

**Сергій Анатолійович Клименко¹, Андрій Сергійович Манохін²,
Сергій Анатолійович Клименко³, Юрій Олексійович Мельничук⁴,
Анатолій Олександрович Чумак⁵, Марина Юрївна Копейкіна⁶,
В'ячеслав Мартинович Береснев⁷**

¹доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: atmu@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>

ResearcherID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771). **SCOPUS Author ID:** [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

²кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: the.manokhin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>

ResearcherID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482). **SCOPUS Author ID:** [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

³кандидат технічних наук
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: alcon1202@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>

ResearcherID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519). **SCOPUS Author ID:** [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

⁴кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна),

E-mail: en22@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. **SCOPUS Author ID:** [57193381972](https://orcid.org/0000-0003-4529-2775)

⁵кандидат технічних наук,
науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: chumak1826ar@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>

ResearcherID: [AEK-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196). **SCOPUS Author ID:** [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁶кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: atmul@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>

ResearcherID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503). **SCOPUS Author ID:** [36337661400](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

⁷доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіаційного матеріалознавства,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (Харків, Україна)

E-mail: v.beresnev@karazin.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4623-3243>

ResearcherID: [ELI-3316-2022](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243). **SCOPUS Author ID:** [26530793400](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243)

БАГАТОШАРОВІ ЛЕГОВАНІ НІТРИДНІ ПОКРИТТЯ СИСТЕМИ TiAlN

Наведено результати досліджень гами багатошарових наноструктурних покриттів на основі системи TiAlN – структурного стану, морфології, складу, мікрогеометрії інтерфейсу. Покриття загальною товщиною 7–8 мкм з товщиною шарів (TiAlN/CrN) 20–30 нм, нанесене вакуумно-дуговим методом на основу з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору. Розглянуто вплив на показники стану інтерфейсу покриттів, легування їхніх матеріалів, комплексом елементів – Y, Zr, Nb, Si. На основі аналізу результатів вивчення інтерфейсу покриттів методом скетч-тестування встановлено агеційний механізми руйнування покриттів залежно від рівня легування їхніх матеріалів, запропоновано перспективні напрями використання покриттів для застосування в різальному інструменті з PcbN.

Ключові слова: покриття на основі системи TiAlN; структура, інтерфейс, морфологія, склад, мікрогеометрія поверхні, руйнування.

Рис. 4. Табл.: 2. Бібл. 12.

Актуальність теми досліджень. Використання твердих плівок як захисних зміцнювальних покриттів дозволяє істотно підвищити поверхневу міцність, зносостійкість, корозійну стійкість і, як наслідок, експлуатаційний ресурс роботи різальних інструментів. На теперішній час захисні покриття використовуються для підвищення працездатності інструментів із робочою частиною з інструментальних та швидкорізальних сталей, твердих сплавів, кераміці, надтвердих матеріалів [1–3].

Сучасними напрямками у створенні покриттів для різального інструменту є формування потрібного за умовами експлуатації наноструктурного стану матеріалів покриттів, використання в матеріалах покриттів багатоелементних систем, аж до високоентропійних, отримання архітектури покриттів у вигляді багатошарових композицій, кожний шар з яких виконує власну функцію, а всьому комплексу шарів притаманний синергізм властивостей [4].

Аналіз досвіду використання інструментів, оснащених PcBN із захисними покриттями, показує, що основні функції таких покриттів полягають у такому: підвищення надійності інструменту на етапі припрацювання; збільшення періоду стійкості інструменту; інтенсифікація режимів різання; інформаційна функція [3].

Усі вказані функції захисних покриттів безпосередньо впливають на ефективність процесів механічної обробки як у частині її економічних показників, так і з погляду забезпечення якості оброблюваних виробів та впливу стану поверхневого шару оброблених виробів на їхні експлуатаційні властивості. У зв'язку з цим актуальність досліджень у напрямку вивчення властивостей і вдосконалення захисних покриттів для різальних інструментів не викликає сумнівів.

Постановка проблеми. Інструменти з надтвердих матеріалів особливо ефективні під час обробки найміцніших сучасних конструкційних матеріалів, що в деяких випадках є запорукою використання таких матеріалів у деталях техніки. При цьому вартість інструментів із надтвердих матеріалів досить значна. Усе це свідчить про важливість проведення робіт з удосконалення та поширення використання захисних покриттів саме для інструментів із надтвердих матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові роботи, присвячені дослідженням як фізико-механічних властивостей та способів отримання захисних покриттів, так і характеристик застосування інструментів з покриттями, свідчать, що наноструктурні системи мають більш високі значення твердості, тріщино- та термостійкості, а також підвищені експлуатаційні показники в порівнянні з покриттями, структурні елементи яких належать до мікрометричного діапазону. У зв'язку з чим однією з основних тенденцій у створенні покриттів для різальних інструментів є забезпечення нанорозмірності при формуванні як структурних елементів покриття, так і окремих шарів у багатошарових композиціях. Вказана перевага наноструктур теоретично обґрунтована фактом суттєвої зміни фізико-механічних властивостей матеріалу зі зменшенням розміру його структурних складових (зерен, кристалів) [5–7].

