

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Шовкопляс Оксани Анатоліївни «Вплив умов формування та терморадіаційної обробки на структуру й властивості покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

### 1. Актуальність теми дисертації

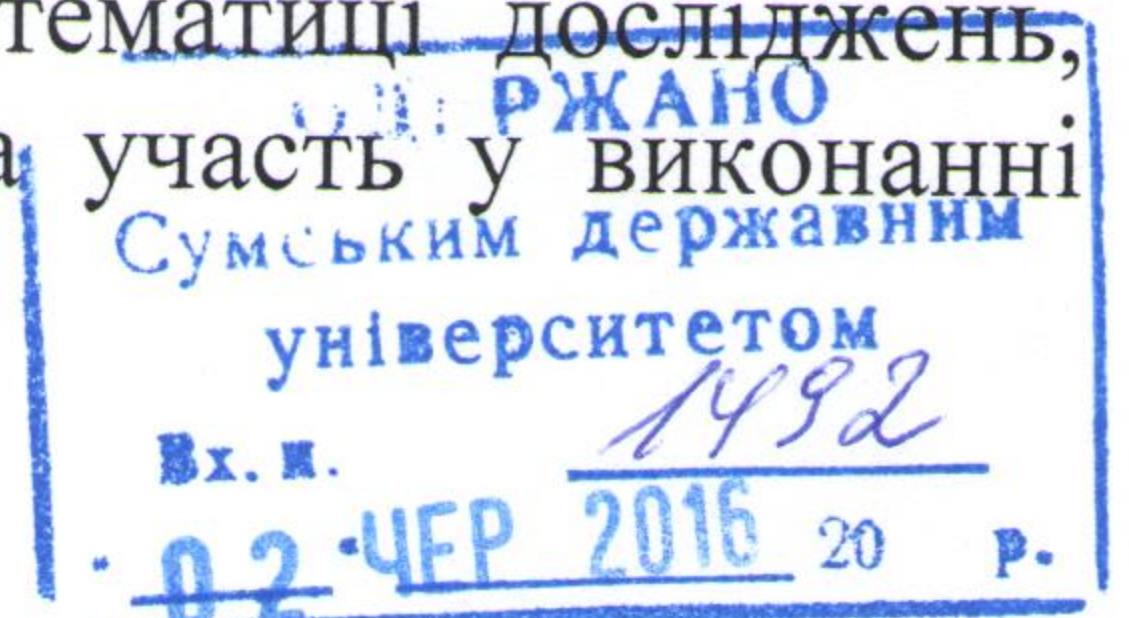
Зважаючи на вимоги сьогодення, пріоритетними у світовій практиці вбачаються наукові розробки, спрямовані на створення нових матеріалів із досконалими показниками фізико-хімічних властивостей, яких неможливо досягти традиційними методами та технологій формування таких матеріалів. При розв'язанні зазначених задач суттєва роль відводиться наноматеріалам, особливості фазового і структурного стану яких зумовлюють їх унікальні якісні характеристики, що не властиві для макроскопічних об'єктів.

Дисертаційна робота Шовкопляс О. А. присвячена дослідженню умов формування багатокомпонентних покриттів іонно-плазмовими методами. Основна увага приділяється структурній інженерії формування покриттів з метою досягнення прогнозованих властивостей нових матеріалів. У роботі комплексно досліджуються покриття на основі систем Ti-W-C і Ti-W-B.

Розроблені, сформовані і досліджені в дисертаційній роботі покриття характеризуються надтвердим станом (40 – 60 ГПа), низьким коефіцієнтом тертя та високою адгезійною міцністю, що дає можливість застосовувати їх як захисні покриття для підвищення працездатності деталей машин. Важливими є концепція та розроблені фізичні основи формування надтвердих покриттів на основі карбідів і боридів тугоплавких металів. Зазначені положення обґрунтовують актуальність тематики і важливість проблеми, якій присвячена дисертаційна робота Шовкопляс О.А.

### 2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота Шовкопляс О.А. виконувалася у Сумському державному університеті на кафедрі моделювання складних систем та в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» на кафедрі матеріалознавства у межах науково-дослідних робіт державного замовлення, зокрема № 0112U000402 «Розробка матеріалознавчих основ створення нанокомпозитних покриттів і модифікованих поверхневих шарів з підвищеними високотемпературними функціональними властивостями»; № 0113U001079 «Багатокомпонентні композитні матеріали та покриття на основі наносполук тугоплавких металів»; № 0113U000424 «Дослідження еволюції структурно-фазового стану багатокомпонентних композиційних матеріалів та покриттів при зовнішньому впливі»; № 0115U000508 «Розробка матеріалознавчих основ створення композиційних матеріалів з високими фізико-механічними властивостями», що відповідають тематиці досліджень, виконаних у дисертаційній роботі. Дисертант приймала участь у виконанні



зазначених науково-дослідних робіт і господарської договірної роботи № 0462 «Розвиток структурного підходу до оптимізації технологічного процесу одержання покриттів» (2014 р.). Таким чином здобувач має широкий досвід виконання науково-дослідних робіт.

