

УДК 621.793

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.37

## СТРУКТУРНИЙ СТАН ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ Ti/TiN-ПОКРИТТІВ

Сердюк І. В.<sup>1</sup>, Столбовий В. О.<sup>1,2</sup>, Андреев А. О.<sup>1</sup>, Горбань В. Ф.<sup>3</sup>,  
Кривошапка Р. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<sup>3</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевіча НАН України

*Анотація.* Підвищення ресурсу праці різального інструменту в умовах знакозмінного навантаження має велике значення, оскільки впливає не тільки на собівартість продукції, але й на конкурентоспроможність підприємства. У роботі було здійснено дослідження структурного стану та фізико-механічних властивостей багатошарових вакуумно-дугових Ti/TiN-покриттів для підвищення тріщиностійкості зносостійких покриттів.

*Ключові слова:* вакуумно-дугові покриття, морфологія, структурний стан, фізико-механічні властивості, мікротвердість, модуль пружності.

### Вступ

Розвиток сучасної техніки вимагає необхідності пошуку нових металічних матеріалів з комплексом фізичних властивостей, якого не можна досягти, використовуючи метали та сплави в кристалічному стані. Стимульовані потребами промисловості стрімко розвиваються нанотехнології, інтенсивно вивчаються можливості створення наноматеріалів з заданими властивостями, зокрема матеріалів з граничними значеннями міцності та твердості. Крім методів отримання матеріалів з нанокристалічною структурою, як порошкові технології та інтенсивні пластичні деформації методи осадження є актуальним предметом детальних експериментальних і теоретичних досліджень. Наноструктурні покриття мають великі потенційні можливості для поліпшення експлуатаційних властивостей різноманітних поверхонь й активно використовуються в галузі інженерії поверхні.

Вакуумно-дуговий розряд використовується в промислових технологіях модифікування поверхонь для отримання унікальних характеристик покриттів. Розряд у парах матеріалу катода створює потоки плазми з початковою енергією іонів у десятки й сотні електрон-вольтів. З катодних плям, в яких щільність струму становить приблизно  $10^6$  А/см<sup>2</sup>, а температура дорівнює 5000 °С, випускаються потоки із атомів матеріалу катода зі ступенем їх іонізації, що досягає 100 %, а це дозволяє за допомогою магнітних полів управляти напрямком і щільністю цих потоків. Кількість іонів, кратність їхнього заряду

й енергія мають тенденцію до збільшення зі зміною температури плавлення матеріалу катода. Під час напускання до вакуумної камери газів (азоту, кисню, сірководню, вуглецевих газів тощо) на підкладці синтезуються покриття, що складаються зі з'єднань цих газів з матеріалами катода. Регулюючи енергію іонів зміною негативного потенціалу на підкладці, можна управляти властивостями покриттів, забезпечуючи необхідні фізико-механічні, антикорозійні та інші властивості. Високий ступінь іонізації плазми дає можливість здійснити очищення поверхні підкладки у високому вакуумі її розпиленням іонами матеріалу, що випаровується, у такий спосіб забезпечити дифузійний зв'язок з покриттям, а отже, й високу адгезію.

Різальні інструменти працюють у досить жорстких умовах. Високі контактні напруги та температури в зоні різання (500...1100 °С) інтенсифікують процеси зношування, зокрема абразивного, адгезійного, окисного та дифузійного. Водночас інструменти зазнають інтенсивних вібрацій, ударів і знакозмінних навантажень. Тому робочі поверхні інструментів повинні мати високу тріщиностійкість, хімічну пасивність щодо оброблюваних матеріалів, тепло- та корозійну стійкість, а також стійкість до окислювання за високих температур. Різноманіття інструментальних матеріалів зумовлене тим, що кожний матеріал повинен мати властивості, оптимальні для конкретного типу завдань. Ці властивості визначають як режими різання, так і геометрію інструментів. Широкий діапазон властивостей вакуумно-дугових багатошарових

покриттів дозволяє застосовувати їх у машинобудуванні для підвищення рівня працездатності інструменту в умовах ударно-переривчастого різання.

