

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Стороженко Марини Сергіївни «**Фізико-технологічні засади створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeV₂» для покриттів з високим рівнем зносостійкості**», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство, галузь знань 13 – Механічна інженерія

Актуальність обраної теми дисертації

Представлена до захисту дисертаційна робота Стороженко М. С., присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми – підвищення зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання в широкому діапазоні температур та абразивного зношування шляхом розробки та апробації нових підходів до створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeV₂» з керованим структурно-фазовим складом.

Дисертаційна робота Стороженко М. С. виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України в рамках наукових програм:

1. **III-33-12 (Ц)** “Розробка принципів структурної інженерії зносостійких (на основі твердих сплавів) покриттів нового покоління з використанням електрофізичних методів поверхневої обробки”.
2. **III-34-17 (Ц)** “Розробка фізико-хімічних принципів створення нових композиційних порошкових матеріалів на основі самофлюсівних сплавів систем Ni(Fe)CrBSiC з добавками тугоплавких сполук титану та хрому для газотермічних та електроіскрових покриттів з підвищеною зносостійкістю”.
3. **II-8-17** “Розробка композиційних матеріалів на основі самофлюсівних сплавів Ni(Fe)CrBSiC з добавками тугоплавких боридів для нанесення зносостійких покриттів”.
4. **I-1-18** “Перспективні металокерамічні покриття на основі самофлюсівних сплавів для підвищення зносостійкості деталей військової техніки”.
5. **II-6-16(Р)** “Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів”.

Це свідчить про актуальність зазначеної роботи для матеріалознавства.

Однією з найважливіших проблем сучасного матеріалознавства є розробка і удосконалення технологій отримання композиційних матеріалів і покриттів для екстремальних умов експлуатації, а саме для умов тертя ковзання без мастильних матеріалів з високими швидкостями і навантаженнями. В якості зміцнювальної фази нових зносостійких матеріалів і покриттів найбільш цікавими є тугоплавкі сполуки карбідів, боридів і карбоборидів, які мають високу твердість, зносо- і корозійну стійкість. З числа тугоплавких сполук, що мають високі фізико-механічні властивості, перспективними для зносостійких добавок є дибориди титану TiB₂ та CrB₂, що зумовлено їх високою твердістю та фізико-хімічними властивостями.

Перспективи широкого застосування можуть мати покриття на основі самофлюсівних сплавів (СФС) з добавками диборидів титану та хрому.

Але, як зазначено в роботі, на даний час приділено недостатньо уваги дослідженню процесів структуроутворення та технологіям виробництва матеріалів для газотермічного напилення, а також визначенню їх триботехнічних властивостей.

Використання триботехнічної кераміки та металокераміки в покриттях дозволяє підвищити ефективність її застосування для зміцнення та відновлення поверхонь тертя деталей машин.

З огляду на сказане вище, дисертантом поставлена актуальна науково-технічна проблема – підвищення зносостійкості покриттів в умовах сухого тертя ковзання в широкому діапазоні температур та наявності абразиву шляхом розробки та апробації нових підходів до створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeB₂» з керованим структурно-фазовим складом.

Вирішення цієї науково-технічної проблеми дозволило запропонувати нові композиційні матеріали, технологію їх виготовлення та виробництво порошків системи NiCrBSiC–TiB₂, FeNiCrBSiC–TiB₂ та FeNiCrBSiC–CrB₂ для газотермічного напилювання покриттів, що забезпечують високий рівень триботехнічних властивостей.

Отже, обрану дисертантом тему вважаю актуальною і такою, що відповідає вимогам «актуальність обраної теми дисертації».

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Наукові положення, які викладені в дисертаційній роботі Стороженко М. С., отримані з використанням сучасного дослідницького обладнання та методів відповідної обробки результатів експериментальних досліджень, проведених у достатньому обсязі для визнання їх достовірності. Комплексний підхід, що полягає у визначенні триботехнічних характеристик матеріалів та дослідження процесів, що мають місце на поверхнях тертя, свідчить про переконливість та обґрунтованість досліджень.

В роботі використані методи гранулометричного, рентгенофазового, металографічного, мікродюрOMETричного, мікрорентгеноспектрального, хімічного аналізів для дослідження структуроутворення отриманих вихідних матеріалів для виготовлення порошків та нанесених покриттів, а також методи трибовипробувань за схемою «палець-диск», ОЖЕ-спектрометрії для дослідження поверхонь пари тертя та утворених вторинних фаз.