При створенні багатошарових нанотовщинних покриттів [16] у структурі зростає площа поверхонь розділу між окремими фазами та межами зерен. Ці межі є перешкодами на шляху розповсюдження тріщин та дислокацій, зумовлюючи підвищення твердості та міцності матеріалу. Ще одним фактором, що сприяє підвищенню твердості, є те, що значення модуля Юнга сусідніх шарів сильно відрізняються. Наочним свідченням ефективності покриттів із нанощаровою архітектурою є дослідження тріщин, що йдуть у масив покриття поруч із відбитком індентора [8] – зростання тріщини вглиб покриття обмежений через розсіювання енергії при подоланні тріщиною міжфазних кордонів на стиках шарів.

Найбільш перспективними, з погляду їх застосування на різальних інструментах PcBN, є нанокompозитні покриття. Це зумовлено поєднанням високих значень фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення та дисоціації хімічних сполук, що входять до їх складу, внаслідок особливостей структури нанокompозитних плівок. Нанокompозитні структури бувають двох видів [9]: а) нітридна нанорозмірна фаза впроваджена в міжкристалітне середовище; б) зерна одного матеріалу утворюють дві фази з різною кристалграфічною орієнтацією або суміш нанозерен різних матеріалів.

Багатошарові покриття можуть підвищити стабільність інструментів на 25–200 % порівняно з одношаровими покриттями TiC і TiCN [4]. При динамічному різанні важкооброблюваних матеріалів найкращу стійкість показали інструменти з багатошаровим покриттям, у якому чергуються «м'які» і «тверді» шари [10]. Багатошарові покриття переважно

багатофункціональні [11]. Вони поєднують високу твердість, зносостійкість, стійкість до адгезійної взаємодії з контактуючим матеріалом, низький коефіцієнт тертя, підвищену стійкість до абразивного зношування і окислення при підвищених температурах.

Аналіз технічної літератури показує, що одними з поширених покриттів для різальних інструментів є покриття на основі системи TiAlN [12]. Для забезпечення більш високих механічних властивостей покриття легуються ітрієм, що підвищує їх абразивну зносостійкість та зменшує здатність до окислення. При цьому шари (TiAlY)_N переміщуються із шарами простих нітридів металів, наприклад CrN, що забезпечує чергування «твердих» і «м'яких» шарів.

Захисне покриття має виконувати також роль пасивного протектора, який перешкоджає механічній взаємодії виробу та інструменту в зоні контакту або відігравати певну роль, змінюючи умови безпосередньої хімічної взаємодії їхніх матеріалів [3]. У зв'язку з цим склад і властивості захисних покриттів можуть впливати на умови взаємодії в зоні контакту і тим самим підвищувати ефективність покритих виробів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для забезпечення повноти уявлень щодо властивостей багатошарових покриттів на основі системи TiAlN, нанесених на підкладку з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору, потрібно виконати дослідження впливу легуючих компонентів у складі покриття на стан інтерфейсу напиленої поверхні, виконати порівняльний аналіз властивостей таких покриттів з визначенням напрямків можливого використання.

Метою статті є аналіз стану інтерфейсу напилених поверхонь і порівняльний аналіз властивостей поверхневого шару покриттів на основі системи TiAlN залежно від легуючих компонент покриття.

Методика досліджень. Розглянуто багатошарові вакуумно-дугові нітридні покриття (TiAlY)_N/CrN, (TiAlSiY)_N/CrN, (TiZrNbYAl)_N/CrN, нанесені на підложку з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору (PcBN) з періодом шарів 20–30 нм. Загальна товщина покриттів (без врахування краплинної фази) – 7,92; 7,45; 7,00 мкм відповідно.

Осадження вакуумно-дугових багатошарових нітридних покриттів проводили протягом 60 хв. Використовували тиск азоту у вакуумній камері під час осадження покриттів $P_N = 0,05\text{--}0,60$ Па, негативний потенціал на підкладці $U_3 = -100\text{--}-200$ В. Нанесення покриттів здійснювалося за допомогою командного контролера.

Зображення поверхні і склад покриттів роботі були отримані за допомогою растрового іонно-електронного мікроскопа JEM-2100F («JEOL» Ltd.) у поєднанні з мікроаналізаторами INCA (фірма «Oxford») (діаметр електронного пучка 0,7 нм).

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

Для випробування покриттів з метою визначення адгезійної / когезійної міцності, стійкості до подряпин і визначення механізму руйнування, використовувався скретч-тестер Revetest (CSM Instruments).

