

PACS numbers: 06.60.Vz, 46.55.+d, 68.37.Hk, 81.15.-z, 81.20.Wk, 81.40.Pq, 81.65.Lp

Механічне оброблення титанових стопів твердостопним різальним інструментом з вакуумно-дуговими нітридними покриттями на основі вольфраму

I. V. Serdiuk*, V. O. Stolbovyy*, V. Bushlya**, R. V. Kryvoshapka*,
Rémi Lemaire**, Romain Walter**

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

** *Лундський університет, факультет машинобудування,
вул. Оле Ремера, 1,
22100 Лунд, Швеція*

Пошук відповідних покриттів для різальних інструментів має важливе значення для підвищення зносостійкості інструменту та таким чином одержання ліпшої шерсткості поверхні оброблених заготовок і підвищення продуктивності. Вимоги до покриття полягають не тільки в його механічних і міцнісних властивостях, а й у його реагуванні на навантаження під час механічного оброблення та на певний вплив зношування. Для розширення уявлень про явища та механізми зношування вакуумно-дугових покриттів на основі вольфраму на різальному інструменті з карбідом Вольфраму під час механічного оброблення титанового стопу Ti–6Al–

Corresponding author: Iryna Vitaliivna Serdiuk
E-mail: iraserduk@kipt.kharkov.ua

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

** *Department of Mechanical Engineering Sciences, Lund University,
1 Ole Rönners väg., 22100 Lund, Sweden*

Citation: I. V. Serdiuk, V. O. Stolbovyy, V. Bushlya, R. V. Kryvoshapka, Rémi Lemaire, and Romain Walter, Machining of Titanium Alloys with a Cemented Carbide Cutting Tools with Tungsten-Based Vacuum-Arc Nitride Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 8: 993–1014 (2023). DOI: [10.15407/mfint.45.08.993](https://doi.org/10.15407/mfint.45.08.993)

4V були одержані, досліджені та пройшли випробування на токарному верстаті SMT 500 Swedturn з використанням 8% -масляноводяної емульсії за тиску у 10 бар вакуумно-дугові покриття W-N, W-Zr-N, W-Nb-N, W-Cr-N, W-Mo-N, W-TiSi-N, W-TiAlYCr-N. Було встановлено декілька основних механізмів зношування та їхній вплив на геометрію вакуумно-дугових покриттів, а також чинники, що впливають на підвищення експлуатаційних властивостей інструменту.

Ключові слова: вакуумно-дугові покриття, різальний інструмент на основі карбіду Вольфраму, механізми зношування, оброблення титанових стопів, зносостійкість.

Finding the right coatings for cutting tools is essential in order to increase the tool wear resistance and, thus, to get better surface roughness for the machined workpieces, and to improve productivity. A coating requirements are not only its mechanical and strength properties, but also its response to a given load and a given wear exposure. To expand ideas about the phenomena and mechanisms of wear of tungsten-based vacuum-arc coatings on the cemented carbides-based cutting tools during mechanical processing of titanium alloy Ti-6Al-4V, vacuum-arc W-N, W-Zr-N, W-Nb-N, W-Cr-N, W-Mo-N, W-TiSi-N, W-TiAlYCr-N coatings are obtained, investigated and tested on the CNC turning machine SMT 500 Swedturn with use of 8% -oil-water emulsion under pressure of 10 bars. Several main wear mechanisms and their influence on the geometry of vacuum-arc coatings are established, and factors influencing on the improvement of the operational properties of the tool are investigated.

Key words: vacuum-arc coatings, cemented carbides-based cutting tools, wear mechanisms, machining of titanium alloys, wear resistance.

Отримано 8 серпня 2023 р.; остаточн. варіант — 20 серпня 2023 р.

1. ВСТУП

Створення й удосконалення нових матеріалів і стопів, що використовуються у складних або екстремальних умовах, ставлять нові завдання для розробки зносостійких, термостабільних, довговічних інструментів для їхнього механічного оброблення. Одним з прикладів таких тяжкооброблюваних матеріалів є титан і його стопи. Завдяки своїм хемічним і фізичним властивостям вони використовуються не тільки у якості технічних компонентів аерокосмічної техніки (диски та лопатки компресора, деталі повітрозбірника, корпусні та кріпильні деталі тощо) [1, 2], але й для виготовлення імплантів і протезів у медицині [3–6]. Крім того, титан і його стопи знайшли широке застосування у металургії, війсьній і хемічній промисловостях, судноплавстві, у електро- та радіотехніці [7, 8]. Основними перевагами титану та його стопів є невелика густина ($\cong 4,5 \text{ г/см}^3$), висока корозійна стійкість (вища, ніж у мідних стопів, у морській

воді та інших агресивних середовищах); вони не схильні до ламкості та зберігають механічні властивості навіть за дуже низьких температур [9, 10]. Деякі стопи титану мають хороші жароміцні властивості. Висока корозійна стійкість титану та його стопів, особливо до біологічних рідин, якими є кров і лімфа, зумовили високі біоінертні властивості та біосумісність цих матеріалів. Під час знаходження в організмі людини на поверхні титану протягом мілісекунд формується інертна оксидна плівка (на основі TiO_2) завтовшки у 10–100 Å, яка служить бар'єром для подальшої взаємодії з тканиною та чинить опір механічній, хемічній та електрохемічній деградації [11]. Тому титан і його стопи використовуються для виготовлення імплантів, надкісткових фіксаторів, дзеркал, ранорозширювачів, цвяхів для остеосинтези, а також інструментів для різних областей хірургічної медицини [12–14].

Всі ці переваги зумовлюють широке застосування титану та його стопів, але одним з його головних недоліків є погана механічна оброблюваність, зокрема різанням [15], що сповільнює впровадження титану та його стопів у інші сфери життєдіяльності.

Складність механічного оброблення титану та його стопів пов'язана зі схильністю до контактного схоплювання через їхню хемічну/кристалічну спорідненість з більшістю матеріалів для інструменту за високих температур. Це посилюється низькою теплопровідністю титану, що призводить до дуже високих температур у зоні різання та дуже великих градієнтів температури всередині інструменту. Коли ці характеристики поєднуються з високою твердістю та міцністю інструменту за високої температури, продуктивність механічного оброблення титану дуже знижується.

На даний час у вирішенні проблеми оброблюваності титану та його стопів можна виділити два основні підходи в залежності від методів механічного оброблення — абразивні методи та різання. Так, проблему незадовільної оброблюваності титану абразивними методами під час виготовлення сферичних головок ендопротезів кульшового суглоба вирішують застосуванням спеціальних інструментів на основі абразивних композитів, що містять в якості активного компонента синтетичні діаманти [16]. Застосування спеціальної полірувальної пасти уможливило одержати шерсткість обробленої поверхні на рівні 0,04 мкм і забезпечити відсутність шаржування діамантами.

Що стосується складності механічного оброблення титану та його стопів різанням, то ця задача переважно вирішується завдяки удосконаленню різального інструменту шляхом нанесення захисних покриттів, що забезпечують зменшення контактного схоплювання між заготовкою з титану й інструментом. Різноманітність наявних вакуумно-дугових покриттів для різального інструменту дає великі можливості для досліджень [17–21]. Розвиток захисних

покриттів на різальному інструменті від однокомпонентних до багаточастинкових покриттів і покриттів на основі високоентропійних стопів приводить до підвищення їхніх фізико-механічних властивостей, зносо- та термостійкості, що, в свою чергу, збільшує надійність і ресурс роботи інструменту. Таким чином, розробка та дослідження нових захисних вакуумно-дугових покриттів для різального інструменту залишається досі актуальним і перспективним завданням.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ОДЕРЖАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

Широко відомі та добре вивчені вакуумно-дугові нітридні покриття на основі металів IV–VI груп таблиці Менделєєва Ti, Zr, Cr, Mo, Nb та інші мають високі фізико-механічні характеристики у різних умовах застосування [22, 23]. Але одним із слабких місць однокомпонентних покриттів є неможливість використання під час різання стопів, що важко обробляються (наприклад, титанових або нікелевих). Складність застосування таких покриттів полягає в обмежених теплофізичних можливостях, а також у створенні в процесі оброблення стопів сполук покриття з матеріалом, що обробляється. У той же час використання Вольфраму в якості добавки в такі покриття дало б змогу істотно збільшити зносостійкість інструменту, підвищити теплостійкість і понизити рівень взаємодії покриття з оброблюваним матеріалом через низьку хемічну активність. Але однією із складностей застосування вольфраму є висока температура топлення ($\cong 3420^\circ\text{C}$ [24]).