Достовірність даних положень, висновків і рекомендацій, що їх одержано у дисертаційній роботі, підтверджено відтворюваністю результатів, отриманих за різними експериментальними методиками, застосуванням сучасного експериментального обладнання та перевіркою отриманих результатів у виробничих умовах, що засвідчено відповідними актами, наведеними в дисертації.

Зазначені у роботі положення і висновки не суперечать

фундаментальним основам матеріалознавства, поверхневої обробки матеріалів, трибології та триботехніки.

Науковим доробком дисертації Стороженко М. С. є вирішення поставленої науково-технічної задачі, яка полягає у розробці нових зносостійких матеріалів для газотермічних покриттів із системи «самофлюсівний сплав $\text{FeNiCrBSiC} - \text{MeB}_2$ » на основі вивчення впливу закономірностей структуроутворення цих композиційних матеріалів для виготовлення порошків, а також покриттів з них на їх зносостійкість, механізми зношування та формулювання рекомендацій щодо застосування розроблених матеріалів та покриттів з них для поверхонь, які призначені для роботи в умовах сухого тертя, абразивного середовища та підвищених температур.

У результаті вирішення цієї науково-технічної задачі, дисертантом було одержано ряд наукових положень, які у своїй сукупності складають **наукову новизну дисертації:**

1. Вперше сформульовано наукові засади створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі $\text{Ni}(\text{Fe}) - \text{MeB}_2$ » з керованим структурно-фазовим складом, які полягають в тому, що хімічна взаємодія між компонентами композиційних матеріалів системи «тугоплавка сполука – металевий сплав» призводить до утворення нових високотвердих боридів та карбоборидів, які сприяють суттєвому підвищенню зносостійкості. В рамках дисертаційної роботи такий підхід реалізовано при створенні композиційних порошкових матеріалів ($\text{TiB}_2 - (\text{Fe} - \text{Mo})$) та на основі серійних дисперсійно твердіючих самофлюсівних сплавів з добавками тугоплавких сполук ($\text{FeNiCrBSiC} - \text{MeB}_2$) для покриттів.

2. В роботі вперше запропоновано метод рідкофазного спікання з наступним подрібненням для отримання композиційних порошкових матеріалів систем $\text{TiB}_2 - (\text{Fe} - \text{Mo})$ та $\text{MeB}_2 - \text{FeNiCrSiBC}$. В результаті застосування даної технології кожна частинка отриманих порошків є композитом, що складається з металевої матриці та частинок тугоплавких сполук. При газотермічному напиленні таких порошків не відбувається сегрегації компонентів, що призводить до формування гетерофазної структури покриттів з рівномірним розподілом зміцнюючих частинок і забезпечує підвищення триботехнічних властивостей.

3. Встановлено та обґрунтовано механізм зношування газотермічних покриттів з розроблених композиційних порошкових матеріалів систем $\text{FeNiCrBSiC} - \text{MeB}_2$. За рахунок збільшення вмісту в структурі розроблених покриттів кількості та розміру твердих боридних фаз вдається здійснити перехід в умовах тертя від адгезійного до окиснювального механізму зношування, що полягає в формуванні захисних оксидних плівок. Такі плівки сприяють "самозаліковуванню" дефектів поверхонь тертя. Завдяки цьому вдається досягнути збільшення зносостійкості покриттів $\text{FeNiCrBSiC} - \text{MeB}_2$ при підвищених температурах (400 °C) в 2–3 рази в порівнянні з покриттями з серійних порошків самофлюсівних сплавів ПГ-СРЗ та ПГ-Ж14.

4. Вперше проведено системні дослідження кінетики змочування та

механізмів контактної взаємодії тугоплавких сполук TiB_2 , CrB_2 , ZrB_2 , TiC з самофлюсівним сплавом на основі заліза $FeNiCrBSiC$ марки ПГ-Ж14. Встановлено, що для розробки композиційних матеріалів перспективними є системи $FeNiCrBSiC-TiB_2$ та $FeNiCrBSiC-CrB_2$, які характеризується малими кутами змочування ($\theta \ll 90^\circ$) та хімічною взаємодією між компонентами сплаву та тугоплавкої сполуки з утворенням високотвердих складних боридів хрому.

5. Вперше методом пошарового Оже-аналізу встановлено вплив структурних складових покриттів систем $FeNiCrBSiC-MeB_2$ на процеси формування оксидних плівок в процесі тертя. Встановлено, що добавки тугоплавких боридів сприяють формуванню вторинних структур на основі оксидів TiO_2 , V_2O_5 , NiO , SiO_2 , які під впливом високих контактних навантажень та температур в зоні тертя ущільнюються і формують суцільну оксидну плівку. Оксидні плівки на поверхнях покриттів систем $FeNiCrBSiC-MeB_2$ екранують механічний та термічний впливи в процесі тертя, що сприяє зменшенню пошкоджень та забезпечує високу зносостійкість покриттів.

