

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Мазіліна Богдана Олександровича «Структура та механічні властивості комбінованих нанокompозитних покриттів на основі керамічних матеріалів», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

1. Актуальність теми дисертації.

Науково-технологічний прогрес та висока ефективність промислового виробництва неможливі без використання сучасних матеріалів, здатних забезпечити працездатність приладів, обладнання та конструкцій протягом тривалого часу в умовах різнофакторного руйнівного зовнішнього впливу.

Модифікування поверхні матеріалів протягом багатьох років ефективно застосовується для надання різноманітним деталям та виробам специфічних властивостей, необхідних для їхньої ефективної експлуатації. Завдяки покращеним характеристикам (твердості, міцності, ерозійній стійкості, протидії корозії та іншим) захисний шар, сформований в процесі модифікування поверхні, може підтримувати довготривалу працездатність матеріалів у важких експлуатаційних умовах.

Створення нових та вдосконалення існуючих матеріалів, в тому числі багатофазних композитів з функціональними шаруватими покриттями, що забезпечують певні бажані властивості поверхні і роблять можливим реалізацію особливих експлуатаційних характеристик виробів, є важливою проблемою прикладної фізики та фізичного матеріалознавства.

У зв'язку з вищезазначеним тема дисертації Мазіліна Богдана Олександровича «Структура та механічні властивості комбінованих нанокompозитних покриттів на основі керамічних матеріалів», в якій вирішується задача створення фізико-технологічних основ формування плазмових нанокompозитних функціональних покриттів на основі керамічних сполук та визначено зв'язки структурно-фазового стану покриттів з механічними та фізико-хімічними властивостями композитів «металева підкладка – покриття», є **актуальною**.

Актуальність, наукова і практична значущість теми дисертації підтверджуються також тим, що її результати отримані здобувачем за його безпосередньої участі в проведенні планових наукових досліджень, виконаних на кафедрі матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

2. Основні наукові та практичні результати дисертації та їхня новизна.

У дисертаційній роботі отримані експериментальні дані про взаємозв'язок особливостей технологічного процесу формування

багатошарових нанокompозитних структур зі структурно-фазовими характеристиками осаджених покриттів та властивостями як цих покриттів, так і композитів «функціональне покриття – підкладинка». Системний аналіз відомих та власних експериментальних даних дав можливість автору не тільки отримати нові технічні результати, а і встановити фізичні чинники зафіксованих перетворень.

Серед **наукових результатів** роботи, отриманих **вперше**, слід, зокрема, відзначити наступні:

1. Виявлено, що багатошарові покриття TiZrN/TiSiN є композицією нанокристалів TiZrN та нанокристалів TiN , які вбудовані в аморфну матрицю SiN_x . Для багатошарових покриттів, утворених бішаровими композиціями TiZrN/TiSiN , при зменшенні періоду бішарової композиції з 85,9 нм до 20 нм зафіксовано зростання твердості з 24,5 ГПа до 38,2 ГПа та зростання модуля пружності покриттів до рівня 430 ГПа.
2. Показано позитивний вплив попередньо сформованого підшару нітриду розпорошеного матеріалу мішені TiZr , TiCr , Cr , Ti на механічні властивості різних типів плазових покриттів, що містять кремній. Формування підшару практично не змінює твердість, але призводить до підвищення опору механічному руйнуванню та зношуванню. Розроблено фізико-технологічну схему підвищення адгезійної міцності зв'язку покриття з підкладкою для покриттів типів $(\text{TiAlSiY})\text{N/CrN}$ та покриттів TiZrN/TiSiN .
3. У вакуумно-дугових багатошарових покриттях на основі нітриду $(\text{TiAlSiY})\text{N}$ з підшаром мононітриду реалізовано надтвердий стан з твердістю 49,5 ГПа та стійкістю до зношення близько 185 Н. Фізичним фактором утворення надтвердого стану з твердістю 50,5 ГПа карбонітридних покриттів на основі молібдену є сумарний тиск 0,4 Па суміші реакційних газів $80\%\text{C}_2\text{H}_2 + 20\%\text{N}_2$.
4. Сформовано різні за призначенням функціональні покриття на основі керамічних матеріалів SiC-AlN , $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$. Доведено, що підвищення механічних властивостей покриття $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ забезпечує нанокристалічний стан з середнім лінійним розміром зерен менше 100 нм, при цьому покриття зберігає високі діелектричні властивості. Досягнутий рівень механічних характеристик та термічної стабільності покриття $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ у поєднанні зі збереженням високої діелектричності робить можливим застосування таких покриттів для захисту виробів машинобудування.

Найважливішими **практичними результатами** дисертаційної роботи Мазіліна Б.О. є:

1. Визначення зв'язку величини періоду модуляції багатошарових покриттів TiZrN/TiSiN з механічними характеристиками (мікротвердістю та модулем пружності).
2. Розробка фізико-технологічної схеми підвищення адгезійної міцності

зв'язку покриття з підкладинкою для покриттів типів (TiAlSiY)N/CrN та TiZrN/TiSiN.