Виклад основного матеріалу. Основою системи покриттів, що розглядаються, є композиція TiAlN. Обрання додаткових складових для легування покриття пов'язане з наступним: додавання до складу матеріалу ітрію (Y) дозволяє підвищити його твердість за рахунок зменшення розміру зерен і підвищити опір окислювальним процесам за рахунок розміщення в межзереному просторі, по якому відбувається переміщення

кисню в процесі роботи покриття; нітриди цирконію забезпечують підвищення твердості покриття та значне підвищення температуростійкості, що є одним із головних якостей при обробці жароміцних сплавів, додавання нітриду кремнію, при правильно підібраних параметрах, дозволить отримати аморфну складову, що дозволить зменшити висоту мікронерівностей покриття; наявність Nb у складі покриття сприяє підвищенню температури, при якій має хімічна взаємодія між нітридом бору та складовими оброблюваного матеріалу.

Багатошарове нітридне покриття (TiAlY)N/CrN сформоване з використанням катодних матеріалів, які мають добру теплопровідність, тому кількість крапельної фази на поверхні досліджуваного зразка порівняно невелика (рис. 1, а). Покриття має високу однорідність і низьку дефектність по всій товщині.

Рентгеноструктурний аналіз покриття (TiAlY)N/NbN показує, що до складу покриття входять усі компоненти катодів (рис. 1, б).

Розмір ОКР для такого покриття становить 24,2 нм при рівні мікронапружень $\varepsilon = 5,76 \cdot 10^{-3}$. Аналіз інтенсивності та результати структурних досліджень свідчать про переважну орієнтацію текстури [111].

Зниження дефектності структури покриття (TiAlY)N/CrN дозволяє покращити мікрорельєф, відзначено зниження висоти мікронерівностей поверхні Ra 0,276, Rz 2,58 (рис. 1, в, г).

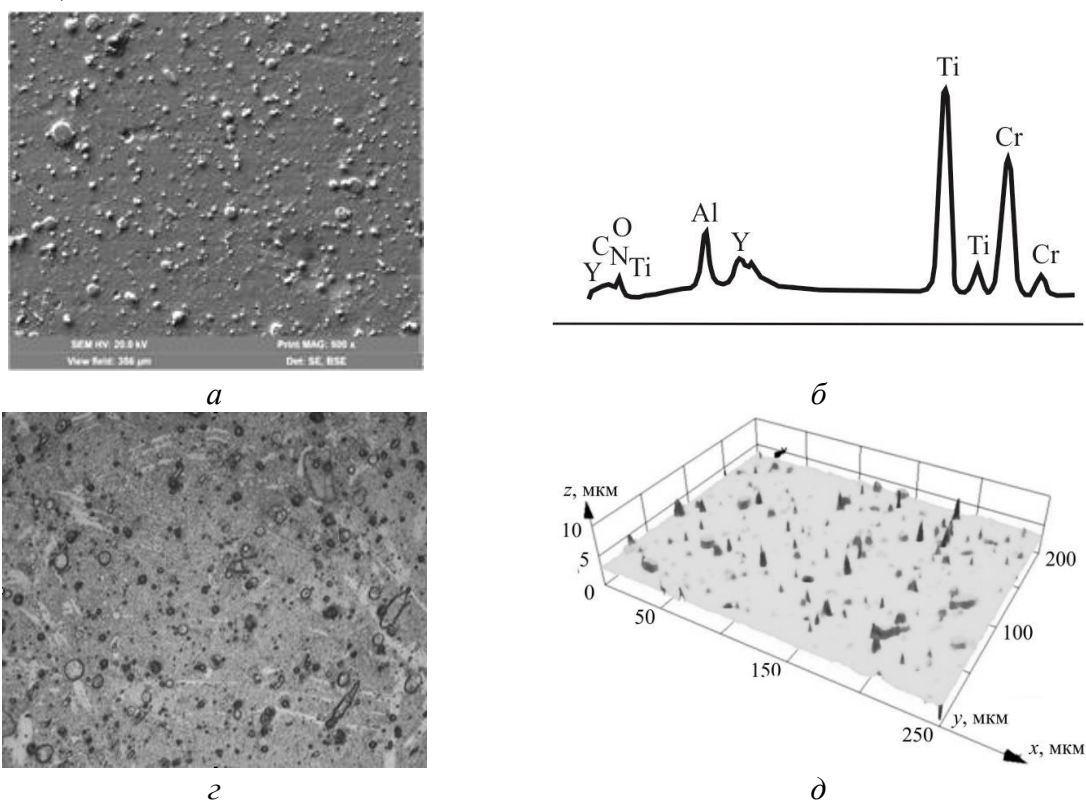


Рис. 1. Покриття (TiAlY)N/CrN. Морфологія поверхні в режимі SEM BSE (а), дифракційні спектри EDS покриття (б), мікрорельєф (г) та топографія (д) поверхні покриття ($U_3 = -200$ В, $P_N = 0,6$ Па)

При формуванні інтерфейсу багатошарового нітридного покриття (TiAlSiY)N/CrN виявлено незначний вміст краплинної фази, яка видалялася після полірування (рис. 2, а).

