

References

1. Shulzhenko, A.A., Bozhko, S.A., Sokolov, A.N., et. al. (1993). Sintez, spekanie i svoistva kubicheskogo nitrida bora [Synthesis, sintering and properties of cubic boron nitride] Nauk. dumka [in Russian].
2. Gricenko, E.I., Dalnik, P.E., & Chapalyuk, V.I. (1993) Tochenie nikelovyh splavov instrumentom iz kubicheskogo nitrida bora [Synthesis, sintering and properties of cubic boron nitride] Nauk. dumka [in Russian].
3. Novykov, N.V. (Ed.). (2005). Sverkhtverdye materyaly. Poluchenie i primenenie [Superhard materials. Obtaining and using]: V. 5. Obrabotka materialov lezviinym instrumentom [Material processing with bladed tools]. ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukrainy, IPTS «ALKON» NAN Ukrainy [in Russian].
4. Novikov, M.V., Shulzhenko, O.O., Bezhenar, M.P., Bozhko, S.A. (1998). Patent of Ukraine №25281A. МКІ С04В35/5831 Sposib spikannia kompozytsiinoho materialu na osnovi kubichnogo nitrydu boru [Method of sintering of composite material based on cubic boron nitride] (Patent Ukrainy №25281A)
5. Novykov, N.V., Shulzhenko, A.A., Bezhenar, N.P., et al. (2001). Kiborit: production, structure, properties, application. Journal of Superhard Materials, 23(2), 38–48.
6. Devin, L. N., Bezhenar, N. P., Rychev, S. V., & Romanenko Ya. M. (2020). The Effect of Charge Grit on Impact Strength and Damping Characteristics of BN–Al Composite Materials. Journal of Superhard Materials, 42(3), 190–198.
7. Devin, L.N. (1992). Prohnozirovaniye rabotosposobnosti metallorzhushcheho instrumenta [Predicting the performance of metal-cutting tool] Nauk. dumka. [in Russian].
8. Stakhniv, M.E., Devin, L.M., Bezhenar, M.P., & Romanenko, Ya.M. (2022). Investigation of the Effect of Cutting Speed on the Force Components and Cutting Temperature, Roughness and Waviness of the Machined Surface on the Finishing Turning of Hardened KhVG Steel with PcBN Cutters. Journal of Superhard Materials, Journal of Superhard Materials, 44(6), 421–430.

УДК 669.058

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-310-319

С.Ан. Клименко, А.С. Манохін, М.Ю. Копейкіна, Ю.О. Мельнійчук,
А.О. Чумак, кандидати технічних наук,
С.А. Клименко, член-кор. НАН України; **В.М. Береснєв,** д-р техн. наук

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

ВПЛИВ УМОВ ФОРМУВАННЯ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ TiNbN/CrN

Наведено результати експериментальних досліджень впливу умов формування – величини потенціалу зсуву U_3 та тиску азоту на трибологічні властивості покриття TiNbN/CrN. Встановлено, що досліджувані умови формування покриття мають суттєвий вплив на кількість азоту у покритті, що обумовлює мікротвердість покриття, тип його кристалічної решітки та структурні особливості покриття. В залежності від величин потенціалу зсуву U_3 та тиску азоту змінюється інтенсивність зношування отриманих покриттів, визначена по схемі «кулька-диск», та значення навантажень, які характеризують рівні і механізми руйнування покриттів при скануванні індентором.

Ключові слова: вакуумно-дугове багатошарове покриття TiNbN/CrN, потенціал зсуву, тиск азоту, структура, механічні і трибологічні властивості.

Вступ

Створення нових матеріалів у вигляді покриттів для поліпшення функціональних властивостей різального інструмента (підвищення швидкості різання, поліпшення якості оброблюваної поверхні, збільшення ресурсу роботи виробу тощо) є одним з найбільш затребуваних додатків захисних покриттів. Нітриди тугоплавких металів мають високу мікротвердість, проте вони окислюються за температури 550 °C [1]. Властивості нітриду титану є найбільш ретельно вивченими серед ніридів перехідних металів. Поліпшення структури та характеристик традиційного покриття TiN відбувається завдяки використанню багатофазних покриттів, яке досягається формуванням багатокомпонентних покриттів на основі TiN [2, 3]. Додавання ніобію в TiN значно покращує його триботехнічні властивості.