6. Вперше проведено системне дослідження процесів змочування дибориду титану сплавами $Fe-Mo$ та вивчено механізми їх міжфазної взаємодії. Виявлено, що в системі $TiB_2-(Fe-Mo)$ молібден є міжфазно-активним компонентом, який сприяє утворенню складних боридних фаз. Встановлено, що для створення нових порошкових композиційних матеріалів перспективною є система $TiB_2-(Fe-13\text{мас.}\%Mo)$. Ця система характеризується нульовими контактними кутами змочування та хімічною взаємодією з утворенням складних боридів Mo_2FeB_2 , які додатково зміцнюють структуру матеріалів.

7. Вперше виявлено механізм зношування плазмових та детонаційних покриттів з розроблених композиційних матеріалів $TiB_2-(Fe-13\text{мас.}\%Mo)$ в абразивному середовищі. В умовах абразивного зношування розроблених покриттів частинки дибориду титану та складних боридів Mo_2FeB_2 екранують дію абразивних частинок при кутах атаки менших 90° і тим самим запобігають контакту абразиву з матрицею, що сприяє підвищенню зносостійкості. Покриття ТБФМ40, яке містить 40мас.% $Fe-Mo$, характеризується найбільш високою зносостійкістю серед розроблених покриттів за рахунок оптимального співвідношення твердих частинок та пластичної металевої матриці.

Отже, вищевикладене позитивно характеризує наукові здобутки дисертанта Стороженко М. С., свідчить про важливість одержаних результатів, що дозволяє рекомендувати виробниче впровадження технологій виготовлення розроблених композиційних матеріалів і порошоків з них та покриттів на їх основі, нанесених методами плазмового, детонаційного напилювання та електроіскрового легування для ефективного використання з метою модифікації, підвищення зносостійкості поверхонь деталей, які працюють в умовах підвищених температур та абразивного зношування.

Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики

Наукова та практична значимість дисертаційної праці Стороженко М. С. полягає в тому, що здобувач вперше науково обґрунтувала, визначила та практично підтвердила такі положення:

– сформульовано наукові засади створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeB₂» з керованим структурно-фазовим складом, які полягають в тому, що хімічна взаємодія між компонентами композиційних матеріалів системи «тугоплавка сполука – металевий сплав» призводить до утворення нових високотвердих боридів та карбоборидів, які сприяють суттєвому підвищенню зносостійкості. В рамках дисертаційної роботи такий підхід реалізовано при створенні композиційних порошкових матеріалів (TiB₂–(Fe–Mo)) та на основі серійних дисперсійно твердіючих самофлюсівних сплавів з добавками тугоплавких сполук (FeNiCrBSiC–MeB₂) для покриттів;

– запропоновано метод рідкофазного спікання з наступним подрібненням для отримання композиційних порошкових матеріалів систем TiB₂–(Fe–Mo) та MeB₂–FeNiCrSiBC. В результаті застосування даної технології кожна частинка отриманих порошків є композитом, що складається з металевої матриці та частинок тугоплавких сполук. При газотермічному напиленні таких порошків не відбувається сегрегації компонентів, що забезпечує формування гетерофазної структури покриттів з рівномірним розподілом зміцнюючих частинок і забезпечує підвищення триботехнічних властивостей;

– встановлено та обґрунтовано механізм зношування газотермічних покриттів з розроблених композиційних порошкових матеріалів систем FeNiCrBSiC–MeB₂. За рахунок збільшення вмісту в структурі розроблених покриттів кількості та розміру твердих боридних фаз вдається здійснити перехід в умовах тертя від адгезійного до окиснювального механізму зношування, що полягає в формуванні захисних оксидних плівок. Такі плівки сприяють "самозаліковуванню" дефектів поверхонь тертя. Завдяки цьому вдається досягнути збільшення зносостійкості покриттів FeNiCrBSiC–MeB₂ при підвищених температурах (400 °C) в 2–3 рази в порівнянні з покриттями з серійних порошків самофлюсівних сплавів ПГ-CP3 та ПГ-Ж14;

