

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ CrN/NbN-ПОКРИТТІВ

Сердюк І. В.¹, Столбовий В. О.^{1,2}, Кривошопка Р. В.¹, Петрушенко С. І.^{3,4}

¹Національний науковий центр

«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

³Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

⁴Ліберецький технічний університет

Анотація. Підвищення стійкості матеріалів до руйнівного впливу зовнішніх факторів залишається актуальним. Одним із методів розв'язання цього завдання є застосування захисних вакуумно-дугових покриттів із поліпшеною зносостійкістю. Створення багатошарових покриттів CrN/NbN виконували за умови таких технологічних параметрів нанесення покриттів: тиск реакційного газу у вакуумній камері ($P_N = 0,08\text{--}0,27$ Па), постійна негативна напруга на підкладці ($U_n = 70\text{--}200$ В). Покриття мали різну кількість шарів ($N = 68, 270, 1080$) і товщина шарів становила від 17 до 150 нм. Дослідження впливу технологічних параметрів нанесення на фізико-механічні властивості багатошарових покриттів CrN/NbN є важливим для прогнозованого отримання необхідних властивостей багатошарових систем.

Ключові слова: вакуумно-дугові покриття, багатошарові покриття, мікротвердість, морфологія поверхні, фізико-механічні властивості.

Вступ

Упродовж останніх років розроблення вакуумно-дугових покриттів для різноманітних сфер застосування йде шляхом комбінації компонентів покриття з різними фізико-механічними, електричними, магнітними, оптичними властивостями та ускладнення структури вакуумно-дугового покриття. Так, за останні два десятиліття створено й досліджено широкий спектр багатокомпонентних [1–5] і багатошарових [6–10] покриттів.

Ці дослідження показали перспективність і безмежність можливостей створення вакуумно-дугових покриттів різного призначення.

Одним із важливих факторів, що впливає на функціональні властивості багатошарового вакуумно-дугового покриття є стан міжфазної границі між шарами матеріалів з різними фазовим складом та структурним станом. Це стає особливо суттєвим у разі зменшення товщини шарів до одиниць – десятків нанометрів [11, 12]. Крім того, товщина окремих шарів та їх загальна кількість роблять значний внесок у процеси керованого формування вакуумно-дугових покриттів з необхідними властивостями [13, 14].

Аналіз публікацій

Для прогнозованого отримання необхідних властивостей багатошарових систем ва-

жливим є встановлення закономірностей структуро- та фазоутворення вакуумно-дугових багатошарових покриттів за різних технологічних параметрів нанесення, а саме тиску реакційного газу у вакуумній камері, постійної негативної напруги на підкладці, товщини та кількості шарів. Незважаючи на значну кількість досліджень у цьому напрямі та з огляду на безмежну кількість можливих комбінацій багатошарових систем це завдання досі залишається актуальним.

Переважно як складові матеріали багатошарової системи використовують нітриди перехідних металів IV (Ti, Zr, Hf) [15–17], V (V, Nb, Ta) [18–20] і VI (Cr, Mo, W) [21–23] груп. Наприклад, нітрид хрому має добру зносо- та корозійну стійкість, високу температурну стабільність і коефіцієнт тертя нижчий за нітрид титану [24]. Завдяки цьому він використовується як захисне покриття на різальному інструменті, що працює за високих швидкостей різання.

Зі свого боку нітрид ніобію демонструє високу твердість і електропровідність, гарну термостійкість і хімічну інертність [25] та використовується в мікроелектронних приладах, надпровідникових детекторах тощо. За поєднання цих двох матеріалів утворюється можливість отримання нових властивостей вакуумно-дугових покриттів і розширення сфери їх застосування.

Мета статті

Метою є дослідження впливу технологічних параметрів нанесення на фізико-механічні властивості вакуумно-дугових багат шарових покриттів на основі хрому й ніобію.

Методика

Вакуумно-дугові нітридні багат шарові CrN/NbN-покриття були нанесені в модифікованій установці «БУЛАТ-6». Матеріалом випарників використовували катоди з чистих металів вакуумної плавки – хром (Х99Н1) і ніобій (Н61).

Підкладками для нанесення покриттів застосовували зразки з неіржавної сталі AISI 430 BA+PVC (12Х17 Україна, ДСТУ) розміром 18х18х2 мм із дзеркальною полірованою поверхнею в півці (шорсткість поверхні становила $Ra < 0,05$ мкм) для визначення фізико-механічних і трибологічних властивостей покриттів. Попередньо зразки промивали лужним розчином в ультразвуковій ванні протягом 10 хв, а потім нефрасом С2-80/120. У процесі нанесення покриттів у вакуумно-дуговій камері установки зразки розміщували з обох боків на вертикальному металевому підкладкотримачі у вигляді прямокутника розміром 220х300 мм, що був розміщений на одному горизонтальному рівні з випарниками й обертався навколо своєї вертикальної осі. Самі випарники були розташовані навпроти один одного.

