

Структура, склад та властивості азотованих сплавів після дифузійної металізації

В.Г. Хижняк¹, Г.Ю. Калашніков¹, Н.А. Харченко², Т.П. Говорун²,
О.В. Хижняк¹, В.Ю. Долгих³, О.О. Голишевський²

¹ Національний технічний університет України «КПІ», просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

² Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

³ Компанія «SECO TOOLS», вул. Бйорбаксваген, 10, SE-73782 Фагерста, Швеція

(Отримано 16.11.2015; опубліковано online 10.12.2015)

Досліджена можливість отримання на сталі 9ХС та твердому сплаві ВК6 багатопшарових покриттів поєднанням азотування в середовищі аміаку з наступним титаноалітуванням в порошковій суміші в контейнерах з плавким затвором. Бар'єрна композиція шарів TiC, TiN позитивно впливає на фазовий і хімічний склад покриттів, гальмує утворення шару Fe₃(Al) на сталі 9ХС та зони з підвищеним вмістом алюмінію та кисню на твердому сплаві ВК6. Азототитаноалітування сприяє зростанню абразивної зносостійкості сталі 9ХС і стійкості багатопшарних твердосплавних непереточуваних пластин ВК6.

Ключові слова: Покриття, Титаноалітування, Азототитаноалітування, Карбіди, Нітриди, Інтерметаліди, Мікротвердість, Зносостійкість.

PACS numbers: 61.46. – w, 62.20.Qr, 62.20. – x, 68.55.Nq

1. ВСТУП

Технічний прогрес потребує підвищення параметрів експлуатації інструментів, оснастки, виробів, деталей машин. Таким чином, зростають вимоги до інструментальних та конструкційних сталей та твердих сплавів, які в процесі експлуатації піддаються зношуванню, контактним навантаженням, дії високих температур, корозійному руйнуванню. Аналіз причин виходу з ладу виробів показав що в більшості випадків руйнування починається з поверхневих зон матеріалу. Найбільш раціональним способом підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин та інструментів є створення на робочих поверхнях покриттів з необхідним комплексом властивостей.

Інструментальні сталі та тверді сплави з покриттями мають, як було показано в роботах [1-5], велику групу переваг. Сталеві та твердосплавні інструменти з покриттями служать в 2-10 разів довше в порівнянні з вихідними, що головним чином залежить від виду покриття, вихідного сплаву, від області застосування покритого інструменту, а також від умов експлуатації. Інструмент, на який нанесене покриття, сприяє зростанню продуктивності праці за рахунок експлуатації при більш високих швидкостях різання, що зростають на 25-90 % без скорочення терміну експлуатації в порівнянні з інструментом без покриття.

На більшості деталей після обробки інструментами з покриттями, поверхня стає більш гладкою, що зменшує знос, зменшує силу тертя в парі інструмент – деталь і, таким чином, збільшує термін експлуатації інструментів [6-11]. Крім того покриті інструменти нагріваються в зоні контакту до більш низьких температур, ніж непокриті.

Додаткову економію ресурсів забезпечують зменшення часу для заміни інструментів і відповідно зменшення часу для простою, а також зменшення вартості робіт з механічної обробки [2, 6, 10, 12].

Вважається, що для зростання продуктивності праці більш раціонально збільшувати швидкість різання та подачу. Такі умови різання можна застосовувати для інструментів з захисними покриттями.

При використанні пластин після ХТО відмічається збільшення терміну їх служби [1, 3, 5].

2. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Підвищення стійкості інструментів з покриттями зумовлено високою твердістю матеріалу покриття, яка поєднана з необхідною міцністю і твердістю матеріалу основи. Крім того, покриття відіграють бар'єрні функції. Це значно зменшує дифузійну взаємодію між інструментом і деталями, які оброблюють, і киснем повітря. Це в результаті сприяє зростанню зносостійкості, гальмує лункоутворення, знижує температуру різання.

На теперішній час відомі кілька методів нанесення покриттів на інструментальні сталі та тверді сплави. До основних можна віднести методи хімічного та фізичного осадження з газової фази та хіміко-термічну обробку, до якої входять: дифузійні азотування, борування, титанування, ванадіювання тощо [1-2, 7, 13-18]. Згадані методи дають можливість наносити на вироби одно- та багатопшарові покриття. В якості покриттів на інструментальних сталях та твердих сплавах використовують карбід титана TiC, нітрид титана TiN, оксид алюмінію Al₂O₃. Знайшли використання бориди заліза (Fe₂B, FeB), карбід та нітрид гафнія (HfC, HfN), карбіди хрому (Cr₇C₃, Cr₂₃C₆), карбіди та нітриди ванадію (V₂C, VC, VN) і інші.

