

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І. М. Францевича

**СТОРОЖЕНКО МАРИНА СЕРГІЇВНА**

УДК 620.22: 621.793:620.186:620.178

**ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ  
МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ «СПЛАВ НА ОСНОВІ Ni(Fe) – MeV<sub>2</sub>» ДЛЯ  
ПОКРИТТІВ З ВИСОКИМ РІВНЕМ ЗНОСОСТІЙКОСТІ**

Спеціальність 05. 02. 01 – матеріалознавство  
Технічні науки (13 Механічна інженерія)

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Уманський Олександр Павлович,**  
Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ,  
завідувач відділу матеріалознавства та  
інженерії високостійких поверхневих шарів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Сухова Олена Вікторівна**  
Дніпровський національний університет  
ім. О. Гончара МОН України, м. Дніпро  
професор кафедри експериментальної фізики

доктор технічних наук, професор  
**Роїк Тетяна Анатоліївна**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»  
МОН України, м. Київ  
в.о. завідувача кафедри технології поліграфічного  
виробництва Видавничо-поліграфічного інституту

доктор технічних наук, професор  
**Савуляк Валерій Іванович**  
Вінницький національний технічний університет  
МОН України, м. Вінниця  
професор кафедри галузевого машинобудування

Захист відбудеться 02 грудня 2019 р. о 10<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.207.03 Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Кржижановського, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Кржижановського, 3.

Автореферат розіслано 28 жовтня 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д26.207.03



О. В. Хоменко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність роботи.* Для підвищення зносостійкості нових та відновлення експлуатаційних характеристик зношених деталей в промисловості широко використовують технології нанесення захисних покриттів. Однак, в ряді випадків, зокрема при виробництві торцевих ущільнень для паливних насосів, застосування покриттів стримується відсутністю матеріалів, здатних стабільно працювати в умовах тертя без змащення, при забрудненні робочих рідин абразивними частинками, при підвищених температурах, при наявності гідродинамічних ударів і високої агресивності середовища. Інноваційний розвиток технологій нанесення покриттів для екстремальних умов експлуатації пов'язаний з застосуванням композиційних матеріалів, в яких вибором структурних складових можна керувати процесами фазоутворення і отримувати покриття з заданими експлуатаційними властивостями. Розробкою зносостійких композиційних матеріалів та покриттів займаються багато вчених, в тому числі А. Г. Косторнов, М. С. Ковальченко, Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, В. Ю. Хаскін, І. О. Подчерняєва, Л. Бергер, М. Джонс, П. Шипвей, Л. Павловскі.

При створенні композиційних металокерамічних матеріалів (КМ) на основі тугоплавких сполук з металевими зв'язками керуються принципами, розробленими П. С. Кислим та А. Д. Панасюк, які полягають в наступному:

1. Утворення нульових контактних кутів змочування тугоплавкої сполуки металевим сплавом.

2. Відсутність активної хімічної взаємодії між тугоплавкою сполукою і металевим сплавом, що призводить до утворення нових хімічних сполук.

Ці принципи справедливі для компактних матеріалів типу стандартних твердих сплавів ВК та ТК з каркасною структурою, в яких зерна тугоплавких сполук оточені металевою зв'язкою. Кількість металевої зв'язки в таких матеріалах не перевищує 20–25%, що, як правило, не є достатнім для ефективного нанесення покриттів. Для забезпечення технологічності нанесення покриттів доцільно використовувати композиційні матеріали матричної структури з вмістом металевої фази не менше 40%. Для таких матеріалів не завжди справедливим є другий принцип про відсутність взаємодії між компонентами, адже в результаті хімічної взаємодії можуть утворюватися нові сполуки в вигляді боридів та карбідів, які сприяють підвищенню зносостійкості покриттів.

Зокрема, ідею про позитивний вплив хімічної взаємодії з утворенням твердих боридних та карбідних сполук закладено в серійних самофлюсівних евтектичних порошкових матеріалах, які широко використовуються для нанесення захисних покриттів методами наплавки, газотермічного напилення електроіскрового та лазерного легування. Актуальним питанням є підвищення зносостійкості покриттів з самофлюсівних сплавів (СФС) шляхом введення до їх складу тугоплавких сполук. Провідні компанії-виробники (Sulzer Metso (Швейцарія), Castolin Eutectic (Швейцарія), Höganäs (Швеція)) вже випускають композиційні порошки на основі СФС з добавками карбідів вольфраму, хрому та титану. Суттєвим недоліком цих порошків є те, що вони являють собою

механічні суміші, а тому в процесі газотермічного напилення відбувається сегрегація компонентів через різну питому вагу. Це призводить до втрати значної частини тугоплавких сполук та формування нерівномірної структури покриттів.

