

**СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВАКУУМНИХ ПЛАЗМОВИХ І  
ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ШИРОКОГО СПЕКТРУ ЗАСТОСУВАННЯ**

**Гонтар Олександр Григорович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України



**Копейкіна Марина Юрїївна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України



**Береснєв Вячеслав Мартинович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна



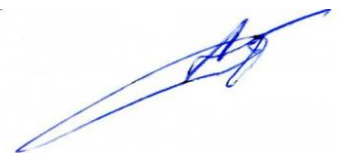
**Васильєв Володимир Васильович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України



**Дабіжа Євген Вікторович** – кандидат технічних наук, директор Малого державного науково-виробничого впроваджувального підприємства «ЕКМА» НАН України



**Дейнека Олександр Володимирович** – генеральний директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-виробнича фірма «Грейс-Інжинірінг»



**Погрелюк Ірина Миколаївна** – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України



**Стрельницький Володимир Євгенійович** – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, начальник лабораторії Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України



**Метою представленої роботи** є створення та впровадження обладнання для нанесення високоефективних функціональних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, розробка технологій формування покриттів як готових закінчених виробів з високою науково-технічною та інноваційною складовою і високим рівнем конкурентоспроможності, що за своїми властивостями відповідають умовам експлуатаційного навантаження виробів з покриттями широкого спектру застосування та відповідають найкращим світовим аналогам, дозволяючи багаторазово подовжити термін експлуатації деталей, знизити витрати енергоносіїв та забезпечити можливість інтенсифікації багатьох виробничих процесів.

Для досягнення сформульованої мети науковцями і фахівцями Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України та МОН України, МДНВВП «ЕКМА» НАН України, ТОВ «Науково-виробнича фірма «Грейс-Інжиніринг», Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України було розв'язано низку актуальних науково-технічних задач, які знайшли своє втілення в новітньому обладнанні та технологіях отримання сучасних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, практичному застосуванні створених покриттів в машинобудуванні, медицині, оптико-електроніці, будівництві та ін.

Найважливіші та найактуальніші наукові та науково-технічні задачі, які були розв'язані при виконанні роботи: – розробка обладнання для формування вакуумних плазмових покриттів, у тому числі створення нових широко-апертурного джерела фільтрованої вакуумно-дугової плазми Т-типу та вакуумно-дугового джерела фільтрованої плазми прямолінійною типу з магнітним островом; – розробка обладнання для формування вакуумних дифузійних покриттів, яке надає можливість здійснювати насичення в динамічній та статичній атмосфері азоту, забезпечуючи необхідний температурно-часовий та газодинамічний режим формування контрольованих за складом, геометрією та структурою покриттів; – розробка наукових та технологічних основ формування вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, обрання складу та архітектурних особливостей побудови покриттів, властивості яких відповідають умовам навантаження виробів з покриттям при експлуатації; – проведення широкого кола промислових випробувань та реалізація практичного застосування створеного обладнання і покриттів на підприємствах України та інших країн.

Нижче наведений короткий опис розв'язання поставлених задач.

**Стислий зміст роботи.** В роботі наведені дані, які характеризують сучасні підходи та потенціал створення захисних покриттів для підвищення працездатності деталей техніки. Показано, що використання твердих плівок для реалізації функції зміцнення поверхні дозволяє одночасно суттєво підвищити зносостійкість, корозійну стійкість і, як наслідок, експлуатаційний ресурс деталей машин, інструменту, технологічної оснастки, різних споруд. Практичний досвід дозволяє виділити вакуумні плазмові покриття на основі алмазоподібних композицій, нітридів

перехідних металів, вакуумні покриття з нітридів, карбонітридів, карбоксидів металів, що отримані дифузійним методом, як найбільш поширені в промисловості та перспективні у майбутньому.