Характерний енергодисперсійний спектр покриття наведено на (рис. 2, б). Встановлено, що сформоване покриття має майже стехіометричну структуру. Хімічний склад покриття відповідає елементам, що входять до складу матеріалу катода, за винятком ітрію, який не виявлено, унаслідок концентрації менше ніж 0,1 %.

Отримане покриття характеризується утворенням фаз із кубічною (ГЦК) кристалічною ґраткою в обох шарах багат шарового покриття. У шарах нітридного покриття утворюється неупорядкований твердий розчин $(\text{TiAlSiY})\text{N}$ з кристалічними ґратками структурного типу NaCl і CrN . Інтенсивність ліній рентгенівського спектра вказує на наявність міцної (111) текстури в багатоеlementному нітриді та нітриді хрому. Зерна цих фаз переважно орієнтовані так, що їхні кристалографічні площини (111) паралельні поверхні зразка. Розмір ОКР становить 14,6 нм.

Шорсткість покриття $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$ після його формування є низькою (R_a 0,0628 R_z 0,5638) (рис. 2, в, г), що зумовлено використанням катодних матеріалів з хорошою теплопровідністю.

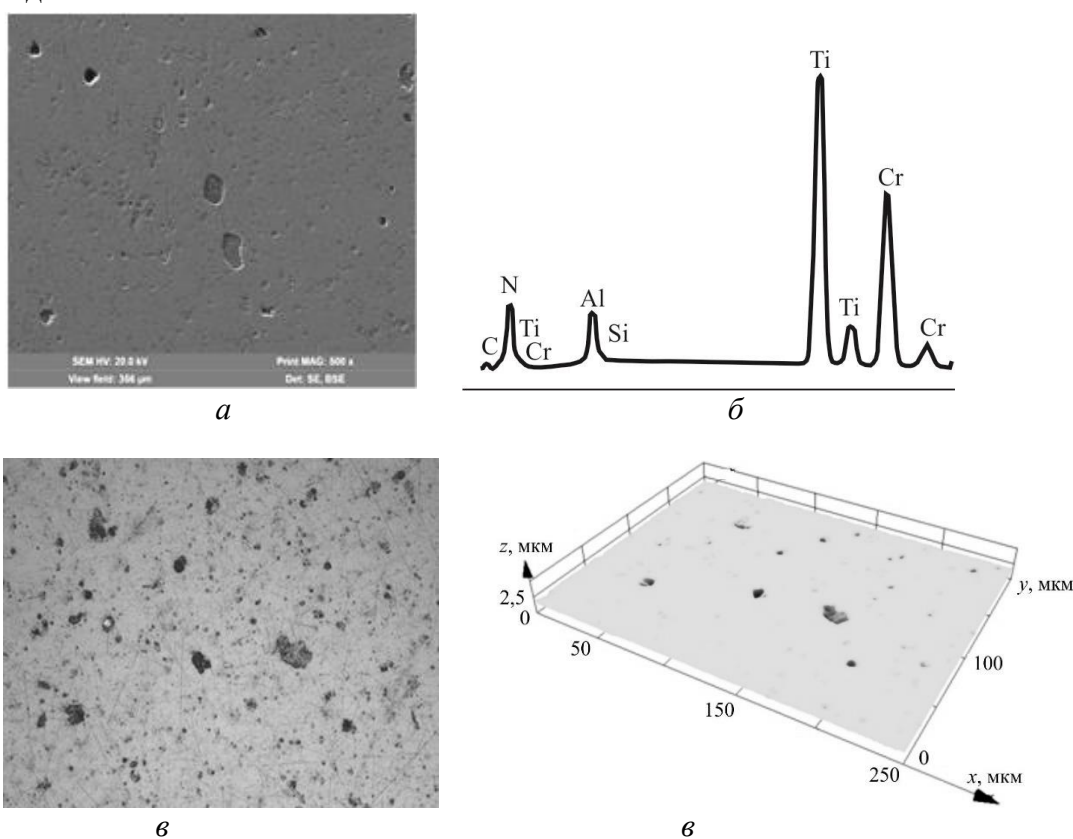


Рис. 2. Покриття $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$. Морфологія поверхні в режимі SEM BSE (а), дифракційні спектри EDS покриття (б), мікрорельєф (в) та топографія (г) поверхні покриття ($U_3 = -200 \text{ В}$, $P_N = 0,6 \text{ Па}$)

Морфологія поверхні багат шарового нітридного покриття $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$ покриття демонструє досить велику кількість крапельної фази матеріалу катода (рис. 3, а). Така велика кількість крапель пояснюється відносно низькою теплопровідністю TiZrNbYAl катода/мішені. Велика кількість краплинної фази призводить до збільшення процентного вмісту елементів Ti, Al, Cr, Y в покритті. При цьому формувалася ОЦК структура, яка не утворювала нітриду, що несприятливо для покриття, що створено для використання на різальному інструменті. Так само краплинна фаза створює труднощі при проведенні механічних випробувань, зокрема визначення мікротвердості.

