

ВІДГУК

офіційного опонента, професора кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Навчально-наукового інституту «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доктора фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.08 – фізика плазми **Зикова Олександра Володимировича** 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

Обґрунтування вибору теми дослідження й актуальність роботи.

В останні роки захисні покриття на основі гексагональних карбідів з загальною формулою $M_{(n+1)}AX_n$ інтенсивно досліджуються серед багатьох інших багатокомпонентних покриттів. Особлива нанометрова шарувата структура і комбінований тип зв'язку надають МАХ фазам переваги як перед металевими, так і керамічними матеріалами. Al – вмісні МАХ фази, такі як Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , є багатообіцяючими матеріалами для покриттів через їх гарні механічні і трибологічні властивості, високу стійкість до високотемпературного окислення, здатність до самовідновлення, добру електропровідність. Додатково керувати властивостями МАХ фаз можна при додаванні легуючих елементів.

Покриття МАХ фаз системи Ti-Al-C перспективні, як альтернатива покриттям на основі нітридів перехідних металів, властивості яких знижуються при високих температурах. Важливий напрямок використання стійких до окислення покриттів – це міжкомпонентні з'єднання для твердих оксидних паливних елементів. Застосування покриттів на основі МАХ фаз потребує розуміння впливу параметрів та методу осадження на їх склад, кристалографічну будову, морфологію та властивості.

Таким чином, можна стверджувати, що дисертація Бортницької М. О. є **повністю актуальною**, а її результати є **важливими** для подальшої розробки процесів синтезу і досліджень особливостей формування структури покриттів Ti-Al-C, одержаних з катодів на основі МАХ фаз та їх зв'язок з фізичними і трибологічними властивостями.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота виконувалась в лабораторії «Іонно-плазмової обробки матеріалів», Інституту Фізики Твердого Тіла, Матеріалознавства та Технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут»

У вступі показана актуальність та важливість теми дослідження, визначена мета, предмет і основні завдання дисертаційної роботи. Висвітлена наукова новизна і практична значимість одержаних результатів.

У першому розділі проведений аналіз джерел інформації із формування покриттів на основі МАХ фаз іонно-плазмовими методами.

У другому розділі наведений перелік та опис матеріалів, експериментальних установок і дослідницького обладнання, застосованих при проведенні досліджень.

У третьому розділі приведено результати особливостей процесів синтезу та їх впливу на склад і структуру покриттів.

В четвертому розділі наведено результати вимірювань механічних властивостей покриттів. Результати наноіндентування, кавітаційних випробувань та трибологічні характеристики покриттів осаджених іонно-плазмовими методами з використанням катодів на основі МАХ фази Ti_2AlC .

В п'ятому розділі приведені експериментальні результати випробувань стійкості розроблених покриттів до окислення та результати вимірювання електропровідності матеріалів та покриттів після окислення у повітрі при 600 С протягом 1000 годин.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел із 201 найменувань достатньо повний і включає вітчизняні та зарубіжні публікації за темою дослідження.

Анотація відображає основний зміст дисертації та повністю розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

Дисертація є **завершеною науковою роботою**, яка базується на чітко сформульованій меті і завданнями досліджень.

Оформлення дисертації відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

1. Вперше проведені комплексні порівняльні дослідження складу, структури та властивостей покриттів, одержаних різними іонно-плазовими методами з катодів на основі МАХ фаз системи Ti-Al-C, виготовлених шляхом гарячого пресування порошкових сумішей. Показано, що МАХ фаза Ti_2AlC належить до важкорозпилюваних матеріалів. Коефіцієнт розпилення мішені на основі МАХ фази в 1,5 рази нижче, ніж коефіцієнти розпилення мішені з титану.

2. З'ясовано, що при синтезі покриттів вакуумно-дуговим способом при низьких температурах підкладки ($\leq 450^\circ C$) 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. При додаванні до складу катоду Sn збільшення вмісту МАХ фази не спостерігається. У разі подвійного легування, Sn пригнічує ефект по збільшенню вмісту МАХ фази від Nb і стабілізує структуру карбиду TiC.

3. 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'ємної 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.

4. Вперше виявлено негативний вплив додавання Nb на трибологічні характеристики покриттів з двофазною структурою твердих розчинів на основі TiC+ Ti_3AlC_2 . Навпаки, при додаванні Sn питома швидкість зношування покриттів зменшується на порядок при температурі $20^\circ C$ і у 6 разів при температурі $500^\circ C$.