Наведені конкретні науково-обґрунтовані пропозиції щодо обрання захисних покриттів для різних галузей використання. При створенні покриттів автори враховували, що метод формування, склад і архітектура повинні надавати покриттям комплекс фізико-механічних, хімічних і теплофізичних властивостей, який відповідають умовам експлуатаційного навантаження виробів з покриттями і визначають перспективну галузь. Кожний вид покриттів характеризується особливими архітектурою і хімічним складом: – алмазоподібні покриття характеризуються високою твердістю і низьким коефіцієнтом тертя, що перспективно у випадках, коли завданням є забезпечення зносостійкості всіх елементів пари тертя, наприклад в торцевих ущільненнях компресорів; – багатокомпонентний склад нанокompозитних нітридних покриттів дозволяє в широких межах варіювати твердість покриттів в залежності від умов експлуатації; механічні властивості нанокompозитних покриттів залежать від їхнього елементного та фазового складу, структури і відносного змісту фаз, хімічного зв'язку між фазами; висока твердість деталі з покриттям може обумовлювати підвищений знос контртіла, тому використання таких покриттів є перспективним для забезпечення зносостійкості одного елемента пари тертя, наприклад в різальних інструментах; – багат шарові нітридні покриття разом з високою твердістю мають, порівняно з одношаровими покриттями, більшу пластичність, що робить їх ефективними при роботі в умовах наявного динамічного контактного навантаження; – виробам з плазмовими покриттями притаманна наявність зони розподілу між покриттям і основою, вироби з дифузійними покриттями такої зони не мають, наслідком цього є підвищена втомна міцність деталей з дифузійними покриттями.

Розглянуті результати науково-технічних розробок, пов'язаних з особливостями конструкцій обладнання для нанесення різноманітних покриттів. Описані підходи до проектування та виготовлення їх складових частин, практичного застосування при формуванні покриттів з необхідними властивостями.

Наведені основні положення найсучаснішої методології проектування вакуумного обладнання для отримання плазмових (алмазоподібних, багатокомпонентних, одно- та багат шарових нітридних) та дифузійних (одно- та багатокомпонентних, нітридних) покриттів, використання яких дає можливість розв'язати комплекс мультидисциплінарних задач, пов'язаних з процесом багатопараметричної, багатокритеріальної, багаторежимної оптимізації складових процесів, до яких належить формування покриттів. Показано, що задача створення обладнання для формування покриттів потребує використання даних оптимізації загальних задач більшого рівня – створення умов експлуатації джерел плазми із забезпеченням заданих якісних показників плазми; – створення необхідного температурно-часового та газодинамічного режиму дифузійного насичення в динамічному та статичному газовому середовищі азоту. Наведені приклади розв'язання цих задач шляхом

створення та використання: – джерел фільтрованої вакуумно-дугової плазми (рис. 1), які при високій якості очищення плазми від макрочастинок забезпечують малі транспортні втрати плазми і рівномірність товщини покриттів на великій поверхні; – системи створення тліючого розряду, який збуджується шляхом застосування ВЧ-напруги; – пілотної установки для плазмохімічного осадження алмазоподібних вуглецевих плівок а-С:Н; – імпульсного джерела живлення, в якому реалізований принцип живлення магнетронної системи біполярним імпульсним струмом складної форми (створена установку ННВ 6.6. И1); – біполярного джерела живлення, яке забезпечує передачу на мішень, що розпилюється, імпульсу позитивної напруги і забезпечує роботу магнетронної системи без дуг навіть на забрудненій мішені; – імпульсного джерела на основі височастотного генератора з метою стимуляції осадження і підвищення якості покриттів; – систем вакуумного, газового і температурного контролю, охолодження камери дифузійного насичення.



Рисунок 1. Широкоапертурне джерело фільтрованої вакуумно-дугової плазми

Розглянуто питання виготовлення установок для формування покриттів на основі використання перелічених розробок. Визначені переваги розробленої техніки. Аналізуються можливості застосування створених конструкторських та технічних рішень для отримання покриттів різного застосування – різних за властивостями, розміром виробів, на які нанесено покриття, за сферою застосування.