### Аналіз публікацій

Аналіз публікацій та досвід попередніх досліджень демонструє, що додавання титану як проміжних шарів до нітриду титану і отримання в такий спосіб багатошарової системи Ti/TiN може підвищити рівень пластичності та загальмувати розвиток тріщин у площині такого покриття завдяки більш низькому модулю пружності титану, як порівняти з нітридом титану. Таким чином, багатошарові Ti/TiN-покриття повинні мати покращений опір руйнуванню на відміну від одношарових покриттів нітриду титану. Проведені в цій галузі дослідження демонструють, що вакуумно-дугові покриття з відносно великою товщиною шарів будуть мати найбільшу тріщиностійкість в разі збереження великої твердості за умови товщини титанових шарів, що становитиме приблизно 120–130 нм [1, 2]. Водночас варто зазначити, що вплив багатошарового стану на релаксацію напружень у шарах позначається за дуже малих періодів (з сумарною товщиною шарів у періоді менше ніж 20–25 нм за співвідношення товщини шарів титану до нітриду титану, що становить не менше ніж 1/4 [3]). Однак у випадку перемішування твердисть таких багатошарових систем є невисокою. У разі застосування вакуумно-дугового методу отримання покриттів з відносно високою енергією заряджених частинок за малої товщини шарів перемішані в процесі осадження зони будуть перекриватися, а титанові шари будуть збагачуватися азотом, що призведе до втрати переваг щодо пластичності титанових шарів у таких багатошарових системах. Тому для забезпечення не перемішаного титанового шару його мінімальна товщина має становити 30 нм, водночас максимальна товщина титанового шару має обмежитись значенням 250 нм. У разі збільшення показників, за даними робіт [1, 2], відбувається різка втрата твердості багатошарової системи.

### Мета та постановка завдання

Метою є дослідження структурного стану та фізико-механічних властивостей вакуумно-дугових багатошарових Ti/TiN-покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати вплив товщини титано-

вого шару та величини негативної напруги на підкладці на структуру, напружено-деформований стан і фізико-механічні властивості багатошарового Ti/TiN-покриття за відносно товстих шарах нітриду титану.

### Результати дослідження

Багатошарові покриття Ti/TiN були отримані у вакуумно-дуговому обладнанні «Булат-6» [4, 5]. Як випарник використовували титан марки ВТ1-0. Покриття наносили на поліровані зразки (підкладки) зі сталі 12Х18Н9Т, що не ржавіє, з розмірами 20x20x3 мм і мідної фольги, товщиною 0,2 мм, які попередньо промивали лужним розчином в ультразвуковій ванні, а потім нефрасом С2-80/120. Зразки розміщували на відстані 250 мм від випарника. Після відкачування вакуумної камери до тиску  $P = 2,7 \cdot 10^{-3}$  Па на зразки подавали негативний потенціал в 1 кВ і за струму дуги 90 А здійснювали очищення й активацію їхньої поверхні бомбардуванням іонами титану протягом 10 хв. Після цього здійснювали осадження шарів титану за тиску залишкових газів  $P = 2,7 \cdot 10^{-3}$  Па і шарів TiN за тиску азоту 0,67 Па. Тривалість нанесення шарів  $T$  становила від 30 до 780 с. Сумарна товщина покриття під час використання шарів з різною їхньою товщиною мала становити приблизно 7 мкм. Кількість двошарових (Ti-TiN) періодів  $N_6$  варіювалась від 7 до 20. Величина негативної напруги на підкладці  $U_n$  змінювалась від 0 В до -200 В. Режими отримання багатошарових покриттів Ti/TiN наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Режими отримання вакуумно-дугових багатошарових покриттів системи Ti/TiN

№	$U_n$ , В	Склад	$P$ , Па	$T$ , с	$N_6$
1	-200	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	30	20
		TiN	0,67	300	
2	-70	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	30	20
		TiN	0,67	300	
3	-40	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	30	20
		TiN	0,67	300	
4	0	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	30	20
		TiN	0,67	300	
5	-200	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	120	8
		TiN	0,67	780	
6	-200	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	240	7
		TiN	0,67	780	
7	-200	Ti	$2 \cdot 10^{-3}$	120	30
		TiN	0,67	120	

Дослідження механічних властивостей здійснювали методом індентування з вико-

ристанням мікроіндентора «Мікрон-Гама». Структурні дослідження зразків здійснювалися на дифрактометрі ДРОН-3М. Електронно-мікроскопічні дослідження проводили на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM-840.

