

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, старшого наукового співробітника **Максимова Сергія Юрійовича** на дисертаційну роботу **Іванова Олександра Олександровича** «**Особливості структуроутворення та властивості електродугових покриттів із порошкових дротів на основі системи Fe-Ti-B-C**», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

1. Актуальність обраної теми дисертації

Нинішній стан промисловості України вимагає широкого впровадження ресурсозберігаючих технологій. Для вирішення цієї проблеми актуальним є використання новітніх матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками, зокрема здатних подовжити строк експлуатації обладнання, яке працює в умовах абразивного зношування. На сьогоднішній день найбільш важливим і ефективним способом боротьби з абразивним зношуванням стало наплавлення. Маса шару, що наноситься в процесі наплавлення, зазвичай невелика і складає 2-6% маси самої деталі, що визначає високу економічну ефективність процесу. Наплавлення дозволяє підвищити зносостійкість деталі в залежності від наплавочного сплаву і умов експлуатації в 2-10 разів, а в деяких випадках і більше, заощадити тисячі тон сталі (часто високолегованої), знизити трудові витрати і простої при ремонті обладнання.

Робочі поверхні деталей машин та механізмів, що відносяться до нафтогазової, машинобудівної, деревообробної, землеробної галузей, обладнання, що використовується при переробці дерев'яних, пластикових та металевих відходів, при виготовленні конструкційної кераміки, твердого палива, завжди потребують відновлення, яке є економічно вигідним та доцільним для конкретних умов роботи. Економічно важливими є тривалість роботи поверхні (деталі/конструкції) між вимушеними ремонтними періодами, вартість матеріалу для відновлення та вартість виконання методу відновлення (підвищення зносостійкості). Робочі поверхні деталей згаданого вище обладнання практично завжди працюють в умовах підвищених питомих та циклічних навантажень, при зношуванні закріпленим та незакріпленим абразивом. Враховуючи вищевказане, матеріал для

відновлення та підвищення зносостійкості робочих органів такого обладнання повинен поєднувати високі значення твердості, стійкості в умовах абразивної дії при високих питомих та циклічних навантаженнях. Створення такого матеріалу ускладнюється тим, що збільшення твердості матеріалу (для типових матеріалів для наплавлення, наприклад на основі хрому і вольфраму) призводить до підвищення його крихкості. Проте, забезпечення у матеріалі формування структури, яка складається з твердих, дрібних, рівномірно-розподілених, рівновісних включень у відносно менш твердій матриці призведе до отримання необхідних експлуатаційних властивостей при конкретних умовах роботи.

Тому представлена робота з розробки на основі дослідження особливостей структуроутворення зносостійких покриттів на базі системи FeTi-B-C з додаванням Mo із використанням чистих порошків металів порошкового дроту, що забезпечує наплавлення покриття з підвищеною стійкістю в умовах абразивної дії, є, безумовно, актуальною.

Про актуальність даної роботи також свідчить її зв'язок з темами фундаментальних та прикладних досліджень, що виконані в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ), зокрема науково-дослідною роботою «Розробка методів і засобів підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь технічного оснащення об'єктів безпекової інфраструктури» РК 0120U102113, у виконанні яких автор дисертації приймав активну участь в якості виконавця.

2. Наукова новизна отриманих результатів

В якості наукових результатів можна зазначити наступне:

- встановлено, що у порошкових електродних матеріалах системи легування FeTi-B-C із вмістом Ti ~ 16, B ~ 5.5, C ~ 1.5 мас. % часткова (~ 50 ат. %) заміна Ti на Mo призводить до утворення у структурі покриття значної кількості (~ 20 об. %) фази на основі потрійного бориду Mo_2FeB_2 із високою мікротвердістю (~ 35 – 40 ГПа) та забезпечує високу твердість покриття ~ 67 HRC;
- отримала подальший розвиток теорія моделювання фазової рівноваги у багатокомпонентних системах методом CALPHAD шляхом доповнення термодинамічних даних для системи Fe-Ti-Mo-B-C новими параметрами потрійних сполук системи B-Mo-C, отриманих за