В даний час у літературі зустрічається мало відомостей (експериментальних даних) про вплив добавки Вольфраму у вакуумно-дугові покриття. Тому вивчення цього питання є актуальним і йому присвячено дану статтю.

Вакуумно-дугові нітридні покриття на основі окремих металів Me_1-Me_2-N ($Me_1 = W$, $Me_2 = Zr, Cr, Mo, Nb$), а також багатокомпонентні покриття на основі стопів $Me_1-Me_{\text{стоп}}-N$ ($Me_1 = W$, $Me_{\text{стоп}} = TiSi, TiAlYCr$) були нанесені в модифікованій установці "БУЛАТ-6", схему якої представлено на рис. 1.

В якості випарників використовувалися катоди з чистих металів вакуумної топки — вольфрам (ВЧ без присадок), цирконій (E100), хром (X99H1), молібден (МЧВП), ніобій (H61), а також двокомпонентний стоп TiSi та чотирикомпонентний стоп TiAlYCr. Катоди з чистих металів виготовлялися із прутків діаметром у 60 мм.

В якості підкладинок використовували поліровані зразки з неіржавійної криці 12X18H9T різних розмірів для визначення фізико-механічних і трибологічних властивостей покриттів (рис. 2, а) та зразки різального інструменту з карбіду Вольфраму у кобальтовій

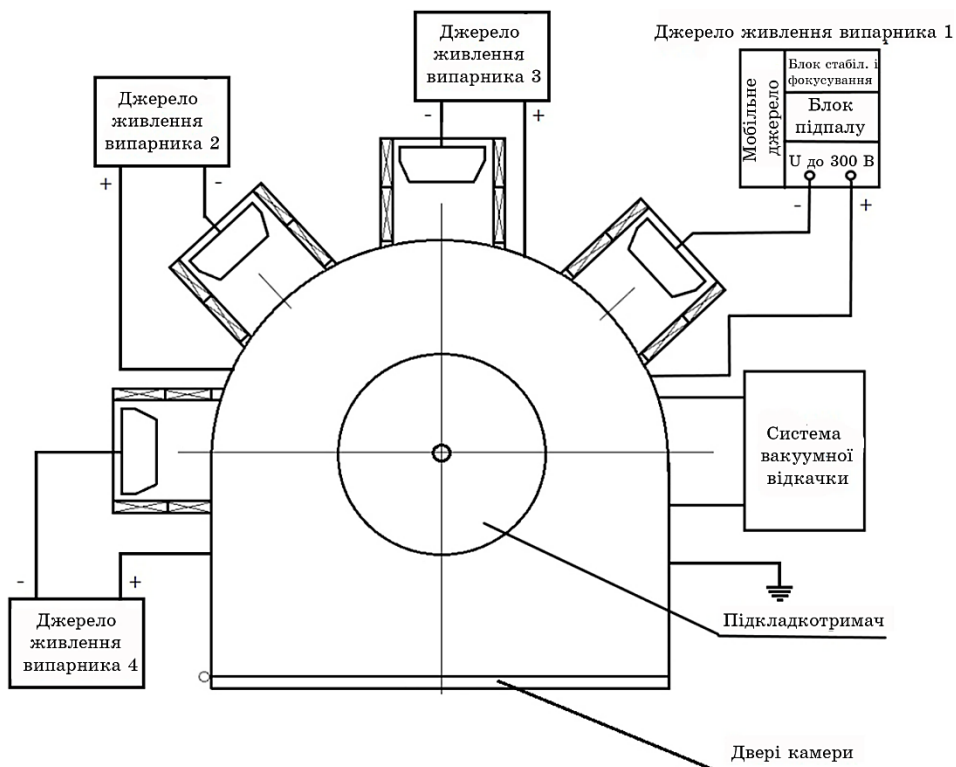


Рис. 1. Схематичне зображення вакуумно-дугової установки (вид зверху).

Fig. 1. Schematic image of a vacuum-arc installation (top view).

матриці WC-Co із добавками TiC/TaC/NbC для підвищення зносостійкості та збільшення гарячої твердості (рис. 2, б).

Зразки попередньо промивали лужним розчином в ультразвуковій ванні, а потім нефрасом C2-80/120. Зразки розташовували по колу на металевому підкладинко-тримачі у вигляді диска діаметром у 280 мм, що знаходився на одному горизонтальному рівні з випарниками. Самі випарники розташовано під кутом 90° один до одного.

Перед нанесенням вакуумно-дугового покриття вакуумну камеру зі зразками відкачували до тиску $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, після чого проводили йонну очистку й активацію поверхні зразків бомбардуванням йонами металів за постійної напруги на підкладинці -1100 В. Процес очищення та нагрівання зразків тривав 10–15 хвилин, після чого наносився підшар чистого металу або стопу для поліпшення адгезійних властивостей покриття.

Нанесення нітридних вакуумно-дугових покриттів на зразки виконувалося протягом 1 години за тиску азоту у вакуумній камері у

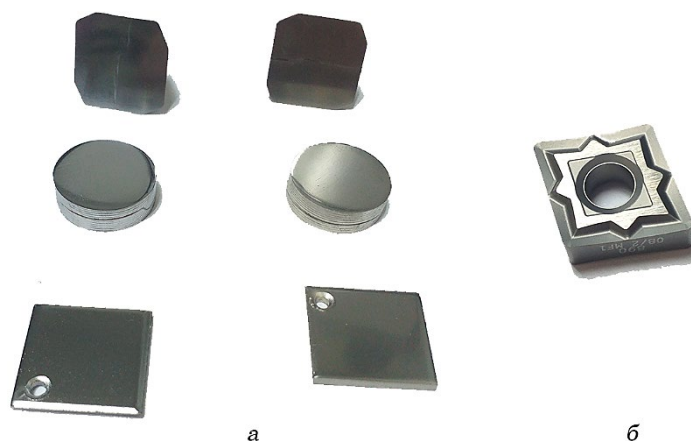


Рис. 2. Фотографії зразків з неіржавійної криці (а) та різального інструменту (б).

Fig. 2. Photographs of stainless steel samples (a) and the cutting tool (b).

0,73 Па, постійної негативної напруги на підкладинці -150 В і постійного обертання підкладинко-тримача зі швидкістю у 12 об/хв. Струм дуги вольфрамового випарника з магнетним утриманням катодної плями без фокусування плазмового потоку складав 200 А, який забезпечувався зовнішнім мобільним потужним джерелом живлення випарника. Для ефективного використання матеріялу катоди та збільшення вмісту Вольфраму у вакуумно-дуговому покритті було застосовано конструктивне рішення виключення котушки випарника, що фокусує плазмовий потік. Це уможливило зменшити віддаль між випарником (вольфрам) і зразками до 360 мм. Струм дуги інших випарників з фокусуванням плазмового потоку магнетним полем $H_{\phi} = 5$ мТл становив 80–110 А. Віддаль від випарників (Zr, Cr, Mo, Nb, TiSi, TiAlYCr) до осі повороту підкладинко-тримача складала 600 мм. Для усунення впливу й уникнення утворення оксидних сполук з Вольфрамом на поверхні вакуумно-дугового покриття, що виникають в атмосферних умовах після вилучення зразків з вакуумного середовища, протягом останніх 5 хвилин процесу нанесення вакуумно-дугового покриття було здійснено утворення нітридного покриття на основі іншого металу Me_2 (Zr, Cr, Mo, Nb) або стопу $Me_{\text{стоп}}$ ($Me_{\text{стоп}} = \text{TiSi, TiAlYCr}$). Орієнтовна товщина останнього захисного шару складає від 210 нм до 420 нм в залежності від матеріялу, що осаджується.

Дослідження фізико-механічних характеристик покриттів на зразках з неіржавійної криці проводили методом індентування з використанням мікротвердоміра ПМТ-3.