Перед нанесенням вакуумно-дугового покриття вакуумну камеру зі зразками відкачували до тиску $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, після чого проводили іонне очищення та активацію поверхні зразків бомбардування іонами металів за умови безперервного обертання підкладкотримача й постійної напруги на ньому $-1,1$ кВ. Процес очищення й нагрівання зразків тривав 10 хв, після чого наносили підшар чистого металу для поліпшення адгезійних властивостей покриття.

Для дослідження впливу технологічних параметрів осадження на фізико-механічні властивості нітридних вакуумно-дугових багат шарових покриттів на основі хрому й ніобію були отримані три серії покриттів: серія А(І) – за безперервного обертання підкладкотримача із зразками зі швидкістю 12 обертів за хвилину, серія В(ІІ) – якщо інтервал обертання підкладкотримача становив 80 с, серія С(ІІІ) – якщо інтервал обертання підкладкотримача – 20 с. Керування технологічними вузлами установки (двигун обертання підкладкотримача й джерела живлення випарників)

за умови нанесення вакуумно-дугових покриттів другої та третьої серій здійснювалось за допомогою системи керування нанесенням наносарових вакуумно-дугових покриттів [26]. Для отримання другої та третьої серії покриттів на час повороту підкладкотримача на 180° випарники вимикались, що дало змогу отримати чіткі межі між шарами.

Технологічний процес нанесення багат шарових покриттів на зразки відбувався протягом 1,5 год за різних тисків реакційного газу (азоту) у вакуумній камері від 0,08 до 0,27 Па й за постійній негативній напруги на підкладці -70 і -200 В. Струм дуги випарників із фокусуванням плазмового потоку магнітним полем $H_\Phi = 5$ мТл становив 80 А (для хрому) й 100 А (для ніобію). Відстань від випарників до осі повороту підкладкотримача становила 500 мм.

Електронно-мікроскопічні зображення були отримані за допомогою *Tescan Vega 3 SBU* в режимі вторинних електронів за прискорювальної напруги 30 кВ. Поперечні перерізи досліджували на сканувальному електронному мікроскопі з польовою емісією (*Zeiss ULTRA Plus*) за прискорювальної напруги 2 або 10 кВ.

Використовували внутрішньолінзовий детектор вторинних електронів і ширококутовий детектор зворотно розсіяних електронів. Фізико-механічні властивості покриттів досліджували на зразках з неіржавної сталі методом мікроіндентування із застосуванням твердоміра CMS, оснащеного стандартною пірамідною Віккерса.

Результати та їх обговорення

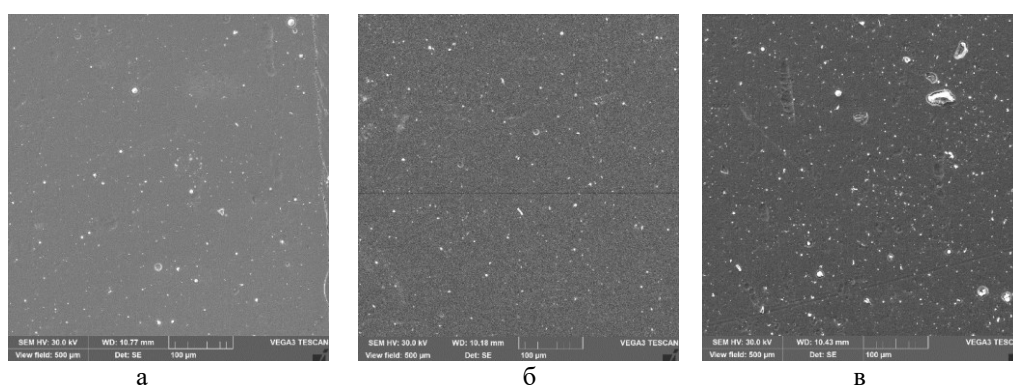
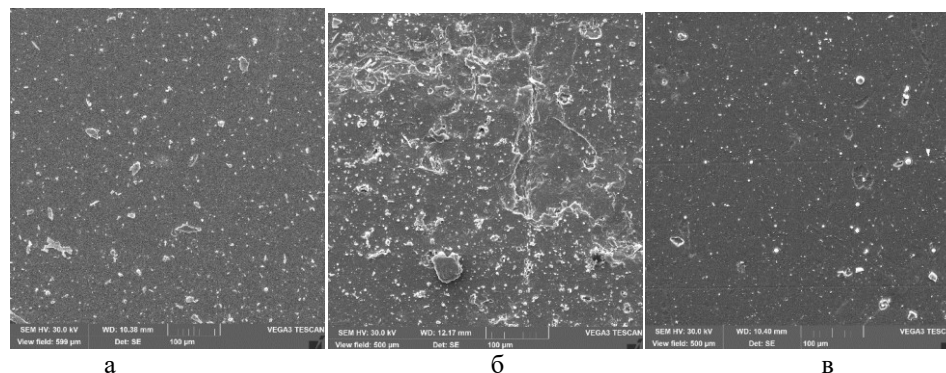
Технологічні параметри нанесення багат шарових нітридних покриттів: струм дуги випарника хрому I_{01} й ніобію I_{02} , постійна негативна напруга на підкладці U_n , тиск реакційного газу (азоту) P_N – подано в табл. 1.