Товщина отриманого покриття становить 7,0 мкм, а в районах крапельної фази може досягати 9,0 мкм.

На рис. 3, б наведено характерний енергодисперсійний спектр покриття. Як видно, весь елементний склад двох катодів розкривається в покритті.

Мікрогеометрія поверхні розділу покриття після її формування (від Ra 0,43 до Rz 3,23) (рис. 3, в, з), яка зумовлена краплинною фазою, призводить до обмежень точності вимірювання мікротвердості та дослідження методом скретч-тесту. Розвинена поверхня за рахунок краплинної фази може негативно впливати на зносостійкість різального інструменту з таким покриттям через крихке руйнування більш м'яких крапель.

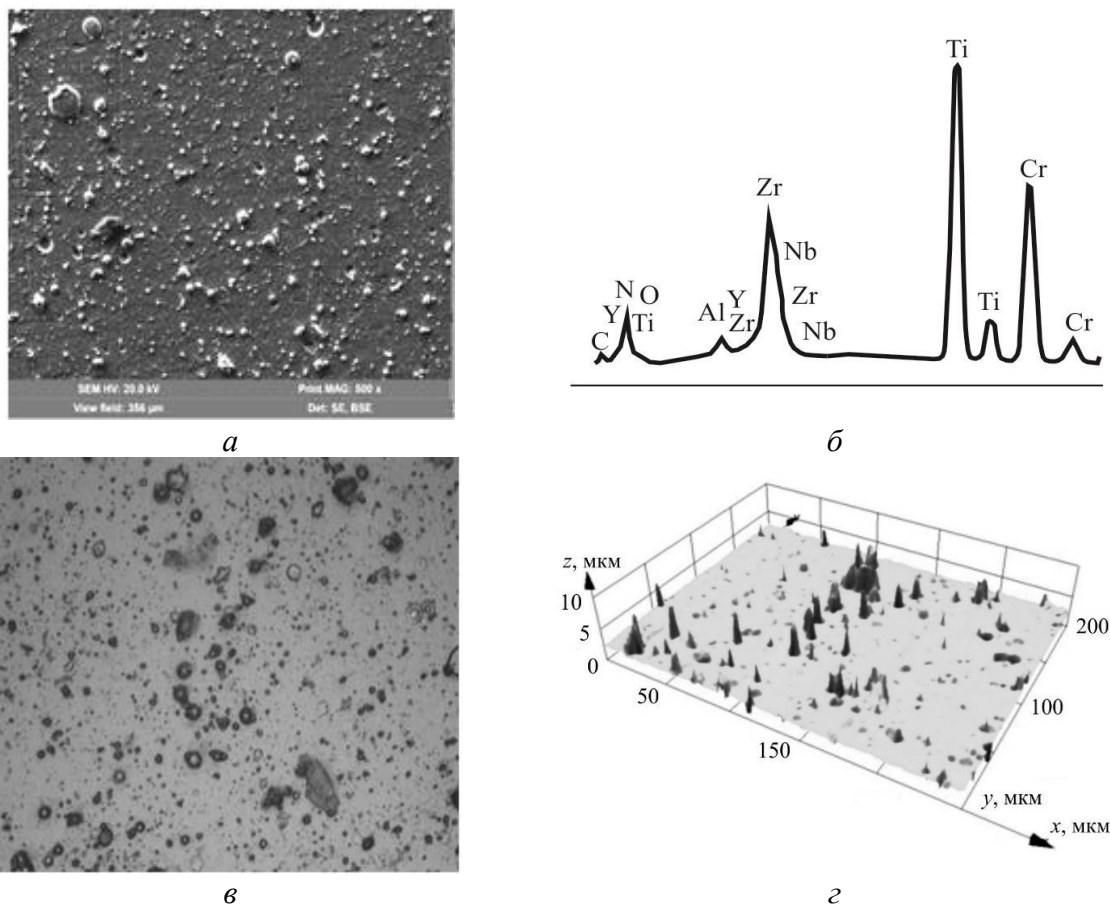


Рис. 3. Покриття $(TiZrNbYAl)N/CrN$. Морфологія поверхні в режимі SEM BSE (а), дифракційні спектри EDS покриття (б), мікрорельєф (в) та топографія (з) поверхні покриття ($U_3 = -200$ В, $P_N = 0,6$ Па)

Механічні властивості покриттів наведені в табл. 1. Залежно від умов осадження мікротвердість досліджуваних покриттів змінюється в широких межах. Слід зазначити, що мікротвердість покриттів може значно перевищувати мікротвердість нітридів (одношарових покриттів), що входять до їхнього складу. Наприклад, покриття $TiAlSiYN$ має мікротвердість 34 ГПа, покриття CrN – 26 ГПа. При дослідженні поверхні покриттів сколів і тріщин не виявлено, що знижує ймовірність утворення дефектів і тріщин при термобаричному навантаженні покриттів при їх використанні в різальному інструменті.