Випробування різального інструменту з вакуумно-дуговими пок-

риттями проводили на токарному верстаті з числовим програмним управлінням (ЧПУ; CNC turning machine) SMT 500 Swedturn з використанням 8% -масляноводяної емульсії в якості охолоджувача за тиску у 10 бар. В якості заготовки, що оброблювалася, використовували титановий стоп Ti-6Al-4V (Ti64), який є одним з найбільш поширених титанових стопів у різних галузях: від аерокосмічної техніки (корпусні та кріпильні деталі, диски та лопатки компресора та ін.) до біоінженерії (імпланти та протези).

Параметри різання значною мірою впливатимуть на температурні умови та тиск на поверхні інструменту. Зазвичай, чим вище швидкість різання v_c або довжина різання l , тим більше навантаження на поверхню інструменту та покриття і тим вище температура та тиск [25]. Такі умови можуть вплинути на швидкість зношування інструменту та його інтенсивність. Для того, щоб мати змогу порівнювати знос різального інструменту з різними вакуумно-дуговими покриттями випробування на токарному станку з комп'ютерним керуванням (CNC turning machine) проводили з фіксованими параметрами оброблення заготовки (рис. 3, а-б): швидкість різання $v_c = 120$ м/хв.; навантаження (подача) $f = 0,15$ мм/об; глибина різання $a_p = 0,8$ мм; довжина оброблення $l = 40$ м.

Інші параметри оброблення, що відносяться до процесу точіння, були розраховані з використанням діаметра заготовки: діаметр $d = 80,8$ мм; осьове зміщення $z = 23,2$ мм; швидкість обертання $\omega = 473$ об/хв.; тривалість механічного оброблення $t = 20$ с.

Через обмежену довжину заготовки, що унеможливило провести всі випробування на одному діаметрі, було виконано багаторазові

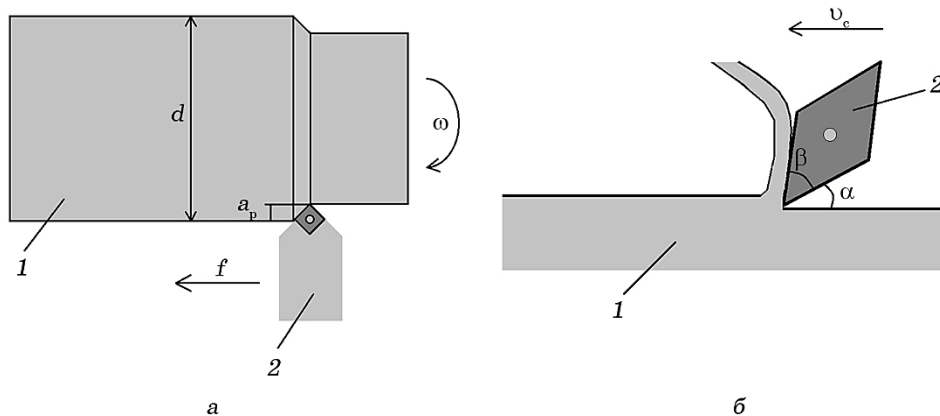


Рис. 3. Параметри механічного оброблення заготовки з титану: 1 — заготовка з титану; 2 — різальний інструмент.

Fig. 3. Parameters of mechanical processing of a titanium workpiece: 1 — titanium workpiece, 2 — cutting tool.

проходи. Через це випробування останніх різальних інструментів з вакуумно-дуговими покриттями були проведені на діаметрі у 79,2 мм зі швидкістю обертання у 482 об/хв. для утримання інших параметрів оброблення на фіксованому рівні.

Дослідження механізмів зношування та стану вакуумно-дугових покриттів на різальному інструменті після випробування на токарному верстаті проводили за допомогою оптичної та сканувальної електронної мікроскопії.

Різальні кромки інструментів з вакуумно-дуговими покриттями, що пройшли випробування, були сфотографовані за допомогою оптичного мікроскопу Olympus SZX7, який був обладнаний камерою та програмним забезпеченням для створення точних зображень інструменту. Фотознімки різальних кромок були зроблені під різними кутами: безпосередньо зверху та збоку (зі сторони заготовки), що уможлиблює побачити та виміряти довжину зносу сторони rake (що загрибає) та флангового боку. Деякі фотографії було зроблено під кутом у 45° для більш об'ємного й інформативного вигляду.

Для подальшого дослідження характеристик і створення поперечного перерізу покриття були зроблені зразки. Для цього різальний інструмент з вакуумно-дуговими покриттями проходив декілька стадій підготовки, що включали в себе розрізання навпіл інструменту (близько до різальної кромки), шліфування залишкового надлишку матеріалу, вирізання потрібної ділянки інструменту з його половинки та лиття в пластичну смолу, полірування поверхні зразків для досліджень.

Електронно-мікроскопічні дослідження одержаних зразків проводилися за допомогою сканувального електронного мікроскопа Tescan Mira3 з роздільною здатністю близько 1 нм.

Для проведення XEDS (X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy) аналізу використовувався енергодисперсійний спектрометр Oxford X-MaxN 80 (124 eV, 80 мм²) з програмним забезпеченням AztecLive в якості приставки до електронного мікроскопа.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Фізико-механічні властивості одержаних вакуумно-дугових покриттів представлено в табл. 1. Мікротвердість H досліджуваних покриттів лежить у діапазоні від 23,6 ГПа (для вакуумно-дугового покриття W–TiSi–N) до 34,1 ГПа (для вакуумно-дугового покриття W–Zr–N). Такі параметри, як хемічний склад покриття, технологічні параметри одержання вакуумно-дугового покриття, склад основи інструменту та заготовки, тип і параметри механічного оброблення заготовки, у поєднанні роблять поведінку зношування покриттів важко передбачуваною, і переважне явище зношування від інструменту до інструменту змінюється.

ТАБЛИЦЯ 1. Фізико-механічні властивості вакуумно-дугових покриттів різного хемічного складу.

TABLE 1. Physical and mechanical properties of vacuum-arc coatings of different chemical composition.

№	№ зразка	Склад покриття	H , ГПа	Товщина покриття, мкм
1	1283	W-N	$32,1 \pm 0,6$	1,9
2	1288	W-Zr-N	$34,1 \pm 0,7$	5
3	1289	W-TiSi-N	$23,6 \pm 0,5$	4,2
4	1292	W-TiAlYCr-N	$28,1 \pm 0,6$	4,8
5	1293	W-Nb-N	$32,3 \pm 0,7$	2,6
6	1294	W-Cr-N	$30,2 \pm 0,6$	3,8
7	1295	W-Mo-N	$31,5 \pm 0,7$	4,7

Розміри штифтів у режимі S: ^c $d = 4,9$ мм, $l = 14,9$ мм, $m = 2,203$ г; ^d $d = 5,2$ мм, $l = 15,0$ мм, $m = 2,632$ г.

Pins' dimensions in mode S: ^c $d = 4.9$ mm, $l = 14.9$ mm, $m = 2.203$ g; ^d $d = 5.2$ mm, $l = 15.0$ mm, $m = 2.632$ g.

Відповідно до [26], розрізняють п'ять основних механізмів деградації, які можуть пояснити відмінності в поведінці та інші спостережувані явища зношування:

абразивне зношування — механічне зношування, котре загалом викликане твердими частинками в матеріялі заготовки; воно дуже схоже на шліфування, та здатність інструменту чинити йому опір сильно залежить від твердості матеріялу інструменту;

дифузійне зношування — хемічний механізм зношування, який послаблює інструмент шляхом обміну певними елементами із заготовкою або стружкою; цей механізм значно залежить від температури та спорідненості між матеріялами інструменту та заготовки;

окиснення, — хемічні реакції, що послаблюють інструмент, — спостерігається лише у зонах, де повітря має змогу дістатися поверхні інструменту, і посилюється за рахунок високої температури;

втомне зношування — механічне явище, що переважно зустрічається під час переривчастого різання та коли сила навантаження на різальний інструмент є дуже великою; викликається повторюваними циклами термічних і механічних навантажень;

адгезійне зношування — механічне послаблення інструменту, що переважно зустрічається за низької температури; враховуючи напругу та високий тиск між деталем та інструментом, частина матеріялу деталю може зварюватися з інструментом, а це невелике скупчення речовини потім поступово відсікається потоком стружки та видаляється через відшарування матеріялу; велика спорідненість між матеріялами заготовки й інструменту може сприяти такому