Детально розглянуті технологічні основи формування вакуумних плазмових і дифузійних покриттів широкого спектру застосування. Показано, що основним результатом роботи, виконаної колективом авторів, є створення надійних технологій формування зазначених покриттів, які є самостійними готовими для широкого виробничого застосування наукоємними об'єктами для надання виробам промисловості високих експлуатаційних властивостей.

Вивчений вплив умов формування покриттів на їхні механічні властивості та експлуатаційні показники. Наведені методики вивчення нанотвердості та параметрів руйнування покриттів та дослідницькі методики оцінки їх триботехнічних показників.

Детально розглянуті питання синтезу алмазоподібних плівок (безводневі аморфні вуглецеві a-C; аморфний нітрид вуглецю  $CN_x$  з фулереноподібною структурою; гідрогенізовані вуглецеві a-C:H) при розкладанні газоподібних вуглеводнів в різного типу розрядах. Такі плівки містять водень, мають значно нижчий рівень власних стискаючих напружень, що значно розширює номенклатуру виробів, на яких можна формувати покриття. Використання, наприклад, тліючого розряду дає можливість наносити покриття на поверхні великого розміру і виробити складної форми.

Детально розглянуті технологічні особливості отримання градієнтних дифузійних покриттів систем TiN, TiCN, багатокомпонентних покриттів від BN, TiN до (TiZrNbCrSi)N, (TiVZrNbHfTa)N, багат шарових – від  $Al_2O_3/NbN$ , TiN/Co до (TiZrNbTaHf)N/MoN та показано, що за рахунок використання створених технічних рішень, оптимізації складу й архітектури покриття забезпечується комплекс фізико-механічних, хімічних і теплофізичних властивостей, необхідний для довготривалої експлуатації виробів в виробничих умовах.

На виході розроблених та виготовлених авторами роботи джерел плазми утворюється на 100% іонізована плазма матеріалу катода, що дозволяє конденсувати високоякісні бездефектні покриття, які характеризуються підвищеною твердістю, зносостійкістю, прозорістю (для оптичних покриттів) та іншими бажаними функціональними характеристиками.

Розглянуті питання з практичного використання досвіду авторів, створеного обладнання та технологій виготовлення покриттів в умовах промислових підприємств України та інших країн. Показано, що протягом декількох років ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, ННЦ «ХФТІ» НАН і МОН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка, МДНВВП «Екма», ТОВ «Наукова фірма «Грейс-Інжиніринг» після значного обсягу виконаних науково-дослідних, конструкторських і технологічних робіт, приділяють значну увагу питанням організації вітчизняного виробництва деталей з покриттями, виготовленню та поставці підприємствам обладнання для нанесення покриттів, виконанню робіт з формування покриттів на замовлення різних установ.

**Наукова новизна роботи.** Основним науковим досягненням цієї роботи є створення наукових основ формування високоефективних функціональних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів широкого спектру застосування (машинобудування, медицина, будівництво, електроніка та ін.) із заданими властивостями, розробка та виготовлення відповідного обладнання, отримання покриттів та обладнання як готових закінчених продуктів з високою науково-технічною та інноваційною складовою, що за своїми показниками відповідають найкращим світовим зразкам і можуть бути використані як при виробництві сучасної техніки, призначеної для роботи в умовах інтенсивного навантаження, так і при її відновленні, забезпечуючи надійність та довговічність техніки, її конкурентоспроможність та, у певній частині, є елементом імпортозаміщення.

**Основні науково-технічні результати.** В результаті проведених наукових досліджень авторами роботи було розроблено унікальне технологічне обладнання і технології, що забезпечили розв'язання комплексу складних задач, пов'язаних з процесами оптимального проектування та конструювання, технологічного забезпечення отримання великої низки гама сучасних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, які мають необхідний комплекс властивостей для експлуатації виробів з покриттям в умовах певного навантаження.