Покриття на основі TiC, твердість яких на сталях та твердих сплавах досягає 30,0-43,5 ГПа, забезпечує високу зносостійкість в різних умовах тертя, низький коефіцієнт тертя, виконує при контактній взаємодії бар'єрні функції. Покриття TiN більш тверде ніж WC, але поступається за твердістю карбіду TiC. Нітрид TiN має коефіцієнт тертя із сталлю нижчий, ніж TiC. Покриття оксиду Al₂O₃ має при низьких температурах твердість, вищу за твердість TiN, але нижчу за твердість TiC. Однак при високих температурах за умов швидкісного різання Al₂O₃ із згаданих сполук має найбільш високу твердість. Крім того, Al₂O₃ сама хімічно стабільна сполука в покриттях при високих

температурах, що робить її стійкою до лункуутворення [12].

Вибір раціонального розташування окремих шарів в покриттях визначається складом основи та умовами експлуатації. Найбільш відома комбінація шарів в покриттях на твердих сплавах, отриманих методом хімічного осадження з газової фази, Al_2O_3 , TiN , TiC дає можливість отримати на поверхні максимальну хімічну стабільність в сполученні із стійкістю до лункуутворення.

За якістю, стабільністю властивостей, адгезією з основою покриття після хіміко-термічної обробки мають перевагу серед інших сучасних методів нанесення покриттів [1-2, 13]. В останні роки з'явилися методи, які поєднують кілька способів. В роботі [16] показана можливість отримання на вуглецевих сталях та твердих сплавах покриття з шарів TiN , TiC шляхом послідовної реалізації процесів азотування і титанування. Азотування і титаноалітування сталі 12X18H10T приводить до утворення багатшарових покриттів TiN , інтерметалідів, Al_2O_3 [5, 19]. Слід зазначити, що титаноалітування вуглецевих сталей супроводжується формуванням покриттів, у яких обов'язковою складовою є шар на основі α -заліза, легований алюмінієм. Цей шар невеликої мікротвердості і значної товщини розташований між основою і шаром TiC . Цілком зрозуміло, що утворена композиція шарів $Fe_\alpha(Al) - TiC$ буде мати незадовільні властивості. При високих температурах позитивний вплив алюмінієвого шару $Fe_\alpha(Al)$ буде гальмуватися шаром TiC , а в умовах контактного навантаження твердий шар TiC буде продавлюватися і руйнуватися.

Можливість отримання на сталі 9XC та твердому сплаві ВК6 покриттів за участю шарів сполук TiC , TiN , Al_2O_3 шляхом азотування з наступним титаноалітуванням, визначення їх фазового та хімічного складів, структури й властивостей і є метою роботи. Тому робота є актуальною.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На першому етапі обробки зразки інструментальної сталі 9XC і твердого сплаву ВК6 азотували відомим способом [13] в середовищі дисоційованого аміаку при температурі 540 °C впродовж 20 годин. Титаноалітування відбувалось в суміші порошків Ti (35 % мас); Al (10 % мас); Al_2O_3 (50 % мас); NH_4Cl (5 % мас) в контейнерах з плавким затвором при температурі 1050 °C впродовж 4 годин. Титанування проводили за умов зниженого тиску в середовищі дисоційованого чотирихлористого вуглецю. Фазовий та хімічний склад, структуру, мікротвердість визначали методами сучасного фізичного матеріалознавства [14].

Результати досліджень фазового та хімічного складів, структури, мікротвердості наведені в таблиці 1 і рис. 1, 2. Для порівняння були проведені дослідження фазового складу, мікротвердості зразків після титанування за методикою [1].

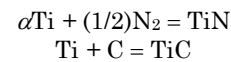
Результати досліджень фазового складу, будови азотованих шарів на сталі 9XC і твердому сплаві ВК6 добре відповідають відомим [13, 20, 21]. На поверхні сталі 9XC після азотування утворюється нітридна зона сполук Fe_2N , Fe_4N та оксиду Fe_3O_4 . Бли-

жче до основи розташована зона внутрішнього азотування, яка складається з α -твердого розчину азоту в залізі, нітридів та карбонітридів в основі.