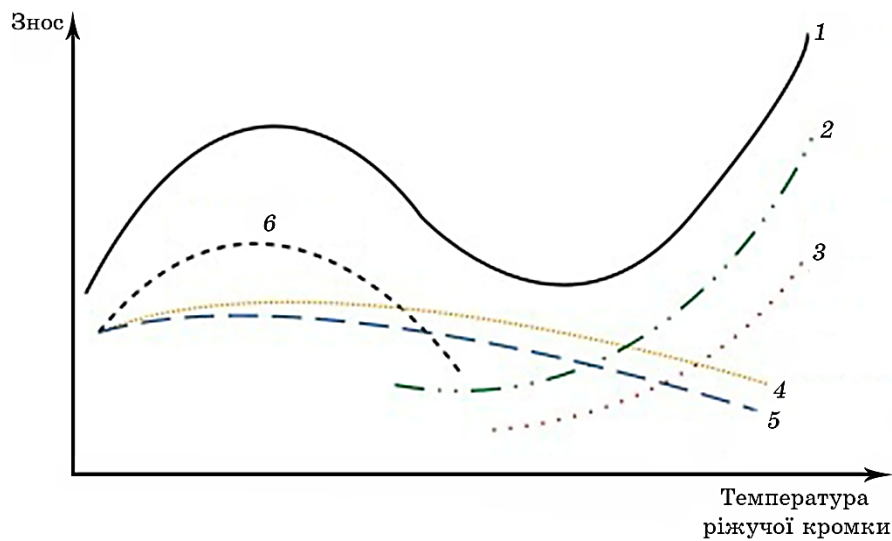


Рис. 4. Діаграма залежності механізмів зношування від температури різальної кромки [27]: 1 — загальний знос, 2 — дифузійний знос, 3 — хемічний знос, 4 — ерозійний знос, 5 — адгезійний знос, 6 — абразивний знос.

Fig. 4. Wear-temperature relationship diagram adapted from [27]: 1—total wear, 2—diffusion wear, 3—chemical wear, 4—erosive wear, 5—adhesive wear, 6—abrasive wear.

механізму.

Вплив деяких з цих механізмів на зношування інструменту з вакуумно-дуговими покриттями буде переважальним за різних температурних умов (рис. 4).

Механічні випробування різального інструменту з вакуумно-дуговими покриттями, зазначеними у табл. 1, за оброблення титанового ступу Ti-6Al-4V (Ti64) виявили наступні типи зносу, що можуть бути розділені в залежності від масштабу.

З огляду на розміщення інструменту на токарному верстаті ділянка пошкодження завжди розташована на різальній кромці; вона включає сторони бокової грані та вістря передньої грані [26], як видно на рис. 5, а. У цих зонах температура та навантаження найвищі; тому відбувається переважальне зношування. Деградація може призвести до змін у геометрії інструменту, вплинути на потік стружки та погіршити шерсткість заготовки з титанового ступу.

Явища макроскопічного зношування.

1) *Кратерне зношування*; цей тип зносу відбувається виключно на передній грані інструменту, де спостерігається потік стружки. Він залишає значний проміжок між наконечником інструменту та недоторканим покриттям, і в більшості випадків він також може

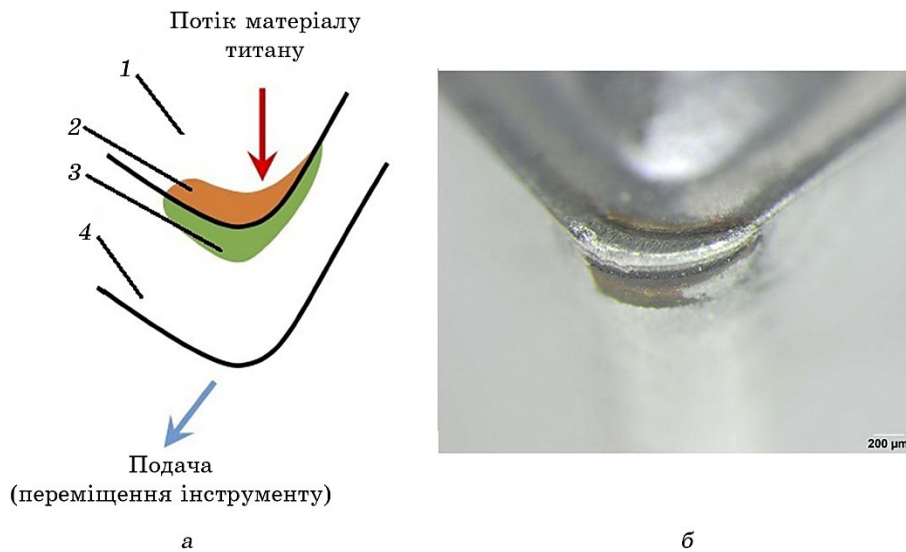


Рис. 5. Зона переважального зношування інструменту: схематичне зображення (а): 1 — передня грань, 2 — зона зношування передньої грані; 3 — зона зношування бічної грані; 4 — бічна грань; фото інструменту з W–Cr–N покриттям (кут обзору — 45°) (б).

Fig. 5. Preferential wearing areas: schematic image (a): 1—rake face, 2—rake wear, 3—flank wear, 4—flank face; tool with W–Cr–N coating (45° observation) (b).

досягати підкладинки з карбиду Вольфраму (рис. 6). Задіяні механізми зношування є абразивними та дифузійними; високі температури сприяють дифузійному зношуванню, тоді як тверді частинки, що рухаються потоком стружки, шліфують покриття. Загальна прогресія зношування може бути сумішшю між цими двома механізмами зношування.

Коли з'являється кратерне зношування, площа контакту між інструментом і деталлю збільшується в розмірах і, таким чином, сприяє більшому навантаженню; кут клину β (рис. 3) також зменшується, що впливає на міцність і теплопередачу різальної кромки, а також на утворення стружки.

Залежно від того, який матеріал піддається впливу потоку стружки, будь то покриття чи підкладинка інструменту, кратерне зношування буде відбуватися по-різному.

2) *Зношування бічної грані* — зношування флангової сторони різальної кромки інструменту. Бічний знос з'являється на боковій поверхні інструменту, залишаючи прогалини в покритті (рис. 7). Це в основному відбувається за рахунок абразивного зношування через потік матеріалу заготовки з цього боку. Занадто велика шви-

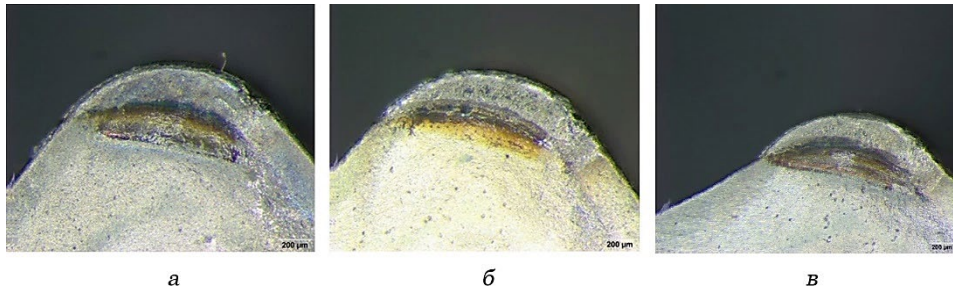


Рис. 6. Знімки кратерного зношування інструменту з вакуумно-дуговими покриттями W-N (а), W-Zr-N (б), W-Nb-N (в).

Fig. 6. Rake wear of cutting tools with vacuum-arc coatings W-N (a), W-Zr-N (б), W-Nb-N (в).

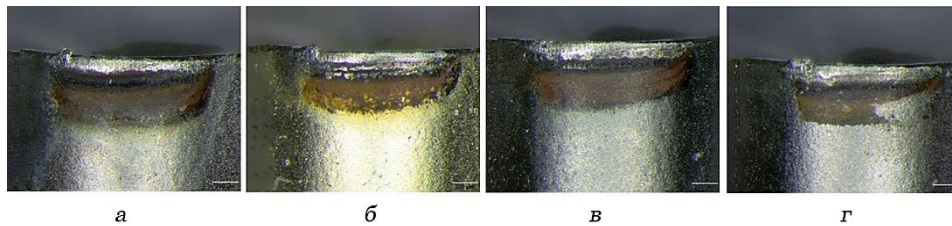


Рис. 7. Знімки зносу бічної грані інструменту з вакуумно-дуговими покриттями W-N (а), W-Zr-N (б), W-Nb-N (в), W-Cr-N (г).