В рамках даної роботи для отримання композиційних порошкових матеріалів на основі самофлюсівних сплавів з добавками тугоплавких сполук пропонується метод рідкофазного спікання заготовок в вакуумі з подальшим подрібненням і класифікацією. В цьому випадку кожна частинка отриманого порошку вже є композиційним матеріалом, що складається з металевої матриці в якій рівномірно розподілені тугоплавкі сполуки. За рахунок процесів змочування і контактної взаємодії при спіканні забезпечується високий адгезійний зв'язок частинок зміцнюючої добавки з матричним сплавом.

При такому способі отримання порошків процеси міжфазної взаємодії між сплавом та тугоплавкою сполукою визначають структуру і властивості покриттів. За рахунок вибору структурних складових з'являється можливість керувати структурно-фазовим складом покриттів, що дозволяє отримувати поверхні з необхідними експлуатаційними властивостями. Тому для вибору складу композиційних матеріалів необхідним є вивчення процесів міжфазної взаємодії в системі «самофлюсівний сплав – тугоплавка сполука» та встановлення впливу добавок зміцнюючої фази на особливості формування структури композиційних матеріалів та покриттів з них.

Ідею про позитивний вплив хімічної взаємодії в рамках дисертаційної роботи також було реалізовано при створенні композиційних матеріалів  $TiV_2-(Fe-Mo)$  шляхом формування in-situ високотвердих боридів, які сприяють підвищенню зносостійкості покриттів.

З огляду на вищесказане, актуальність роботи визначається необхідністю розробки фізико-технологічних засад створення композиційних порошкових матеріалів методом рідкофазного спікання в вакуумі для нанесення покриттів з високим рівнем зносостійкості.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано в рамках наукових програм Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України:

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. **П-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”.

**Мета роботи** – розробка концепції створення нових композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeB<sub>2</sub>» з керованою структурою для нанесення покриттів з підвищеним рівнем зносостійкості шляхом дослідження закономірностей впливу їх структурно-фазового складу на механізми зношування.

Для досягнення поставленої мети в рамках виконання дисертаційної роботи вирішуються наступні завдання:

1. Визначення закономірностей змочування і особливостей міжфазної взаємодії в системах TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo), MeB<sub>2</sub>–NiFeCrBSiC для вибору структурних складових композиційних порошкових матеріалів.

2. Встановлення впливу кількості добавок тугоплавких боридів титану і хрому на особливості формування структурно-фазового складу композиційних матеріалів та покриттів.

3. Оптимізація технологічних параметрів отримання розроблених композиційних порошкових матеріалів методом рідкофазного спікання в вакуумі та нанесення покриттів з них методами газотермічного напилення та електроіскрового легування.

4. Вивчення впливу структурно-фазового складу розроблених газотермічних та електроіскрових покриттів системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) на зносостійкість в умовах абразивного зношування.

5. Дослідження впливу добавок тугоплавких боридів титану та хрому на зносостійкість газотермічних покриттів на основі самофлюсівних сплавів NiFeCrBSiC шляхом вивчення механізмів зношування покриттів в умовах тертя ковзання без мастила в діапазоні температур від 20 до 400 °С.

**Об’єкт дослідження** – процеси створення та зношування розроблених газотермічних покриттів системи FeNiCrBSiC–MeB<sub>2</sub>.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу структурно-фазового складу газотермічних покриттів з розроблених композиційних порошкових матеріалів системи «металевий сплав – тугоплавка сполука» на зносостійкість та механізми зношування.

**Методи дослідження** – вибір компонентів нових композиційних матеріалів виконано за допомогою дослідження змочування та контактної взаємодії в системах «металевий сплав – тугоплавка сполука» методом «лежачої» каплі; структурно-фазовий склад зон контактної взаємодії, композиційних матеріалів та покриттів, а також доріжок тертя досліджували на електронних мікроскопах РЕМ–106И і JEOL JAMP-950; дюротричний аналіз проводили на мікротвердомірі ПМТ-3; дослідження процесів фазоутворення в композиційних матеріалах та закономірностей їх окиснення проводили методом високотемпературного диференційно-термічного аналізу (ВДТА) на установках ВДТА-8М та Derivatograph Q–1500–D; подрібнення та змішування порошкових сумішей здійснювали в планетарному млині «Санд-1»; спікання композиційних матеріалів здійснювали у вакуумній печі СШВЛ; покриття з

розроблених композиційних матеріалів наносили методами плазмового напилення на установці УПУ-3Д та детонаційного напилення на установці «Дніпро-3», а також методом електроіскрового легування на установці ALLIER-52; триботехнічні характеристики газотермічних покриттів визначали на триботестерах CETR (Brucker) UMT Multi-Specimen Test System та МТ-68 за схемами “pin-on-disc” та “ball-on-disc”.