На основі результатів виконаних науково-дослідних, конструкторських та технологічних розробок зі створення та виготовлення обладнання для нанесення покриттів, оцінки його працездатності, зокрема, для формування алмазоподібних покриттів вакуумно-дуговим методом, синтезу гідрогенізованих вуглецевих (а-С:Н) плівок в тліючому ВЧ-розряді, синтезу одношарових чвертьхвильових алмазоподібних аморфних гідрогенізованих вуглецевих плівок, отримання вакуумно-дугових нітридних покриттів на основі однокомпонентних, багатоконпонентних та багатшарових систем, отримання нітридних, нітриднокарбідних, нітриднооксидних дифузійних покриттів за рахунок їх багатопараметричної, багатокритеріальної та багаторежимної оптимізації були розроблені наукові основи отримання функціональних покриттів із заданими властивостями відповідно до умов експлуатаційного навантаження шляхом обрання складу покриття, архітектури його побудови та режимів формування, розроблені та оптимізовані оригінальні технології створення великої низки покриттів, вивчені галузі найефективнішого використання створених покриттів.

Для формування великої низки покриттів були розроблені та виготовлені авторські конструкції обладнання, створені промислові установки «Булат-7», ННВ 6.6. И1, установка для нанесення дифузійних покриттів. З використанням нових фільтрів та джерел плазми, джерел енергії, розпилення, іонів, додаткового обладнання вакуумних камер були модернізовані установки «Булат-3Т», «Булат-6» (Україна), ВУ-700 «Д», ВУ-2МБС і ВУ-1100 «Д» (Білорусь).

Виконано комплекс досліджень технологій та властивостей створених покриттів:

– порівняння отриманих з використанням створених джерел плазми а-С і  $CN_x$  покриттів показало, що а-С покриття є надтвердими і жорсткими, тоді як  $CN_x$  покриття поєднують в собі досить високу твердість і знижену жорсткість з виключно високою еластичністю; з урахуванням зазначеного а-С покриття бажано використовувати у вологих середовищах за умови, що пріоритетним акцентом є зниження втрат тертя, а якщо основною вимогою є дзеркальна поліровка доріжки тертя при малих розмірах частинок зносу, то треба обирати  $CN_x$  покриття;

– розроблений метод синтезу а-С:Н покриттів шляхом піролізу газоподібних органічних сполук в плазмі тліючого розряду та показано, що атоми вуглецю утворюють всі відомі у вуглецевій системі зв'язки ( $sp^3$ ,  $sp^2$ ,  $sp$ ) (концентрація  $sp$  зв'язків  $\leq 5\%$ ); технологія дозволяє формувати покриття з високою рівномірністю по товщині на виробках різної форми; високі твердість, зносостійкість, однорідність по

товщині і висока адгезія до металевих поверхонь обумовлюють перспективність покриття для зміцнення поверхонь тертя прецизійних деталей;

- розроблені та оптимізовані технології нанесення моно- та багат шарових алмазоподібних а-C:H просвітлювальних та захисних покриттів на оптичні елементи з германію – коефіцієнт пропускання елементів з осадженими на обидві сторони чвертьхвильовими алмазоподібними плівками в інтерференційному максимумі порівнює 95% при товщини плівки в діапазоні 3–5 мкм та 83% – в діапазоні 8–12 мкм; для діапазону 7–12 мкм ІЧ-спектру френелівські втрати енергії на відбиття не перевищують 0,15%; композиційна твердість багат шарових покриттів – 5,0 ГПа.;

- з використанням розроблених джерел плазми отримані нітридні покриття систем TiN, TiAlN і TiAlYN з твердістю 28–36 ГПа, однорідною мікроструктурою і незначним розміром областей когерентного розсіювання; ширина і глибина доріжок зносу при трибологічних випробуваннях цих покриттів в 3–4 рази менші за аналогічні показники традиційних покриттів цього складу, а коефіцієнт тертя не збільшується під час випробувань і залишається на низькому рівні – 0,1–0,2;