Як відомо [4], величини СВАСК d^5 для перехідних металів тісно корелюють з характеристиками їх мікротвердості і міцнісними показниками. Атомна стабільність металів визначає схильність до різного рода взаємодій і збільшується зі зростанням СВАСК d^5 -конфігурацій. Прогнозується висока ефективність інструмента з покриттям, до складу якого входить ніобій, при обробці сплавів на основі Fe (СВАСК d^5 -конфігурацій 54%) [5] – високе сумарне значення СВАСК d^5 -конфігурацій для Nb (СВАСК d^5 -конфігурацій 76%) і Fe (СВАСК d^5 -конфігурацій 54%) обумовлюють зниження адгезійної активності на контактних поверхнях інструмента.

Дослідження [6–8] присвячене вивченню адгезії та трибологічних властивостей покриттів TiNbN при використанні в різальному інструменті. Рентгенівська дифракція підтвердила, що Nb заміщує атоми Ti в решітці TiN, та у покритті формується ГЦК кристалічна структура. Але невеликі відмінності в радіусах атомів Nb і Ti збільшують напруження при стисканні матеріалу, покращуючи його механічні властивості порівняно з TiN [6–8].

Зі збільшенням температури підкладки при формуванні покриття параметр його кристалічної решітки зменшується, а матеріал кристалітів змінюється від плоскої до сферичної форми [6]. При цьому має місце збільшення мікротвердості покриття та зменшення модулю Юнга, наслідком чого є покращення межі пружної деформації до руйнування та показнику опору пластичної деформації, що призводить до зростання жорсткості та контактної пружності покриття. Адгезійне руйнування покриття пов'язано з відшаруванням сколів, а когезійні – з бічним розтріскуванням. Підвищення температури призводить до збільшення коефіцієнту тертя, при цьому на інтенсивність взаємодії впливає морфологія поверхні, а зношування обумовлене утворенням абразивних частинок та не пов'язане з відшаруванням покриття.

Останнє також підтверджено в роботах [8, 9].

Роботами [10–12] показано, що сполука TiNbN характеризується високою міцністю на зсув при підвищених температурах, підвищеною зносостійкістю, хімічною та термічною стабільністю. Міцний адгезійний зв'язок між покриттям та підложкою, підвищена термостійкість дозволяють цим покриттям працювати при високих робочих температурах.

Механічні властивості покриття залежать від вмісту Nb, а також від технології осадження покриття. При вмісті Nb > 25% мікротвердість покриття складає до 26 ГПа [8, 13, 14], трибологічні властивості в умовах низького навантаження, низьких швидкостей – коефіцієнт тертя 0,1, швидкість зношування 10^{-4} мм³/Нм.

Ефективним способом покращення властивостей захисних покриттів є їх багатошарове формування [15]. За таких умов у структурі матеріалу покриття збільшується частка поверхонь

розділу, що дозволяє збільшувати одночасно їхню мікротвердість та в'язкість. Серед різних бінарних нітридів перехідних металів нітрид хрому (CrN), який має високу мікротвердість і хімічну стабільність за високих температур, є ефективною складовою [16], що може бути другим шаром багат шарової структури спільно з TiNbN.

Аналіз технічної літератури показує, що на теперішній час існує нестача інформації у частині уявлень щодо трибологічних властивостей покриттів TiNbN в умовах зношування, пов'язаних із локалізацією деформації у зоні тертя, що має місце, наприклад, під час роботи різального інструменту, а також інформації щодо впливу умов формування багат шарового покриття TiNbN/CrN на його триботехнічні показники.

Метою роботи є вивчення впливу технологічних параметрів осадження, зокрема потенціалу зміщення та тиску азоту, на триботехнічні властивості багат шарового покриття TiNbN/CrN.

Методика дослідження

Зразки з багат шаровим покриттям TiNbN/CrN отримані вакуумно-дуговим осадженням. Тиск азоту (N₂) в робочій камері складав $p = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр та $4 \cdot 10^{-3}$ Торр, швидкість осадження ~ 2 нм/с.

Покриття на робочі поверхні змінних різальних пластин із PcbN RNUN 070300 наносили з використанням мішеней TiNb та Cr при постійному обертанні зразків, закріплених на підкладках, зі швидкістю 3 об/хв., що дозволяло за годину осадження отримувати покриття товщиною $\sim 5-7$ мкм з товщиною окремих шарів ~ 11 нм, загальною кількістю 650 шарів. В процесі осадження на робочий стіл, на якому встановлені пластини PcbN, подавався постійний негативний потенціал зміщення $U_3 = -30, -80, -100, -140, -250$ В.

Дифрактометричні дослідження зразків проводилися на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4-07 у мідному Cu-K α випромінюванні із застосуванням Ni фільтру, що селективно поглинає. Дифрагроване випромінювання реєструвалося сцинтиляційним детектором.