Застосування різних технологічних прийомів дало змогу отримати три серії вакуумно-дугових багат шарових нітридних покриттів з різною товщиною окремих шарів CrN і NbN та періоду бішару (CrN-NbN), кількістю шарів (68 і 270 шари) та характером інтерфейсу між шарами (чітка межа або перехідний шар).

На рис. 1 подано фотографії морфології поверхні вакуумно-дугових покриттів трьох серій, отриманих за однакових технологічних режимів (постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -200$ В і тиску реакційного газу (азоту) $P_N = 0,08-0,09$ Па).

Таблиця 1 – Технологічні параметри нанесення багатошарових нітридних покриттів на основі хрому й ніобію

Серія покриттів	№ зразка	I_{01} , А	I_{02} , А	U_n , В	P_N , Па	Технологічний режим
А(І)	А-1	80	120	-70	0,27	Безперервне обертання
	А-2	80	120	-200	0,27	Безперервне обертання
	А-3	80	100	-200	0,09	Безперервне обертання
В(ІІ)	В-1	80	100	-200	0,27	інтервал обертання – 80 с 68 шарів
	В-2	80	100	-70	0,27	інтервал обертання – 80 с 68 шарів
	В-3	80	100	-70	0,08	інтервал обертання – 80 с 68 шарів
	В-4	80	100	-200	0,08	інтервал обертання – 80 с 68 шарів
С(ІІІ)	С-1	80	100	-200	0,27	інтервал обертання – 20 с 270 шарів
	С-2	80	100	-70	0,27	інтервал обертання – 20 с 270 шарів
	С-3	80	100	-70	0,08	інтервал обертання – 20 с 270 шарів
	С-4	80	100	-200	0,08	інтервал обертання – 20 с 270 шарів

Рис. 1. Фотографії морфології поверхні багатошарових покриттів CrN/NbN трьох серій, отриманих за однакових технологічних режимів ($U_n = -200$ В, $P_N = 0,08-0,09$ Па): А(І) серія (а), В(ІІ) серія (б), С(ІІІ) серія (в)Рис. 2. Фотографії морфології поверхні багатошарових покриттів CrN/NbN серії В(ІІ), отриманих за різних технологічних умов нанесення: зразок В-1 – $U_n = -200$ В, $P_N = 0,27$ Па (а); зразок В-2 – $U_n = -70$ В, $P_N = 0,27$ Па (б); зразок В-3 – $U_n = -70$ В, $P_N = 0,08$ Па (в)

Використання різних технологічних режимів нанесення вакуумно-дугових покриттів, а саме вимикання джерел живлення випарників катодів (хрому й ніобію) через 20 та 80 с на час розвороту підкладотримача (5 с) й постійно увімкнені випарники, впливають на процеси, що відбуваються на поверхні катодів і в прикатодній зоні (до $2 \cdot 10^{-4}$ см [27]). Формування катодних плям І та ІІ роду

й тривалість їх існування на поверхні катода, температура катодів, склад і стан металевої компоненти плазми залежать від цих умов. Так, навіть відносно незначна зміна температури катода призводить до суттєвого зниження середньої енергії та кратності іонів металевої компоненти плазми [27], що надалі впливає на формування вакуумно-дугового покриття, структурно-фазовий стан і фізико-

механічні властивості вакуумно-дугових покриттів.

На рис. 2 подано фотографії морфології поверхні багатошарових покриттів CrN/NbN серії В(II), отриманих за різних технологічних умов нанесення.

У режимі безперервного обертання підкладкотримача за постійно увімкнених катодів (серія А(I)) у вакуумно-дугових нітридних покриттях на основі хрому й ніобію формується перехідний шар Cr-Nb-N між шарами CrN і NbN, тоді як в умовах використання системи керування нанесенням нанощарових вакуумно-дугових покриттів (серії В(II) і С(III)) між шарами CrN і NbN формується чітка межа внаслідок вимкнення катодів на час розвертання підкладки тримача (рис. 3)..

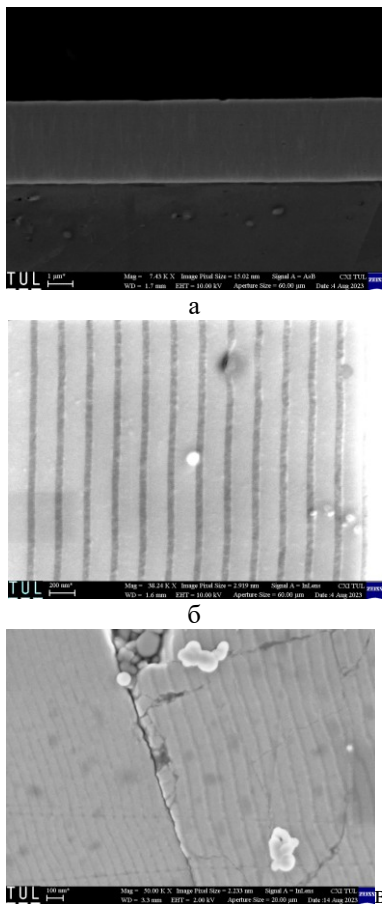


Рис. 3. SEM-зображення поперечного перерізу багатошарових покриттів CrN/NbN з різною кількістю шарів: серія А(I) (зразок А-3) – постійне обертання (а); серія В(II) (зразок В-4) – 68 шарів (б); серія С(III) (зразок С-1) – 270 шарів (в)