3. Експериментальні дані можливого коригування структурно-фазового стану керамічних покриттів для забезпечення різних функціональних характеристик (захисні покриття пар тертя, захист від руйнування різального інструменту, термостійкі та корозійностійкі покриття для виробів машинобудування).
4. Проведення випробувань функціональних захисних керамічних нітридних покриттів на різальному інструменті з висновком про досягнуте підвищення стійкості інструменту у 1,5 рази.

3. Достовірність отриманих в роботі результатів. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Для формування комбінованих нанокompозитних покриттів дисертантом використано серійне та модернізоване технологічне обладнання. При виготовленні катодів-мішеней застосовано якісні вихідні матеріали і хімічно чисті реактиви, що відповідають чинним стандартам і технічним вимогам. Застосовані спеціальні технічні прийоми виготовлення багатoeлементних керамічних матеріалів.

Для отримання достовірних наукових даних про склад, структуру, властивості та експлуатаційні можливості розроблених композитних матеріалів здобувачем проведено комплекс експериментальних досліджень з використанням різних фізичних методів аналізу та сучасного наукового обладнання. Структурно-фазові дослідження базуються на даних рентгенівської дифрактометрії, просвітлювальної та растрової електронної мікроскопії, енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, іонної мас-спектрометрії. Для визначення фізико-механічних характеристик покриттів використовували вимірювання мікротвердості, скретч-тестування, трибологію.

Виконані автором дисертації дослідження базуються на сучасних уявленнях прикладної фізики та фізичного матеріалознавства, результати та висновки цих досліджень не суперечать визнаним положенням та узгоджуються з відомими теоретичними та експериментальними даними. Вищезазначене є підставою зробити **висновок про достовірність наукових результатів і належну обґрунтованість наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації.**

4. Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих наукових працях. Завершеність і стиль викладення. Дотримання вимог академічної доброчесності.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи Б.О. Мазіліна в повному обсязі опубліковані у 14 статтях у спеціалізованих

наукових журналах (всі у наукометричній базі Scopus), 8 тезах доповідей на конференціях. В дисертації основні підходи, зміст досліджень і фізичне трактування отриманих результатів висвітлені повно і послідовно. В цілому дисертація є **завершеним науковим дослідженням**, виконана на високому науково-технічному рівні. Текст дисертаційної роботи та викладені результати є новими, **не мають ознак порушення академічної доброчесності**, робота не містить запозичень без належних посилань.

5. Зауваження по дисертації.

1. При описах технологічних процесів формування покриттів не надано обґрунтування обрання саме таких чисельних значень параметрів, зокрема це стосується величини потенціалу зміщення, тиску реакційного газу. Необхідно пояснити, на підставі чого автор обрав такі кількісні значення цих чинників.
2. Необхідно пояснити, чим зумовлено формування зони перемішування між підкладкою та покриттям, що спостерігається на електронно-мікроскопічних зображеннях поперечного перерізу покриттів (рис. 3.2).
3. За даними табл. 3.2 (с. 107) товщина покриттів TiZrN/TiSiN становить біля 4 мкм, а розмір макрочастинок крапельної фракції, сформованих під час осадження на поверхні, варіюється в межах 0,5 – 12 мкм (ця ж сторінка), тобто деякі макрочастинки за розміром перевищують товщину покриття. Як це впливає на мікроструктуру покриття та отримані в роботі трибологічні показники?
4. При описі властивостей оксидних покриттів (підрозділ 4.2) на с. 164 зазначено, що за своїми фізико-механічними властивостями такі багатoshарові покриття можуть використовуватись для захисту елементів двигунів. Для доведення цього необхідно у тексті навести дані про механічні та корозійні характеристики досліджених покриттів.
5. Є деякі зауваження технічного характеру. У тексті є стилістичні помилки, не всі рисунки повністю відповідають вимогам оформлення (рис. 3.19, 4.15 – відсутні похибка та точність вимірювань, рис. 1.3, 3.2, 3.13, 3.15, 3.16 – наявні позначки англійською мовою, рис. 2.5 – відсутня розшифровка величин по осях, на деяких рисунках обрано замалий масштаб окремих елементів (рис. 4.2 – 4.4, 4.6, 4.7, 4.11).

Зроблені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку роботи, не зменшують вагомість та цінність отриманих при її виконанні наукових та практичних результатів.

6. Загальні висновки. Дисертаційна робота Мазіліна Б.О. «Структура та механічні властивості комбінованих нанокompозитних покриттів на основі керамічних матеріалів» є **актуальним завершеним науковим дослідженням**, має наукову новизну та практичну значимість. Тема дисертаційної роботи, зміст її наукових і практичних результатів відповідає

спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали та відповідають вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та положенням Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167 (зі змінами згідно з Постановами КМ № 979 від 21.10.2020 та № 608 від 09.06.2021).

Вважаю, що Мазілін Богдан Олександрович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Завідувач відділу чистих металів,
металофізики та технологій нових матеріалів
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



Микола ПИЛИПЕНКО

Підпис Миколи Пилипенка засвідчую

ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар
ННЦ ХФТІ

09



Handwritten signature of the official secretary
09