Мікротвердість покриттів визначена за допомогою приладу AFFRI DM-8 за методом мікро-Віккерса.

Трибологічні випробування проводили на повітрі за схемою «кулька-диск» на машині тертя Tribometer, «CSM Instruments». У якості контртіла використали кульки діаметром 6,0 мм, які виготовлені зі спеченого сертифікованого оксиду алюмінію Al₂O₃.

Для випробування покриттів з метою визначення адгезійної / когезійної міцності, стійкості до подряпин і визначення механізму руйнування, використовувався скретч-тестер Revetest (CSM Instruments). На поверхню покриття алмазним сферичним індентором типу Роквелл С з радіусом закруглення 200 мкм наносили подряпини при навантаженні від 0 до 200 Н. Одночасно реєстрували потужність сигналу акустичної емісії (АЕ), коефіцієнт тертя, глибину проникнення індентора, а також нормальне навантаження на ньому. Швидкість переміщення індентора становила 1 мм/хв, довжина подряпини – 10 мм, швидкість росту навантаження – 6,91 Н/хв, частота дискретності сигналу – 60 Гц, потужність сигналу АЕ – 9 дБ. Фіксували наступні основні критичні навантаження зі зміни кривих залежності коефіцієнта тертя і акустичної емісії від навантаження скрайбування: L_{C1} – означає момент появи першої шевронної тріщини на дні подряпини; L_{C2} – момент появи шевронних тріщин на дні подряпини; L_{C3} – руйнування носить когезійно-адгезійний характер; L_{C4} – локальне відшарування ділянок покриття; L_{C5} – пластичне стирання покриття до підкладки, втрата адгезійної міцності.

Результати досліджень та їх обговорення

Потенціал зсуву впливає на зміну вмісту азоту у PVD-покриттях. Це пов'язано з впливом електричного потенціалу із енергією іонів, що приймають участь у формуванні покриття, та їх взаємодією з основою. Вищий потенціал зсуву призводить до збільшення енергії іонів азоту, що досягають підкладки. Це сприяє кращій інтеграції азоту в структуру покриття, оскільки високі енергії забезпечують глибше проникнення іонів азоту в плівку. Вищий потенціал зсуву зазвичай призводить до збільшення вмісту азоту, що покращує мікротвердість і зносостійкість покриття.

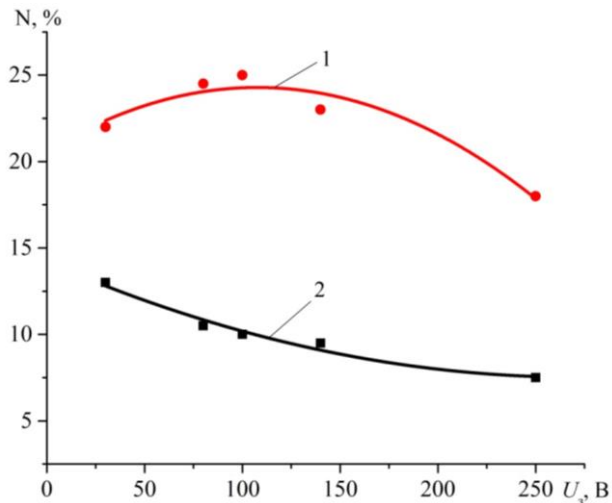


Рис. 1. Вплив потенціалу зсуву U_z на кількість азоту в покритті TiNbN/CrN при тиску $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр (1) та $p = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр (2)

Вплив потенціалу зсуву на вміст азоту у багатошаровому покритті TiNbN/CrN наведено на рис. 1.

При збільшенні тиску азоту $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр відбувається монотонне зростання вмісту азоту в покритті до значення потенціалу зсуву 100 В, що супроводжується підвищенням механічних властивостей покриття, а також вказує на ефективні параметри осадження, які дозволяють протікати реакціям нітридоутворення. Подальше збільшення потенціалу зсуву до значення 250 В

призводить до зменшення інтенсивності протікання утворення нітридних сполук в покритті за рахунок формування покриття із більш щільною структурою і, як наслідок, вторинного випаровування атомів азоту.

Інший характер залежності, отриманої для випадку формування покриття при $p = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр, пов'язаний із вторинним випаровуванням атомів N з поверхні покриття внаслідок відносно високих питомої ваги атомів Ti, Nb, Cr та енергії осадження.

Рентгеноструктурний аналіз покриттів показав, що при збільшенні потенціалу зсуву при $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр можливий перехід від переважної орієнтації з віссю (111) до орієнтації з віссю (100). Це проявляється у зміні відносної інтенсивності рефлексів (111) та (200) відповідно.