– проведено системні дослідження кінетики змочування та механізмів контактної взаємодії тугоплавких сполук TiB₂, CrB₂, ZrB₂, TiC з самофлюсівним сплавом на основі заліза FeNiCrBSiC марки ПГ-Ж14. Встановлено, що для розробки композиційних матеріалів перспективними є системи FeNiCrBSiC–TiB₂ та FeNiCrBSiC–CrB₂, які характеризуються малими кутами змочування ($\theta \ll 90^\circ$) та хімічною взаємодією між компонентами сплаву та тугоплавкої сполуки з утворенням високотвердих складних боридів хрому;

– методом пошарового Оже-аналізу встановлено вплив структурних складових покриттів систем FeNiCrBSiC–MeB₂ на процеси формування оксидних плівок в процесі тертя. Встановлено, що добавки тугоплавких боридів сприяють формуванню вторинних структур на основі оксидів TiO₂, B₂O₃, NiO, SiO₂, які під впливом високих контактних навантажень та температур в зоні тертя ущільнюються і формують суцільну оксидну плівку. Оксидні плівки на поверхнях покриттів систем FeNiCrBSiC–MeB₂ екранують механічний та термічний впливи в процесі тертя, що сприяє зменшенню пошкоджень та забезпечує високу зносостійкість покриттів;

– проведено системне дослідження процесів змочування дибориду титану сплавами Fe-Mo та вивчено механізми їх міжфазної взаємодії. Виявлено, що в системі TiB_2 -(Fe-Mo) молібден є міжфазно-активним компонентом, який сприяє утворенню складних боридних фаз. Встановлено, що для створення нових порошкових композиційних матеріалів перспективною є система TiB_2 -(Fe-13мас.%Mo). Ця система характеризується нульовими контактними кутами змочування та хімічною взаємодією з утворенням складних боридів Mo_2FeB_2 , які додатково зміцнюють структуру матеріалів;

– виявлено механізм зношування плазмових та детонаційних покриттів з розроблених композиційних матеріалів TiB_2 -(Fe-13мас.%Mo) в абразивному середовищі. В умовах абразивного зношування розроблених покриттів частинки дибориду титану та складних боридів Mo_2FeB_2 екранують дію абразивних частинок при кутах атаки менших 90° і тим самим запобігають контакту абразиву з матрицею, що сприяє підвищенню зносостійкості. Покриття ТБФМ40, яке містить 40мас.% Fe-Mo, характеризується найбільш високою зносостійкістю серед розроблених покриттів за рахунок оптимального співвідношення твердих частинок та пластичної металевої матриці.

Значним практичним напрацюванням дисертанта є результати виробничих випробувань:

– нового покриття, нанесеного розробленими порошками ФХТБ20 ($FeNiCrBSiC-20\%TiB_2$) на робочі поверхні торцевих ущільнень в умовах Державного підприємства КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, які продемонстрували зносостійкість, що у 1,8 – 2,2 рази перевищує зносостійкість ущільнень, що застосовуються;

– нанесення електроіскрових покриттів з розробленого композиційного матеріалу ФХТБ20 на робочі поверхні валу-шестерні Л-20877А ескалатора типу ЛТ-2 забезпечує подовження ресурсу його роботи в 2-2,5 рази;

– випробування на ПАТ «Сумське НВО» показали збільшення ресурсу роботи змінних ножів РЗ-01032.00.00-10, зміцнених плазмовими покриттями ТБФМ40, в 1,5 рази порівняно з серійними деталями;

– за результатами дослідно-виробничої перевірки на ТОВ ПМТЗ «Сервіс» композиційні матеріали ТБФМ40 рекомендовано для нанесення захисних покриттів методом плазмового напилення на робочі поверхні деталей сільськогосподарської техніки з метою підвищення їх зносостійкості та ресурсу (до 4-5 разів);

– за результатами виробничої перевірки на КП «Київський метрополітен» виявлено, що застосування композиційного матеріалу ТБФМ40 в якості електроду для ЕІЛ-відновлення піввісей КМ35-И/ЭТ.00.024 сходин ескалатора типу «ЭТ-2» з метою їх відновлення забезпечує подовження ресурсу вказаних деталей в 2,0-2,5 рази (150–170 тис. км).