На рис. 1 наведено електронно-мікроскопічний знімок поперечного перерізу багатошарового покриття Ti/TiN для відносно товстого (600 нм) шару TiN.

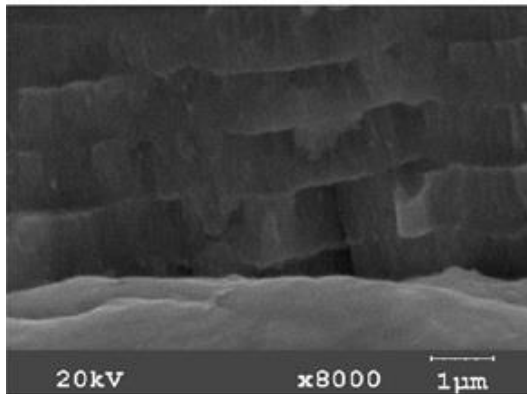


Рис. 1. Знімок поперечного перерізу багатошарового покриття Ti/TiN, отриманого за  $U_n = -200$  В

З попередніх досліджень відомо, що в одношаровому покритті TiN формується стовбчаста (волокниста) структура. Водночас виражена односпрямована волокнистість спостерігається з товщини 100–200 нм від підкладки. За умови менших показників якої орієнтування порушується. Подібна волокнистість наявна і у відносно товстих шарах TiN багатошарового покриття (рис. 1). У цьому випадку спостерігається розшарування як у багатошарових покриттях з відносно товстими (приблизно 600 нм), так і тонкими (приблизно 125 нм) шарами нітриду титану. Причиною такого розшарування можуть бути високі напруги в шарах, що призводять до часткової пластичної течії на їхній межі. Крім того, до такого ефекту може призвести різний структурний стан для нижньої і верхньої частин шару в періоді (Ti-TiN) багатошарової системи.

На рис. 2 наведено дифракційні спектри та результати аналізу структурного стану для багатошарового покриття (20 бішарів) системи Ti (30 нм) / TiN (300 нм) за різних напруг на підкладці  $U_n$ . Основу дифракційного спектра складають рефлекси від фази TiN. Подача напруги на підкладку призводить до

зміни осі переважної орієнтації кристалітів від [100] за невеликої напруги до [111] за високої  $U_n$ . Таким чином, зміна структури в шарах нітриду титану, товщиною 300 нм, у разі збільшення  $U_n$  є аналогічною структурним змінам в одношарових покриттях TiN, загальною товщиною 7 мкм. Рефлекси від титанової складової чітко виражені від перших трьох площин з найбільшою інтенсивністю розсіяння (рис. 2). Наближене до табличних (картка JCPDS 01-1197) співвідношення інтенсивностей для цих рефлексів свідчить про відсутність переважної орієнтації в шарах титану, товщиною 30 нм.

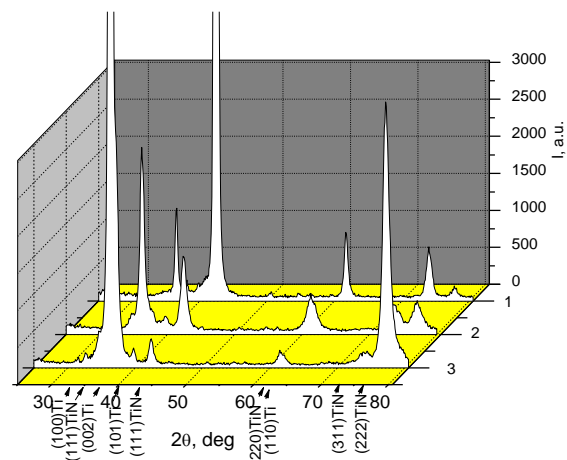


Рис. 2. Ділянки дифракційних спектрів багатошарового покриття Ti(30 нм)/TiN(300 нм), отриманого за напруги  $U_n = 0$  В – спектр 1,  $U_n = -70$  В – спектр 2,  $U_n = -200$  В – спектр 3