результатами квантово - хімічних розрахунків та розробки бази даних термодинамічних функцій для прогнозування фазового складу сплавів даної системи та, відповідно, обґрунтованого вибору елементного складу електродних матеріалів для наплавлення;

- виявлено, що в центральних областях фази Mo_2FeB_2 , яка утворюється в електродугових покриттях системи Fe-Ti-Mo-B-C, знаходяться дисперсні (розмірами $\sim 1-2$ мкм), рівномірно розташовані ограничені зерна фази на основі TiC, сформованої *in situ*, що свідчить про їх модифікуючу роль при формуванні структури покриттів;

- встановлено, що при об'ємному співвідношенні Ti:Mo у вихідній шихті від 0.42 до 1 зносостійкість покриттів, наплавлених порошковими дротами системи Fe-16(Ti+Mo)-5.5B-1.5C є на 50-60 % вищою порівняно із покриттями, нанесеними із використанням серійних високохромистих матеріалів, що дає підстави для використання розроблених матеріалів для заміни серійних для роботи в умовах високих навантажень.

3. Практична цінність роботи

За результатами термодинамічного моделювання та досліджень, виконаних дисертантом, створено електродний матеріал з високим рівнем фізико-механічних і технологічних властивостей, з структурою, відмінною від серійних матеріалів для наплавлення. Використання розроблених порошкових електродів на основі системи легування Fe-Ti-B-C із добавками Mo при нанесенні електродугових покриттів на робочі поверхні ножів для зняття кори з деревини та шнеків пресів для виробництва будівельної кераміки дозволяє підвищити їх довговічність у 2,8 та 1,9-2,0 рази, відповідно. При вищих фізико-механічних та експлуатаційних властивостях, вартість виготовлення таких матеріалів менша вартості серійних електродів. Промислова апробація розроблених електродів для відновлення та підвищення зносостійкості робочих органів обладнання, що працює в умовах змішаної абразивної дії підтверджує дані, отримані при лабораторних дослідженнях та практичну цінність одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при читанні курсів лекцій «Основи матеріалознавства».

4. Обґрунтованість наукових положень дисертації та їх достовірність

Ступінь обґрунтованості наукових положень, що сформульовані у дисертаційній роботі, висновків та практичних рекомендацій зроблено на високому рівні, задачі і мету поставлено чітко. Вірогідність наукових положень та практичних рекомендацій підтверджено сучасними методиками, та значним обсягом експериментальних даних, які автор використовував у своїх дослідженнях.

Висунуті в дисертаційній роботі основні наукові положення та результати досліджень пройшли апробацію на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Основний зміст дисертації та найважливіші висновки викладені у статтях, що опубліковані у фахових виданнях, які входять до переліку МОН України для публікації праць здобувачів наукового ступеня.

5. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, 5-ти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури із 172 джерел та 4 додатків. Загальний обсяг роботи - 219 сторінок, в тому числі 100 рисунків і 17 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень. Висвітлено наукову новизну та практичну значимість отриманих в роботі результатів досліджень, відображено особистий внесок автора, а також наведено відомості щодо апробації роботи.

У першому розділі виконано аналіз сучасних систем легування і матеріалів, що використовуються для отримання зносостійких покриттів, сучасних серійних наплавочних матеріалів провідних виробників та їх практичне застосування, наведено методи отримання покриття, висвітлено особливості формування структури та властивостей електродугових покриттів із порошкових електродних матеріалів, наведено методи теоретичного аналізу фазового складу багатокомпонентних систем, перспективних для вибору систем легування порошкових електродів.

У другому розділі наведена інформація щодо вхідних матеріалів, їх характеристики та обладнання для виготовлення дослідних електродів. Описано методики досліджень мікроструктури та фазового складу дослідних зразків, триботехнічних досліджень, визначення

фізико-механічних характеристик дослідних матеріалів, термодинамічного моделювання фазового складу наплавленого шару і форми, геометрії та будови частинки.