На мій погляд виконані Стороженко М. С. комплексні дослідження, наукові та практичні результати яких наведено у дисертації, визначаються достатнім обсягом експериментальних даних, їх професійною обробкою з використанням сучасних методів досліджень і обладнання та підтвердженням успішною реалізацією під час виробничих випробувань.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літературних джерел з 342 найменувань. Повний обсяг роботи становить 14,6 авторських аркушів, з них – 12,8 аркушів основного тексту; дисертація містить 232 рисунки, 95 таблиць, 8 додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми виконаної роботи, мету та основні задачі досліджень, об'єкт, предмет і методи досліджень, формулювання наукової новизни, практичної значимості одержаних результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, публікації та структуру дисертації.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду стану питань розробки та досліджень технологій нанесення покриттів, а також створенню нових композиційних матеріалів для забезпечення підвищення експлуатаційних властивостей покриттів. Зроблено висновки щодо доцільності застосування нанесення захисних покриттів методами газотермічного напилення та електроіскрового легування, а для їх реалізації доцільно використовувати матричні композиційні матеріали з керованою структурою. Значну увагу приділено питанням отримання і застосування самофлюсівних сплавів FeNiCrBSiC, які традиційно використовуються для нанесення зносостійких газотермічних покриттів. Встановлено, що в екстремальних умовах експлуатації (високі швидкості, навантаження та температури) розмір і кількість твердих частинок в структурі самофлюсівних покриттів є недостатніми для забезпечення для екранування поверхонь тертя від катастрофічних видів зношування. Робиться припущення про можливість розв'язання цього питання шляхом введення до сплаву FeNiCrSiBC частинок карбідів та боридів металів IV групи. В рамках дисертаційної роботи пропонується отримання компактних композиційних матеріалів методом рідкофазного спікання в вакуумі. Тому в роботі виконано огляд публікацій, присвячених вивченню закономірностей змочування та контактної взаємодії тугоплавких сполук металів IV групи (Ti, Cr, B) з металевими сплавами.

У підсумку, на мою думку, виконаний автором дисертаційної роботи Стороженко М. С. аналіз літературних вітчизняних і закордонних джерел та ґрунтовні висновки по ньому надав можливість обґрунтувати необхідність проведення досліджень з обраної теми та конкретизувати мету і завдання роботи.

Другий розділ дисертації містить опис методики досліджень, обладнання та обробки їх результатів. Насамперед детально охарактеризовано вихідні матеріали, що слугують для синтезу порошків для газотермічного напилювання та вказано технічні умови їх отримання. Докладно описано технологію подрібнення та рідкофазного спікання вихідних компонентів шихти. Детально опрацьовано технологічні методи одержання нових покриттів, та дослідження їх властивостей: надано достатню інформацію про установку для нанесення покриттів плазмовим

напилюванням; описано установку для випробування розроблених матеріалів на зносостійкість та наведено необхідні розрахункові формули; метод «лежачої» краплі для дослідження контактної взаємодії для систем «тверда тугоплавка сполука – розплав».

Описано використані методи та апаратуру для фізико-хімічного аналізу синтезованого композиційного матеріалу та напиленого покриття. Дослідницький комплекс, що використано в роботі, та методика експериментів свідчать про високий рівень організації досліджень та високу кваліфікацію дисертанта.

Отже зміст та рівень викладення другого розділу дисертаційної роботи Стороженко М. С. доводить, що отримані автором дані мають достатній рівень достовірності, а здобувач може вирішувати наукові та інженерні задачі з використанням сучасного експериментального обладнання та методів обробки результатів на відповідному кваліфікаційному рівні.

Третій розділ дисертації приділяє увагу розробці та дослідженню композиційних матеріалів та покриттів шляхом впливу зміцнювальних домішок до СФС. За основу вибрана система «TiB₂- (Fe - Mo)». Вибір сплавів Fe–Mo обумовлений тим, що залізо є недорогим та недефіцитним металом, а молібден – широко використовується при виготовленні безвольфрамових твердих сплавів. Детально досліджено властивості сплаву (Fe - Mo) з різними співвідношеннями компонентів та обрано склад (Fe - 13%Mo), який є оптимальним за критеріями змочування та контактної взаємодії його розплаву з диборидами MeB₂ і, зокрема, (TiB₂), утворення додаткових високотвердих фаз, що забезпечує підвищення зносостійкості покриттів з таких КПМ.

Для дослідження процесів фазоутворення під час РФС системи (Fe - Mo) – TiB₂ використано установку та метод диференційно-термічного аналізу (ДТА). Аналіз показав, що під час нагрівання на ДТА-кривих мають місце термічні піки, які свідчать про екзотермічні процеси в системі. Зі збільшенням частки TiB₂ в системі ці піки зміщуються в бік високих температур. Аналіз показав також наявність хімічної взаємодії між компонентами та формування евтектичної структури.