Дослідження напружено-деформованого стану багатошарових покриттів Ti/TiN демонструє, що підвищення напруги на підкладці від 0 до -70 В призводить до збільшення напруги стиснення в шарах TiN від -3,1 ГПа за  $U_n = 0$  В до -6,65 ГПа за  $U_n = -70$  В. У цьому випадку розвиток високої деформації у ґратці від 0,96 % ( $U_n = 0$  В) до 2,04 % ( $U_n = -70$  В) призводить до зменшення середнього розміру кристалітів від 19 нм до 11,8 нм. Мабуть, деформація ґратки  $-(2,04...2,10)$  % є граничною для отриманої у нашому випадку фази TiN, тому подальше збільшення  $U_n$  до -200 В не призведе до істотного збільшення напружено-деформованого стану, а за умови високоенергетичного впливу відбувається вдосконалення текстури (111) за одночасного збільшення середнього розміру кристалітів та збільшення багатошарового покриття від

11,8 до 17 нм за умови зменшення величини періоду ґратки. Ці процеси відбуваються через відносне зменшення покриття атомами азоту під час їх розпилення за великої напруги на підкладці (-200 В).

Крім того, збільшення періоду ґратки в ненапруженому перерізі за підвищення напруги  $U_n$  від 0 до -70 В можна пояснити імплантаційним ефектом прискорених іонів титану, що впроваджуються в поверхневі зони покриття і визначають високу деформацію стиснення ґратки. Така зміна напружено-деформованого стану корелює з типом зміни величини періоду ґратки в ненапруженому перерізі. У шарах нітриду титану, товщиною 300 нм, період ґратки збільшується від 0,4239 нм за 0 В до 0,4247 нм за  $U_n = -70$  В і 0,42454 нм за  $U_n = -200$  В. Це свідчить про те, що основною причиною формування напружено-деформованого стану є імплантаційні процеси, що супроводжуються збільшенням періоду ґратки під час поверхневої імплантації прискорених іонів.

Під час порівняльного аналізу структури та напруженого стану багатошарового покриття Ti/TiN за різної товщини (розмірний фактор) титанового шару (рис. 3) було визначено, що в шарах нітриду титану розмір кристалітів хоча й менший за той, що в моношаровому покритті TiN (приблизно 25 нм), але становить в шарах, товщиною 300...600 нм, -16...17 нм, зменшуючись до 14 нм за найменшої товщини шару TiN (приблизно 125 нм).

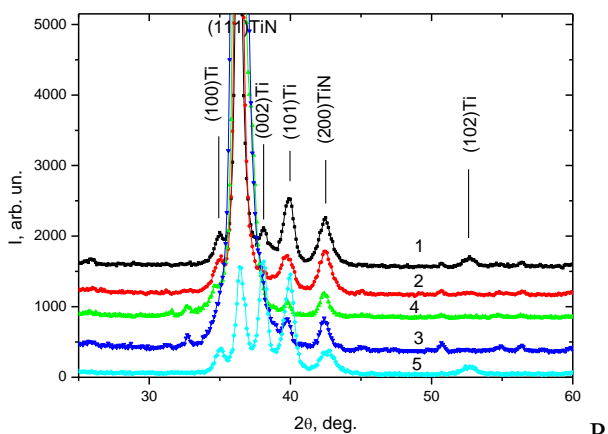


Рис.3. Ділянки дифракційних спектрів багатошарових покриттів Ti/TiN з різними товщинами шарів, отриманих за  $U_n = -200$  В: спектр 1 – зразок 6; спектр 2 – зразок 5; спектр 3 – зразок 1; спектр 4 – одношаровий TiN; спектр 5 – зразок 7

Варто зазначити, що значення розміру нетекстурованих кристалітів значно менші і становлять 7–8 нм. У шарах титану розмір кристалітів менший і змінюється від 8 нм для шару завтовшки 125 нм до 10 нм для шару завтовшки 250 нм, і лише за наявності текстури (001) титану в багатошаровому покритті (зразок № 7) середній розмір кристалітів в напрямку осі текстури збільшується до 14,5 нм.