Фазовий склад та структура поверхневих зон після азотування сплаву ВК6 практично не змінюється. Кобальт, відповідно до діаграми стану $Co-N$, може утворювати нітриди Co_3N та Co_2N , які в покритті виявлені не були. Мікрорентгеноспектральним аналізом було показано, що азот при азотуванні розчиняється в кобальтовій зв'язці і проникає за прийнятних умов в основу на 200-220 мкм.

Дослідження фазового складу дифузійних покриттів №1-8 та відомих з літературних джерел, отриманих при однокомпонентному насиченні перехідними металами IV-VI груп періодичної системи, багатоконпонентному насиченні титаном та алюмінієм, титаном та кремнієм тощо [1, 13, 14], дозволили зробити висновок, що формування шарів фаз проникнення відбувається в основному за участі вуглецю, азоту основи шляхом екстрагування їх до поверхні.

Аналіз вільної енергії утворення нітриду TiN , карбиду TiC за реакціями:



показав, що вірогідність утворення нітридної фази вища за карбідну. Таким чином на сталі 9XC і твердому сплаві ВК6 першим утворюється шар TiN . Композиція шарів TiN , TiC , їх хімічний склад та мікротвердість визначаються складом основи.

Необхідно також відзначити бар'єрні функції композиції шарів TiN , TiC . Відомо [13, 22], і це знайшло підтвердження в даній роботі (покриття № 3, 4; табл. 1), що титаноалітування вуглецевих сталей і твердих сплавів супроводжується формуванням покриття за участю шару карбиду TiC й шару $Fe_\alpha(Al)$ – на сталях; шару TiC та зони зі значним вмістом алюмінію та кисню – на твердому сплаві. В роботі встановлено, що двошарова композиція TiC , TiN блокує проникнення в сталь та твердий сплав не тільки алюмінію, але і кисню. Товщина шарів TiC в покриттях № 5-7 менша ніж в покриттях № 1-4. Останнє пов'язано з бар'єрною дією шару TiN , який гальмує дифузію вуглецю основи, необхідного для утворення TiC , до поверхні. Подібним чином бар'єрний шар гальмує рух до поверхні заліза сталей і в меншій мірі кобальту твердого сплаву. Відвід кобальту до поверхні покриття із зони під шарами TiN , TiC унеможливило утворення шару сполук Co_3W_3C , Co_6W_6C .

Мікроструктурно азототитаноалітовані покриття (покриття № 7, 8; рис. 1, 2) на сталі 9XC і твердому сплаві ВК6 виявляються в вигляді сірих, світлосірих шарів з добре вираженою майже прямою лінією розділу (рис 1, 2). В оптичний мікроскоп шар нітриду TiN має жовто-золотавий колір і тому легко ідентифікується.

До позитивних властивостей азототитаноалітованих покриттів слід віднести високу мікротвердість (табл. 1). В першу чергу це стосується шарів карбиду TiC – 38,5 ГПа та нітриду TiN – 20,5 ГПа; а також шарів оксидів $Fe_2(Ti, Al)_4O$ – 15,5 ГПа. Висока твер-

Таблиця 1 – Фазовий склад і властивості покриттів на сталі 9ХС і твердому сплаві ВК6