Величини потенціалу зсуву та тиску азоту суттєво впливають на механічні властивості покриттів у зв'язку з тим, що ці технологічні параметри обумовлюють мікроструктуру покриттів, формування їх фазового складу, наявність дефектів.

При потенціалі зсуву 100–140 В (по модулю) і високому тиску азоту покриття містить більше азоту, що сприяє утворенню стехіометричних і щільних нітридів. Для TiNbN це означає формування композиційної ГЦК кристалічної структури, яка у значному ступені отримана із заміщенням атомів Ti в решітці TiN атомами Nb, підвищуючи мікротвердість покриття. Для CrN утворюється щільна структура CrN з високою твердістю. При більш високих значеннях потенціалу зсуву можуть утворюватися дефекти в структурі покриття, такі як вакансії і дислокації, що знижують мікротвердість. Зменшення азоту в покритті призводить до утворення фаз, що мають нижчу мікротвердість, через відхилення від стехіометрії.

При нанесенні багатошарових покриттів TiNbN/CrN слід уникати низьких значень тиску азоту, що може призвести до зменшення кількості азоту в покритті і утворення дефектів

у решітках нітридів. У випадку TiNbN це може призвести до утворення менш твердої фази TiNb, що знижує загальну мікротвердість покриття.

Покриття, які були отримані за тиску азоту $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр, мали кубічну кристалічну решітку та склалися із однофазних шарів. Покриття, осаджені при низькому тиску $p = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр, утворюються із шарами нітриду хрому Cr₂N, біднішими на азот та з гексагональною кристалічною решіткою.

Як показують результати досліджень, найбільші значення мікротвердості покриття (29–32 ГПа) досягаються при діапазоні величин потенціалу зсуву (100–140 В, за модулем) і найбільшому тиску азоту, що забезпечує найбільше насичення покриття азотом.

Результати трибологічних досліджень розроблених покриттів показані в табл. 1. Отримані результати показують значну відмінність для зразків, отриманих за різних тисків азоту.

Таблиця 1. Трибологічні характеристики покриття TiNbN/CrN, отримані при потенціалі зсуву $U_3 = -140$ В та різних тисках азоту

Тиск азоту, Торр	Коефіцієнт тертя, μ		Інтенсивність зношування ν , $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$		R_a , мкм
	початковий	при випробуваннях	контртіло (Al ₂ O ₃)	покриття	
$8 \cdot 10^{-4}$	0,451	0,526	$0,32 \cdot 10^{-7}$	$23,55 \cdot 10^{-7}$	0,57
$4 \cdot 10^{-3}$	0,525	0,569	$0,66 \cdot 10^{-7}$	$10,36 \cdot 10^{-7}$	0,38

Збільшення тиску азоту дозволяє отримати однотипну кубічну структуру решітки у шарах покриття, внаслідок чого його зносостійкість зростає.

Процес руйнування покриттів під час скретч-тесту можна детально розглянути через стадії, які проходять покриття під впливом поступово зростаючого навантаження на індентор.

На початковій стадії (монотонне проникнення індентора) покриття чинить значний опір проникненню, внаслідок чого коефіцієнт тертя немонотонно збільшується, оскільки покриття ще зберігає свою цілісність і чинить опір, а характер сигналу АЕ залишається незмінним, що вказує на відсутність значних руйнувань або дефектів у покритті. На стадії збільшення навантаження покриття починає втрачати свою цілісність, коефіцієнт тертя продовжує збільшуватися, але менш інтенсивно, ніж на початковій стадії, рівень амплітуди АЕ змінюється менш інтенсивно, ніж коефіцієнт тертя, що вказує на поступове руйнування покриття, але без раптових великих тріщин або відшарувань. Критична стадія (процес руйнування покриття) – на даній стадії покриття не може чинити ефективного опору, починається утворення тріщин і відшарувань, коефіцієнт тертя може різко змінюватися (часто збільшується), що пов'язано з руйнуванням поверхні покриття, амплітуда сигналів АЕ різко збільшується, що вказує на утворення великих тріщин, відшарування покриття або навіть повне руйнування покриття.

У якості прикладу на рис. 2. наведено графіки зміни коефіцієнта тертя та величини акустичної емісії для покриття TiNbN/CrN, отриманих при різних тисках азоту і потенціалі зсуву $U_3 = -100$ В.