### **3. Наукова новизна**

Рівень новизни отриманих результатів визначається такими положеннями:

На основі даних структурного аналізу при використанні схем зйомок із двома взаємно ортогональними дифракційними векторами обґрунтована модель росту іонно-плазмових покриттів системи Ti-W-W із переважним збільшенням розміру кристалітів вздовж осі росту у міру збільшення товщини покриттів, які знаходяться під дією напружень стискання.

В роботі визначено, що формування пересичених твердих розчинів систем Ti-W-C і Ti-W-W та виділення на їх основі нижчих за елементом проникнення фаз зумовлює диспергування кристалітів й ріст мікро деформації. Формування нижчих фаз стимулюється збільшенням відносного вмісту атомів W із низькою теплою утворення монокарбідів і диборидів.

Експериментально доведено, що в покриттях твердих розчинів, одержаних при гомологічній температурі  $K_H = 0,2-0,25$ , зростання співвідношення концентрацій атомів титану і вольфраму ( $C_{Ti}/C_W$ ) від 0 до 0,95 приводить до зміни характеру напружень від розтягнення до стискання і появи переважних орієнтацій росту кристалітів із осями [111] і [001] в монокарбідах і диборидах відповідно.

Встановлено, що найбільш нестійкими до високотемпературного постконденсаційного відпалювання є нижчі за елементом проникнення фази. В однофазних (твердий розчин) покриттях фазовий стан, структура та субструктурні характеристики залишаються практично незмінними до температури відпалювання  $T_{\text{анн}} = 1300$  К, а також при високому опроміненні ( $6,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>) протонами з енергією 200 кеВ. При цьому в тріаді фазовий склад – структура (субструктура) – напружено деформований стан істотні зміни зазнає лише напружено-деформований стан, зменшуючи за абсолютною величиною конденсаційні напруження стискання.

Експериментально визначено, що найбільших значень твердість набуває в покриттях, одержаних при високій температурі підкладки при осадженні ( $T_S > 670$  К), коли процеси розшарування твердого розчину приводять до стану передвиділення з нижчою за елементом проникненням фазою ( $\beta$ -WB для боридів і  $\alpha$ -W<sub>2</sub>C для карбідів), у той час, як за низької  $T_S$  (670 і менше), коли в покриттях відбувається формування твердо-розчинного стану, твердість не перевищує 40 ГПа.

В дисертаційній роботі запропонована оригінальна модель самоузгодженого підвищення міцності в системі «металева підкладка – покриття з твердого розчину на стадії його упорядкування» під дією точкового навантаження.

#### **4. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Для вирішення завдань, поставлених у роботі, Шовкопляс О. А. застосувала експериментальні методи дослідження фізики твердого тіла та методи математичного моделювання. Достовірність й обґрунтованість отриманих автором експериментальних даних підтверджена комплексом застосованих сучасних і апробованих методів аналізу фазового й елементного складу, текстури і морфології поверхні за допомогою електронних мікроскопів та рентгенівського дифрактометра. Вимірювання твердості і модуля пружності здійснювалися за допомогою мікроіндентора та наноіндентора. Коефіцієнт тертя, адгезійна міцність покриттів до підкладки визначалися склерометричними методами.

#### **5. Повнота викладу наукових положень дисертаційної роботи**

Основні результати роботи опубліковані в 22 наукових працях, зокрема 7 статтях у періодичних фахових наукових виданнях, у тому числі 4 – у виданнях, що індексуються БД Scopus; 3 статтях у матеріалах конференцій та 12 тезах доповідей на Міжнародних наукових конференціях.

#### **6. Практична цінність отриманих результатів**

Наукова і практична цінність результатів, одержаних при виконанні дисертаційної роботи полягає в розширенні уявлень про закономірності формування елементного та фазового складу, структури, субструктури, напружено-деформованого стану покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B, осаджених іонно-плазмовими методами, що є основою для їх структурної інженерії та досягнення при цьому необхідних фізико-механічних характеристик.

Одержані в роботі результати структурних досліджень та створені на їх основі моделі розвитку анізотропності кристалітів при збільшенні товщини конденсату та зміцнення при упродовженні твердого розчину у системах Ti-W-C і Ti-W-B можуть застосовуватися для прогнозування властивостей покриттів залежно від умов їх функціонування. Максимальна твердість досліджуваних покриттів становить 39,2 ГПа в системі Ti-W-C і 68,3 ГПа в системі Ti-W-B, що визначає перспективність застосування таких покриттів як захисних зносостійких для металічних конструкційних елементів.

Прикладний характер результатів дисертації полягає в їх впровадженні в навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при викладанні дисциплін «Наноматеріали» та «Нові функціональні матеріали».