Грунтовно виконано дослідження впливу кількості та розмірів зносостійкої зміцнювальної складової на структуру і фазовий склад системи (Fe - Mo) – TiB₂. Досліджені домішки TiB₂ в кількості 10, 20 і 40%. Встановлено, що введення домішки дибориду титану зменшує розміри зерен зв'язки та збільшує кількість включень складних боридів. Збільшення вмісту TiB₂ до 40% показало, що після спікання при температурі 1590 °C композит виявився досить крихким внаслідок недостатньої кількості в'язучого (матриці) та високих внутрішніх напружень. Рекомендовано вводити до складу композиту 40 – 80% металевої зв'язки (Fe - 13%Mo).

Отже, було розроблено компактні та порошкові КМ ТБФМ системи TiB₂–(Fe–13мас.%Mo) для нанесення електроіскрових та газотермічних покриттів, які за рівнем триботехнічних властивостей не поступаються

покриттям з стандартного твердого сплаву ВК-6. Для зміцнення робочих поверхонь деталей машин рекомендуються покриття з КМ ТБФМ40, який забезпечує технологічність процесів нанесення покриттів та їх високу зносостійкість за рахунок оптимального поєднання металевої та тугоплавкої складових.

Встановлено, що оптимальним з розглянутих є порошковий матеріал ТБФМ40 для нанесення плазмових та детонаційних покриттів, а для електроіскрових ТБФМ20 або ТБФМ40. Нанесені із розроблених матеріалів покриття пройшли дослідно–промислове випробування на різних деталях, які працюють в умовах абразивного зношування та забезпечили значне підвищення їх ресурсу.

Загалом зміст третього розділу характеризується послідовністю та взаємозв'язком експериментальних досліджень для вирішення задачі пошуку оптимальних структур та технологій, що позитивно характеризує наукову кваліфікацію здобувача.

Четвертий розділ дисертації містить дослідження самофлюсівних сплавів NiCrBSiC з добавками тугоплавких боридів для нанесення зносостійких покриттів.

Для вибору зміцнюючої добавки для КМ на основі самофлюсівних сплавів проведено комплексне дослідження процесів змочування та міжфазної взаємодії в системах «NiCrBSiC – TiC, ZrB₂, TiB₂, CrB₂». Встановлено, що для зміцнення самофлюсівного сплаву NiCrBSiC доцільно використовувати добавки TiB₂, при цьому в системі в процесі рідкофазного спікання відбувається утворення зносостійких боридів хрому та карбоборидів титану-хрому.

Для отримання компактних зразків НХТБ час розмолу шихти вихідних порошків NiCrBSiC (40-60 мкм) та TiB₂ (3-4 мкм) має становити не менше 3 год, температура спікання – 1100–1400 °С. Кожна частинка отриманих таким способом порошків НХТБ є композитом, завдяки чому вдається уникнути сегрегації компонентів під час газотермічного напилення і реалізувати в покриттях структуру компактних КМ з високою адгезією до основи (25–32 МПа), товщина покриттів – до 500 мкм.

Структура плазмових покриттів НХТБ складається з пластичної металевої матриці, в якій розподілено частинки TiB₂, Cr₅B₃ та Cr(Ti)₂₃C(B)₆.

При введенні до сплаву NiCrBSiC диборидів TiB₂ зносостійкість покриттів збільшується, а вміст добавок TiB₂ впливає на кількість та розмір тугоплавких сполук. Тобто це дозволяє керувати структурно-фазовим станом КМ. В роботі запропоновано та досліджено технологію приготування порошків для газотермічного нанесення покриттів.

Під час триботехнічних випробувань методом МРСА виявлено формування на поверхнях тертя покриттів НХТБ20 складних оксидних плівок, які сприяють зменшенню пошкоджень та забезпечують високу зносостійкість покриттів. Формування захисних оксидних плівок підтверджено результатами покровоого Оже-аналізу, згідно яких частинки

тугоплавких боридів сприяють утворенню вторинних структур на основі оксидів TiO_2 , B_2O_3 , NiO , SiO_2 . Під впливом високих контактних навантажень та температур в зоні тертя оксиди ущільнюються і формують суцільну захисну плівку.

Отже, на мою думку, даний розділ дисертації Стороженко М. С. містить на основі ретельно виконаних досліджень та аналізу вдалу реалізацію основних принципів синтезу композиційних покриттів, які відповідають їх функціональному призначенню, є вкладом в матеріалознавчу науку, що без сумніву характеризує здобувача як зрілого науковця.

П'ятий розділ дисертації присвячено дослідженню самофлюсівних сплавів $FeCrBSiC$ з добавками тугоплавких боридів TiB_2 , CrB_2 , ZrB_2 та TiC для нанесення зносостійких покриттів.