Отримані експериментальні дані показують, що для покриття, отриманого при низькому тиску азоту, при значенні коефіцієнту тертя 0,36 і пройденому шляху тертя 3,6 мм відбувається зростання амплітуди сигналу АЕ, що пов'язано із дефектністю структури та крихким механізмом руйнування матеріалу покриття. Огляд доріжок тертя на ділянках L_{c2} (рис. 2, в) та L_{c5} (рис. 2, д)

показує, що збільшення амплітуди АЕ пов'язане із початком крихкого стирання покриття, а при збільшенні шляху тертя в покритті відмічено появу тріщин та локальних відшарувань матеріалу.

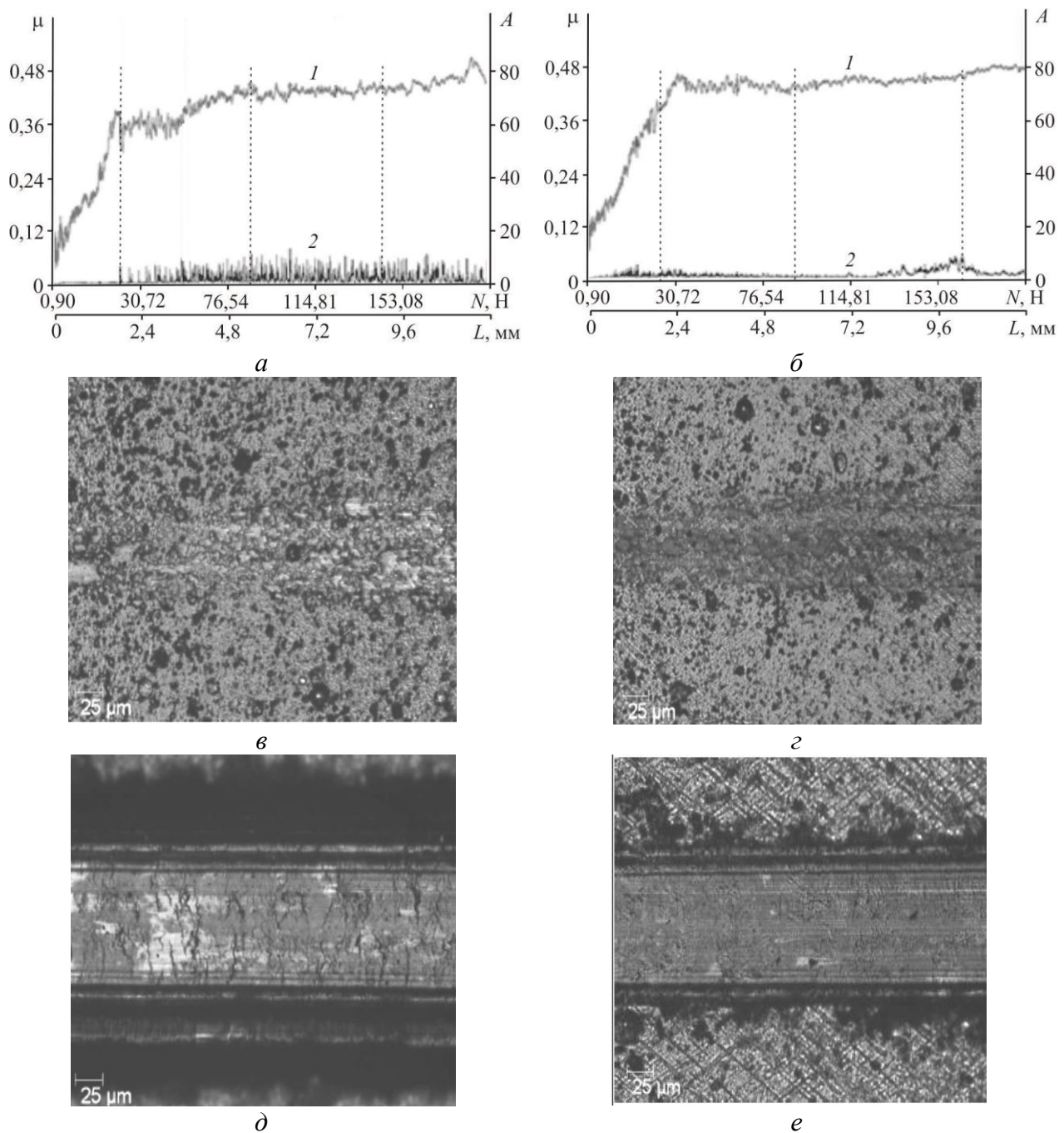


Рис 2. Залежність коефіцієнта тертя μ та амплітуди A від навантаження та довжини доріжки тертя (а, б) та доріжки тертя в зоні навантажень, що відповідають критичним навантаженням L_{c2} (в, г) та L_{c3} (д, е) для покриття TiNbN/CrN за тиску азоту $p = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр (а, в, д), $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр (б, г, е) і потенціалу зсуву $U_3 = -100$ В (1 – μ ; 2 – A)

Для покриттів, отриманих за більш високого тиску азоту та у всьому діапазоні значень потенціалу зсуву, можна відмітити незначну зміну коефіцієнту тертя та амплітуди АЕ з

дистанцією тертя, що говорить про більш рівномірний характер зносу отриманих покриттів (рис. 2, б).

