

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Бортницької Маргарити Олександрівни
«Закономірності формування та властивості
іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань
10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

1. Актуальність теми дисертації.

Необхідність забезпечення постійної відповідності між властивостями матеріалів та все більш жорсткими умовами їх використання при екстремальних навантаженнях, високих температурах, у агресивному середовищі потребує розробки нових матеріалів. Подальший прогрес вимагає застосування підходів, що забезпечують перехід до матеріалів нового покоління з унікальними властивостями. До таких матеріалів належать матеріали на основі МАХ фаз. В останні роки МАХ фази викликають великий інтерес завдяки своїй унікальній наночаруватій структурі та властивостям, що займають нішу між керамікою та металом завдяки комбінації зв'язків різного типу. Зокрема, формування покриттів на основі МАХ фаз на поверхні виробів виступає перспективним способом захисту матеріалів, що працюють в складних умовах дії високої температури, корозії та радіації. Чудові механічні властивості, висока електро- та теплопровідність, стійкість до пошкоджень, здатність до самовідновлення, висока термічна стабільність, стійкість до окислення, корозії та стирання робить такі покриття корисними для багатьох додатків. Такі покриття можуть бути ефективно використані для комплексного захисту титанових, алюмінієвих, цирконієвих сплавів, сталей та суперсплавів на основі нікелю, що важливі для аерокосмічної, автомобільної, морської, хімічної промисловості та атомної енергетики.

В залежності від потенційного призначення сучасні дослідження повинні бути спрямовані на перенесення та вдосконалення відповідних властивостей масивних МАХ фаз на матеріал у формі покриттів, що іноді досить складно реалізувати. Розробка і створення покриттів на основі МАХ фаз неможливі без вивчення фізичних принципів і законів, за якими формується їх структура, дослідження властивостей покриттів і впливу на них зовнішніх факторів. Синтез захисних покриттів доцільно проводити при відносно низьких температурах підкладки, що не здатні негативно впливати на матеріал основи. Застосування іонно-плазмових PVD методів осадження покриттів на основі МАХ досить перспективне, оскільки дозволяє знижувати температуру синтезу завдяки додатковому потоку енергії, що виникає внаслідок бомбардування поверхні росту енергетичними частинками. Успішна розробка покриттів вимагає розуміння того, як спосіб виробництва та параметри осадження впливають на склад, кристалографічну будову та

морфологію. У свою чергу, важливо знати, як вони визначають фізико-механічні і технологічні властивості отриманого матеріалу.

Виходячи з викладеного вище, вважаю, що дисертаційна робота Бортницької М.О. «Закономірності формування та властивості іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз», є безумовно **актуальною, як з фундаментальної, так і з практичної точок зору.**

Додатково слід зауважити, що дисертаційна робота виконувалась у відповідності до плану науково-дослідних робіт лабораторії «Іонно-плазмової обробки матеріалів», Інституту Фізики Твердого Тіла, Матеріалознавства та Технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут».

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

Дисертаційна робота Бортницької М.О. присвячена виявленню закономірностей формування структури іонно-плазмових покриттів, що осаджуються з катодів на основі МАХ фаз системи Ti-Al-C, а також, встановлення зв'язків між параметрами синтезу, складом, структурою, механічними і трибологічними властивостями покриттів та їх стійкістю до окислення

Серед **наукових результатів** роботи, які були одержані **вперше** слід відзначити наступні:

- Отримано результати комплексних порівняльних досліджень складу, структури та властивостей покриттів, одержаних різними іонно-плазмовими методами з катодів (мішеней) на основі МАХ фаз системи Ti-Al-C, виготовлених шляхом гарячого пресування порошкових сумішей. Визначено особливості покриттів, що осаджують методами іонного та магнетронного розпилення, а також, вакуумно-дугового осадження.

- З'ясовано, що МАХ фаза Ti_2AlC належить до матеріалів, що важко піддаються іонному розпиленню. Коефіцієнт розпилення мішені на основі МАХ фази іонами аргону приблизно у 1,5 рази нижче, ніж коефіцієнт розпилення мішені з титану.

- Визначено умови, що забезпечують формування МАХ фаз в покриттях при низьких температурах підкладки ($\leq 450^\circ C$). Показано, що при синтезі покриттів вакуумно-дуговим способом для формуванню МАХ фаз Ti_2AlC та Ti_3AlC_2 сприяє застосування катоду з підвищеним вмістом алюмінію та посилення потужності іонного бомбардування поверхні росту важкими іонами, яке реалізується завдяки введенню у вакуумну камеру Ar та/або додавання до складу катоду Nb.

- Вперше методом вакуумно-дугового осадження на підкладках з Ti фольги синтезовані наноструктурні покриття з МАХ фазою Ti_2AlC , що показали стійкість до окислення при температурі $600^\circ C$ протягом 1000 годин вищу, ніж стійкість об'ємного зразку Ti_2AlC внаслідок утворення на поверхні складних сполук Ti-Al-(C,N,O), причому поверхня покриття зберігає високу електропровідність $1,3 \cdot 10^6$ См/м.