5. Нанесення на сталеві зразки вакуумно-дугових покриттів, що містять МАХ фазу Ti_3AlC_2 , збільшує опір фретинг-втомі. Найбільше посилення опору фретинг-втомі забезпечує покриття без добавок. Показано, що вакуумно-дугове покриття на основі TiC+ α -Ti має високу зносостійкість при кавітаційних та трибологічних випробуваннях.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Аналіз тексту дисертації та змісту публікацій Бортницької М.О. дає змогу зробити висновок, що результати є науково обґрунтованими,

достовірними та відповідають меті й завданням дисертаційної роботи.

Поставлена мета досягається за допомогою апробованих експериментальних методів дослідження. Обґрунтованість результатів, що наведені в дисертації, підтверджується застосуванням методів електронної та оптичної мікроскопії, рентгенівської дифрактометрії, мікро- та наноіндентування, випробувань на фретинг та кавітаційну стійкість, трибологічних вимірювань, випробувань на стійкість до окиснення.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів і висновків дисертаційної праці не викликає жодних сумнівів і забезпечується високим рівнем апробації та наукових видань, у яких опубліковано результати дослідження.

Значення отриманих результатів для науки і практичного використання.

Результати проведених досліджень доповнюють і розширюють існуючі уявлення про фізичні механізми формування структури та властивостей іонно-плазмових покриттів. Важливість дисертаційної роботи для вирішення широкого кола прикладних задач полягає в тому, що одержані результати є науковою основою для вибору оптимальних технологічних режимів формування функціональних покриттів на основі МАХ фаз з необхідними характеристиками.

Результати досліджень впроваджено у Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна в освітньому процесі. Використання в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України основних положень дисертації дозволяє суттєво знизити витрати на вибір складу, виготовлення та підвищити якість матеріалів на основі МАХ фаз. Рекомендовано оптимальні енергетичні і часові параметри процесу нанесення вакуумно-дугових і магнетронних покриттів за використання катодів (мішеней) на основі МАХ фаз, які запропоновано для інтерконектів середньотемпературних полегшених твердооксидних паливних комірок у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 8 наукових працях і фахових виданнях України та інших держав, що індексуються в наукометричній базі «Scopus», та 11 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена

у дисертаційній роботі. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Академічна доброчесність.

На підставі детального розгляду тексту дисертації, посилань, статей здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку можливої наявності текстових запозичень виконано в інтернет-системі Unicheck.com) встановлено, що дисертаційна робота **виконана самостійно**, текст дисертації **не містить плагіату**, а дисертація **відповідає усім вимогам академічної доброчесності**.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

1. В роботі недостатньо ясно визначено різницю в фізичних параметрах потоків активованих частинок, сформованих вакуумно-дуговим, магнетронним та іонно-плазмовим методами нанесення покриттів, а також переваги і недоліки цих методів.
2. Доцільно було б вказати величину напруженості магнітного поля в фокусираторах установок іонно-плазмового розпилення та вакуумно-дугового осадження.
3. Недостатньо обґрунтовано вибір параметрів магнетронного розряду - тиску інертного газу аргону та електричної потужності, при нанесенні покриттів.
4. Відсутні дані по визначенню адгезії покриттів, нанесених магнетронним методом, до підкладки з титанового сплаву.
5. Деякі рисунки, зокрема схеми установок на рис. 1.6; 1.7; 2.2 , не дуже якісні.

Однак, вказані недоліки не знижують наукової цінності дисертаційної роботи і не впливають на її позитивну оцінку та практичну значимість.

Висновок.

Дисертаційна робота Бортницької Маргарити Олександрівни «Закономірності формування та властивості іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз» за актуальністю, змістом та повнотою викладу її результатів у публікаціях, обсягом і якістю оформлення відповідає спеціальності 104 – «Фізика та астрономія» (Галузь знань 10 – Природничі науки) та вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме пунктам 6, 7, 8 і 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44

Дисертаційна робота є закінченою роботою, що містить нові результати досліджень і направлена на вирішення практичної задачі по 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.

Вважаю, що Бортницька Маргарита Олександрівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій
ННІ «Фізико-технічний факультет»
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Олександр ЗИКОВ