Вихідний сплав	№ покриття	Вид ХТО t °С, час год.	Зона покриття	Фазовий склад	Період кристалічної ґратки, нм	Товщина покриття, мкм	Мікротвердість, ГПа
Сталь 9ХС	1	Титанування 1050; 4	Зона сполук	Fe ₂ Ti	$a = 0,4703$ $c = 0,7696$	2,5	8,1
				TiC	$a = 0,4330$	16,0	32,4
Твердий сплав ВК6	2	Титанування 1050; 2	Зона сполук	CoTi	–	0,5	–
				TiC	$a = 0,4320$	6,0	31,0
				Co ₃ W ₃ C	–	0,5	–
Сталь 9ХС	3	Титаноалітування 1050; 4*	Зона сполук	Fe ₂ (Ti, Al) ₄ O	$a = 1,1290$	22,5	8,6
				TiC	$a = 0,4301$	16,0	38,9
			Перехідна зона	Fe _α (Al)	$a = 0,2871$	48,0-50,5	2,1-2,8
Твердий сплав ВК6	4	Титаноалітування 1050; 2*	Зона сполук	AlCoTi ₂ (Ti, Al)Co ₂	$a = 0,2950$	8,0	11,0
				TiC	$a = 0,4295$	7,0	29,5
			Перехідна зона	WC, Me ₂ O ₃	–	8,0	–
				WC, Co(Al)	–	13,0	–
Сталь 9ХС	5	Азототитанування 1050; 4	Зона сполук	FeTi	$a = 0,2982$	4,0	–
				TiC	$a = 0,4321$	8,5	35,0
				TiN	$a = 0,4259$	5,5	26,5
Твердий сплав ВК6	6	Азототитанування 1050; 2	Зона сполук	TiC	$a = 0,4320$	2,5	32,5
				TiN	$a = 0,4224$	5,0	26,0
Сталь 9ХС	7	Азототитаноалітування 1050; 4*	Зона сполук	Fe ₂ (Ti, Al) ₄ O	$a = 1,1298$	15,5	13,5
				TiC	$a = 0,4326$	6,0	38,5
				TiN	$a = 0,4228$	6,5	20,5
Твердий сплав ВК6	8	Азототитаноалітування 1050; 2*	Зона сполук	AlCoTi ₂	$a = 0,2982$	11,0	8,5-9,0
				TiC	$a = 0,4321$	3,5	36,5
				TiN	$a = 0,4224$	3,0	22,1

* – на поверхні титаноалітованих та азототитаноалітованих покриттів виявлена сполука Al₂O₃

дість сполуки Fe₂(Ti, Al)₄O (покриття №7) в порівнянні із сполукою покриття №3 зумовлено, вірогідніше за все, легуванням при титаноалітуванні азотом. Останнє припущення підтверджується результатами мікрорентгеноспектрального аналізу, які показали присутність в шарі Fe₂(Ti, Al)₄O азоту на рівні 0,1-0,5 % мас. Характерний розподіл мікротвердості з максимально твердим шаром в центрі покриття можна вважати позитивним. Треба також зазначити присутність на зовнішній стороні покриття сполуки Al₂O₃, яка крім високої твердості сприяє жаростійкості та виконує бар'єрні функції.

Зносостійкість сталі 9ХС з покриттями № 1, 3, 5, 7 (табл. 1) досліджували в умовах абразивного зношування вільним абразивом за методикою [1]. Результати досліджень сталі 9ХС у вихідному стані (гартування та низькотемпературний відпуск, твердість 61-63 HRC) та з покриттями наведено на рис. 3.

Отримані дані показали, що в порівнянні зі сталлю без обробки зносостійкість сталі 9ХС з покриттями зростає в 2,0-5,5 разів.

Ефект підвищення абразивної зносостійкості зумовлений, як високою твердістю окремих шарів покриття, так і особливостями структури. В порядку збільшення зносостійкості досліджені в роботі покриття за способами нанесення можна розташувати наступним чином: титаноалітування – титанування – азототитанування – азототитаноалітування.

Встановлено, що під час випробувань впродовж 200-300 с покриття руйнується в місці найбільшого контакту до основи. При подальшому випробуванні зношується композиція «покриття – основа». В азототитаноалітованих покриттях (покриття №7, табл. 1) – це шари інтерметалідів та оксиду алюмінію – карбід титану – нітрид титану – основа. Даний тип покриття виявився за прийнятих умов випробувань самим стійким.