- Виявлено негативний вплив додавання Nb і позитивний Sn на трибологічні характеристики покриттів з двофазною структурою твердих розчинів на основі $\text{TiC} + \text{Ti}_3\text{AlC}_2$. Показано, що нанесення на сталеві зразки вакуумно-дугових покриттів, що містять МАХ фазу Ti_3AlC_2 , збільшує опір фретинг-втомі.

Найважливіші **практичні результати** дисертаційної роботи Бортницької М.О. полягають у тому, що матеріали і висновки проведених досліджень доповнюють і розширюють існуючі уявлення про фізичні механізми формування структури та властивостей іонно-плазмових конденсатів. Результати роботи слугують науковою основою для вибору оптимальних технологічних режимів формування функціональних покриттів на основі МАХ фаз з необхідними характеристиками.

За результатами досліджень рекомендовано оптимальні енергетичні і часові параметри процесу нанесення вакуумно-дугових і магнетронних покриттів за використання катодів (мішеней) на основі МАХ фаз Ti_2AlC і $\text{Ti}_2(\text{Al}_{0,75}\text{Sn}_{0,25})\text{C}$, які запропоновано для інтерконектів середньотемпературних (600°C) полегшених твердооксидних паливних комірок, що розробляються у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України.

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

Достовірність результатів дисертаційної роботи обумовлена використанням комплексу сучасних, традиційних і апробованих методів фізики та фізичного матеріалознавства: скануюча електронна мікроскопія, рентгенівська дифрактометрія, рентгенофлуоресцентний аналіз, енергодисперсійний мікроаналіз, Оже-спектроскопія, наноіндентування, адгезійні, кавітаційні та трибологічні випробування покриттів, випробування на фретинг-втому та визначення електропровідності покриттів чотириточковим зондом. Одержані в роботі наукові результати мають чітку та наочну фізичну інтерпретацію та не суперечать сучасним уявленням фізичного матеріалознавства. Основні положення та висновки дисертаційної роботи добре відповідають змісту одержаних результатів і є достатньо обґрунтованими. Основні результати роботи, отримані за допомогою різних методик, добре погоджуються між собою. Наукові положення дисертації ґрунтуються на сучасних уявленнях фізики твердого тіла та узгоджуються із загальноприйнятими теоретичними та експериментальними даними.

4. Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих наукових працях.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи Бортницької М.О. в повному обсязі опубліковані у 8 наукових працях

фахових виданнях України, що індексуються у наукометричній базі «Scopus», та 11 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Відповідність вимогам академічної доброчесності.

Наведені в дисертації результати є новими, робота не містить запозичених даних інших авторів без належних посилань на їхні дослідження, тобто робота відповідає умовам академічної доброчесності.

5. Зауваження до тексту дисертації:

1. У розділі 2 зазначено, що температура підкладок під час осадження для всіх використаних в роботі методів синтезу покриттів не перевищувала 450°C, для запобігання структурних змін в матеріалі підкладок та виникнення значних термічних напружень, однак, не пояснено як відбувався контроль температури.

2. В розділі 3 показано, що магнетронні покриття, незалежно від застосованої потужності розряду 600-2800 Вт, мають склад, що досить гарно відповідає складу катоду на основі МАХ фази Ti_2AlC , однак, в покриттях не виявлено МАХ фаз. Нажаль автором не обґрунтовується вибір діапазону зміни потужності розряду і не розглядається спосіб формування МАХ фази у цих покриттях шляхом наступної термообробки.

3. Автор порівнює кінетичні криві кавітаційного зношування об'ємного матеріалу на основі МАХ фази Ti_2AlC і вакуумно-дугового покриття $(Ti,Al)C$. Більш доцільно було дослідити покриття, що містить МАХ фазу.

4. В роботі відсутній аналіз стосовно відповідності елементного складу багатокомпонентних катодів на основі МАХ фаз системи $Ti-Al-C$ із додаванням Nb або Sn і покриттів, що отримують з їх застосуванням.

5. Нажаль в роботі не обговорюється можливий механізм впливу додавання Nb та Sn на трибологічні характеристики вакуумно-дугових покриттів, що містять МАХ фазу Ti_3AlC_2 .

Наведені зауваження не зменшують достовірність та цінність одержаних наукових результатів, а також не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

6. Загальні висновки по роботі.

Дисертаційна робота Бортницької М. О. «Закономірності формування та властивості іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз», є актуальним завершеним науковим дослідженням, що має наукову новизну та практичне значення. За своєю спрямованістю та змістом дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія, галузі знань 10 – Природничі науки, а також 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 Постановами КМ №979 від 21.10.2020 та №608 від 09.06.2021).

Враховуючи актуальність, обґрунтованість наукових положень висновків, наукову новизну та практичну значущість дисертаційної роботи, вважаю, що Бортницька Маргарита Олександрівна заслуговує на присудження їй ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
МОН України, доктор технічних наук,
професор



Г.С. ХРИПУНОВ