- в досліджених нітридних покриттях збільшення кількості компонентів призводить до суттєвого підвищення їхньої стійкості до зношування та окислення; середні швидкості кавітаційного і абразивного зносу покриття TiAlN+1 ат.% Y у 3–5 разів нижче, ніж покриття TiAlN і в 10 разів нижче, ніж покриття TiN; температура початку окислення покриття TiAlN+1 ат.% Y сягає 980 °C, що обумовлено формуванням мікрокристалічної структури з міцними міжзеренними границями;

- розроблені технології отримання багатоконпонентних покриттів систем (TiZrNbCr)N і (TiZrNbCrSi)N; розрахунковими методами показано, що зростання розміру ентропії при збільшенні кількості компонент в еквіатомних сплавах супроводжується адекватним зниженням вільної енергії системи та стабілізацією при цьому нерівноважний твердорозчинний стан; для багатоелементних нітридних покриттів, отриманих розпорошенням високоентропійних сплавів, при збільшенні тиску і насиченні покриття азотом в поверхневих шарах зростає вміст ГЦК фази;

- дослідження фазового складу багатоконпонентних нітридних покриттів свідчать, що структура покриття (TiZrNbAlY)N сформована ОЦК (~ 10 нм) і ГЦК (~ 7 нм) фазами, покриття (TiZrNbAlCrY)N має біфазну нанокристалічну структуру з ОЦК фазою із середнім розміром кристалітів близько 15 нм і періодом ґратки 0,342 нм і ГЦК фазою із середнім розміром кристалітів 7 нм та періодом ґратки 0,437 нм; мікротвердість (за Віккерсом) покриття (TiZrAlYNb)N – 34–49 ГПа, (TiZrNbCr)N – 36,5–44,5 ГПа, (TiZrNbCrSi)N – максимум 27,9 ГПа;

- створені технології формування низки багат шарових покриттів – від TiN/Co до (TiZrNbTaHf)N/MoN та показано, що за шарувата структура забезпечує підвищену пластичність покриття, а це, в свою чергу, є передумовою ефективної роботи в умовах динамічних навантажень; багат шарове покриття може мати екстремальну твердість – покриття з високоентропійною та алмазоподібною частинами (TiZrHfVNbTa)N+АПП має твердість > 68 ГПа;

– розроблені покриття  $Al_2O_3-NbN-Ti$ , покриття  $BN_a$  з аморфною структурою для використання в різальних інструментах, оснащених полікристалічними надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору (сBN); ці покриття перешкоджають хімічній взаємодії елементів інструментального та оброблюваного матеріалів в зоні різання та знижують температуру на контактних поверхнях інструментів;

– розроблені технології підвищення функціональності поверхневого шару виробів з титанових сплавів за рахунок формування поверхневої структури, до складу якої входить тверде, корозійноінертне нітридне покриття (TiN, TiCN, TiON), отримане з контрольованих активних середовищ, яке добре зчеплене з матрицею металу та поєднане з нею відносно глибоким перехідним шаром з градієнтом структури та властивостей.

Проведені науково-технічні заходи дозволили створити низку новітніх функціональних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів широкого спектру застосування, практичне використання яких забезпечує потрібні поверхневі функціональні властивості та суттєво підвищує експлуатаційні показники високонавантажених деталей компресорів, лопаток ГТД, різальних інструментів, виробів авіаційної техніки, деталей медичного застосування, елементів оптико-електронної техніки, декоративних виробів та ін., що підтверджено практичним досвідом використання створених покриттів як в Україні, так і за кордоном.

Результати роботи є підґрунтям для створення виробів високонадійної конкурентоспроможної техніки, а також дозволяє зменшити витрати валюти за рахунок імпортозаміщення.

**Практична значимість та обсяг впровадження.** Масштаби, важливість, практичну значимість та необхідність проведення інноваційних заходів щодо створення та використання функціональних покриттів можна побачити, проаналізувавши ємність та потребу внутрішнього ринку з точки зору підвищення надійності та конкурентоспроможності виробів широкого спектру.

Результати розглянутих вище дослідно-конструкторських та науково-дослідних робіт зі створення обладнання для нанесення вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, технологій нанесення покриттів, оптимізації складів покриттів, вивчення їх фізико-механічних властивостей та експлуатаційних можливостей є базою для широкого практичного використання функціональних покриттів у різних галузях промисловості.

