежність від температури спікання густини зразків композитів, спечених в АВТ з сумішей алмазного нанопорошку АСМ5 0,1/0 з нанопорошками вольфраму та його сполук: 1 – 5 відповідає табл. 1; тривалість спікання 20 с

отриманих без застосування розчинної вольфрамовмісної речовини.

На рис. 5 показано структуру композиту, спеченого з вказаної суміші за 20 с за температури 1900 °C. Як видно з рисунка, в композиті відсутні ділянки, в яких би були присутні агломерати частинок алмазу або сполук вольфраму. Хоча спостерігаються певні коливання в концентрації елементів (табл. 2), проте вони лежать в межах 13 % для карбону і 15 % для вольфраму.

Твердість даного композиту складає 32 ГПа при навантаженні на індентор Кнупа 9,8 Н, що в 1,2 рази перевищує твердість нанокompозитів алмаз – WC,

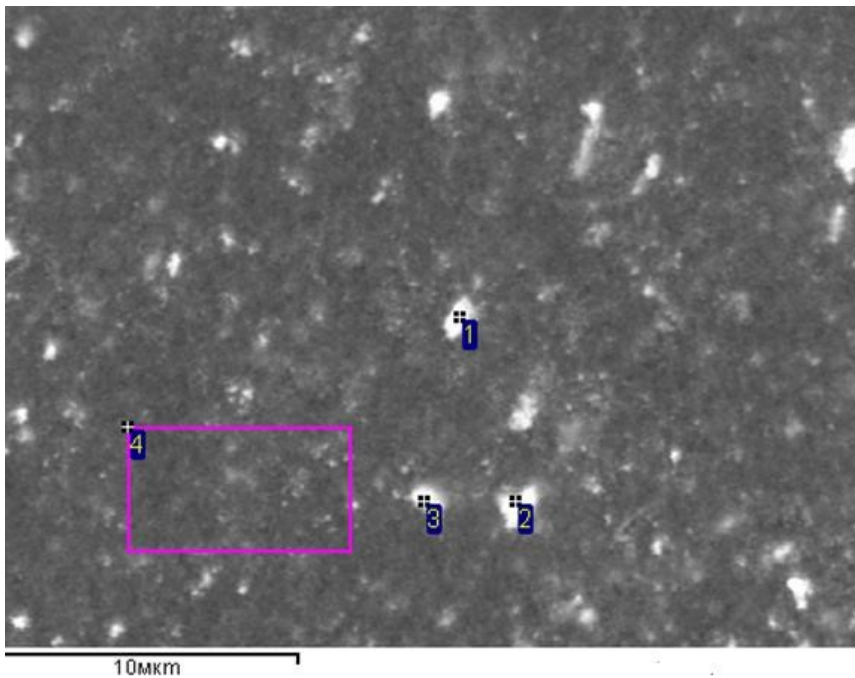


Рис. 5. Структура нанокompозиту алмаз – карбід вольфраму, спеченого із суміші алмазного нанопорошку статичного синтезу, нанопорошку триоксиду вольфраму та розчинної вольфрамівмісної речовини: цифрами позначено ділянки, на яких визначали елементний склад

Таблица 2. Вміст елементів в виділених ділянках нанокompозиту алмаз – карбід вольфраму

№ ділянки на рис. 4	Вміст елементів, % (за масою)				
	C	O	W	Pb	Сумарне значення
1	41,61	5,64	52,45	0,31	100,00
2	50,29	7,39	41,96	0,37	100,00
3	58,13	9,22	31,33	1,32	100,00
4	71,69	7,08	18,46	2,75	100,00
Середнє значення	55,43	7,33	36,05	1,19	100,00
Стандартне відхилення	12,77	1,47	14,54	1,14	
Максимальне значення	71,69	9,22	52,45	2,75	

Для дослідження можливості застосування розроблених композитів «алмаз–WC» були виготовлені втулки діаметром 60 мм та довжиною 80 мм з твердого сплаву BK15. Порівняння застосування інструмента, оснащеного композитами з «алмаз–WC», алмазно-твердосплавними пластинами (АТП) та композитом на основі КНБ борсиніт показало, що при швидкостях різання до 20 м/хв. не спостерігається суттєвої різниці у працездатності таких композитів. При подальшому підвищенні швидкості різання інтенсивність зношування інструменту з «алмаз–WC» значно нижча у порівнянні з інструментом з АТП (рис. 6).

Зношування інструменту з компоту «алмаз–WC» при точінні твердого сплаву ВК15 має абразивний характер. У процесі точіння переважно зношується задня поверхня з утворенням фаски зносу без суттєвого руйнування різальної кромки.