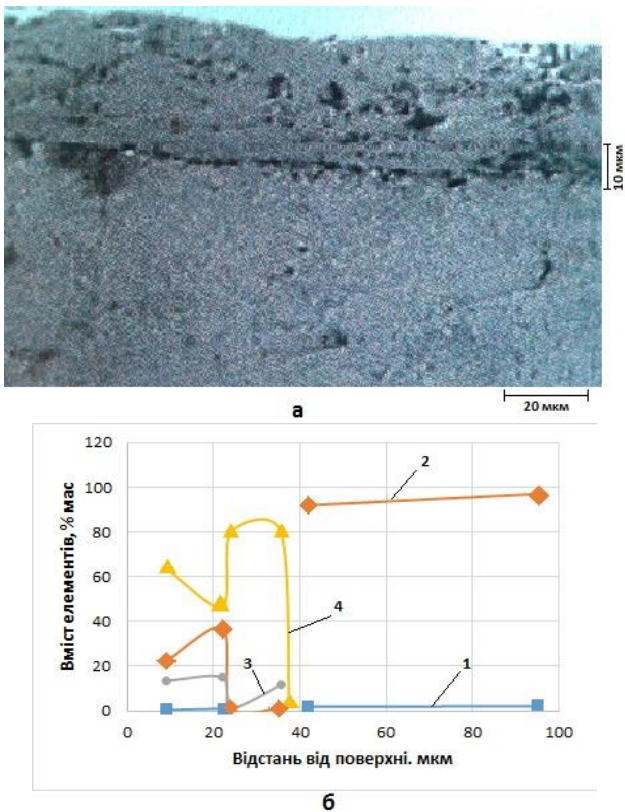


Рис. 1 – Мікроструктура (а) та розподіл елементів (б) за товщиною азотититаноалюмінового покриття на сталі 9XC; азотування: $t = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 36$ годин; титаноалювння: $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 4$ години

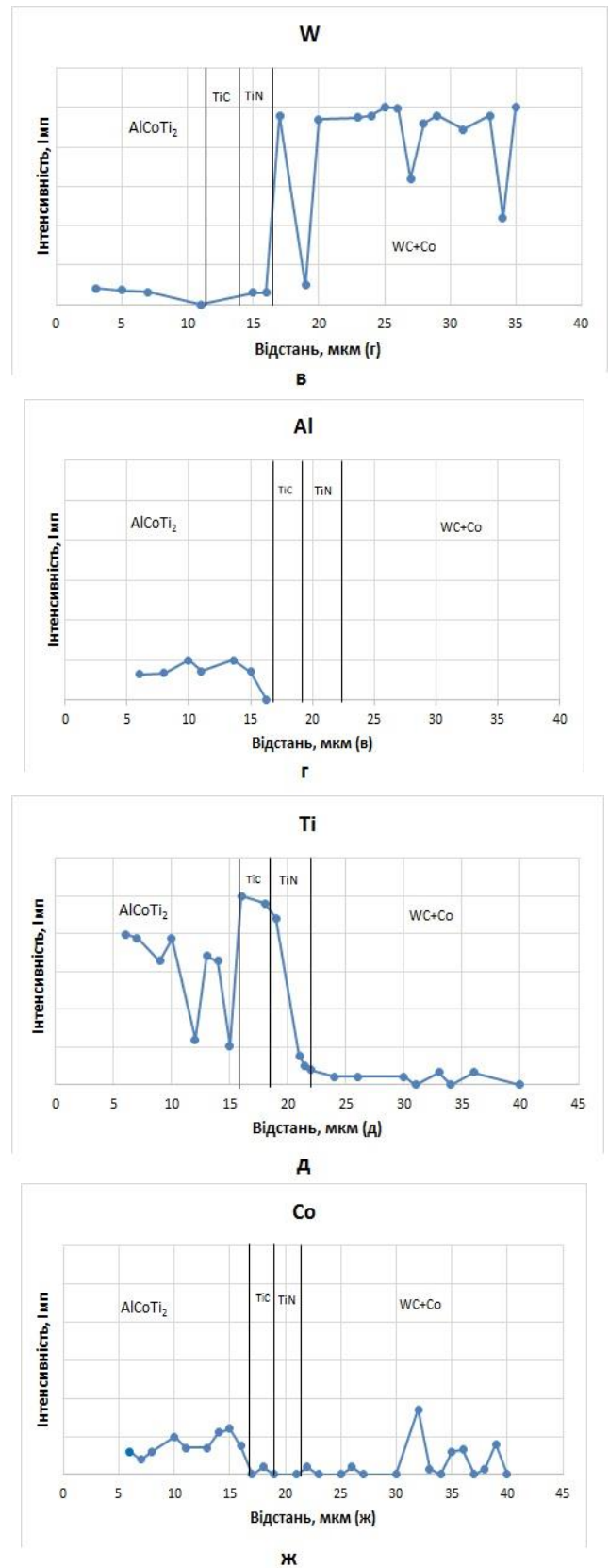
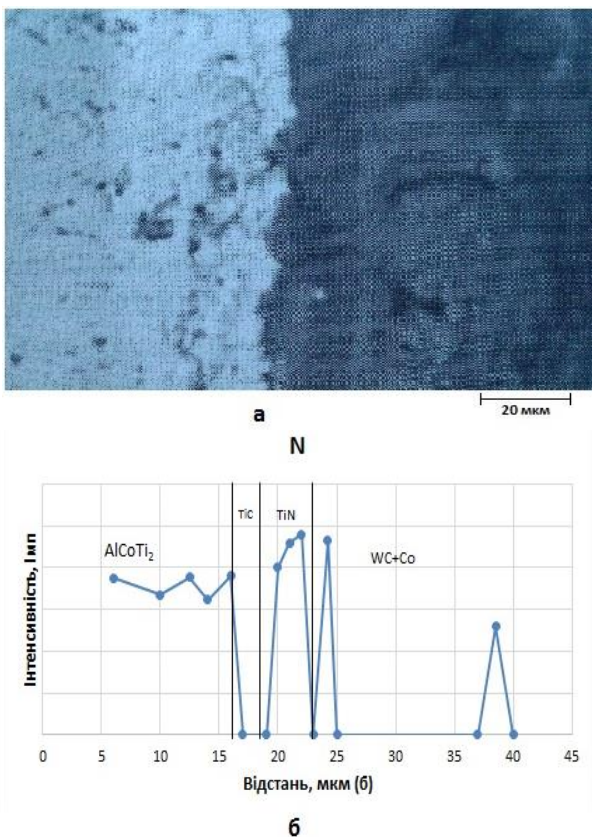