Fig. 7. Flank wear of cutting tools with vacuum-arc coatings W-N (a), W-Zr-N (б), W-Nb-N (в), W-Cr-N (г).

дкість різання або недостатня зносостійкість сприяють такому виду зношування.

Зміна геометрії поверхні флангової сторони різальної кромки інструменту впливає на кут зазору α (рис. 3). Його зменшення приводить до збільшення сил зсуву та нормальних сил; отже, ці умови підвищують температуру у зоні різання через тертя. Зношування триває, доки кут зазору не досягне значення $\alpha = 0^\circ$; у цей момент можуть виникнути серйозні пошкодження інструменту на тримачі інструменту або на заготовці через вигинання їх або погіршення текстури поверхні.

3) *Нарощена кромка*; матеріал заготовки налипає на різальну кромку та зварюється на холодно з інструментом (переважно виникає за повільної швидкості різання, оскільки інші явища перешкоджають їхньому накопиченню за більш високих швидкостей).

Завдяки плинності матеріалу, як по передній, так і по бічній поверхнях інструменту (стружки та заготовки відповідно), деяка кількість титанового ступу може прилипнути до різальної кромки інструмен-

ту й утворити невеликі ділянки, які називаються нарощеними кромками. Титановий стоп, що обробляється, може приварюватися на інструменті через високий тиск і спорідненість між матеріалами заготовки та вакуумно-дугового покриття.

Є два основні небажані наслідки такого зношування. По-перше, погіршується геометрія інструменту та скорочується термін служби інструменту; по-друге, така агрегація речовини може погіршити текстуру поверхні заготовки [26]. Однак створення нарощеної кромки мало також інший вплив. У деяких випадках вона захищала поверхню інструменту, особливо передню грань від кратерного зношування [25].

Під час дослідження різальних інструментів з вакуумно-дуговими покриттями, зазначеними в табл. 1, не спостерігалася наявність таких нарощених кромки. Це може бути пов'язано з обраною швидкістю різання, а також з хемічним складом вакуумно-дугових покриттів, що впливає на хемічну спорідненість.

Більшість попередніх типів зносу спостерігалися під мікроскопом, не розрізаючи інструмент навпіл. Але тепер ми глибше зосередимося на зношуванні, яке відбувається в мікроскопічному масштабі, в межах товщини покриття. Для цього кожен інструмент пройшов підготовку зразків (процеси різання, шліфування та полірування) для ліпшої аналізи зносу в мікроскопічному масштабі. Загалом, ці типи зносу впливають на макроскопічний аспект зношування передньої та бічної поверхонь інструменту. Явища, що відбуваються в покриттях, є непередбачуваними, виявляються на невеликих ділянках, і прогресування зношування повністю відрізняється від одного інструменту до іншого.

Явища мікроскопічного зношування.

1) *Макротріщинуватість.* Такий вид зносу залишає гострі краї на вакуумно-дуговому покритті інструменту, оскільки він пов'язаний з відривом шматочків покриття або підкладинки великих розмірів (декілька мкм). Але частинки, що були видалені таким шляхом, спостерігалися рідко, оскільки вони швидко видаляються від близькості до інструменту. Це приводить до характерної ступінчастої форми (дуже різка зміна нахилу поверхні зношеної зони) та може бути викликано адгезійним або втомним зношуванням (рис. 8). Сходинок на покритті з'являлися або на передній поверхні, або на бічній стороні інструменту (рис. 9). Іноді спостерігався відрив ділянки вакуумно-дугового покриття, оскільки всередині нього поширювалася тріщина (рис. 10).

2) *Мікротріщинуватість.* Це явище тісно пов'язане з попереднім типом зносу, але діє у меншому масштабі. Дуже маленькі частинки покриття або підкладинки інструменту (розміром до мкм) відриваються та переносяться потоком матеріалу (потоком стружки по передній грані інструменту або матеріалом заготовки по бо-

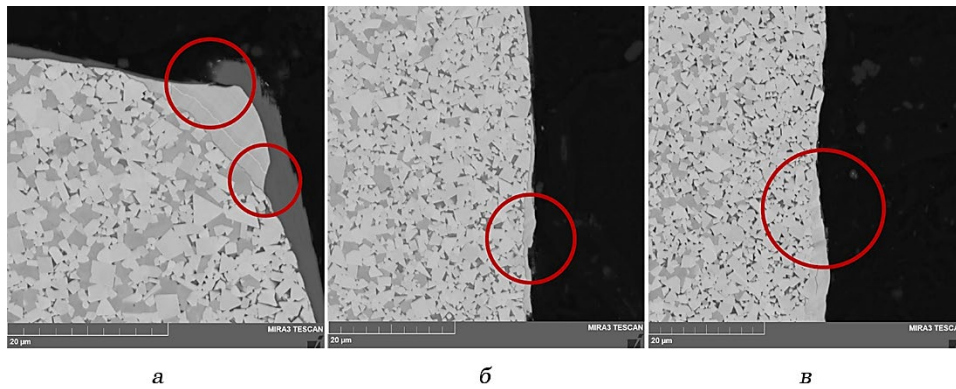


Рис. 8. Макротріщинуватість вакуумно-дугових покриттів W-Zr-N (а), W-TiSi-N (б), W-Cr-N (в) на різальному інструменті.

Fig. 8. Macrofracturing of vacuum-arc coatings W-Zr-N (a), W-TiSi-N (б), W-Cr-N (в) on the cemented-carbides' cutting tools.

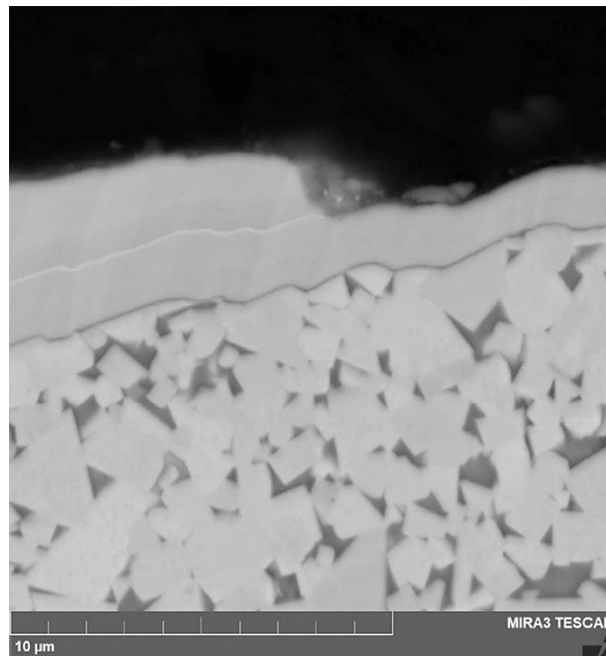


Рис. 9. Знімок ділянки інструменту з W-Zr-N-покриттям (сходінка ступінчастої форми).

Fig. 9. Cutting tool with W-Zr-N coating (of step shape).

ковій стороні) (рис. 11).