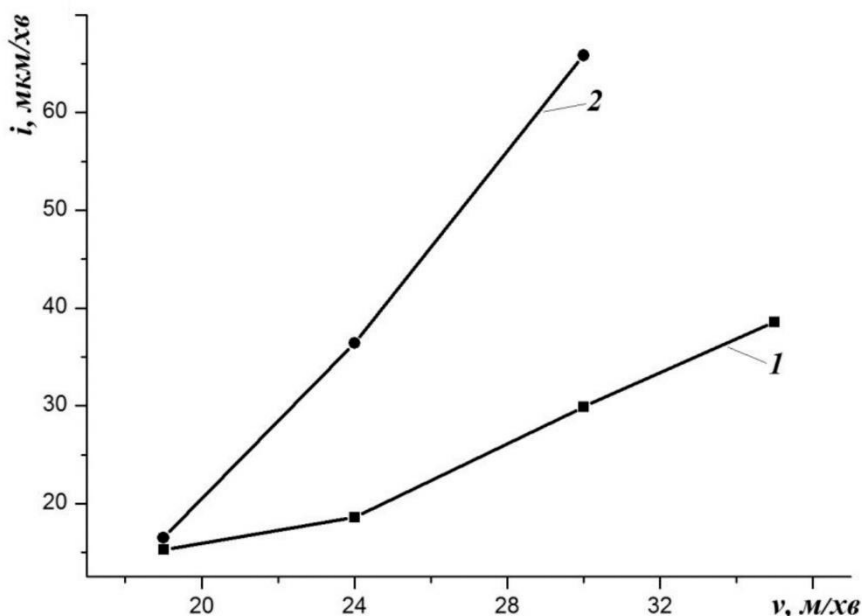


Рис. 6. Залежність швидкості зношування інструменту, оснащеного композитом «алмаз–WC» (1) та пластинами АТП (2) від швидкості різання при точінні твердого сплаву ВК15 (подача $S = 0,1$ мм/об; глибина різання $l = 0,2$ мм; $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 10^\circ$)

Проведені дослідження показали, що застосування інструменту з «алмаз–WC» дозволяє високоефективно оброблювати вуглеграфіт з високими швидкостями різання 300–350 м/хв. (обробка заготовки під втулку нерухому з вуглеграфіту АГ 1500-C05 ТУ 20-3-72). Детальні дослідження процесу обробки і визначення стійкості інструменту з «алмаз–WC» при точінні вуглеграфіту АГ 1500-C05 в лабораторних умовах не проводилися через високу стійкості такого інструменту.

Із застосуванням пластин з «алмаз–WC» було досліджено перспективність обробки деталей, які виготовляються із силікованого графіту, зокрема втулок підшипників до дизельних турбодвигунів. Заготовки для втулок (зовнішній діаметр 17,2 мм) виготовляються з матеріалу СГП ТУ 147-54-94 (SiC – 74,81%, кремній вільний – 17,18 %, твердість 70–72 НРС).

Для порівняльної оцінки проводили обробку торців. Після п'яти проходів ($n = 800$ м/хв.; $S_{\text{попер}} = 0,025$ мм/об; $h = 0,25$ мм) зношування задньої поверхні різальних пластин АТП і «алмаз–WC» одного форморозміру виявилось приблизно однаковим $h_3 = 0,35$ мм. При обробці втулок діаметром 30 мм підвищення числа обертів верстата від 350 до 630 об/хв. при інших постійних параметрах ($S_{\text{попер}} = 0,050$ мм/об; $l = 0,20$ мм, 4 проходи) не привело до істотного зростання величини зношування інструменту з «алмаз–WC» ($h_3 = 0,40$ – $0,45$ мм). Аналіз отриманих результатів показує, що для підвищення продуктивності попередню обробку силікованого графіту рекомендується проводити на наступних режимах: $v = 50$ – 60 м/хв.; $S = 0,14$ – $0,17$ мм/об; $l = 0,1$ – $0,25$ мм.

При обробці алюміній-кремнієвих сплавів спостерігається повільне регулярне зношування пластин з композиту «алмаз–WC», інтенсивність якого визначається вмістом кремнію. Стійкість таких різців при обробці алюмінієвих сплавів становить сотні годин, тому проведення стійкісних досліджень в лабораторних умовах пов'язане із значними труднощами.

При обробці поршнів двигунів внутрішнього згоряння з алюмінієво-кремнієвого сплаву АЛ25 (ГОСТ 2685-75) в широкому діапазоні швидкостей різання (160–700 м/хв.) спостерігається утворення наросту (особливо інтенсивно в діапазоні невисоких швидкостей різання) і налипання на передній поверхні інструменту оброблюваного матеріалу, що призводить до зростання висотних параметрів шорсткості обробленої поверхні.