Рис. 2 – Мікроструктура (а) та розподіл елементів (б-ж) за товщиною азотититаноалюмінового покриття на твердому сплаві ВК6; азотування: $t = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 20$ годин; титаноалювння: $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2$ години

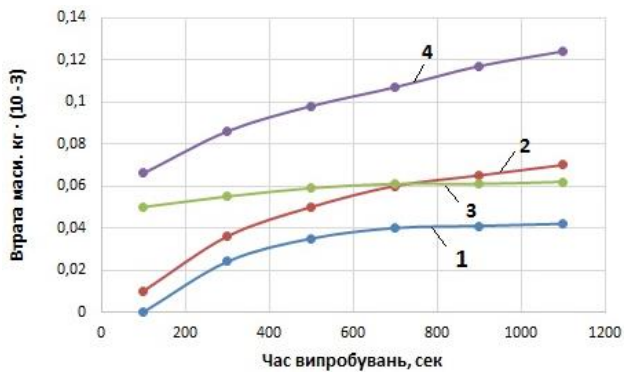


Рис. 3 – Кінетика абразивного зношування сталі 9XC з покриттями; навантаження – 14,7 Н; швидкість – 0,159 м/с; 1 – сталь 9XC без покриття; 2 – титанування; 3 – азототитанування; 4 – азототитаноалітування

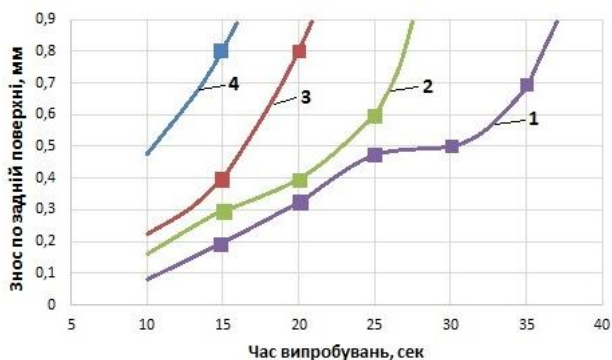


Рис. 4 – Кінетика зношування багатогранної непереточуваної твердосплавної пластини із сплаву ВК6 після азототитаноалітування (1), азототитанування (2), титанування (3), титаноалітування (4), при різанні сталі 70X13; $V = 2,5$ м/с; $S = 0,434$ мм/об; $t = 1$ мм; на вихідному сплаві по задній поверхні 0,8 мм становив за 10 хвилин різання

Стійкісні випробування багатогранних твердосплавних непереточуваних пластин із сплаву ВТ6 з різними покриттями при різанні сталі 70X13 проводили в жорстких умовах різання у відповідності до методики [23].

Ріжучі властивості багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин з покриттями порівнювали з ріжучими властивостями пластин без покриттів. Коефіцієнт підвищення стійкості вираховували як відношення часу стійкості пластин з покриттями до часу стійкості вихідних. Оцінку зношування пластин

проводили по задній поверхні. Порівнювали час до утворення лунок розміром 0,8 мм.