Встановлено, що системи $FeNiCrBSiC-TiB_2$, $FeNiCrBSiC-CrB_2$ характеризуються малими контактними кутами змочування (рис. 20), а тому TiB_2 та CrB_2 є перспективними зміцнюючими добавками для самофлюсівного сплаву $FeNiCrBSiC$. Дослідження зони міжфазної взаємодії та каплі виявили, що в системах $FeNiCrBSiC-TiB_2$, та $FeNiCrBSiC-CrB_2$ відбувається хімічна взаємодія з утворенням складних карбоборидів хрому-молібдену, які мають досить високу мікротвердість (до 24 ГПа).

Структура компактних КМ ФХТБ20 ($FeNiCrBSiC-20\%TiB_2$) та ФХБ20 ($FeNiCrBSiC-20\%CrB_2$) складається з матриці на основі нікелю-заліза, в якій розміщено включення складних карбоборидів титану, хрому та молібдену. В роботі оптимізовано технологічні параметри плазмового нанесення розроблених КПМ ФХТБ20 та ФХБ20: дистанція напилення – 150 мм; напруга – 65В; струм – 480 А. Товщина отриманих покриттів становить 250-600 мкм, адгезія до основи – 30-32 МПа.

Структура покриттів ФХТБ20 та ФХБ20 подібна до структури компактних та порошкових КМ, що свідчить про відсутність сегрегації компонентів металевого сплаву та тугоплавкої сполуки в процесі напилення. Триботехнічні випробування розроблених покриттів ФХТБ20 та ФХБ20 проводили в парі тертя з Al_2O_3 при температурах 20, 200, 400 °С. Для порівняння випробовували плазмові покриття з розробленого КПМ НХТБ20 та серійних порошків ПГ-СР3, ПГ-Ж14 та ПС-12НВК-01. Механізм зношування розроблених покриттів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 кардинально відрізняється від серійних покриттів. Зі збільшенням температури триботехнічних випробувань кількість дефектів на поверхнях розроблених покриттів навпаки зменшується. За результатами МРСА на поверхнях тертя формуються вторинні структури, які містять значну кількість оксигену (57 ат.%) і сприяють «заліковуванню» дефектів продуктами зносу. Отже, за рахунок збільшення вмісту та розміру твердих частинок складних боридів та карбідів в структурі покриттів на основі самофлюсівних сплавів вдається перейти від адгезійного до окиснювального механізму зношування в умовах тертя ковзання без мастила при високих температурах. Під час тертя розроблених покриттів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 відбувається утворення захисних оксидних плівок та

самозаліковування дефектів поверхонь тертя, що призводить до збільшення зносостійкості при підвищених температурах (400 °С) в 2–3 рази у порівнянні з покриттями з серійних порошків самофлюсівних сплавів.

Значна увага у цьому розділі приділена технології нанесення розроблених композиційних матеріалів ФХТБ20 на поверхні тертя електроіскровим методом. Доведена ефективність електроіскрового легування трибоповерхонь. Показано, що в процесі ЕІЛ формується гетерофазна структура, зміцнена боридами титану та хрому, що підвищує зносостійкість у 4-5 разів.

Такі результати свідчать про високу кваліфікацію дисертанта Стороженко М. С. у галузі матеріалознавства.

Висновки до дисертації відповідають меті та поставленим задачам і свідчать про їх повне виконання, завершеність роботи та перспективи використання результатів на виробництві.

Додатки дисертації містять: акти дослідно-промислового впровадження результатів роботи; сертифікат випробування покриттів на зношування в умовах сертифікованої лабораторії Таллінського технологічного університету; технічні умови на електроди для електроіскрового зміцнення деталей триботехнічного призначення.

Подана у додатках документація свідчить про безумовну практичну цінність та новизну отриманих дисертантом Стороженко М. С. наукових результатів.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати рецензованої дисертації Стороженко М. С. опубліковано в **41** науковій праці: **23** статтях у наукових фахових виданнях, з яких **12** статей – в журналах, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science) та **11** статей – в виданнях України, що входять до Переліку МОН України; **16** публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних конференціях; отримано **2** патенти на корисну модель на композиційні матеріали. Всі надруковані праці за темою дисертації виконані автором особисто та у співавторстві. Це свідчить про виконання у повному обсязі вимог щодо повноти публікацій та апробації результатів дисертації Стороженко М. С.

