

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Максакової Ольги Василівни  
«Структура та фізико-механічні властивості композитних покриттів на основі  
ZrN/CrN», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-  
математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

**Актуальність обраної теми.**

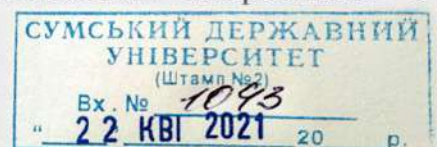
Ефективним та економічно вигідним способом підвищення працездатності і терміну служби продукції інструментальної та машинобудівної галузей традиційно вважається осадження на ній багатофункціональних покриттів з покращеними фізико-механічними та експлуатаційними характеристикам. Серед існуючих класів покриттів, нітриди перехідних металів представляють великий інтерес в якості зміцнюючих покриттів для поверхні матеріалів, оскільки мають достатньо високі твердість, зносостійкість, корозійну стійкість, температурну стабільність.

Розширення спектру їх властивостей можливе за рахунок структурних трансформацій. Існують різні трансформаційні підходи. Це, наприклад, отримання трьох чи чотирьох компонентних покриттів шляхом додавання інших елементів (кремній, вуглець, бор) до бінарних з'єднань; осадження нітридних покриттів, на основі високоентропійних сплавів; створення багат шарових покриттів із комбінації кількох твердих нітридів. Останній вважається особливо перспективним, а при формуванні шарів нанометрового масштабу, тобто формування покриттів наноструктурними, досягається значне підвищення показників їх фізичних та механічних властивостей.

Тому, дослідження покриттів такого типу, зокрема, встановлення фізичних процесів, що відбуваються при їх синтезі, вивчення структури, складу та властивостей мають прикладне значення та є актуальною задачею сучасного матеріалознавства та фізики твердого тіла. У зв'язку з вищезазначеним, дослідження багат шарових покриттів ZrN/CrN та (CrN/ZrN/Cr/Zr), що було проведено у дисертаційній роботі Максакової О.В., є актуальним та своєчасним.

**Ступінь обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Викладені в дисертації експериментальні результати підтверджуються застосуванням таких аналітичних методів дослідження як растрова електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз з



використанням спектрометра з дисперсією за енергією, спектроскопія резерфордівського зворотного розсіювання, спектроскопія характеристичних втрат енергії електронів, рентгеноструктурний аналіз, просвічуюча електронна спектроскопія з застосуванням мікродифракції електронів, диференційна сканувальна калориметрія, методи індентування. Дисертантка використала взаємодоповнюючі методи дослідження, усвідомлюючи їх певні недоліки і переваги для підтвердження достовірності викладених результатів. Всі зазначені методи є добре апробованими та дозволяють отримувати точні та надійні результати, які є також поясненими в роботі.

### **Ступінь новизни отриманих результатів**

1. Вперше досліджено дефектну структуру композитних покриттів на основі ZrN/CrN та виявлено формування повних та часткових дислокації у місцях розподілу шарів, на межі різноорієнтованих у відношенні один до одного зерен та всередині зерен.

2. Вперше розраховано величини, що характеризують ступінь досконалості структури, а саме, коефіцієнт текстури та густину дислокацій. Встановлено, що зі зменшенням періоду модуляції від 732 до 53 нм відбувається істотне збільшення коефіцієнту текстури від 1,320 до 2,975. Зменшення значення густини дислокацій від  $1,2 \cdot 10^{16}$  до  $2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$  вказує збільшення ступеня субструктурної досконалості покриттів.

3. Вперше з'ясовано, що стійкими до підвищених температур та придатними до багаторазового термічного навантаження є ZrN/CrN покриття стехіометричного складу, осаджені при  $P_N = (0,16 \div 0,2)$  Па та  $U_{зм} = -150$  В. У той час покриття, осаджені при низькому потенціалі зміщення на підкладці  $U_{зм} = -70$  В, визнані нестійким до відпалу, а температура їх знеміцнення складає  $1470 \pm 10$  К.

### **Значимість роботи для науки та практики**

У першу чергу, варто зазначити фундаментальне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі, що полягало у встановленні взаємозв'язку структури, хімічного складу та напруженого стану з термодинамічними і механічними властивостями композитних покриттів на основі ZrN/CrN.