Застосування мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ дозволяє істотно поліпшити якість обробленої поверхні. Так, при обробці поршнів ДВЗ інструментом з «алмаз–WC» діаметром 7,00 мм ($\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$) з використанням 3–5% розчину концентрату напівсинтетичної водорозчинної МОТС "Трибол" і вакуумного масла ВМ6 інтенсивного наростоутворення не спостерігалось, а шорсткість обробленої поверхні в порівнянні із «сухим» точінням знижувалася з Ra 1,2 до 0,8 мкм.

Велике значення при обробці кольорових сплавів має вибір геометричних параметрів інструменту. Використання інструменту ($v = 570$ м/хв.; $S = 0,05$ мм/об; $l = 0,2$ мм; МОТС) оснащеного круглими пластинами «алмаз–WC» діаметром 7,00 мм з геометричними параметрами інструменту $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 11^\circ$ дозволяє стабільно отримувати поверхні з Ra 0,45–0,52. Збільшення від'ємного значення переднього кута також призводить до значного зростання шорсткості обробленої поверхні.

Використання круглої пластини діаметром 7 мм за рахунок її поворотів забезпечує 6–8 періодів стійкості на кожній пластині, стабільну шорсткість обробленої поверхні. При обробці ділянок поршнів з канавками під компресійні кільця і отвір під шатунний палець інструмент працює з ударними навантаженнями. При точінні поршнів на ріжучих пластинах «алмаз–WC» ($\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 11^\circ$, $v = 570$ м/хв.; $S = 0,05$ мм/об; $l = 0,2–0,3$ мм) не спостерігаються сколювання, викликані дією ударних навантажень, що свідчить про високу ударостійкість такого інструменту при обробці алюмінієво-кремнієвих (силумінових) сплавів.

Істотно на шорсткість поверхні впливає поздовжня подача, зі зростанням якої спостерігається погіршення якості поверхні. Тому для досягнення високої якості поверхні чистову обробку деталей з силумінових сплавів рекомендується проводити з подачами 0,02–0,05 мм/об.

Збільшення глибини різання в діапазоні 0,05–0,5 мм не приводить до істотного зростання параметра Ra . Швидкість різання в широкому діапазоні (160–570 м/хв.) її значень суттєво не впливає на шорсткість обробленої поверхні при обробці силумінових сплавів.

Висновки

1. Виходячи з отриманих температурних залежностей густини нанокompозитів алмаз – карбід вольфраму, спечених із сумішей, які відрізняються складом вихідних вольфрамівмісних речовин і способами обробки, можна зазначити, що найбільш ефективно покращує спікання алмазного нанопорошку статичного синтезу введення до нього нанопорошку триоксиду вольфраму та розчинної вольфрамівмісної речовини в поєднанні з відпалом одержаної суміші в атмосфері водню та вакуумною дегазацією.

2. В структурі композиту, спеченого з вказаної суміші за 20 с за температури 1900 °С і тиску 8 ГПа, відсутні ділянки, в яких би були присутні агломерати частинок алмазу або сполук вольфраму. Відхилення в концентрації елементів лежать в межах 13 % для карбону і 15 % для вольфраму. Твердість даного композиту при навантаженні на індентор Кнупа 9,8 Н складає 32 ГПа, що в 1,2 рази перевищує твердість нанокompозитів алмаз – карбід вольфраму отриманих без застосування розчинної вольфрамівмісної речовини.

3. Різальний інструмент, оснащений виготовленими зразками композиту має високу працездатність при обробці виробів із алюмінієво-кремнієвих сплавів (типу АЛ25), силіфікованого графіту, твердих сплавів. У залежності від оброблюваного матеріалу і режимів різання при точінні різцями, оснащеними зразками композиту алмаз-WC, досягається шорсткість оброблюваної поверхні Ra 0,35-0,80.

4. Створені інструменти при точінні виробів із алюмінієво-кремнієвих сплавів при високих швидкостях різання (500-700 м/хв.) дозволяють проводити як безударну обробку, так і обробку з динамічними навантаженнями.

5. Інтенсивність зношування інструментів з розробленого композиту при високопродуктивному ($v = 30-40$ м/хв.) точінні твердого сплаву ВК15 на 30-35 % нижча у порівнянні з інструментами, оснащеними алмазно-твердосплавними пластинами.

Показано, что использование растворенной соли вольфрамвокислого аммония в качестве среды для приготовления исходной смеси нанопорошков алмаза и WO_3 улучшает спекания нанокompозита алмаз-карбид вольфрама. В структуре спеченного композита отсутствуют участки, в которых бы присутствовали агломераты частиц алмаза или соединений вольфрама. Твердость данного композита в 1,2 раза превышает твердость нанокompозита, полученного без применения растворимого вольфрамсодержащего вещества. Режущий инструмент, оснащенный изготовленными образцами композита, имеет высокую работоспособность при обработке изделий из алюминийево-кремниевых сплавов, силицированного графита, твердых сплавов

Ключевые слова: алмазные нанопорошки, высокое давление, спекание, вольфрамвокислый аммоний, режущий инструмент.