За найменшої товщини шару нітриду титану 125 нм вже відбувається формування текстури (111). Однак ступінь її досконалості невисокий, водночас у титанових шарах з гексагональними ґратками формується текстура (001). У цьому випадку період гексагональної ґратки титану  $a = 0,29586$  нм, тобто наближений до табличного значення, а період ґратки титану  $c = 0,47249$  нм, тобто перевищує табличні значення. Збільшений період ґратки  $c$ , згідно з даними [6], свідчить про наявність у міжвузлях впроваджених атомів, зокрема азоту. За більш тонкого шару титану 30 нм збільшеними є як період решітки  $a = 0,29601$  нм, так і період  $c = 0,48344$  нм, що свідчить про досить великий вміст в такому титановому шарі домішкових (азотних) атомів і розвиток напруг стиснення. Якщо для відносно великого об'ємного вмісту титану (приблизно 50 об. %) у багатошаровому покритті (зразок 7) ми маємо порівняно невисокий ступінь текстурованості TiN кристалітів з площиною (111), паралельній поверхні збільшення, то у разі збільшення товщини шару до 300 нм і великому об'ємному вмісту (90 об. %) або за більшої товщини 600 нм, але меншому об'ємному вмісту (80 і 70 об. %) текстура (111) TiN посилюється. Ступінь текстурованості, показником якої є співвідношення інтенсивностей піків від площин (111) і (200), збільшується від 4,1 нм (зразок 7) до 10,7 нм (зразок 6), від 18,7 нм (зразок 5) і до 59 нм (зразок 1).

У таблиці 2 наведені результати дослідження мікротвердості  $H_T$  багатошарових покриттів Ti/TiN залежно від товщини шарів  $h$ . Аналіз результатів демонструє, що мікротвердість отриманих багатошарових покриттів за товщини титанового шару  $h_{Ti}$  менша ніж 125 нм, хоча і нижча за моношарове TiN-покриття (27 ГПа), проте становить досить велику величину від 23,7 до 26,3 ГПа. Тобто за товщини шару титану менше ніж 125 нм механічні властивості багатошарового покриття Ti/TiN залишаються досить високими, що за умови відомого з літератури збільшен-

ні тріщиностійкості [1, 2] таких покриттів робить перспективним їх використання за високого знакозмінного навантаження.

Модуль пружності багатошарового покриття Ti/TiN дещо нижче за модуль в одношаровому покритті TiN. У випадку багатошарового покриття Ti(30 нм)/TiN(300 нм) модуль пружності змінюється від 387 ГПа до 401 ГПа за умови збільшення напруги на підкладці  $U_n$  від 0 до -200 В.

Таблиця 2 – Мікротвердість вакуумно-дугових багатошарових покриттів Ti/TiN

№	$U_n$ , В	Склад	$h$ , нм	$H_{\text{Т}}$ , ГПа
1	-200	Ti	30	$26,1 \pm 0,8$
		TiN	300	
2	-70	Ti	30	$25,7 \pm 1,5$
		TiN	300	
3	-40	Ti	30	$26,3 \pm 2$
		TiN	300	
4	0	Ti	30	$25,9 \pm 1,5$
		TiN	300	
5	-200	Ti	125	$24,3 \pm 1,1$
		TiN	600	
6	-200	Ti	250	$15,1 \pm 2,1$
		TiN	600	
7	-200	Ti	125	$23,7 \pm 1,8$
		TiN	125	

У разі збільшення товщини титанового шару модуль пружності багатошарового покриття зменшується за  $U_n = -200$  В до 364 ГПа (для шару завтовшки 125 нм) і до 342 ГПа (для товщини шару 250 нм).

### Висновки

Під час дослідження багатошарових покриттів Ti/TiN було визначено, що в шарах нітриду титану, товщиною 300 нм і більше, у процесі подачі напруги на підкладку розвивається текстура [111].