На рис. 3 подано фотографії поперечного перерізу багатошарових покриттів CrN/NbN з різною товщиною окремих шарів CrN і NbN і періоду бішару (CrN-NbN), кількістю шарів

(68 та 270 шарів) та характером інтерфейсу між шарами (чітка межа або перехідний шар), на яких добре видно межі між шарами. Аналіз поперечних перерізів багатошарових покриттів CrN/NbN трьох серій з різною кількістю шарів показав, що загальна товщина покриттів становила 3,6 мкм для вакуумно-дугових покриттів серії А(I), які були отримані внаслідок безперервного обертання підкладкотримача, і приблизно 8 та 9 мкм для вакуумно-дугових покриттів серій В(II) і С(III) відповідно. У табл. 2 наведено геометричні параметри багатошарових покриттів CrN/NbN трьох серій, а саме товщина шарів нітриду хрому h_{CrN} і нітриду ніобію h_{NbN} , період бішару h_b , загальна товщина покриттів h_z , кількість бішарів (періодів) і загальна кількість шарів.

Таблиця 2 – Геометричні параметри багатошарових покриттів CrN/NbN трьох серій

Серія покриття	h_{CrN} нм	h_{NbN} нм	h_b , нм	h_z , мкм	Кількість періодів (бішарів)	Кількість шарів
А(I)	-	-	6,7	3,6	540	1080
В(II)	80	150	230	7,8	34	68
С(III)	17	50	67	9	135	270

Оцінювання товщини окремих шарів хрому h_{CrN} і ніобію h_{NbN} для багатошарових нітридних покриттів серії А(I) (за постійного обертання підкладкотримача) не проводилось, оскільки ці покриття не мають чітких меж переходу між шарами CrN і NbN через утворення перехідного шару Cr-Nb-N.

Розподіл хімічних елементів по глибині покриття показав, що покриття серії В(II) мають високу планарність шарів і практично відсутність крапельної фази в об'ємі багатошарового нітридного покриття CrN/NbN.

Хімічний склад (по поверхні) вакуумно-дугового багатошарового нітридного покриття CrN/NbN серії В(II) (зразок В-4) становить: ніобій – 25,1 ат.%; хром – 32,5 ат.%; азот – 42,4 ат.%.

Мікротвердість досліджуваних багатошарових нітридних покриттів на основі хрому й ніобію продемонстрована в табл. 3 у вигляді мінімального H_{min} й максимального H_{max} значень мікротвердості, діапазону отриманих величин ΔH , середнього значення H_{med} і середньоквадратичного відхилення (СКВ). Мікротвердість оцінювалась за вісьмома вимірюваннями на відстані 100 мкм між ними, із загальною довжиною вимірювання

1 мм. У процесі аналізу отриманих значень мікротвердості вилучалися значення, що належали до крапельної фази вакуумно-дугових покриттів зі значеннями мікротвердості менше ніж 2,5 ГПа.

Це відповідає максимальному значенню мікротвердості серед чистих металів (катодів), а саме хрому.

Таблиця 3 – Мікротвердість вакуумно-дугових багатошарових нітридних покриттів на основі хрому й ніобію

Серія покриттів	№ зразка	H_{min} , ГПа	H_{max} , ГПа	ΔH , ГПа	H_{med} , ГПа	СКВ, ГПа
A(I)	A-1	22,27	24,92	2,65	23,72	1,04
	A-2	16,61	25,00	8,39	22,31	2,55
	A-3	16,97	19,91	2,94	18,77	0,90
B(II)	B-1	15,76	31,72	15,96	22,48	4,34
	B-2	10,40	17,18	6,78	14,53	2,96
	B-3	18,88	31,92	13,04	24,06	3,47
	B-4	23,08	29,58	6,50	25,19	1,99
C(III)	C-1	21,89	25,56	3,67	23,44	1,39
	C-2	15,33	35,00	19,67	23,72	7,16
	C-3	23,06	28,02	4,96	25,05	2,06
	C-4	21,57	24,91	3,34	23,05	1,15

Неоднорідність структурно-фазового стану кожного вакуумно-дугового покриття визначається розкидом значень мікротвердості та величиною середньоквадратичного відхилення (СКВ). Так, вище значення СКВ вказує на більший розкид значень мікротвердості в отриманому масиві даних, менше ж значення, відповідно, вказує на те, що отримані значення групуються навколо середнього значення мікротвердості.

Аналіз середніх значень мікротвердості отриманих вакуумно-дугових покриттів за серіями залежно від зміни постійної негативної напруги на підкладці U_n продемонстрував, що підвищення U_n від -70 до -200 В призводить до:

1) зменшення середнього значення мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії A(I) на 3,5 ГПа, якщо тиск реакційного газу (азоту) $P_N = 0,09$ Па;

2) збільшення середнього значення мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії B(II) на 8 ГПа, якщо тиск реакційного газу (азоту) $P_N = 0,27$ Па, і на 1 ГПа за умови тиску реакційного газу (азоту) $P_N = 0,08$ Па;

3) збереження середнього значення мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії C(III), якщо тиск реакційного газу (азоту) $P_N = 0,27$ Па, й зменшення на 2 ГПа за

умови тиску реакційного газу (азоту) $P_N = 0,08$ Па.