Стійкість багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин з покриттями при обробці різанням сталі 70X13 зростає в 1,5-3,6 рази. Найбільш високі результати показали азототитаноалітовані покриття. Основними причинами значного ефекту азототитаноалітованих покриттів є висока твердість композиції TiC, TiN; Al_2O_3 , AlCoTi₂; в перспективі висока жаростійкість, зумовлена присутністю шару Al_2O_3 та значною концентрацією алюмінію в інтерметаліді AlCoTi₂; високі бар'єрні властивості шарів Al_2O_3 , TiC, TiN; висока адгезія з основою, характерна для всієї групи дифузійних покриттів (рис. 4).

Відомо [1, 2], що в процесі експлуатації твердих сплавів температура в зоні різання може досягати значних величин, що прискорює дифузію кобальту в сталеву стружку, а залізо із стружки в твердий сплав. В результаті відбувається інтенсивне зношування інструменту, яке отримало назву – адгезійне. Можна вважати, що такий вид зношування в азототитаноалюмінієвих покриттях відсутній.

Перераховані вище позитивні властивості покриттів № 7, 8 (табл. 1) дозволили їм зайняти перші місця за результатами випробувань сталі 9XC з покриттями на абразивну зносостійкість та твердого сплаву ВК6 з покриттями при різанні сталі 70X13.

4. ВИСНОВКИ

1. Показана можливість нанесення на сталь 9XC і твердий сплав ВК6 багатшарових покриттів: нітриду титана, карбиду титана, інтерметалідів, оксиду алюмінію шляхом реалізації процесів азотування в аміаку з наступним титаноалітуванням в контейнерах в порошковій суміші: Ti (35 % мас.); Al (10 % мас.); Al_2O_3 (50 % мас.); NH_4Cl (5 % мас.). Присутність бар'єрної композиції TiC, TiN попереджає утворенню шару $Fe_n(Al)$ на сталі 9XC; зони з підвищеним вмістом алюмінію та кисню на сплаві ВК6.

2. Мікротвердість шарів TiC становить 36,5-38,5 ГПа, шарів TiN – 20,5-22,1 ГПа, шарів інтерметалідів – 8,5-13,5 ГПа.

3. Абразивна зносостійкість сталі 9XC з азототитаноалітованими покриттями зростає в 5,5 разів в порівнянні з вихідною термообробкою (гартування та низькотемпературний відпуск, HRC 61-62).

4. Ріжучі властивості твердого сплаву ВК6 після азототитаноалітування при обробці сталі 70X13 зросли в 3,6 рази в порівнянні з вихідними.

The Structure, Composition and Properties of Nitrided Alloys after Diffusion Metallization

V.G. Hignjak¹, G.Y. Calashnicov¹, N.A. Harchenko², T.P. Hovorun²,
O.V. Hignjak¹, V.Y. Dolgikh³, O.O. Holyshevskiy²

¹ National Technical University of Ukraine «KPI» 37, Peremohy Prosp., 03056 Kyiv, Ukraine

² Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

³ SECO TOOLS, 10, Bjornbacksvagen Str., SE-73782 Fagersta, Sweden

It has been examined the possibility of obtaining 9XC and solid steel alloy multilayer coatings BK6 combination of nitriding in ammonia environment followed by titanium-aluminum in a powder mixture in containers with consumable gate. Barrier compositions of TiC, TiN positively effects on the phase and chemical composition of coatings. It also inhibits the formation of Fe_α(Al) layer on steel 9XC and areas with a high content of aluminum and oxygen on BK6 solid alloy. Nitrogen plus Titanium calorizing promotes abrasive wear resistance and stability of steel 9XC, as well as stability of multifaceted carbide indexable BK6 plates.

Keywords: Coating, Titanium-aluminum, Nitrogen-titanium-aluminum, Carbides, Nitrides, Intermetallic, Microhardness, Wear-resistance.

Структура, состав и свойства азотированных сплавов после диффузионной металлизации

В.Г. Хижняк¹, Г.Ю. Калашников¹, Н.А. Харченко², Т.П. Говорун²,
О.В. Хижняк¹, В.Ю. Долгих³, А.О. Гольшевский²

¹ Национальный технический университет Украины «КПИ», просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина

² Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

³ Компания «SECO TOOLS», ул. Bjornbacksvagen, 10, SE-73782 Фэгерста, Швеция

Исследована возможность получения на стали 9XC и твердом сплаве BK6 многослойных покрытий объединением процессов азотирования в среде аммиака с последующим титаноалитированием в порошковой смеси в контейнерах с плавким затвором. Барьерная композиция слоев TiC, TiN позитивно влияет на фазовый и химический состав покрытий, тормозит образование слоя Fe_α(Al) на стали 9XC и зоны с повышенным содержанием алюминия и кислорода на твердом сплаве BK6. Азоттитаноалитирование способствует повышению абразивной износостойкости стали 9XC и стойкости многогранных твердосплавных неперетачиваемых пластин BK6.