Ступінь досконалості текстури підвищується зі збільшенням товщини шару. За товщини титанового шару від 30 нм до 250 нм розвиток напружено-деформованого стану в шарах нітриду титану відбувається без їх суттєвої релаксації. Механічні властивості багатошарового покриття Ti/TiN зберігаються досить високими (твердість 23,7...26,3 ГПа) за товщини титанового шару менше ніж 125 нм.

Підвищення тріщиностійкості багатошарових покриттів Ti/TiN внаслідок додавання титанових шарів робить перспективним їх

використання за високого знакозмінного навантаження.

### Література

- Xiang Yu et al. Investigation of Ti/TiN multilayered films in a reactive mid-frequency dual-magnetron sputtering. *Applied Surf. Science*. 2007. V. 253. P. 3705–3711. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.08.002>
- Juergen M. Lackner. Industrially-scaled room-temperature pulsed laser deposition of Ti-TiN multilayer coatings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. V. 59. P. 16–21. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/59/1/004>
- Lin G. et al. Factors Affecting Microhardness of Ti/TiN Multilayer Films Deposited by Pulsed Bias Arc Ion Plating. *Plasma Process Polym.* 2007. V. 4. P. 120–123. <https://doi.org/10.1002/ppap.200730502>
- Сердюк І. В., Столбовий В. О., Доломанов А. В., Домнич В. М. Модернізація технології вакуумно-дугового нанесення багатошарових наноструктурних покриттів. *Металлофізика та новітні технології*. 2022. Т. 44. № 4. С. 547–563. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0547>
- Sisoiev Iu., Serdiuk I., Dolomanov A., Kovteba D. Generator of gas mixtures for ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*. 2017. № 2 (109). Pp. 178–183.
- Veprek S., Veprek-Heijman M. G. J., Karvankova P., Prochazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films*. 2005. V. 476. P. 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>

### References

- Xiang, Yu et al. Investigation of Ti/TiN multilayered films in a reactive mid-frequency dual-magnetron sputtering. *Applied Surf. Science*. 2007. V. 253. P. 3705–3711. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.08.002>
- Juergen, M. Lackner. Industrially-scaled room-temperature pulsed laser deposition of Ti-TiN multilayer coatings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. V. 59. P. 16–21. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/59/1/004>
- Lin, G. et al. Factors Affecting Microhardness of Ti/TiN Multilayer Films Deposited by Pulsed Bias Arc Ion Plating. *Plasma Process Polym.* 2007. V. 4. P. 120–123. <https://doi.org/10.1002/ppap.200730502>
- Serdiuk, I. V., Stolboviy, V. O., Dolomanov, A. V., Domnich, V. M. (2022). Modernization of Vacuum-Arc Deposition Technology of Multilayer Nanostructured Coatings. *Metallophysics and Advanced Technologies*. Vol. 44. No

4. Пp. 547–563.  
<https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0547>
5. Sisoiev, Iu., Serdiuk, I., Dolomanov, A., Kovteba, D. Generator of gas mixtures for ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*. 2017. № 2 (109). Pp. 178–183.
6. Veprek, S., Veprek-Heijman, M. G. J., Karvankova, P., Prochazka, J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films*. 2005. V. 476. P. 1–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>

<sup>1</sup>Сердюк Ірина Віталіївна, к.т.н., с.н.с. відділу інтенсивних іонно-плазмових технологій, тел. +38 095 603-10-69, [iraserduk@kipt.kharkov.ua](mailto:iraserduk@kipt.kharkov.ua)

<sup>1,2</sup>Столбовий В'ячеслав Олександрович, д.т.н., професор кафедри технології металів та матеріалознавства імені О. М. Петриченка, тел. +38 063 573-18-96, [stolbovoy@kipt.kharkov.ua](mailto:stolbovoy@kipt.kharkov.ua)

<sup>1</sup>Андрєєв Анатолій Опанасович, д.т.н., пров. н. с. відділу інтенсивних іонно-плазмових технологій, тел. +38 066 023-84-41, [aandreev@kipt.kharkov.ua](mailto:aandreev@kipt.kharkov.ua)

<sup>3</sup>Горбань Віктор Федорович, д.т.н., пров.н.с. [gorban1944@ukr.net](mailto:gorban1944@ukr.net)

<sup>1</sup>Кривошапка Руслан Васильович, аспірант, тел. +38 093 201-90-35, [kryvoshapkarv@gmail.com](mailto:kryvoshapkarv@gmail.com)

<sup>1</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», вул. Академічна, 1, Харків, 61108, Україна.