Таблиця 1 – Механічні властивості отриманих покриттів

Покриття	Мікротвердість, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
$(TiAlY)N/CrN$	25,0	310
$(TiAlSiY)N/CrN$	30,5	295
$(TiZrNbYAl)N/CrN$	32,0	380

Таблиця 2 – Результати трибологічних випробувань отриманих покриттів

Покриття	Тип руйнування	Нормальне зусилля при руйнуванні, сН	Максимальне навантаження, сН
(TiAlY)N/CrN	Адгезійне	75	100
(TiAlSiY)N/CrN	Когезійне	84	100
(TiZrNbYAl)N/CrN	Когезійне	92	100

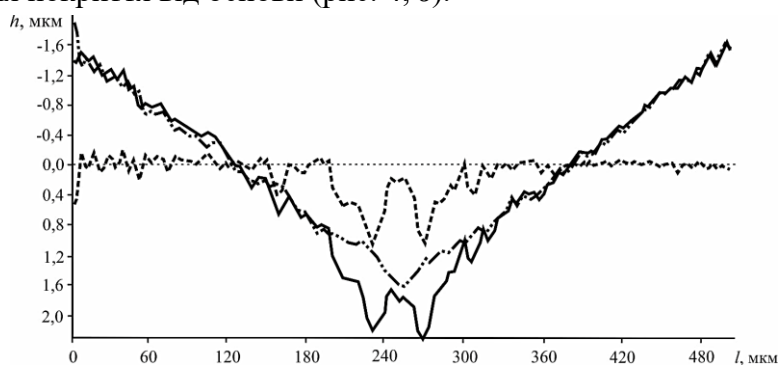
Трибологічні випробування покриттів на підкладці із ПКНБ проводилися за методом скретч-тестування (табл. 2) та визначення максимальних зусиль руйнування покриттів при повздовжньому переміщенні індентора і постійному зростанні навантаження, максимальне значення якого становило 100 г.

Аналіз отриманих результатів трибологічних випробувань методом скретч-тестування показав, що для покриттів (TiAlSiY)N/CrN та (TiZrNbYAl)N/CrN не відзначено відшарування покриття від основи, а характерний тип руйнування – когезійний.

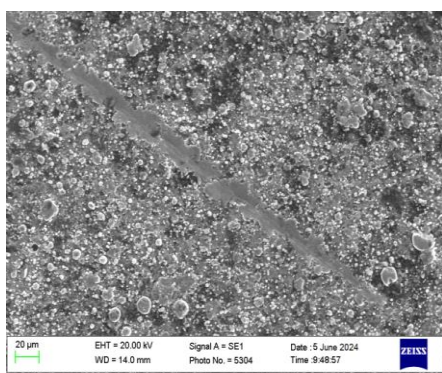
Як приклад на рис. 4, а наведено сканограма (графік залежності глибини занурення індентора від координати переміщення) навантажень при прямому переміщенні індентора та профіль поверхні руйнування – горизонтальна лінія (рис. 4, а), а також зображення поверхні зразка покриття (TiZrNbYAl)N/CrN, отриманого при $U_3 = -200$ В, $P_N = 0,6$ Па (рис. 4, б).

Після трьох проходів максимальна глибина занурення індентора в поверхню покриття (TiZrNbYAl)N/CrN становила 2,0 мкм. Це підтверджує, що покриття здатні витримувати значні навантаження.

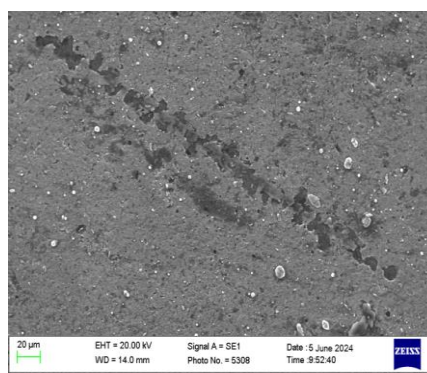
Для покриття (TiAlY)N/CrN характерний адгезійний тип руйнування, що призводить до відшарування покриття від основи (рис. 4, в).



а



б



в

Рис. 4. Результати трибологічних випробувань покриттів:
а – зворотне сканування та профіль руйнування покриття (TiZrNbYAl)N/CrN (h – глибина втілення індентора, l – довжина траси сканування); б – поверхня зразка покриття (TiZrNbYAl)N/CrN; в – поверхня зразка покриття (TiAlY)N/CrN

Враховуючи фізико-механічні та трибологічні дослідження покриттів, можна запропонувати як перспективний напрям використання покриттів $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$ та $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$ у різальному інструменті обробку конструкційних матеріалів, для яких характерна адгезійна взаємодія з матеріалом інструменту, наприклад жароміцних сплавів.