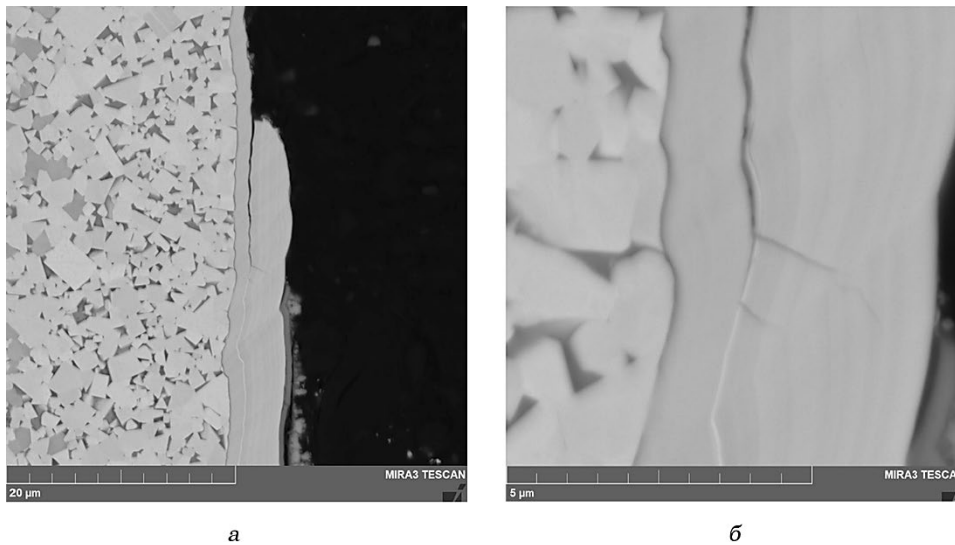


Рис. 10. Знімки інструменту з W–Zr–N-покриттям. Бічна поверхня — ділянка покриття, що відривається. Масштаб: 20 мкм (а), 5 мкм (б).

Fig. 10. Cutting tool with W–Zr–N coating. Flank side—piece of coating tearing apart. Scale: 20 μm (а), 5 μm (б).

Передня грань інструменту зазнає більш низької швидкості потоку матеріалу, що сприяє мікротріщинам покриття [28]. Через деякий час це приводить до суцільної плавної форми зношеної ділянки та може бути викликано адгезійним зношуванням.

3) *Плавне зношування* — це дійсно плавне та лінійне зношування інструменту (рис. 12). Він спостерігався на інструменті з вакуумно-дуговим W–Zr–N-покриттям, і його легко впізнати, оскільки він залишає пошкоджену різальну кромку інструменту та бокову поверхню з гладкими поверхнями. Товщина покриття поступово зменшується, доки не оголиться підкладка з карбіду Вольфраму. Поява цього зносу може бути викликана двома чинниками: комбінацією механічного зносу та дифузії або наявністю дуже дрібних мікротріщин.

4) *Дефекти*. В даному випадку мають на увазі краплі та горизонтальні тріщини. Краплі є особливістю вакуумно-дугового методу нанесення покриття (рис. 13, а, б). Вони впливають на гладкість поверхні покриття, мають тенденцію утворювати багато нерівностей, які можуть діяти як опорні точки для прилипання матеріалу заготовки та зриву покриття. Занадто великі краплі змінюють форму покриття та додають йому багато нерівностей. Але достатньо маленькі крапельки всередині покриття також послаблюють його структуру, оскільки вони стають точками концентрації напружень,

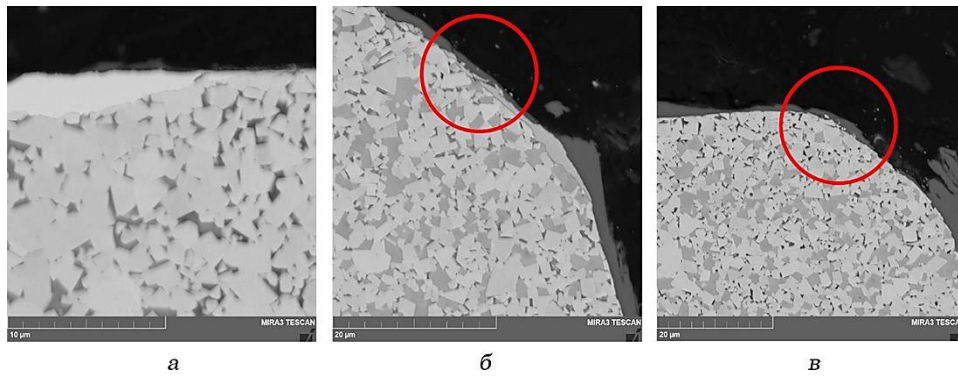


Рис. 11. Мікротріщинуватість вакуумно-дугових покриттів W-N (а), W-TiSi-N (б), W-Cr-N (в) на різальному інструменті.

Fig. 11. Microfracturing of vacuum-arc coatings W-N (a), W-TiSi-N (б), W-Cr-N (в) on the cemented-carbides' cutting tools.

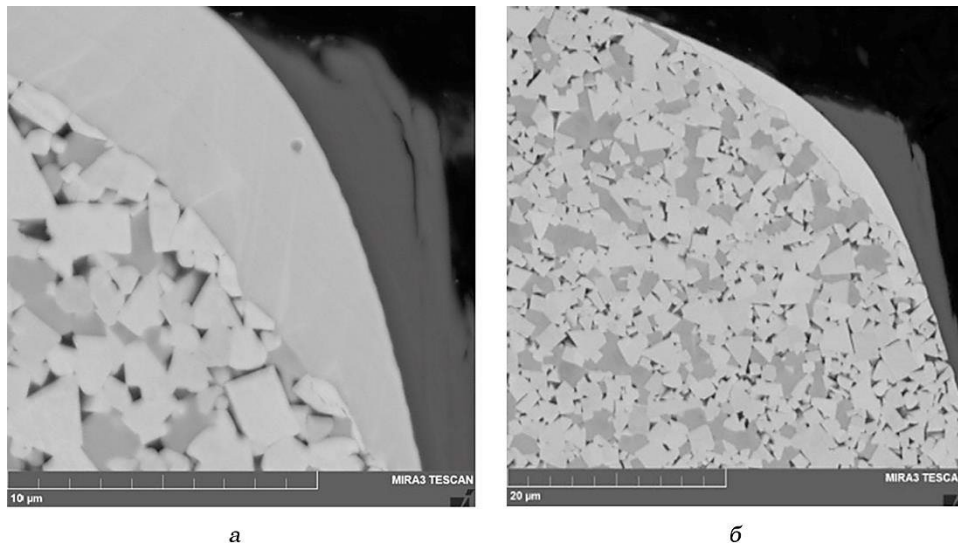


Рис. 12. Плавне зношування досліджуваних вакуумно-дугових W-Zr-N-покриттів на різальному інструменті.

Fig. 12. Smooth wear of investigated cutting tools with vacuum-arc coating W-Zr-N.

коли інструмент зазнає високих зусиль під час оброблення. Якщо напруження перевищує певне значення, тріщина може поширюватися всередині покриття (рис. 13, в). Чим менше дефектів, тим ліпше покриття.

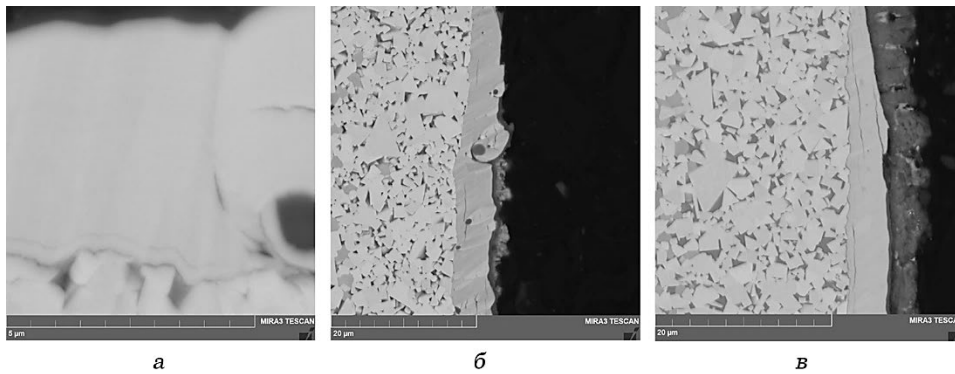


Рис. 13. Дефекти: краплі в вакуумно-дуговому покритті W-TiSi-N (а), W-TiAlCrY-N (б) та горизонтальні тріщини в вакуумно-дуговому покритті W-TiSi-N (в).

Fig. 13. Defects: droplets in vacuum-arc coatings W-TiSi-N (a), W-TiAlCrY-N (б) and horizontal cracks in vacuum-arc coatings W-TiSi-N (в).