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

<sup>3</sup>Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, м. Київ, 03142, Україна.

### Structural state and physical-mechanical properties of multilayer vacuum arc Ti/TiN coatings

**Abstract. Problem.** Increasing the resource of the cutting tools in conditions of variable load is of great importance, as it affects not only the cost of production but also the competitiveness of the enterprise.

A wide range of properties of vacuum arc multilayer coatings allows them to be used in mechanical engineering to increase the performance of the tools in the variable conditions of cutting. **Goal.** The goal is to study the structural state and physical and mechanical properties of vacuum arc multilayer Ti/TiN coatings. To achieve the goal, it is necessary to analyze the effect of the thickness of the titanium layer and the amount of negative stress on the substrate on the structure, stress-strain state, and physical and

mechanical properties of the multilayer Ti/TiN coating with relatively thick layers of titanium nitride. **Methodology.** Multilayer Ti/TiN coatings were obtained in the Bulat-6 vacuum-arc installation. The study of mechanical characteristics was carried out by the indentation method using the Micron-Gama microindenter. Structural studies of the samples were carried out on a DRON-3M diffractometer. Electron microscopic studies were performed on a JEOL JSM-840 scanning electron microscope. **Originality.** It was found that in titanium nitride layers with a thickness of 300 nm or more, a texture develops when a voltage is applied to the substrate [111]. The degree of texture perfection increases with increasing layer thickness. When the thickness of the titanium layer is from 30 nm to 250 nm, the development of the stress-strain state in the titanium nitride layers takes place without significant relaxation. The mechanical properties of the Ti/TiN multilayer coating remain quite high (hardness 33.7...36.3 GPa with a modulus of elasticity 413...434 GPa) when the thickness of the titanium layer is less than 125 nm. **Practical value.** Increasing the crack resistance of Ti/TiN multilayer coatings due to the introduction of titanium layers makes their use promising for hard loads.

**Key words:** vacuum arc coatings, morphology, structural state, physical and mechanical properties, micro-hardness, modulus of elasticity.

<sup>1</sup>Serdiuk Iryna Vitaliivna<sup>1</sup>, PhD, Senior Researcher of Department of Intense Vacuum Plasma Technologies, [iraserduk@kipt.kharkov.ua](mailto:iraserduk@kipt.kharkov.ua), +38 095 603-10-69

<sup>1,2</sup>Stolbovyi Viacheslav Oleksandrovich<sup>2</sup>, Doctor of Science, Professor of Department of Metal Technology and Materials Science named after O.M. Petrichenko, [stolbovoy@kipt.kharkov.ua](mailto:stolbovoy@kipt.kharkov.ua), +38 063 573-18-96

<sup>1</sup>Andreev Anatolij Opanasovich<sup>1</sup>, Doctor of Science, Leading Researcher of Department of Intense Vacuum Plasma Technologies, [aandreev@kipt.kharkov.ua](mailto:aandreev@kipt.kharkov.ua), тел. +38 066 023-84-41

<sup>3</sup>Gorban Viktor Fedorovich<sup>3</sup>, Doctor of Science, Leading Researcher, [gorban1944@ukr.net](mailto:gorban1944@ukr.net)

<sup>1</sup>Kryvoshapka Ruslan Vasilievich<sup>1</sup>, PhD Student [kryvoshapkarv@gmail.com](mailto:kryvoshapkarv@gmail.com), +38 093 201-90-35

<sup>1</sup>NSC KIPT, 1, Akademicheskaya str., Kharkiv, 61108, Ukraine

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>3</sup>Institute for Problems of Material Sciences NAS of Ukraine, 3, Omelian Prytsak str., Kiev, 03142, Ukraine.