Прикладне значення отриманих результатів полягає у їх використанні під час розробки нових концепцій по створенню багатофункціональних багатошарових систем на основі комбінації кількох твердих нітридів з шарами нанометрової товщини вакуумно-дугової

технологією. Перспективними напрямками застосування таких покриттів в якості модифікуючого захисного шару є передові галузі обробної промисловості, зокрема, інструментальна, машинобудівна, авіаційна, оскільки здатні забезпечити підвищення працездатності та терміну служби промислової продукції (інструментів, деталей тощо).

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні результати дисертації викладено у 14 наукових працях, що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертаційна робота. Аналіз представлених публікацій дає підставу стверджувати, що всі основні положення дисертації в повній мірі опубліковано й апробовано на конференціях. Зміст автореферату повністю відповідає основним положенням дисертації.

### **Зауваження щодо змісту дисертації**

Робота не позбавлена деяких недоліків.

1. В роботі не наведена шорсткість підкладки, яка може впливати на характеристики адгезії нанесених покриттів.
2. Твердження, що метод РЗР є достатньо поширеним для вимірювання концентрації атомів хімічних елементів малої атомної маси, помилкове, навпаки метод достатньо добре дає результати для великих атомарних мас.
3. Наскільки мені відоме на електростатичному прискорювачі Білоруського державного університету відсутній канал мікрозонду, тому розміри пучка в методі РЗР близько 1 мм, а не 1 мкм.
4. У Розділі 2 недостатньо інформації щодо методики осадження експериментальних покриттів, зокрема, доцільно було б навести схему будови установки Булат-6, та уточнити деякі технологічні параметри, зокрема, температуру підкладки, режим осадження, його часову тривалість.
5. Як видно з електронно-мікроскопічних знімків, наведених на рис. 3.6–3.8 дисертаційної роботи та рис. 3 автореферату в покриттях ZrN/CrN присутня крапельна складова, однак у роботі не вказано чи встановлений її вплив механічні властивості покриттів.
6. У Розділі 5 наведено значення індексу в'язкопластичності  $H/E$  як одного із показників трибологічних властивостей покриттів, однак експериментальні дослідження даних властивостей відсутні. Їх проведення значно розширило б уявлення про області застосування досліджених композитів.

Але ці зауваження не зменшують цінності результатів дисертації.

**Відповідність встановленим вимогам до кандидатських дисертацій.**

Дисертаційна робота присвячена вивченню структури і властивостей багатошарових композитних вакуумно-дугових покриттів на основі ZrN/CrN, встановленню взаємозв'язків між параметрами осадження, елементним складом, структурою, напруженим станом та термодинамічними і механічними властивостями покриттів.

Структура дисертації в повній мірі відповідає вимогам, які пред'являються до кандидатських дисертацій. Мова та стиль подання зрозумілий, речення логічно побудовані, мають смислову завершеність, цілісність та зв'язність. Зміст дисертації послідовно відображає постановку задач, методи їх вирішення та інтерпретацію отриманих результатів. Дисертація є цілісною та завершеною роботою.

На підставі вищевикладеного можна стверджувати, що дисертаційна робота Максакової О.В. «Структура та фізико-механічні властивості композитних покриттів на основі ZrN/CrN» є завершеною кваліфікаційною працею. Таким чином, за актуальністю, ступенем новизни, значимістю для науки і практики, а також за структурою і об'ємом дисертація відповідає вимогам на здобуття ступеня кандидата наук, зокрема пунктам 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», та свідчить про високий науковий рівень авторки, яка заслуговує присвоєння їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Завідувач відділом фізики пучків заряджених частинок  
Інституту прикладної фізики НАН України  
доктор фізико-математичних наук, професор

О.Г. Пономарьов

Підпис О.Г. Пономарьова  
доктора фізико-математичних наук, професора  
завідувача відділом фізики пучків заряджених частинок **завіряю.**

Вчений секретар  
Інституту прикладної фізики НАН України  
кандидат фізико-математичних наук



О.І. Ворошило