Це задовольняє вимогам за кількістю та якістю наукових праць для присудження наукового ступеня доктора технічних наук. Результати дисертаційного дослідження апробовані на достатній кількості міжнародних наукових конференціях з матеріалознавства та проблем тертя та зношування, про що свідчать тези і збірники матеріалів конференцій.

Зміст автореферату повністю ідентичний змісту дисертаційної роботи та дає повне уявлення про виконане дослідження.

Зауваження по дисертаційній роботі, автореферату та їх оформленню

1. У таблиці 3.4.1.1 посилання на рис. 3.2.2.4 є некоректним, а спектр 2

- включення білого кольору не може відповідати дибориду титану.
2. На рис. 3.8.2.3 показано знос ЕІЛ–покриттів в міліграмах без прив’язування до часу або шляху, або відносно до еталону.
 3. На сторінці 229 обговорюється питання утворення бориду хрому в системі NiCrBSiC – TiB₂. Крім термодинамічних факторів, які справедливо підтверджують висловлені міркування, потрібно врахувати також і кінетичні фактори. Адже мова йде про взаємодію рідкої фази (краплі розплаву) з твердою фазою.
 4. На сторінці 229 обговорюється питання наявності на поверхні тертя стержня, який ковзає по диску, значно більших пошкоджень, ніж на диску. Пояснюється тим, що «внаслідок менших розмірів стержня, а отже і меншої площі контакту покриття на стержні нагрівається до більших температур ніж на поверхні диску». Слід зауважити, що фактичні площі контакту між двома тілами пари тертя завжди однакові. Але тепловий потік, який виникає внаслідок роботи сил тертя, може розподілятися нерівномірно через наявність різної теплопровідності та температуропровідності. Крім того, теплоємність диска і стержня різні, що і є основною причиною вищої температури стержня, його пластичності та проявів адгезійного схоплювання.
 5. На рис. 4.6.3.1a по осі ординат потрібно вказувати «інтенсивність зношування, мкм/км», а не зносостійкість.
 6. Під час розгляду процесів тертя ковзання (особливо для гетерогенних матеріалів) доцільно розглядати одночасно три компоненти: тіло, контртіло та третє тіло (продукти зношування, оксидні плівки тощо). В залежності від сукупності факторів для композитів, що є предметом дослідження даної роботи, обломки твердих включень можуть відігравати роль абразиву, який зношує поверхні тертя, або роль підшипника. Доцільно досліджувати тверді продукти зношування, їх геометрію у взаємозв’язку з формою включень та структурою композиту.
 7. В тексті дисертації та автореферату є невелика кількість описок, помилок та вживання небажаних словосполучень: «представляє собою», «слід відмітити», «однак», «випроміненні» та інші. Рисунок 4.1.3.8 не несе інформації (чорно-білий), у підписі під рисунком 4.5.4 вкралася помилка.

Висновок про відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам

Дисертація Стороженко М. С. є завершеною науковою працею при виконанні якої були одержані нові науково-обґрунтовані теоретичні й експериментальні результати, що вирішують важливу науково-технічну проблему підвищення зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання та абразивного зношування шляхом розробки та апробації нових підходів до створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeB₂» з керованим структурно-фазовим складом.

Для цього Стороженко М. С. виконала комплекс теоретичних та експериментальних досліджень з вивчення механізмів формування високих триботехнічних властивостей композиційних матеріалів та їх зміцнення

шляхом введення диборидів металів, технологій підготовки композиційних порошків для газотермічного напилювання та електродів для електроіскрового легування; реалізації технології нанесення покриттів з детальним вивченням механізмів тертя та зношування в парі з різними матеріалами, виконала аналіз результатів досліджень та їх узагальнення з розробкою рекомендацій для практичного застосування.

Положення дисертаційної праці повністю опубліковано в друкованих працях, що входять у рейтингову базу «Scopus», статті у фахових виданнях, матеріали доповідей на конференціях. Апробація роботи здійснена на достатній кількості наукових конференцій високого рівня.

Дисертація Стороженко М. С. цілком відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Автореферат дисертаційної роботи Стороженко М. С. є ідентичним до основних положень дисертації.

У цілому дисертаційна робота Стороженко М. С. «Фізико-технологічні засади створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeV₂» для покриттів з високим рівнем зносостійкості», написана доступною мовою, виконана на високому науково-теоретичному та експериментальному рівні, містить наукову новизну, практично значущі результати, відповідає вимогам, які пред'являються МОН України до докторських дисертацій, а її автор, Стороженко Марина Сергіївна, – заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри галузевого машинобудування
Вінницького національного
технічного університету

В. І. Савуляк