#### **7. Структура та обсяг роботи**

В першому розділі «Мікроструктурне конструювання покриттів квазібінарних систем на основі фаз проникнення (літературний огляд)» проаналізовано основний масив опублікованих літературних джерел за тематикою дослідження.

У другому розділі «Методика проведення експериментальних досліджень» описані іонно-плазмові методи отримання покриттів; високотемпературного вакуумного відпалювання; іонного опромінення високоенергетичними пучками протонів; елементного, структурно-фазового аналізу та аналізу їх напружено-деформованого стану; дослідження механічних властивостей зразків.

У третьому розділі «Структурна інженерія покриттів системи Ti-W-C» представлені результати енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу. Досліджено результати високотемпературного постконденсаційного відпалювання зразків покриттів системи Ti-W-C. За допомогою « $\sin^2\psi$ »-методу рентгенівської тензометрії встановлено, що отримані покриття знаходяться під дією макронапружень стиснення. Досліджено вплив на покриття високодозного опромінення протонами з енергією 200 кеВ на фазово-структурний та напружено-деформований стан іонно-плазмових покриттів.

У четвертому розділі «Структурна інженерія покриттів системи Ti-W-B» наведені результати дослідження впливу термічного фактора на морфологію та структуру покриттів системи Ti-W-B. Встановлено, що розвиток волокнистої морфології покриттів ґрунтується на анізотропності кристалітів з переважним їх зростанням у напрямку падіння потоку плівкоутворюючих частинок. Визначено напружено-деформований стан нанокристалічних покриттів системи Ti-W-B з гексагональною кристалічною ґраткою. Досліджено вплив радіаційної дії на структуру, субструктурні характеристики й напружено-деформований стан іонно-плазмових покриттів системи Ti-W-B.

У п'ятому розділі «Фізико-механічні характеристики покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B та їх зв'язок зі структурним станом» досліджено фізико-механічні та триботехнічні характеристик покриттів на основі систем Ti-W-C і Ti-W-B. Встановлено, що найвища твердість 60 ГПа в поверхневому шарі товщиною 0,5–0,7 мкм властива покриттям системи Ti-W-B, одержаних при температурі підкладки при осадженні 970–1170 К і вмісті TiB<sub>2</sub>-складової в розпилювальній мішені 10–31 мол.%. Твердість покриттів системи Ti-W-C, одержаних в аналогічних умовах, набуває свого максимального значення 37 ГПа при температурі відпалювання 1070 К. Описані механізми підвищення міцності покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B, осаджених на металічну підкладку.

## **8. Загальні висновки по роботі**

Вважаю що дисертаційна робота Шовкопляс О.А. являє собою цілеспрямоване і завершене теоретичне та експериментальне дослідження, виконане на високому науковому рівні та представляє значний інтерес у фундаментальному та прикладному сенсі. В роботі отримані конкретні фізичні характеристики синтезованих покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B, одержаних іонним розпиленням. Встановлено, що досліджувані покриття досягають твердості 40 - 60 ГПа, мають низький коефіцієнт тертя і можуть знайти застосування як захисні покриття для пар тертя деталей машин. Визначено вплив радіаційної дії на покриття протонів енергією 200 кеВ і доведено, що під дією протонів змінюється лише деформаційно-напружений стан покриттів.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації, у якому викладені мета і задачі дослідження, наукова новизна отриманих результатів, методики досліджень, основні результати та висновки. Автореферат оформлений належним чином.

### **9. Зауваження щодо дисертаційної роботи**

1. Чим пояснюється асиметрія у співвідношенні складових мішені WC – TiC (сторінка 40)?
- 2.. Не зрозуміло про яке моделювання йдеться у першому абзаці на сторінці 108.
3. Бажане ґрунтовніше пояснення механізму впливу зростання розмірів кристалітів при відпалюванні на механічні характеристики покриттів.
4. У підрозділах 5.1.2 та 5.2.3 бажано конкретизувати значення адгезійної міцності синтезованих надтвердих покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B.
5. Цікавим було б аналітичне порівняння характеристик надтвердих покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B, зважаючи на те, що ці системи поєднані в роботі.

Однак, наведені зауваження не знижують цінності та важливості одержаних автором дисертаційної роботи результатів і не ставлять під сумнів достовірність і обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист, не впливають визначальним чином на загальну позитивну оцінку роботи.

### **Висновок**

Дисертаційна робота Шовкопляс О.А. «Вплив умов формування та терморадіаційної обробки на структуру й властивості покриттів систем Ti-W-C і Ti-W-B» за актуальністю, ступенем обґрунтованості наукових положень, теоретичною та практичною цінністю, обсягом і рівнем одержаних результатів, повнотою їх викладення в опублікованих працях і за висновками повністю задовольняє вимоги до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, зокрема пунктам 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор Шовкопляс Оксана Анатоліївна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,  
заступник директора з наукової роботи  
Наукового фізико-технологічного центру  
МОН та НАН України,  
кандидат фізико-математичних наук



П.В. Турбін