Руйнування покриття TiNbN/CrN, отриманого за високого тиску азоту, відбувається при значно вищому навантаженні на індентор L_{c3} (біля 150 Н) (рис. 2, е), ніж це має місце для покриттів, отриманих при тиску азоту $p = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр, при яких руйнування покриття відбувається при навантаженні 87 Н.

Загальні рівні навантажень для точок L_{c1} , L_{c2} та L_{c3} для покриттів, отриманих при різних потенціалах зсуву та за високого тиску азоту, наведені в табл. 2.

Таблиця 3.2. Вплив величини потенціалу зсуву на критичні навантаження L_c для покриттів TiNbN/CrN при $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр

Потенціал зсуву U_z , В	Критичні навантаження, Н		
	L_{c1}	L_{c2}	L_{c3}
30	10	48	89
80	16	67	142
100	25	81	148
140	18	74	145
250	11	59	139

Збільшення величини потенціалу зсуву призводить до більшого ущільнення матеріалу покриття, що призводить до підвищення критичних навантажень L_c . При дослідженні на дряпання отримані покриття стираються не відшаровуючись, що вказує на когезійний механізм руйнування, але з різною інтенсивністю. Характерними особливостями такого механізму руйнування є поява втомних тріщин, пов'язаних із пластичною деформацією матеріалу.

Висновки

Аналіз результатів досліджень, проведених при вивченні покриття TiNbN/CrN, дозволяє зробити наступні висновки:

- залежність кількості азоту у покритті від величини потенціалу зсуву U_z для випадку використання високого тиску азоту має екстремальний характер;
- вміст азоту біля 25% відповідає мікротвердості покриття 29–32 ГПа;
- покриття, отримані за високого тиску азоту, мають кубічну кристалічну решітку, та складаються із однофазних шарів;
- найбільшу зносостійкість має покриття, отримане за високого тиску азоту та при потенціалі зсуву 100–150 В;
- збільшення величини потенціалу зсуву під час формування покриття сприяє підвищенню критичних навантажень L_c ;
- загальний вигляд ділянок покриттів, на яких відбувалося дряпання, свідчить про когезійний механізм руйнування досліджуваних покриттів.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках виконання проєкту «Створення композитів на основі кубічного нітриду бору із захисними наноструктурними покриттями, вивчення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей в умовах формування виробів авіаційної техніки» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0046) (проєкт-переможець конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди»).

S.An. Klymenko, A.S. Manokhin, M.Y. Kopeykina, Y.O. Melnychuk,
A.O. Chumak, S.A. Klymenko, V.M. Beresnev

V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

INFLUENCE OF FORMATION CONDITIONS ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF TiNbN/CrN MULTILAYER COATING

The results of experimental studies of the influence of the formation conditions, such as the value of the shear potential U_z and nitrogen pressure on the tribological properties of TiNbN/CrN coatings, are presented. It was found that the values of the shear potential U_z and nitrogen pressure have an extreme effect on the amount of nitrogen in the coating, which determines the hardness of the coating, the type of its crystal lattice, and the structural features of the coating. Coatings produced at high nitrogen pressure have a cubic crystal lattice and consist of single-phase layers. Depending on the values of the shear potential U_z and nitrogen pressure, the wear intensity of the resulting coatings varies, determined according to the «ball-disk» scheme – the coating obtained at high nitrogen pressure and at a shear potential of 100-150 V has the highest wear resistance. Critical loads characterizing the levels and mechanisms of coating failure during indenter scanning increase with an increase in the value of the shear potential during coating formation. During scratch-etching, the resulting coatings are erased without peeling off, which indicates a cohesive fracture mechanism, but with different intensity.

Key words: vacuum-arc multilayer TiNbN/CrN coating, shear potential, nitrogen pressure, structure, mechanical and tribological properties.