Висновки. Для багат шарових покриттів на основі системі $\text{TiAlN} - (\text{TiAlY})\text{N}/\text{CrN}$, $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$, $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$, нанесених на підложку з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору, досліджено структурний стан, якість поверхні, механічні та трибологічні властивості інтерфейсу. Встановлено: 1) показники стану інтерфейсу покриттів пов'язані з характером легування їх матеріалів; 2) наявність краплинної фази на інтерфейсі покриттів зумовлена хімічним складом їхніх матеріалів; 3) шорсткість поверхні інтерфейсу покриттів зумовлена наявністю на ній краплинної фази; 4) мікротвердість покриттів зумовлена їхнім хімічним складом; 5) залежно від характеру легування покриття має місце адгезійне або когезійне руйнування покриття; 6) для покриттів $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$ та $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$ пропонується застосування в різальному інструменті при обробці жароміцних сплавів.

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

Список використаних джерел

1. Внуков, Ю. Н. Резание инструментом с покрытием : уч. пособие / Ю. Н. Внуков, Э. В. Кондрачук, Е. Б. Козлова. – Запорожье : ЗНТУ, 2015. – 48 с.
2. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным флюем : справочник / Г. И. Костюк. – Харьков : Антиква, 2003. – 412 с.
3. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / С. А. Клименко, А. С. Манохин, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, Ю. А. Мельничук, А. А. Чумак ; под ред. С.А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с.
4. Manokhin, A. S. Promising types of coatings for PCBN tools / A. S. Manokhin, S. A. Klimentko, S. An. Klimentko, V. M. Beresnev // J. of Superhard Mat. – 2018. – Vol. 40, № 6. – P. 424-431.
5. Veprek, S. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek, M. Veprek-Heijman, P. Karvankov, J. Prochazka // Thin Solid Films. – 2005. – 476. – P. 1-29.
6. Гранкин, С. С. Механічні властивості наноструктурованих покриттів $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ і $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{N}$, отриманих методом вакуумно-дугового осадження / С. С. Гранкин, У. С. Немченко, В. Ю. Новиков, О. В. Соболев, Л. В. Маликов, С. И. Плиев // Фізика та інженерії поверхні. – 2014. – Том 12, № 2.
7. Береснев, В. М. Структура и механические свойства вакуумно-дуговых покрытий системы TiAlSiY , осажденных в азотной атмосфере / В. М. Береснев, О. В. Соболев, А. Д. Погребняк и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2017. – № 2. – С. 34-43.
8. Musil, J. Ch. Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering / J. Musil // Nanostructured Hard Coatings. – Kluwer Academic; Plenum Publishers, 2005.
9. Азаренков, Н. А. Наноструктурные покрытия и наноматериалы : Основы получения. Свойства. Области применения: Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Д. А. Колесников. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 368 с.

10. Kauffmann, F. Mirostructural size effects on the hardness of nanocrystalline TiN/amorphous- SiNx coatings prepared by magnetron sputtering / F. Kauffmann, G. Dehm, V. Schier et al. // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 473. – Pp. 114-122.
11. Dobrzański, L. A. Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings / L. A. Dobrzański, L. W. Żukowska, J. Mikuła et al. // *J. of Mat. Proc. Technol.* – 2008. – Vol. 201, № 1-3.
12. Tadahiro, W. Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel / W. Tadahiro, H. Hiroyuki // *IOP Conf. Ser. : Mat. Sci. Eng.* – 2017. – № 264. – Pp. 1-8.