Як приклад, на рис. 2, наведені фотографії деяких виробів з покриттям.

Новітнє обладнання виготовлено та поставлено за контрактами в наукові установи і на промислові підприємства Вірменії, Іспанії, Південної Кореї, Македонії, США, України. Ліцензія на вакуумно-дугове джерело фільтрованої плазми прямолінійного типу з магнітним островом продана в Нідерланди.

Використовуючи теоретичні та прикладні розробки науковців, фахівцями ТОВ «Грейс-Інжинірінг», створене вітчизняне виробництво деталей з алмазоподібними покриттями. За договорами з промисловими підприємствами України та інших країн (Білорусі, Оману, Росії, Туреччини, Туркменістану, Чехії) виготовляються сухі газові



ущільнювачі (СГУ) з карбіду кремнію з алмазоподібними покриттями для компресорів високого тиску до 200 атм.

### **Вироби машинобудування.**

**Компресоробудування.** Було розроблено і виготовлено технологічне оснащення для формування рівномірного алмазоподібного покриття на великих за розмірами поверхнях деталей, виготовлених з карбіду кремнію, із забезпеченням їх високої твердості покриттів  $\sim 30\text{--}40$  ГПа і високого рівня їхньої адгезії до основи. Визначені оптимальні параметри, які забезпечують формування дво- та тришарових покриттів товщиною 1,3–2,7 мкм. При навантаженнях на індентор до 40 Н не спостерігається помітного відшарування покриттів від підкладки, твердість покриття 30–40 ГПа.

Сформовані на компресорних кільцях покриття протестовані на спеціалізованих робочих стендах та визнані придатними для їх використання в вузлах сухого тертя СГУ для ущільнення валів компресорів високого тиску до 200 атм.

**Лопатки ГТД.** Перспективним матеріалами для формування твердих ерозійностійких покриттів на лопатках ГТД є багатошарові нітридні покриття, зокрема  $\text{Co/TiN}$ , загальної товщиною 15 мкм, сформовані послідовно наносеннями шарами  $\text{Co}$  товщиною 0,20–0,25 мкм та шарами  $\text{TiN}$  товщиною 2 мкм (робоча температура 450–500 °С).

Покриття можуть бути використані як при виробництві нових лопаток, так й при їх відновленні.

**Різальні інструменти.** Експериментальні дослідження в умовах промислових підприємств показують, що використання нітридних покриттів  $\text{TiN}$ ,  $\text{TiAlN}$ ,  $\text{TiSiN}$ ,  $(\text{TiHfSi})\text{N}$  підвищує стійкість різальних інструментів в твердого сплаву ВК6 при токарній обробці сталей ШХ15, Х13, ХН77ТЮ, 12Х18Н10Т до 4 разів, нітридні покриття  $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$ ,  $(\text{TiZrNbTaHf})\text{N}$ ,  $\text{TiN/MoN}$ ,  $\text{MoN/CrN}$ ,  $(\text{TiAlSiY})\text{N}$  підвищують стійкість різальних інструментів, оснащених полікристалічними надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору, при обробці загартованих сталей ШХ15, ХВГ до 70%.

З урахуванням особливостей фізико-хімії контактної взаємодії в зоні різання інструменту з надтвердих композитів з оброблюваним матеріалом створено покриття  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NbN-Ti}$ , яке мінімізує таку взаємодію та за рахунок цього підвищує ефективність процесу обробки. Такими інструментами можна продуктивно обробляти вироби із сучасних найбільш важкооброблюваних конструкційних матеріалів. Стійкість інструментів підвищується: – при чистовій обробці загартованих сталей (55–62 HRC) на 25–30%; – при обробці наплавленого нікелевого сплаву 08Х18Н9Г7Т на 20%; – при обробці легованого фтором чавуну на 10%; – при обробці твердих сплавів ВК15, ВК20, ВНК25, ВК30 на 25%.