У **третьому розділі** виконано термодинамічне моделювання покриттів на основі системи легування Fe–Ti (Mo)–B–C. Шляхом поєднання теоретичних розрахунків в рамках методики CALPHAD та експериментального дослідження структури та фазового складу встановлено, що оптимальний характер формування фазового складу припадає на склад матеріалів ат. %: Fe - 56.7; B – 21.7; C – 5.4 та Mo від 8 до 13 (решта Ti).

У **четвертому розділі** наведено результати досліджень впливу марки порошку титану, реакційної суміші Me + B + C на формування структури та фазового складу дослідних матеріалів, виконано моделювання форми, геометрії та будови частинки, проведено металографічне дослідження структури і фазового складу зони термічного впливу.

В **п'ятому розділі** наведені результати визначення фізико-механічних властивостей, триботехнічних випробувань на зносостійкість, в тому числі в умовах тертя по абразиву, в умовах газоабразивного і ударно-абразивного зношування, розглянуто технологічні особливості отримання покриття. Розрахунком та експериментально визначено термічний цикл при наплавленні порошковими електродами системи легування Fe-Ti-Mo-B-C. За результатами узагальнення проведених досліджень було обрано електроди, що характеризуються найкращими технологічними показниками. Наведено приклади промислового впровадження розроблених електродних матеріалів.

У **загальних висновках**, що сформульовані в дисертаційній роботі, в повній мірі відображено результати проведених автором досліджень.

6. Апробація положень та результатів дисертації та повнота їх викладення в опублікованих роботах

Основні результати дисертації опубліковані в 9 статтях, 4 з яких у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, зроблено 8 доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

1. Автор не вказав, яка конструкція електроду – дріт чи стрічка.
2. З тексту дисертації незрозуміло, який захист використовувався при наплавленні, чи це була відкрита дуга. В такому разі, в результаті взаємодії з киснем і азотом повітря в наплавленому металі мали утворитися нітриди титану і бору.
3. В роботі відсутня інформація щодо хімічного складу наплавленого металу.
4. Незрозуміло, з кількох шарів складалося наплавлення. Якщо їх було декілька, то доцільно було вказати розподіл властивостей по кожному шару.
5. Параграф 5.3. За рахунок чого змінюються зварювально-технологічні властивості електродів?
6. Наплавлення виконувалося на струмі 150 А. Доцільно було б обґрунтувати такий вибір, оскільки наплавлення на малих режимах призводить до погіршення стабільності процесу, збільшення втрат на розбризкування.
7. Оскільки в реальних умовах можлива експлуатація відновлених виробів у вологому середовищі, було б доцільно провести корозійні випробування.
8. Більшість загальних висновків носять констатуючий характер.
9. Окрім того, в тексті зустрічаються граматичні помилки та неточності, наприклад «взірець», а не «зразок», «січення», а не «перетин».

Загальний висновок

Наведені зауваження не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального наукового рівня.

Дисертаційна робота «Особливості структуроутворення та властивості електродугових покриттів із порошкових дротів на основі системи Fe-Ti-B-C» відповідає вимогам з актуальності, об'єму, методичного рівня досліджень, ступеню обґрунтованості наукових положень і висновків, наукової новизни і практичної цінності, рівня отриманих результатів та висновків, повноти їх висвітлення у наукових

працях, які зазначені в Наказі МОН України № 40 від 12 січня 2017 р. "Про затвердження вимог до оформлення дисертації", Постанові Кабінету Міністрів України № 261 від 23.03.2016 р. «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії», Постанові Кабінету Міністрів України № 167 від 06.03.2019 р. «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» з урахуванням змін, внесених Постановою Кабінету Міністрів України № 979 від 21.10.2020 р., а її автор, Іванов Олександр Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 - «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент

Заступник директора

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України

д.т.н., с.н.с.



С.Ю. Максимов

Підпис С.Ю. Максимова засвідчую:

Учений секретар

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України

к.т.н.

І.М. Ключков