References

1. Vnukov, Yu.N., Kondratyuk, E.V., Kozlova, Ye.B. (2015). *Rezaniye instrumentom s pokrytiyem [Cutting with a coated tool]*. ZNTU.
2. Kostyuk, G.I. (2003). *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym floyem: spravochnik [Efficient cutting tool with a coating and hardened floe: reference book]*. Antikva.
3. Klimenko, S.A., Manokhin, A.S., Kopeykina, M.Yu., Klimenko, S.An., Melniychuk, Yu.A., Chumak, A.A. (2018). *Vysokoproizvoditelnaya chistovaya lezviynaya obrabotka detaley iz staley vysokoy tverdosti [High-performance finishing blade machining of parts made of high-hardness steels]*. ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy.
4. Manokhin, A.S., Klimenko, S.A., Klimenko, S.An., Beresnev, V.M. (2018). Promising types of coatings for PCBN tools. *J. of Superhard Mat.*, 40(6), 424– 431.
5. Veprek, S., Veprek-Heijman, M., Karvankov, P., Prochazka, J. (2005). Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films*, 476, 1–29.
6. Grankin, S.S., Nemchenko, U.S., Novikov, V.Yu., Sobol, O.V., Malikov, L.V., Pliyev, S.I. (2014). Mekhanichní vlastivostí nanostrukturovanikh pokrittív (Ti, Al)N í (Ti, Cr)N, otrimanikh metodom vakuumno-dugovogo osadzhennya [Mechanical properties of nanostructured (Ti, Al)N and (Ti, Cr)N coatings obtained by vacuum-arc deposition]. *Fiziki ta inzhenerii poverkhni – Surface Physics and Engineering*, 12(2).
7. Beresnev, V.M., Sobol, O.V., Pogrebnyak, A.D. (2017). Struktura i mekhanicheskiye svoystva vakuumno-dugovykh pokrytiy sistemy TiAlSiY, osazhdennykh v azotnoy atmosphere [Structure and mechanical properties of vacuum-arc coatings of the TiAlSiY system deposited in a nitrogen atmosphere]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of material processing*, (2), 34–43.
8. Musil, J. Ch. (2005). Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering. *Nanostructured Hard Coatings*. Kluwer Academic; Plenum Publishers.
9. Azarenkov, N.A., Beresnev, V.M., Pogrebnyak, A.D., Kolesnikov, D.A. (2012). *Nanostrukturnyye pokrytiya i nanomaterialy: Osnovy polucheniya. Svoystva. Oblasti primeneniya: Osobennosti sovremennogo nanostrukturnogo napravleniya v nanotekhnologii [Nanostructured coatings and nanomaterials: Basics of production. Properties. Application areas: Features of the modern nanostructured direction in nanotechnology]*. Knizhnyy dom «LIBROKOM».
10. Kauffmann, F., Dehm, G., Schier, V. et al. (2005). Mirostructural size effects on the hardness of nanocrystalline TiN/amorphous- SiNx coatings prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 473, 114–122.
11. Dobrzański, L.A., Żukowska, L.W., Mikuła, J. et al. (2008). Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings. *J. of Mat. Proc. Technol.*, 201(1–3).
12. Tadahiro, W., Hiroyuki H. (2017). Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel. *IOP Conf. Ser. : Mat. Sci. Eng.*, 264, 1–8.

Отримано 29.08.2024

**Sergii Klymenko¹, Andrii Manokhin², Serhii Klymenko³, Yurii Melniychuk⁴,
Anatolii Chumak⁵, Maryna Kopieikina⁶, Vyacheslav Beresnev⁷**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director for Research
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: atmu@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>
ResearcherID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771). **SCOPUS Author ID:** [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

²PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: the.manokhin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>
ResearcherID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482). **SCOPUS Author ID:** [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

³PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: alcon1202@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>
ResearcherID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519). **SCOPUS Author ID:** [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

⁴PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: en22@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. **SCOPUS Author ID:** [57193381972](https://orcid.org/0000-0003-4529-2775)

⁵PhD in Technical Sciences,
Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: chumak1826ar@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>
ResearcherID: [AEK-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196). **SCOPUS Author ID:** [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁶PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: atmu1@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>
Researcher ID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503). **SCOPUS Author ID:** [36337661400](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

⁷Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radiation Materials Science
V.N. Karazin Kharkov National University (Kharkov, Ukraine)
E-mail: v.beresnev@karazin.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4623-3243>
ResearcherID: [ELI-3316-2022](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243). **SCOPUS Author ID:** [26530793400](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243)

MULTYLAYER DOPED NITRIDE COATINGS OF THE TiAlN SYSTEM

The results of studies of the range of multilayer nanostructured coatings based on the TiAlN system - structural state, morphology, composition, and microgeometry of the interface - are presented. A coating with a total thickness of 7-8 μm and a layer thickness (TiAlN/CrN) of 20-30 nm was applied by the vacuum arc method to a base of superhard ceramics based on cubic boron nitride. The influence of doping of the coatings with Y, Y, and Si materials and a complex of elements such as Y, Zr, and Nb on the state of the interface was considered. For coatings with different levels of material doping, the presence of a droplet phase at the interface of the coatings and its effect on the defectiveness and surface roughness of the coatings were analyzed. It was found that the minimum amount of the droplet phase at the interface is inherent in (TiAlSiY)N/CrN, which is associated with the high thermal conductivity of the resulting coating. A large amount of the droplet phase is characteristic of the (TiZrNbYAl)N/CrN coating. The roughness of the interfaces of the coatings changes according to the amount of the droplet phase. The microhardness of the coatings was determined, the value of which is related to the presence of alloying elements in the material. The microhardness of the coatings can exceed the microhardness of the nitrides that make up their composition: the microhardness of the (TiAlSiY)N/CrN coating is 30.5 GPa, and that of the CrN nitride is 26 GPa. No chips or cracks were found at the interfaces of the studied coatings. Based on the analysis of the results of studying the interface of coatings by the method of sketch testing, the aggressive and cohesive mechanisms of coating destruction were established, depending on the nature of the alloying of their materials. The results of studies of the mechanical and tribological properties of coatings allow us to propose promising areas for the use of coatings in PcBN cutting tools.

Keywords: coating based on TiAlN system; structure; interface, morphology; composition; surface microgeometry; fracture.
Fig.: 4. Table: 2. References: 12.