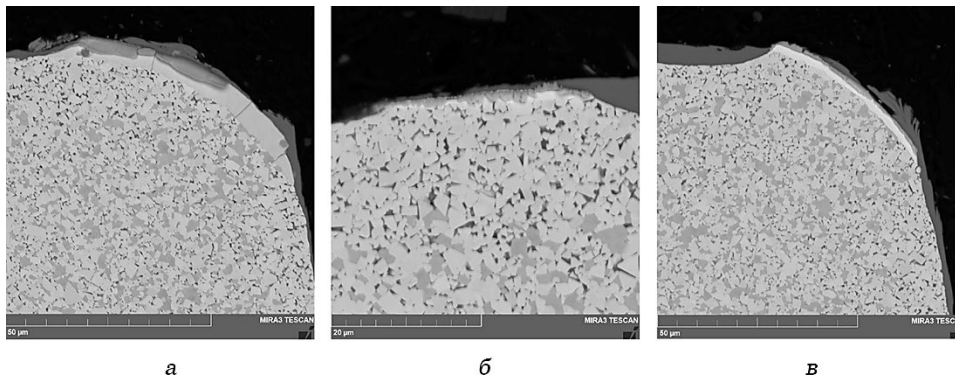


Рис. 14. Нові явища у вакуумно-дугових покриттях W-Mo-N (а), W-N (б, в) за оброблення титанового стопу Ti-6Al-4V.

Fig. 14. Unknown phenomena in vacuum-arc coatings W-Mo-N (a), W-N (б, в) during the machining of the titanium alloy Ti-6Al-4V.

5) *Нові явища.* Під час дослідження різального інструменту з вакуумно-дуговими покриттями зустрічалися цікаві явища, що відбувалися на поверхні покриття і які поки що складно пояснити (рис. 14). Виникнення цих явищ може бути пов'язано як з обраними параметрами різання, так і з іншими чинниками.

Узагальнені одержані результати дослідження різального інструменту з різними вакуумно-дуговими покриттями представлено в табл. 2 (з наступними поясненнями: 1 — макротріщинуватість, 2

ТАБЛИЦЯ 2. Випадки зносу для кожного вакуумно-дугового покриття на твердостопному різальному інструменті за оброблення титанового стопу Ti-6Al-4V.

TABLE 2. All encountered wear behaviours per vacuum-arc coatings on the cemented-carbide cutting tool during the machining of the titanium alloy Ti-6Al-4V.

Склад покриття	макротріщ.	мікротріщ.	адгез. знош.	дифуз. знош.	дефекти	перпенд. тріщ.	плавне знош.	нові явища	без покрит.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W-N		×						×	
W-Zr-N	×				×		×	×	
W-TiSi-N	×	×			×				
W-TiAlYCr-N					×				×
W-Nb-N	×								
W-Cr-N	×	×							×
W-Mo-N	×				×	×		×	

— мікротріщинуватість, 3 — адгезійне зношування, 4 — дифузійне зношування, 5 — дефекти, 6 — перпендикулярні тріщини, 7 — плавне зношування, 8 — нові явища, 9 — повне стирання покриття до поверхні інструменту).

4. ВИСНОВКИ

Дослідження вакуумно-дугових W-N-, W-Zr-N-, W-Nb-N-, W-Cr-N-, W-Mo-N-, W-TiSi-N-, W-TiAlYCr-N-покриттів на різальному інструменті з карбиду Вольфраму за механічного оброблення титанового стопу Ti-6Al-4V на токарному верстаті SMT 500 Swedturn з використанням 8%-масляноводяної емульсії за тиску у 10 бар дали змогу розширити уявлення про явища та механізми зношування вакуумно-дугових покриттів на основі вольфраму. Слід зауважити, що одержані результати стосуються механічного оброблення титанового стопу Ti-6Al-4V за фіксованих параметрів оброблення заготовки, а саме, за швидкості різання у 120 м/хв., навантаження (подачі) у 0,15 мм/об., глибини різання у 0,8 мм,

довжини оброблення у 40 м, швидкості обертання у 473 об/хв., тривалості механічного оброблення у 20 с.

Одержані результати досліджень можна узагальнити у вигляді наступних висновків.

- 1) Переважальним явищем мікроскопічного зношування, яке зустрічалось під час випробовування, є макротріщинуватість, що пов'язана з відривом ділянок покриття розміром у декілька мкм і появою характерної ступінчастої форми поверхні вакуумно-дугового покриття на інструменті. Це явище спостерігалось на різальному інструменті з покриттями W-Zr-N, W-Nb-N, W-Cr-N, W-Mo-N, W-TiSi-N.
- 2) Мікротріщинуватість, яка відрізняється від попереднього явища мікроскопічного зношування розміром частинок покриття (до мкм), що відриваються та переносяться потоком матеріалу і приводять до плавної форми поверхні вакуумно-дугового покриття, спостерігалася на різальному інструменті з покриттями W-N, W-Cr-N, W-TiSi-N.
- 3) Плавне зношування спостерігалось тільки на інструменті з вакуумно-дуговим W-Zr-N-покриттям. Воно залишило пошкоджену різальну кромку інструменту та бокову поверхню з гладкими поверхнями; товщина покриття поступово зменшувалася до поверхні інструменту з карбіду Вольфраму.
- 4) Дослідження одержаних вакуумно-дугових покриттів показало, що наявність дефектів у покриттях, яка пов'язана з технологією нанесення покриттів, не є обов'язковою. Так, на різальному інструменті з вакуумно-дуговими покриттями W-Zr-N, W-TiSi-N, W-TiAlYCr-N зустрічалися каплі різного розміру. У вакуумно-дуговому W-Mo-N-покритті спостерігалися горизонтальні тріщини, поява яких скоріш за все пов'язана з наявністю всередині покриття дефектів у вигляді дуже маленьких крапельок, які стали точками концентрації напружень за високих навантажень інструменту під час механічного оброблення титанового стопу. В той же час на різальному інструменті з вакуумно-дуговими покриттями W-N, W-Nb-N, W-Cr-N не спостерігалася наявність дефектів.
- 5) Цікавим результатом проведених досліджень стала відсутність адгезійного та дифузійного зношувань. На це вказує відсутність нарощених кромок, тобто ділянок різальної кромки інструменту з матеріалом заготовки (титановим стопом), що налипає.
- 6) Під час дослідження різальних інструментів з вакуумно-дуговими покриттями на основі вольфраму за оброблення титанового стопу Ti-6Al-4V було виявлено нові цікаві явища у W-Mo-N- та W-N-покриттях, які будуть досліджуватися далі.

Таким чином, на основі одержаних результатів серед досліджуваних вакуумно-дугових покриттів можна виділити наступні пок-

риття, які мали найменшу кількість з перелічених вище явищ, а саме:

- W–N-покриття — тріщинуватість та нові явища;
- W–TiAlYCr–N-покриття — дефекти та повне стирання покриття до поверхні інструменту;
- W–Nb–N-покриття — макротріщинуватість;
- W–Cr–N-покриття — макро- та мікротріщинуватість, повне стирання покриття до поверхні інструменту.