Ключевые слова: Покрытие, Титаноалитирование, Азоттитаноалитирование, Карбиды Нитриды, Интерметаллиды, Микротвердость, Износостойкость.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- V.F. Loskutov, V.G. Hizhnyak, I.S. Pogrebova, R.M. Gorbatyuk, I.J. Bogar, *Karbidni pokryttya na stalyah i tverdih splavah* (Ternopil: Lileya, 1998) [in Ukrainian].
- C. Nick, *Manufacturing Eng.* 97 (1986).
- K. Bartsch, A. Leonhardt, E. Wolf, *J. Mater. Sci.* 26, 4318 (1991).
- G.I. Kostyuk, P.N. Vasil'kov, *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii: sb. nauch. trud. V 18* (Harkov: Nac. aehrokozmoshicheskij universitet im. N.E. Zhukovskogo «HAB»: 2000) [in Ukrainian].
- V.G. Hizhnyak, M.V. Arshuk, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij: Chernaya metallurgiya* 3 (2012) [in Ukrainian].
- V.V. Kolomic, R.V. Ridnyj, I.M. Luk'yanov, S.A. Klimenko, *Instrumentalniy sviit* 10-11 (2001).
- I.A. Podchernyaeva, O.V. Stepanova, A.D. Panasyuk, et al., *Poroshkovaya Metallurgiya* 5/6 (2008).
- T. Hishimoto, T. Jzumi, S. Hayashi, T. Narita, *Intermetallics* 11, 225 (2003).
- H. Jung, D.Ju Jung, K.Y. Kim, *Surf. Coat. Technol.* 154, 75 (2002).
- V.G. Hizhnyak, M.V. Arshuk, O.V. Hizhnyak, M.M. Bobina, T.V. Loskutova, *Problemi tertya ta znoshuvannya* 4, 65 (2014) [in Ukrainian].
- A.S. Vereshchaka, B. Karpushevski, L.G. Dyubner, *Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni* (Harkiv: NTU «HPD»: 2008).
- G. Bhat, P.F. Woerner, *J. Metal.* 38, 68 (1986).
- L.G. Voroshnin, O.L. Mendeleeva, V.A. Smetkin, *Teoriya i tekhnologiya himiko-termicheskoy obrabotki*: (M.: Novoe znanie; Minsk: Novoe znanie: 2010).
- N.A. Harchenko, V.G. Hignjak, T.P. Hovorun, A.I. Degula, *J. Nano- Electron. Phys.* 6 No 4, 04021 (2014).
- U.S. Nemchenko, V.Yu. Novikov, S.S. Grankin, et al., *J. Nano- Electron. Phys.* 7, No 2, 02040 (2015).
- N.A. Harchenko, V.G. Hignjak, V.I. Sigova, *Ultradispersni difuzijni karbonitridni pokryttya na stalyah ta tverdih splavah*: (Sumy: 2011) [in Ukrainian].
- V.G. Hignjak, I.S. Pogrebova, K.V. Yancevich, *Phys. Chem. Solid State* 3 No 3, 482 (2002).
- O.V. Sobol', N.V. Pinchuk, A.A. Andreev, *J. Nano- Electron. Phys.* 7 No 2, 02042 (2015).
- M.V. Arshuk, A.V. Mikitchik, V.G. Hizhnyak, M.V. Karpec, *Sovremennaya ehlektrometallurgiya* 103, 2 (2011).
- Yu.M. Lakhtin, D.Ya. Kogan, G.I. Shpis, et al., *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya*: (M: Metallurgiya: 1991).
- Azotirovaniye i karbonitirovaniye* (Pod red A.V. Supova) (M: Metallurgiya: 1990).
- V.G. Khizhnyak, A.I. Degula, D.V. Lesechko, *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* 4 (2009).
- M.V. Arshuk, N.A. Kurilo, V. G. Khizhnyak, et al., *Problemi tertya ta znoshuvannya* 5 (2009) [in Ukrainian].