

Рецензія

начальника відділу газостатичних та плазмових технологій Національного наукового центра "Харківський фізико-технічний інститут", доктора технічних наук

Сасенко Сергія Юрійовича

на дисертаційну роботу **Бортницької Маргарити Олександрівни**

«Закономірності формування та властивості іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз», представлену на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки»

Іонно-плазмові технології осадження захисних покриттів широко застосовуються для підвищення властивостей матеріалів. В останні роки багатокомпонентні покриття на основі МАХ фаз привертають велику увагу серед науковців. Шарувата нанометрова структура і комбінований тип зв'язку між атомами надають МАХ фазам властивості як металевих, так і керамічних матеріалів. Масивні МАХ фази, які містять алюміній, такі як Ti_2AlC та Ti_3AlC_2 мають високі механічні і трибологічні властивості, а також стійкі до високотемпературного окислення. Покриття на основі МАХ фаз системи Ti-Al-C можуть бути використані для заміни покриттів на основі нітридів перехідних металів, захисні властивості яких знижується при високих температурах. Однак, відомо, що високі температури синтезу перешкоджають широкому впровадженню покриттів на основі МАХ фаз. Іонно-плазмові методи фізичного осадження можуть дозволити значно знизити температуру синтезу таких покриттів.

Дисертаційна робота М.О. Бортницької присвячена виявленню закономірностей формування структури іонно-плазмових покриттів, що осаджуються з катодів на основі МАХ фаз системи Ti-Al-C, а також, встановленню зв'язків між параметрами синтезу, складом, структурою, механічними і трибологічними властивостями покриттів та їх стійкістю до окислення. Комплексні дослідження впливу методів осадження та їх параметрів, які можуть дати нову інформацію щодо фізики багатокомпонентних покриттів на основі МАХ фаз системи Ti-Al-C, раніше не проводилися. Тому **актуальність** теми дисертаційної роботи не викликає сумнівів, адже в роботі отримано низку нових унікальних результатів.

Дисертація базується на восьми статтях, які опубліковано в міжнародних журналах, одна з них з кварталом Q1 згідно SCImago Journal та Country Rank, та 11 тезах міжнародних конференцій.

Основні результати дисертаційної роботи.

Дисертація традиційно складається із вступу та п'яти розділів. У **вступі** обґрунтовані актуальність та мета дисертаційної роботи, наведені зв'язок роботи з науковими програмами, наукова новизна отриманих результатів, практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану досліджень з осадження покриттів на основі МАХ фаз іонно-плазмовими методами. Аналіз літературних даних свідчить, що для впровадження покриттів на основі МАХ фаз у різних сферах необхідні дослідження у багатьох напрямках. Виявлення закономірностей формування структури іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз та встановлення зв'язків між параметрами осадження, структурою і властивостями покриттів залишається нагальною потребою, як з наукової так із прикладної точки зору.

У **другому розділі** детально розглянуто матеріали і методики використані під час проведення досліджень. Обраний комплекс методів дозволяє всебічно та достовірно дослідити склад, структуру та властивості функціональних покриттів на основі МАХ фаз перспективних для зміцнення і захисту поверхні матеріалів.

У **третьому розділі** вперше досліджено процес розпилення мішені на основі МАХ фази Ti_2AlC за допомогою джерела газової плазми. З'ясовано, що МАХ фаза Ti_2AlC належить до важкорозпилюваних матеріалів. Виявлено, що на елементний склад наноструктурних покриттів, отриманих методами іонного розпилення та вакуумно-дугового осадження із застосуванням катоду на основі МАХ фази Ti_2AlC , значний вплив має величина напруги зміщення на підкладці. З'ясовано, що формуванню МАХ фаз Ti_2AlC та Ti_3AlC_2 у вакуумно-дугових покриттях сприяє застосування катоду з підвищеним вмістом алюмінію та посилення потужності іонного бомбардування поверхні росту покриття важкими іонами ніобію.

Розділ 4 дисертаційної роботи присвячено дослідженню механічних

властивостей покриттів. Вперше виявлено негативний вплив додавання Nb на трибологічні характеристики покриттів з двофазною структурою твердих розчинів на основі $\text{TiC}+\text{Ti}_3\text{AlC}_2$. Навпаки, при додаванні Sn питома швидкість зношування покриттів зменшується на порядок при температурі 20°C і у 6 разів при температурі 500°C . Найбільше посилення опору фретинг-втомі забезпечує покриття без добавок ніобію та олова. Показано, що вакуумно-дугове покриття на основі $\text{TiC}+\alpha\text{-Ti}$ має високу зносостійкість при кавітаційних та трибологічних випробуваннях.

У **розділі 5** наведено результати дослідження та аналізу стійкості покриттів до окислення. Вперше методом вакуумно-дугового осадження на підкладках з Ti фольги синтезовані наноструктурні покриття з MAX фазою Ti_2AlC , що показали стійкість до окислення при температурі 600°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 $1,3 \cdot 10^6 \text{ См/м}$.

У **Висновках** стисло представлено основні результати роботи, які відповідають меті та поставленим завданням.

Авторкою було отримано експериментальні результати, що зазнали глибокого аналізу. Ці результати викладені послідовно та чітко, дисертаційна робота написана науковою мовою із використанням сучасної термінології фізики поверхні та покриттів.

Однак, дисертаційна робота не позбавлена деяких недоліків:

- присутні друкарські помилки в тексті та на рисунках, які були авторкою виправлені;
- текст на типових схемах осадження покриттів рисунок 1.6 занадто дрібний та ускладнює їх розуміння;
- у висновках до розділу 1 не пояснюється важливість отримання покриттів на основі MAX фаз саме в одностадійному процесі;
- в розділі 2 не наведено масовий вміст порошкових сумішей для приготування катодів та мішеней методом гарячого пресування;
- в Таблиці 3.6 наведений елементний склад покриттів $(\text{Ti,Al})\text{C}$ осаджених в різних режимах магнетронного осадження. Однак, не пояснюється відносно

збільшення концентрації вуглецю в покриттях.

Проте, вказані недоліки не знижують наукової цінності дисертаційної роботи і не впливають на її високу позитивну оцінку.

В підсумку, дисертаційна робота Бортницької М.О. «Закономірності формування та властивості іонно-плазмових покриттів на основі МАХ фаз», є оригінальною завершеною науковою працею, що повністю відповідає вимогам пп.7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами від 21 березня 2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 і від 03.05.2024 № 507. За своєю спрямованістю та змістом дисертаційна робота відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія, галузі знань 10 – Природничі науки. Дисертація відповідає принципам академічної доброчесності, а здобувач, **Бортницька Маргарита Олександрівна** заслуговує на **присудження їй ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».**

Рецензент:

начальник відділу газостатичних
та плазмових технологій Національного
наукового центру "Харківський фізико-
технічний інститут" доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Сергій САЄНКО