Одержання вакуумно-дугових покриттів і дослідження їхніх фізико-механічних властивостей було виконано за підтримки НАН України найважливіших проблем фізико-математичних і технічних наук (відомча тематика 6541230: № 0121U110102). Проведення на кафедрі інженерної механіки машинобудівного факультету Лундського університету випробувань різального інструменту з вакуумно-дуговими покриттями W–N, W–Zr–N, W–Nb–N, W–Cr–N, W–Mo–N, W–TiSi–N, W–TiAlYCr–N, що були одержані у відділі інтенсивних вакуумно-плазмових технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», стало можливим завдяки тісній співпраці науковців обох установ в рамках міжнародного співробітництва за програмою EURIZON Fellowship Programme 'Remote Research Grants'.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко, *Конструкционные материалы в самолетостроении* (Київ: КВІЦ; 2015).
2. J. C. Williams and R. R. Boyer, *Metals*, **10**, No. 6: 705 (2020).
3. G. He and M. Hagiwara, *Mater. Sci. Eng. C*, **26**, No. 1: 14 (2006).
4. S. X. Liang, X. J. Feng, L. X. Yin, X. Y. Liu, M. Z. Ma, and R. P. Liu, *Mater. Sci. Eng. C*, **61**: 338 (2016).
5. R. Karre, M. K. Niranjana, and S. R. Dey, *Mater. Sci. Eng. C*, **50**: 52 (2015).
6. M. F. Ijaz, H. Y. Kim, H. Hosoda, and S. Miyazaki, *Mater. Sci. Eng. C*, **48**: 11 (2015).
7. I. Gurrappa, *Mater. Charact.*, **51**, Nos. 2–3: 131 (2003).
8. C. Veiga, J. P. Davim, and A. J. R. Loureiro, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **32**: 14 (2012).
9. J. C. Fanning, *J. Mater. Eng. Perform.*, **14**: 788 (2005).
10. M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, and C. Leyens, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications* (Eds. C. Leyens and M. Peters) (Wiley-VCH Verlag, GmbH & Co.: KGaA: 2003).
11. С. Л. Старикова, В. В. Стариков, *Вестник проблем биологии и медицины*, **2**, № 2 (108): 160 (2014).
12. H. Serhan, M. Slivka, T. Albert, and S. D. Kwak, *Spine J.*, **4**, No. 4: 379 (2004).
13. F. Guilleminot, *Expert Rev. Med. Devic.*, **2**, No. 6: 741 (2005).
14. M. Niinomi, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **1**, No. 1: 30 (2008).
15. В. К. Біланенко, *Sci. J. «ΛΟΓΟΣ. The Art of Scientific Mind»*, **2**: 90 (2019).
16. S. E. Sheikin, I. M. Pogrelyuk, and D. A. Sergach, *J. Superhard Mater.*, **37**, No. 5: 75 (2015).

17. A. S. Manokhin, S. A. Klymenko, V. O. Stolboviy, I. V. Kolodiy, M. Yu. Kopieikina, S. An. Klymenko, K. V. Kamchatna-Stepanova, and I. V. Serdyuk, *J. Superhard Mater.*, **44**, No. 5: 368 (2022).
18. I. B. Сердюк, В. О. Столбовий, А. В. Доломанов, В. М. Домнич, *Металлофіз. новітні технол.*, **44**, №. 4: 547 (2022).
19. H. O. Postelnyk, O. V. Sobol', V. A. Stolbovoy, I. V. Serdiuk, and O. Chocholaty, *Probl. Atom. Sci. Tech.*, **2**: 139 (2020).
20. V. F. Gorban', R. A. Shaginyan, N. A. Krapivka, S. A. Firstov, N. I. Danilenko, and I. V. Serdyuk, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **54**, Nos. 11–12: 725 (2016).
21. O. V. Sobol', A. A. Andreev, R. P. Mygushchenko, V. M. Beresnev, A. A. Meylekhov, A. A. Postelnyk, S. A. Kravchenko, T. A. Tabaza, S. M. Al-Qawabah, U. F. Al-Qawabeha, V. A. Stolbovoy, I. V. Serdyuk, D. A. Kolesnikov, and M. G. Kovaleva, *Probl. Atom. Sci. Tech.*, **1**: 82 (2018).
22. А. А. Андреев, В. А. Столбовой, И. В. Сердюк, *East-Eur. J. Enterp. Tech.*, **2**, No. 5: 65 (2011).
23. 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).
24. Н. С. Ахметов, *Общая и неорганическая химия* (Москва: Высшая школа: 2001).
25. M. S. I. Chowdhury, B. Bose, K. Yamamoto, L. S. Shuster, J. Paiva, G. S. Fox-Rabinovich, and S. C. Veldhuis, *Wear*, **446–447**: 203168 (2020).
26. *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook* (Sandvik Coroman: 1994).
27. J.-E. Stahl, *Metal Cutting Theories and Models* (SECO TOOLS AB: 2012).
28. S. Koseki, K. Inoue, and H. Usuki, *Precision Eng.*, **44**: 41 (2016).

REFERENCES

1. A. G. Molyar, A. A. Kotsyuba, A. S. Bychkov, and O. Yu. Nechyporenko, *Konstruktivnyye Materialy v Samolyotostroenii* [Structural Materials in Aircraft Construction] (Kiev: KVITs: 2015) (in Russian).
2. J. C. Williams and R. R. Boyer, *Metals*, **10**, No. 6: 705 (2020).
3. G. He and M. Hagiwara, *Mater. Sci. Eng. C*, **26**, No. 1: 14 (2006).
4. S. X. Liang, X. J. Feng, L. X. Yin, X. Y. Liu, M. Z. Ma, and R. P. Liu, *Mater. Sci. Eng. C*, **61**: 338 (2016).
5. R. Karre, M. K. Niranjan, and S. R. Dey, *Mater. Sci. Eng. C*, **50**: 52 (2015).
6. M. F. Ijaz, H. Y. Kim, H. Hosoda, and S. Miyazaki, *Mater. Sci. Eng. C*, **48**: 11 (2015).
7. I. Gurrappa, *Mater. Charact.*, **51**, Nos. 2–3: 131 (2003).
8. C. Veiga, J. P. Davim, and A. J. R. Loureiro, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **32**: 14 (2012).
9. J. C. Fanning, *J. Mater. Eng. Perform.*, **14**: 788 (2005).
10. M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, and C. Leyens, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications* (Eds. C. Leyens and M. Peters) (Wiley-VCH Verlag, GmbH & Co.: KGaA: 2003).
11. S. L. Starikova and V. V. Starikov, *Bulletin of Problems in Biology and Medicine*, **2**, No. 2 (108): 160 (2014) (in Russian).
12. H. Serhan, M. Slivka, T. Albert, and S. D. Kwak, *Spine J.*, **4**, No. 4: 379 (2004).

13. F. Guillemont, *Expert Rev. Med. Devic.*, **2**, No. 6: 741 (2005).
14. M. Niinomi, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **1**, No. 1: 30 (2008).
15. V. K. Bilanenko, *Sci. J. «ΛΟΓΟΣ. The Art of Scientific Mind»*, **2**: 90 (2019) (in Ukrainian).
16. S. E. Sheikin, I. M. Pogrelyuk, and D. A. Sergach, *J. Superhard Mater.*, **37**, No. 5: 75 (2015).
17. A. S. Manokhin, S. A. Klymenko, V. O. Stolboviy, I. V. Kolodiy, M. Yu. Kopieikina, S. An. Klymenko, K. V. Kamchatna-Stepanova, and I. V. Serdyuk, *J. Superhard Mater.*, **44**, No. 5: 368 (2022).
18. I. V. Serdiuk, V. O. Stolboviy, A. V. Dolomanov, and V. M. Domnich, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 4: 547 (2022) (in Ukrainian).
19. H. O. Postelnyk, O. V. Sobol', V. A. Stolbovoy, I. V. Serdiuk, and O. Chocholaty, *Probl. Atom. Sci. Tech.*, **2**: 139 (2020).
20. V. F. Gorban', R. A. Shaginyan, N. A. Krapivka, S. A. Firstov, N. I. Danilenko, and I. V. Serdyuk, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **54**, Nos. 11–12: 725 (2016).
21. O. V. Sobol', A. A. Andreev, R. P. Mygushchenko, V. M. Beresnev, A. A. Meylekhov, A. A. Postelnyk, S. A. Kravchenko, T. A. Tabaza, S. M. Al-Qawabah, U. F. Al-Qawabeha, V. A. Stolbovoy, I. V. Serdyuk, D. A. Kolesnikov, and M. G. Kovaleva, *Probl. Atom. Sci. Tech.*, **1**: 82 (2018).
22. A. A. Andreev, V. A. Stolbovoy, and I. V. Serdiuk, *East-Eur. J. Enterp. Tech.*, **2**, No. 5: 65 (2011) (in Russian).
23. 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).
24. N. S. Akhmetov, *Obshchaya i Neorganicheskaya Khimiya* [General and Inorganic Chemistry] (Moskva: Vysshaya Shkola: 2001) (in Russian).
25. M. S. I. Chowdhury, B. Bose, K. Yamamoto, L. S. Shuster, J. Paiva, G. S. Fox-Rabinovich, and S. C. Veldhuis, *Wear*, **446–447**: 203168 (2020).
26. *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook* (Sandvik Coroman: 1994).
27. J.-E. Stahl, *Metal Cutting Theories and Models* (SECO TOOLS AB: 2012).
28. S. Koseki, K. Inoue, and H. Usuki, *Precision Eng.*, **44**: 41 (2016).