При вартості різального інструменту  $\sim 50$  дол. США, економія на одиницю інструменту складає 13–18 дол. США.

Різальні інструменти з покриттям  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NbN-Ti}$  (виробництво ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України) використані на підприємствах України, Росії, Білорусі. За замовленням ТОВ «Компанія «Інтервіт» (м. Київ) покриття з нітриду титану ( $\text{TiN}$ ,

«під золото») нанесено на партію 200 шт. різальних інструментів з полікристалічним надтвердим композитом на основі кубічного нітриду бору торгової марки «Борсиніт» (виробництво ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України).

**Вироби авіаційної техніки.** Поверхнєве зміцнення деталей дифузійним насиченням з контрольованих газових середовищ з формуванням зносостійких покриттів знаходить широке практичне застосування для виробництва титанових деталей авіаційної техніки.

Аналіз технічних можливостей сучасних методів реалізації необхідних трибологічних характеристик титанових виробів (гальванічне покриття Cr; покриття Ni, нанесене хімічним способом; плазмове напилення покриттями ВКНА і ПГ10Н-01; електроіскрове поверхнєве легування покриттями TiB<sub>2</sub>-NiMo; вакуумне азотування), з дотриманням вимог екології, свідчить про високу ефективність і перспективність дифузійних покриттів.

За замовленнями підприємств ДП «Завод «Техмаш» ВАТ «Оріана (м. Калуш), ТзОВ «Классон Інжиніринг Україна» (м. Львів), ДП «Луцький завод «Мотор» (м. Луцьк), АНТК «Антонов» (м. Київ), ЗДП «Кремнійполімер» (м. Запоріжжя) на договірних умовах вакуумним дифузійним насиченням сформовано покриття на різноманітних виробках.

Розроблено Технологічні рекомендації «Підвищення триботехнічних та втомних властивостей виробів з титанових сплавів комбінованою обробкою – нанесенням зносостійкого покриттів з наступним поверхневим зміцненням», спеціальні технічні умови СТУ № 103-05/05 на виконання технологічної операції азотування деталей авіаційної техніки, які виготовляють з титанових сплавів на КіАЗ «Авіант», технологічна інструкція ТИ 16-654-05 «Азотування високоміцного титанового сплаву ВТ-22».

**Декоративні покриття.** Результати розробки були застосовані для отримання нового оздоблювального матеріалу – декоративного захисного покриття «під золото» шляхом синтезу нітриду титану на листи нержавіючої сталі. Композиція має високу абразивну і корозійну стійкість та запропонована для використання замість сусального золота для реставрації будівель, споруд та декорування архітектурних деталей в містобудівництві (ліплення, декоративне оздоблення елементів декору та дизайну як у середині, так і зовні будівель й споруд). Покриття на основі синтезованого нітриду титану забезпечує можливість варіювання відтінків золотого кольору за швейцарською шкалою і з успіхом замінює традиційний, дуже коштовний оздоблювальний матеріал – сусальне золото; покриття забезпечує довгострокове збереження декоративних властивостей поверхні та є менш дефіцитним – виробляється в Україні.

Декоративно-захисні покриття на основі нітриду і карбонітридів титану, а також інших матеріалів, отримані з використанням створеного вакуумного обладнання та технологічних ноу-хау, знайшли широке застосування при оздоблюванні відновленні старих і при будівництві нових релігійних будівель (храмів, церков), а також інших архітектурних споруд не тільки в Україні, а й за кордоном – у Македонії. На замовлення Митрополиту Свято-Успенської Києво-Печерської Лаври УПЦ виконано

роботи з виготовлення покриттів із листової нержавіючої полірованої сталі з декоративним покриттям на основі синтезованого нітриду титану «під золото» загальною площею 1000 м<sup>2</sup>.