Література

1. Aksenov I.I., Andreev A.A., Belous V.A., Strelnitsky V.E., Khoroshikh V.M. Vacuum arc: plasma sources, coating deposition, surface modification. Kyiv: Nauk. dumka, 2012. 727 p.
2. Lytovchenko S.V., Mazilin B.A., Beresnev V.M., Stolbovoy V.M., Kovalyova M.G., Kritsyna E.V., Kolodiy I.V., Glukhov O.V., Malikov L.V. (TiZr)N/(TiSi)N multilayer nanostructured coatings obtained by vacuum arc deposition. *J. Nano- and Electronic Phys.* 2018. Vol. 10, N 5. 05041.
3. Serro A.P., Completo C., Colaço R., Dos Santos F., Lobato da Silva C., Cabral J.M.S., Araújo H., Pires E., Saramago B. A comparative study of titanium nitrides, TiN, TiNbN and TiCN, as coatings for biomedical applications. *Surf. and Coat. Technol.* 2009. Vol. 203, N 24. P. 3701–3707.
4. Самсонов Г.В., Прядко Л.Ф., Прядко И.Ф. Конфигурационная модель вещества. М.: Наука, 1976. 315 с.
5. Клименко С.А., Манохин А.С., Копейкина М.Ю., Клименко С.Ан., Мельничук Ю.А., Чумак А.А. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2018. 304 с.
6. Gonzalez-Carmona J.M., Mambuscay C.L., Ortega-Portilla C., Hurtado Macias A., Jeferson F. TiNbN Hard Coating Deposited at Varied Substrate Temperature by Cathodic Arc: Tribological Performance under Simulated Cutting Conditions. *Materials.* 2023. Vol. 16, N 13. 4531.
7. Skjöldebrand C., Tipper J. L., Hatto P., Bryant M., Hall R. M., Persson C. Current status and future potential of wear-resistant coatings and articulating surfaces for hip and knee implants. *Mater. Today Bio.* 2022. 15. 100270.
8. Baran Ö, Keleş A., Çiçek H., Totik Y., Efeoglu I. The mechanical and tribological properties of Ti [Nb, V] N films on the Al-2024 alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2017. 332. P. 312–318.
9. Nasab S.A., Manafi S., Ghahremani D. Preparation of mullite/NbN composites through

- spark plasma sintering. *Mater. Chem. Phys.* 2022. 285. 126126.
10. Sheppard L.R., Zhang H., Liu R., Macartney S., Murphy T., Wuhler R. Reactive sputtered TiXNYNZ thin films. I. Basic processing relationships. *Mater. Chem. Phys.* 2019. 224. P. 308–313.
 11. Cicek H., Baran O., Keles A., Totik Y., Efeoglu I. A comparative study of fatigue properties of TiVN and TiNbN thin films deposited on different substrates. *Surf. and Coat. Technol.* 2017. Vol. 332, N 25. P. 296–303.
 12. Chang Yin-Yu, Chung Cheng-Hsi. Tribological and Mechanical Properties of Multicomponent CrVTiNbZr(N) Coatings. *Coatings.* 2022. Vol. 11, N 1. 41.
 13. Gonzalez-Carmona J.M., Mambuscay C.L., Ortega-Portilla C., Piamba J.F., Hurtado Macias A., Sanchez-Sthepa H. Effect of Substrate Temperature on Adhesion and Tribological Properties of Tinbn Coatings Deposited by Cathodic Arc. Available at SSRN. 2023. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4342237.
 14. Dempwolf H., Proft M., Baumann A., Malz S., Keßler O. The Impact of Bias and Nitrogen Pressure on TiNbN Coatings in Arc-PVD Processes—A Multifactorial Study. *Coatings.* 2022. Vol. 12, N 7. 935.
 15. Азаренков Н.А., Соболев О.В., Погребняк А.Д., Береснев В.М. Инженерия вакуум-плазменных покрытий. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2011. 344 с.
 16. Кунченко В.В., Андреев А.А., Кунченко Ю.В., Картмазов Г.Н. CrNx покрытия, полученные вакуумно-дуговым методом. Вопросы атомной науки и техники. 2004. № 3. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. С. 87–95.