Аналіз середніх значень мікротвердості отриманих вакуумно-дугових покриттів по серіях залежно від зміни тиску азоту у вакуумній камері P_N продемонстрував, що підвищення P_N від 0,08 до 0,27 Па приводить до:

1) збільшення середнього значення мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії A(I) на 1,4 ГПа за постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -70$ В;

2) зменшення середнього значення мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії B(II) на 9,5 ГПа за постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -70$ В і на 2,7 ГПа, якщо постійна негативна напруга на підкладці $U_n = -200$ В;

3) зменшення на 1,3 ГПа середнього значення мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії C(III) за постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -70$ В та збереження значення, якщо постійна негативна напруга на підкладці становить $U_n = -200$ В.

Цікавим є те, що для багатошарових покриттів CrN/NbN серії C(III) з найбільшою загальною кількістю шарів (270 шарів) та найменшим періодом бішару ($h_\delta = 67$ нм) спостерігається збереження середнього значення мікротвердості в разі зміни тиску азоту у вакуумній камері (якщо незмінна негативна напруга на підкладці $U_n = -200$ В) на рівні 23,05 ГПа (зразок C-4) – 23,44 ГПа (зразок C-1) і за умови зміни негативної напруги на підкладці (якщо незмінний тиск реакційного газу (азоту) $P_N = 0,27$ Па) на рівні 23,72 ГПа (зразок C-2) – 23,44 ГПа (зразок C-1). Зміна напруги на підкладці за постійного тиску азоту приводить до зміни температурних умов нанесення вакуумно-дугових покриттів унаслідок зміни енергії іонів металів, що бомбардують підкладку. Зі свого боку підвищення тиску реакційного газу (азоту) у вакуумній камері за незмінної напруги на підкладці викликає збільшення розсіювання крапельної фази плазмового металевих потоку й може впливати на енергію іонів металів і цим також регулювати температурні умови нанесення покриттів. Отже, імовірно, в процесі отримання вакуумно-дугових покриттів на зразках C-1, C-2 та C-4 були створені однакові температурні умови для різних технологічних параметрів, що вплинуло на утворення центрів зародків і спрямованість хімічної реакції у процесі формування плівки.

Для вакуумно-дугових покриттів серії A(I) (постійне обертання підкладкотримача),

з огляду на технологічні умови нанесення покриттів (час нанесення – 1,5 год, швидкість обертання підкладкотримача – 5 с, товщина покриття – 3,6 мкм), приблизні розраховані значення кількості шарів і періоду бішару становили 1080 шарів (обертів підкладкотримача) та 6,7 нм відповідно.

Збільшення кількості шарів від 68 до 270 викликає підвищення середнього значення мікротвердості H_{med} на 4–39 % за різних технологічних параметрів нанесення вакуумно-дугових багатошарових нітридних покриттів, окрім режиму, де $U_n = -200$ В, $P_N = 0,08$ – $0,09$ Па, коли відбувається зменшення H_{med} на 8,5 %.

Ці зміни пов'язані зі збільшенням кількості міжфазних границь, які впливають на процеси деформації окремих шарів і дифузії між ними.

Це призводить до підвищення стійкості до поширення тріщин і пружних властивостей вакуумно-дугових багатошарових нітридних покриттів. Характер границь між шарами CrN і NbN також впливає на фізико-механічні властивості покриттів. Так, багатошарові покриття з перехідним шаром Cr-Nb-N (серія A(I)) між шарами CrN і NbN мають середні значення мікротвердості на 11–19 % менші, ніж покриття з чіткими границями переходу CrN/NbN (серія C(III)).

Максимальне значення середньої величини мікротвердості $H_{med} = 25,19$ ГПа багатошарових покриттів CrN/NbN було отримано за постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -200$ В, тиску реакційного газу (азоту) у вакуумній камері $P_N = 0,08$ Па й загальній кількості шарів $N = 68$ з періодом бішару $h_0 = 230$ нм. Необхідно зауважити, що максимальне значення абсолютної величини мікротвердості $H_{max} = 35$ ГПа (табл. 3) серед досліджуваних вакуумно-дугових покриттів CrN/NbN має покриття C-2, яке містить 270 шарів із періодом бішару $h_0 = 67$ нм, але водночас воно має максимальний розкид значень мікротвердості СКВ = 7,16 ГПа.

Підвищення постійної негативної напруги на підкладці від -70 В до -200 В за постійного тиску реакційного газу (азоту) у вакуумній камері призводить до зменшення розкиду значень мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN усіх трьох серій відповідно. Це вказує на те, що отримані значення гуртуються навколо середнього значення мікротвердості.

Отже, в умовах збільшення напруги на підкладці формуються багатошарові покриття CrN/NbN з більш однорідною структурою.