O. O. Bochechka, S. A. Klimenko, T. O. Kuryliak, S. M. Nazarchuk, Yu. O. Melniichuk, V. M. Tkach
INFLUENCE OF MODIFICATION OF THE DIAMOND NANOPARTICLES
SURFACE BY W-C BOND ON SINTERING AND PROPERTIES OF NANOCOMPPOSITE
DIAMOND-TUNGSTEN CARBIDE

It is shown that the use of a dissolved ammonium tungstate salt as a medium for the preparation of the initial mixture of diamond nanopowders and WO_3 improves the sintering of the diamond -tungsten carbide nanocomposite. There are no sections in the structure of the sintered composite in which agglomerates of diamond particles or tungsten compounds were present. The hardness of this composite is 1.2 times that of a nanocomposite obtained without using a soluble tungsten-containing substance. The cutting tool, equipped with manufactured samples of the composite, has a high working capacity when processing products from aluminum-silicon alloys, silicified graphite, and hard alloys

Key words: diamond nanopowders, high pressure, sintering, ammonium tungstate, cutting tool.

Література

1. Пат. на винахід № 93803 Україна, М. кл.6 МПК, В24D 3/02, В22F 3/14. Спосіб отримання алмазного композиційного матеріалу / М. В. Новіков, О. О. Бочечка, С. М. Назарчук, В.С. Гаврилова, Г. С. Олейник, Л. А. Романко, І. А. Свешніков, С. Д. Заболотний. – Опубл. 10.03.11; бюл. № 5.

2. Вплив вольфраму на кінетику окиснення алмазного нанопорошку / В. Я. Забуга, О.О. Бочечка, Г. Г. Цапюк та ін. // Сверхтвердые материалы. – 2016. – №1. – С. 12 – 23.
3. Kurylyak T.O., Bochechka O.O., Kutsay O.M. The influence of tungsten additives on the functional covering of diamond nanopowder ACM 5 0,1/0 // Scientific works of 16-th Int. Young Scientists Conf. “Optics and High Technology Material Science” (SPO 2015, 22-25 October 2015), Kyiv, Ukraine. – Kyiv: AP 18, 2015. – P. 68 – 69.
4. Nozhkina A. V., Kolchemanov N. A., Kardanov A. A., and Dyatkov P. Ya. Physicochemical properties of dynamically synthesized diamond // Journal of Superhard Materials. - 2000. - N 1. - P. 78-84.
5. Bochechka A. A. and Lutsenko A. N. Kinetics of high pressure compaction of diamond powder at different temperatures // Journal of Superhard Materials. – 2002. –N 1. – P. 67–81.
6. Пилянкевич А. Н., Олейник Г.С., Бритун В.Ф. Структурообразование поликристаллических однокомпонентных алмазных материалов // Высокие давления и свойства материалов. – Киев: ИПМ АН УССР, 1988. – С. 10–18.

Надійшла 26.07.18

References

1. Novikov, M. V., Bochechka, O. O., Nazarchuk, S. M., Havrylova, V. S., Oleinyk, H. S., Romanko, L. O., Svieshnikov, I. A., Zabolotnyi, S. D. (2011). Patent of Ukraine 93803.
2. Zabuha, V. Ya., Bochechka, O. O., Tsapyik, H. H., et al. (2016). Vplyv volframu na kinytyku okysnenniaalmaznoho nanoporoshku [Effect of tungsten on the oxidation kinetics of diamond nanopowder]. *Sverkhtverdye materialy. – Superhard materials, 1*, 12–23 [in Ukrainian].
3. Kurylyak, T. O., Bochechka, O. O., Kutsay, O.M. The influence of tungsten additives on the functional covering of diamond nanopowder ACM 5 0,1/0. Proceedings’15: Scientific works of 16-th Int. Young Scientists Conf. “Optics and High Technology Material Science” (SPO 2015, 22-25 October 2015), (pp. 68–69). Kyiv.
4. Nozhkina, A. V., Kolchemanov, N. A., Kardanov, A. A., and Dyatkov, P. Ya. (2000). Physicochemical properties of dynamically synthesized diamond. *J. of Superhard Materials, 1*, 78-84.
5. Bochechka, A. A. and Lutsenko A. N. (2002). Kinetics of high pressure compaction of diamond powder at different temperatures. *J. of Superhard Materials, 1*, 67–81.
6. Piliankevich, A. N., Oleinik, G. S., Britun, V. F. (1988). Strukturnoobrazovanie polikristallicheskikh odnokomponentnykhalmaznykh materialov [Structure formation of polycrystalline single-component diamond materials]. *Vysokie davleniia i svoiustva materialov. – High pressure and material properties*, 543–550 [in Russian].