Надійшла 21.08.24

References

1. Aksenov, I.I., Andreyev, A.A., Belous, V.A., et al. (2012). *Vacuum arc: plasma sources, coating deposition, surface modification*. Nauk. Dumka. 727 p.
2. Lytovchenko, S.V., Mazilin, B.A., Beresnev, V.M., et al. (2018). (TiZr)N/(TiSi)N multilayer nanostructured coatings obtained by vacuum arc deposition. *J. Nano- and Electronic Phys.*, 10(5), 05041.
3. Serro, A.P., Completo, C., Colaço, dos Santos, et al. (2009). A comparative study of titanium nitrides, TiN, TiNbN and TiCN, as coatings for biomedical applications. *Surf. and Coat. Technol.*, 203(24), 3701–3707.
4. Samsonov, G.V., Prjadko, L.F., & Prjadko, I.F. (1976). *Konfiguratsionnaia model veshchestva [Configuration model substance]*. Nauk. Dumka. 315 [in Russian].
5. Klymenko, S.A., Manokhin, A.S., Kopiekin, M.Yu, et al. (2018). *Vysokoproizvoditelnaia chistovaia lezviinaia obrabotka detalei iz stali vysokoi tverdosti [High-performance finishing blade machining of parts made of high hardness steels]*. ISM. 304 [in Russian].
6. Gonzalez-Carmona, J.M., Mambuscay, C.L., Ortega-Portilla, C., et al. (2023). TiNbN Hard Coating Deposited at Varied Substrate Temperature by Cathodic Arc: Tribological Performance under Simulated Cutting Conditions. *Materials*, 16(13), 4531.
7. Skjöldebrand, C., Tipper, J. L., Hatto, P., et al. (2022). Current status and future potential of wear-resistant coatings and articulating surfaces for hip and knee implants. *Mater Today Bio.*, 15, 100270.
8. Baran, Ö., Keleş, A., Çiçek, H., et al. (2017). The mechanical and tribological properties of Ti [Nb, V] N films on the Al-2024 alloy. *Surf. Coat. Technol.*, 332, 312–318.
9. Nasab, S.A., Manafi, S., & Ghahremani, D. (2022). Preparation of mullite/NbN composites

- through spark plasma sintering. *Mater. Chem. Phys.*, 285, 126126.
10. 10. Sheppard, L.R., Zhang, H., Liu, R., et al. (2019). Reactive sputtered TiXNYNZ thin films. I. Basic processing relationships. *Mater. Chem. Phys.*, 224, 308–313.
 11. 11. Cicek, H., Baran, O., Keles, A., et al. (2017). A comparative study of fatigue properties of TiVN and TiNbN thin films deposited on different substrates. *Surf. and Coat. Technol.*, 332(25), 296–303.
 12. 12. Chang, Yin-Yu, & Cheng-His, Chung. (2022). Tribological and Mechanical Properties of Multicomponent CrVTiNbZr(N) Coatings. *Coatings*, 11(1). 41.
 13. 13. Gonzalez-Carmona, J.M., Mambuscay, C.L., Ortega-Portilla, C., et al. (2023) *Effect of Substrate Temperature on Adhesion and Tribological Properties of Tinbn Coatings Deposited by Cathodic Arc*. Available at SSRN. (b.d.) https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4342237.
 14. 14. Dempwolf, H., Proft, M., Baumann, A., et al. (2022). The Impact of Bias and Nitrogen Pressure on TiNbN Coatings in Arc-PVD Processes—A Multifactorial Study. *Coatings*, 12(7). 935.
 15. 15. Azarenkov N.A., Sobol', O.V., Pogrebhjak, A.D., & Beresnev, B.M. (2011). *Inzheneriia vakuum-plazmennyykh pokrytii [Vacuum Plasma Coating Engineering]*. KhNU imeni V.N. Karazina [in Russian].
 16. 16. Kunchenko, V.V., Andreev, A.A., Kunchenko, Yu.V., & Kartmazov G.N. (2004). *CrNx pokrytiia, poluchennye vakuumno-dugovym metodom [CrNx coatings obtained by vacuum-arc method]*. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. – Physics of Radiation Damage and Radiation Material Science*, 3. 87–95.

УДК 623.4:621.785.6

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-319-326

А.Ю. Сірий, магістр

Національна Металургійна Академія України, просп. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СТВОЛІВ ГАУБИЦЬ ДЛЯ ВИТРИМАННЯ ІНТЕНСИВНОГО ВОГНЮ

Метою цього дослідження є вивчення впливу різних методів термічної обробки на характеристики стволів артилерійських гаубиць, зокрема на їх твердість, міцність, в'язкість і зносостійкість. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних технологій обробки для підвищення витривалості та ефективності стволів під час інтенсивного вогню. В роботі використаний аналітичний підхід на основі опрацювання інформаційних джерел з теми дослідження. Результати дослідження показують, що різні методи термічної обробки мають суттєвий вплив на характеристики стволів гаубиць. Зокрема, гартування та відпускання значно підвищують твердість і міцність металу, а відпускання додатково збільшує в'язкість, роблячи стволи більш стійкими до тріщин і ударів. Азотування та цементация підвищують зносостійкість, що подовжує термін служби стволів. Так визначено, що процес теплової обробки має кілька етапів.

Ключові слова: гаубиця; ствол артилерійської системи; термічна обробка; механічний знос; експлуатаційна стійкість.