Підвищення тиску реакційного газу (азоту) у вакуумній камері від $0,09$ Па до $0,27$ Па за незмінної напруги на підкладці призводить до зменшення розкиду значень мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серії A(I) (у разі постійного обертання підкладкотримача) та збільшення розкиду значень мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN серій B(II) і C(III).

Мікротвердість вакуумно-дугового нітридного покриття визначається здебільшого силами зв'язку атомів металу й неметалу, тоді як на властивості, пов'язані з динамікою кристалічної ґратки (середньоквадратичні амплітуди теплових коливань структурних комплексів ґратки, температура плавлення, постійні пружності), більше впливає зв'язок між самими атомами металу. Так, зростання вмісту атомів азоту в сполуках Cr_xN_y і Nb_xN_y призводить до зменшення мікротвердості. Збільшення ж мікротвердості відбувається внаслідок посилення міжатомного зв'язку атомів металу між собою, а саме в разі зменшення модуля зсуву, коли деформації зсуву металу утруднені.

У табл. 4 подано середні значення модуля пружності (контактний модуль пружності E_r , модуль пружності Юнга E) багатошарових покриттів CrN/NbN, співвідношення H_{med}/E_r , що визначає структурний стан вакуумно-дугового покриття та властивість матеріалу чинити опір механічному впливу, і співвідношення H_{med}^3/E_r^2 , що визначає стійкість матеріалу до пластичної деформації [14].

Таблиця 4 – Фізико-механічні властивості багатошарових покриттів CrN/NbN

Серія покриттів	№ зразка	H_{med} , ГПа	E_r , ГПа	E , ГПа	H_{med}/E_r	H_{med}^3/E_r^2
A(I)	A-1	23,72	300,5	372,9	0,064	0,148
	A-2	22,31	291,5	356,9	0,063	0,131
	A-3	18,77	250,2	291,4	0,064	0,106
B(II)	B-1	22,48	318,0	403,7	0,056	0,112
	B-2	14,53	250,5	293,4	0,050	0,049
	B-3	24,06	279,0	336,9	0,071	0,179
	B-4	25,19	312,3	393,3	0,064	0,164
C(III)	C-1	23,44	299,6	369,3	0,063	0,143
	C-2	23,72	335,3	439,5	0,054	0,119
	C-3	25,05	302,1	373,7	0,067	0,172
	C-4	23,05	286,1	347,2	0,066	0,15

Співвідношення середніх значень мікротвердості до контактного модуля пружності H_{med}/E_r отриманих багатошарових покриттів

CrN/NbN лежить в діапазоні від 0,050 до 0,071, що відповідає наноструктурному стану покриттів.

Унаслідок збільшення кількості шарів у покритті від 68 до 270 контактний модуль пружності E_r зменшується на 6–8 % за постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -200$ В та збільшується на 8–25 %, якщо напруга $U_n = -70$ В за різних тисків реакційного газу (азоту) $P_N = 0,08\text{--}0,27$ Па. Це може відбуватися завдяки зменшенню енергії іонів, що бомбардують підкладку й впливають на механізми утворення покриття. Тобто зменшується вплив радіаційного фактора на властивості покриттів. У багатошарових покриттів із перехідним шаром Cr-Nb-N контактний модуль пружності E_r зменшується на 3,5–12,5 % за умови всіх досліджуваних технологічних параметрів нанесення покриттів. Отже, у багатошарових покриттях серії А(І) із загальною кількістю шарів 1080 на тенденцію змін фізико-механічних властивостей покриттів H_{med} і E_r переважає вплив має характер границь, що утворюються між шарами CrN і NbN.

Максимальне значення контактного модуля пружності $E_r = 335,3$ ГПа вакуумно-дугового покриття CrN/NbN було отримано за постійної негативної напруги на підкладці $U_n = -70$ В, тиску реакційного газу (азоту) у вакуумній камері $P_N = 0,27$ Па й загальної кількості шарів $N = 270$ з періодом бішару $h_\delta = 67$ нм.

Висновки

Дослідження багатошарових покриттів CrN/NbN дали змогу розширити уяву про вплив технологічних параметрів на фізико-механічні властивості отриманих покриттів:

- у багатошарових покриттях CrN/NbN серії С(ІІІ) з найменшим періодом бішару ($h_\delta = 67$ нм) спостерігається збереження середнього значення мікротвердості внаслідок зміни тиску азоту у вакуумній камері (якщо незмінна негативна напруга на підкладці $U_n = -200$ В) на рівні 23,05 ГПа (зразок С-4) – 23,44 ГПа (зразок С-1), а також у разі зміни негативної напруги на підкладці (якщо незмінний тиск реакційного газу (азоту) $P_N = 0,27$ Па) на рівні 23,72 ГПа (зразок С-2) – 23,44 ГПа (зразок С-1);

- збільшення кількості шарів від 68 до 270 призводить до зростання середнього значення мікротвердості H_{med} на 4–39 % за різних технологічних параметрів нанесення багатошарових покриттів, окрім режиму, де $U_n = -200$ В, $P_N = 0,08\text{--}0,09$ Па, коли відбувається зменшення

H_{med} на 8,5 %. Ці зміни пов'язані зі збільшенням кількості міжфазних границь, які впливають на процеси деформування окремих шарів і дифузії між ними. Це приводить до підвищення стійкості до поширення тріщин і пружних властивостей вакуумно-дугових багатошарових нітридних покриттів;

- підвищення постійної негативної напруги на підкладці від -70 В до -200 В в умовах постійного тиску реакційного газу (азоту) у вакуумній камері приводить до зменшення розкиду значень мікротвердості багатошарових покриттів CrN/NbN усіх трьох серій.