**Медичне застосування.** В рамках договору з підприємством «Техно-Мед Україна» розроблені технологічні процеси зі створення функціональних багатошарових покриттів для виробів медичної техніки – ультразвукових лікувальних пристроїв з п'єзокераміки, які не мають аналогів в світі. Створені функціональні складнокомпонентні електропровідні, зносостійкі та бактерицидні покриття для захисту робочих поверхонь виробів зі спеціальної п'єзокераміки від зносу, ударів та інших механічних пошкоджень в процесі їх експлуатації. Виготовлені вироби (більше 1000 шт.) надані в підприємство «Техно-Мед Україна». Проведені дослідно-промислові випробування засвідчили високий технічний рівень створених покриттів, їхню конкурентність та перспективність.

**Оптико-електроніка.** Підвищення механічних та експлуатаційних характеристик зовнішніх поверхонь елементів ІЧ-оптики досягається при додаванні у конструкцію багатошарових оптичних покриттів плівок аморфного гідрогенізованого вуглецю з контрольованими оптичними властивостями та фізико-механічними характеристиками.

Найпрозоріші плівки з мінімальним показником поглинання  $k < 0,05 \text{ см}^{-1}$  в діапазоні довжини хвиль 1–50 мкм (за виключенням областей деформаційних і валентних коливань  $\text{СН}_x$ -зв'язків), осаджуються із метан-водневої суміші, що містять 40–60 об.% метану. Показник заломлення світла ( $n$ ) плівок для довжини хвилі 632 нм змінюється від 1,9 до 2,2.

Використання у складі інтерференційних покриттів захисних алмазоподібних а-С:Н плівок забезпечує збільшення композитної нанотвердості такого покриття з 0,5 до 5,0 ГПа.

**Виконана робота** зі створення функціональних плазмових та дифузійних покриттів показала, що за техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками вони відповідають кращим світовим зразкам і є найкращими в Україні, а їх використання в різних промислових умовах дозволяє суттєво підвищити працездатність різноманітної техніки, її ефективність, надійність, конкурентоспроможність.

Створені обладнання, технології та покриття не чинять шкідливого впливу на оточуюче середовище.

Сумарний економічний ефект від впровадження роботи зі створення функціональних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, як готових закінчених виробів з високою науково-технічною та інноваційною складовою та високим рівнем конкурентоспроможності, складає понад 130 млн. грн.

Основними чинниками досягнутого економічного ефекту є підвищення працездатності обладнання для нанесення покриттів, збільшення строків експлуатації виробів з покриттями, організація промислового виробництва та реалізація деталей з покриттями для промисловості України та інших країн.



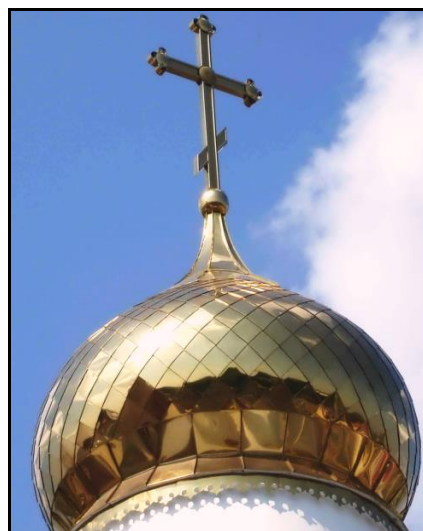
Торцеві кільця з карбиду кремнію з алмазоподібним покриттям



Головки з титану VT1-0 для ендопротезів кульшового суглоба людини



Германієві оптичні елементи з алмазоподібним покриттям



Декоративно-захисне покриття кольору «під золото»

Рисунок 2. Вироби з покриттями

За матеріалами роботи опубліковано 23 монографії, 202 наукових статті (понад 150 в міжнародних виданнях). Загальна кількість посилань на основні роботи авторів за базою даних Google Scholar – 1058 (h-індекс 22), Web of Science – 1077, Scopus – 1438 (h-індекс 24). Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 38 патентами Євросоюзу, Китаю, Південної Кореї, Росії, США, України, Японії.

За тематикою роботи були захищені 7 докторських та 21 кандидатська дисертація.