Література

1. O. V. Sobol', A. A. Andreev, V. F. Gorban', N. A. Krapivka, V. A. Stolbovoi, I. V. Serdyuk, and V. E. Fil'chikov, *Technical Physics Letters*, 38, No. 7: 616 (2012). <https://doi.org/10.1134/S1063785012070127>
2. V. F. Gorban', R. A. Shaginyan, N. A. Krapivka, S. A. Firstov, N. I. Danilenko, and I. V. Serdyuk, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 54, No. 11–12: 725 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9767-2>
3. M. El Garah, L. Patout, A. Bousssil, A. Charai, and F. Sanchette, *Coatings*, 13, No. 8: 1380 (2023). <https://doi.org/10.3390/coatings13081380>
4. O. V. Sobol', V. M. Beresnev, I. V. Serdyuk, A. D. Pogrebnyak, D. A. Kolesnikov, U. S. Nemchenko, and S. N. Grigoriev, *J. Friction and Wear*, 35, No. 5: 359 (2014). <https://doi.org/10.3103/S1068366614050067>
5. V. F. Horban, I. V. Serdiuk, O. M. Chuhai, O. O. Voloshin, S. V. Oliinyk, H. H. Veselivska, M. I. Danylenko, D. V. Sliusar, V. A. Stolbovyi, and O. S. Kalahan, *Materials Science*, 57, No. 3: 428 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00557-8>
6. O. V. Sobol', A. A. Andreev, V. F. Gorban, A. A. Meylekhov, A. A. Postelnyk, and V. A. Stolbovoy, *J. Nano-Electron. Phys.*, 8, No. 1: 01042 (2016). [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01042](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01042)
7. V. O. Stolbovyi, *J. Nano-Electron. Phys.*, 9, No. 5: 05038 (2016). [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(5\).05038](https://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05038)
8. O. V. Sobol', A. A. Postelnyk, A. A. Meylekhov, A. A. Andreev, V. A. Stolbovoy, and V. F. Gorban, *J. Nano-Electron. Phys.*, 9, No. 3: 03003 (2017). [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(3\).03003](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03003)
9. A. Gilewicz and B. Warcholinski, *Tribology International*, 80, 34 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.06.012>
10. J. J. Roa, E. Jiménez-Piqué, R. Martínez, G. Ramírez, J. M. Tarragó, R. Rodríguez, and L. Llanes, *Thin Solid Films*, 571, 308 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.04.018>
11. R. A. Koshy, M. E. Graham, and L. D. Marks, *Surf. Coat. Technol.*, 202, 1123 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.07.090>

12. Harish C. Barshilia, Anjana Jain, and K. S. Rajam, *Vacuum*, 72, No. 3: 241 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2003.08.003>
13. Zaoli Zhang, Zhuo Chen, David Holec, Christian H. Liebscher, Nikola Koutna, Matthias Bartosik, Yonghui Zheng, Gerhard Dehm, Paul H. Mayrhofer, *Acta Materialia*, 194, 343 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.024>
14. R. Mundotia, T. Ghorude, D. C. Kothari, A. Kale, and N. Thorat, *Ap. Surf. Sci. Adv.*, 7, 100205 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100205>
15. M. Nordin, M. Larsson, and S. Hogmark, *Wear*, 232, No. 2: 221 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00149-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00149-0)
16. Li DeJun, Zang JingJing, and Wang MingXia, *Science in China Series E: Technological Sciences*, 50, 206 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11431-007-0023-3>
17. Keng-Liang Ou, *Microelect. Eng.*, 83, No. 2: 312 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2005.09.008>
18. P. Lazar, J. Redinger, and R. Podlucky, *Phys. Rev. B*, 76, 174112 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.174112>
19. H. O. Postelnyk, O. V. Sobol', V. A. Stolbovoy, I. V. Serdiuk, and O. Chocholaty, *Probl. Atom. Sci. Tech.*, 2: 139 (2020).
20. H. Wang, H. Zeng, Q. Li, and J. Shen, *Thin Solid Films*, 607, 59e66 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.TSF.2016.03.061>
21. J. Lin, J. J. Moore, B. Mishra, M. Pinkas, X. Zhang, and W.D. Sproul, *Thin Solid Films*, 517, 5798e5804 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.TSF.2009.02.136>
22. N. Koutna, D. Holec, M. Friak, P. H. Mayrhofer, and M. Sob, *Mater. Des.*, 144, 310e322 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.033>
23. Julian Buchinger, Nikola Koutna, Zhuo Chen, Zaoli Zhang, Paul Heinz Mayrhofer, David Holec, Matthias Bartosik, *Acta Materialia*, 172, 18 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.04.028>
24. O. V. Sobol', A. A. Andreev, V. A. Stolbovoy, N. V. Pinchuk, and A. A. Meylekhov, *J. Nano-Electron. Phys.*, 7, No. 1: 01026 (2015).
25. S. A. Barnett, A. Madan, I. Kom, and K. Martin, *MRS Bull.* 28, 169 (2003).
26. V. P. Rudenko, V. O. Stolbovoy, I. V. Serdiuk, and K. G. Kartmazov, *East.-Eur. J. Enterp. Tech.*, 48, 6/1: 66 (2010) (in Russian).
27. A. A. Andreev, L. P. Sablev, and S. N. Grigoriev, *Vacuumno-dugovie pokritiya* [Vacuum Arc Coatings] (Kharkiv: 2010).

Сердюк Ірина Віталіївна¹, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. відділу інтенсивних вакуумно-плазмових технологій,
e-mail: iraserduk@kipt.kharkov.ua,
тел. +38 095 603-10-69,
<https://orcid.org/0000-0002-6678-4771>;

Столбовий В'ячеслав Олександрович^{1,2}, д-р техн. наук, професор кафедри технології металів та матеріалознавства імені О. М. Петриченка,

e-mail: stolbovoy@kipt.kharkov.ua,

тел. +38 063 573-18-96,

<https://orcid.org/0000-0001-7734-0642>;

Кривошопка Руслан Васильович¹, аспірант, інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій;

e-mail: kryvoshapkarv@gmail.com,

тел. 0932019035,

<https://orcid.org/0009-0006-4132-1558>;

Петрушенко Сергій Іванович^{3,4}, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики низьких температур, e-mail: petrushenko@univer.kharkov.ua, тел. +38 (057) 707-55-89.

¹Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, вул. Академічна, 1, 61108 Харків, Україна.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

³Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, 61022 Харків, Україна.

⁴Ліберецький технічний університет, вул. Студентська 1402/2, 46117 Ліберець 1, Чеська Республіка.

Physico-mechanical properties of multilayer CrN/NbN coatings

Abstract. Studying the influence of technological deposition parameters on the physical and mechanical properties of CrN/NbN multilayer coatings is important for predicting the required properties of multilayer systems. **Problem.** Increasing the resistance of materials to the destructive effects of external factors remains relevant. One of the methods for solving this problem is the use of protective vacuum-arc coatings with improved wear resistance. **Goal.** The goal is to create and investigate wear-resistant multilayer vacuum arc coatings CrN/NbN at different technological parameters of the deposition - pressure of the reaction gas in the vacuum chamber ($P_N = 0.08\text{--}0.27\text{ Pa}$) and constant negative voltage on the substrate ($U_n = 70\text{--}200\text{ V}$). **Methodology.** Vacuum arc multilayer coatings CrN/NbN were deposited in a modified installation "BULAT-6". Planar raster electron microscopic images were obtained using a Tescan Vega 3 SBU in secondary electron mode at an accelerating voltage of 30 kV. Cross sections were examined in a field emission scanning electron microscope (Zeiss ULTRA Plus) at an accelerating voltage of 2 or 10 kV. The study of physical and mechanical characteristics of coatings on stainless steel samples was carried out by the microindentation method using CMS hardness measurement equipped by standard Vickers pyramid. **Originality.** The study showed that it is possible to form wear-resistant multilayer coatings with different layer thickness (17-

150 nm) and number of layers ($N = 68, 270, 1080$).
Practical value. This article presents the research results that allow obtaining new properties of multilayer coatings deposited by vacuum arc and expanding the scope of their application for resistance to abrasive wear and aggressive environments.

Key words: vacuum arc coatings, multilayer coatings, microhardness, surface morphology, physical and mechanical properties.

Serdiuk Iryna Vitaliivna¹, PhD, Senior Researcher of Department of Intense Vacuum Plasma Technologies,

e-mail: iraserduk@kipt.kharkov.ua,

tel. +38 095 603-10-69,

<https://orcid.org/0000-0002-6678-4771>;

Stolbovyi Viacheslav Oleksandrovich^{1,2}, Doctor of Science, Professor of Department of Metal Technology and Materials Science named after O. M. Petrichenko,

e-mail: stolbovoy@kipt.kharkov.ua,

tel. +38 063 573-18-96,

<https://orcid.org/0000-0001-7734-0642>;

Kryvoshapka Ruslan Vasylovych¹, PhD Student, Institute of Solid State Physics, Materials Science and Technology;

e-mail: kryvoshapkarv@gmail.com,

tel. 0932019035,

<https://orcid.org/0009-0006-4132-1558>;

Petrushenko Serhii Ivanovych^{3,4}, PhD, Associate Professor of the Department of Low Temperature Physics,

e-mail: petrushenko@univer.kharkov.ua,

tel. +38 (057) 707-55-89.

¹National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology», N.A.S. of Ukraine, 1 Akademichna St., UA-61108 Kharkiv, Ukraine.

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine.

³V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sqr., UA-61022 Kharkiv, Ukraine.

⁴Technical University of Liberec, Studentska 1402/2, 46117 Liberec 1, Czech Republic.