Достовірність та обґрунтованість результатів дослідження підтверджується великим обсягом експериментальних даних, отриманих з використанням комплексу сучасних методів досліджень, що доповнюють один одного, статистичною обробкою даних.

***Наукова новизна отриманих результатів:***

1. Вперше сформульовано наукові засади створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeB<sub>2</sub>» 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 (TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo)) та на основі серійних дисперсійно твердіючих самофлюсівних сплавів з добавками тугоплавких сполук (FeNiCrBSiC–MeB<sub>2</sub>) для покриттів.

2. В роботі вперше запропоновано метод рідкофазного спікання з наступним подрібненням для отримання композиційних порошкових матеріалів систем TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) та MeB<sub>2</sub>–FeNiCrBSiC. 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 FeNiCrBSiC–MeB<sub>2</sub>. 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–MeB<sub>2</sub> при підвищених температурах (400 °С) в 2–3 рази в порівнянні з покриттями з серійних порошків самофлюсівних сплавів ПГ-СР3 та ПГ-Ж14.

4. Вперше проведено системні дослідження кінетики змочування та механізмів контактної взаємодії тугоплавких сполук TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, TiC з самофлюсівним сплавом на основі заліза FeNiCrBSiC марки ПГ-Ж14. Встановлено, що для розробки композиційних матеріалів перспективними є системи FeNiCrBSiC–TiB<sub>2</sub> та FeNiCrBSiC–CrB<sub>2</sub>, 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<sub>2</sub> на процеси формування оксидних плівок в процесі тертя. Встановлено, що добавки тугоплавких боридів сприяють формуванню вторинних структур на основі оксидів TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, SiO<sub>2</sub>, 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>–(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<sub>2</sub>–(Fe–13мас.%Mo). Ця система характеризується нульовими контактними кутами змочування та хімічною взаємодією з утворенням складних боридів Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>, які додатково зміцнюють структуру матеріалів.

7. Вперше виявлено механізм зношування плазмових та детонаційних покриттів з розроблених композиційних матеріалів TiB<sub>2</sub>–(Fe–13мас.%Mo) в абразивному середовищі. В умовах абразивного зношування розроблених покриттів частинки дибориду титану та складних боридів Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> 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.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі проведених досліджень вибрано склад та встановлено технологічні режими отримання композиційних порошкових матеріалів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 систем FeNiCrBSiC–20%MeB<sub>2</sub> для нанесення газотермічних покриттів з високим рівнем зносостійкості. За результатами триботехнічних випробувань, проведених сумісно з Талліннським Технічним університетом, в умовах тертя ковзання без мастила при підвищених температурах (до 400 °С) розроблені газотермічні покриття НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 характеризуються зносостійкістю в 2-3 рази вищою порівняно з покриттями з промислових порошоків ПГ-СР3 та ПГЖ-14, що підтверджується відповідним актом від 14.03.2018.

В результаті дослідно-виробничої перевірки в умовах ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» встановлено, що нанесення плазмових покриттів з композиційного порошку ФХТБ20 (FeNiCrBSiC–20%TiB<sub>2</sub>) на робочі поверхні торцевих ущільнень забезпечує збільшення зносостійкості вузла ущільнення паливного насосу СЦЛ-20-24 в 1,8 – 2,2 рази порівняно з покриттями з серійних самофлюсівних сплавів марок ПГ-СР3 та ПГ-Ж14 (Акт від 27.12.2018).

Розроблено технічні умови ТУ У 25.9–05416930–049–014:2019 «Електроди FeNiCrBSiC–TiB<sub>2</sub> для електроіскрового зміцнення деталей триботехнічного призначення». За результатами дослідно-виробничої перевірки на КП «Київський метрополітен» виявлено, що 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 (150-160 тис. км) (Акт від 12.04.2019).

Видано рекомендації щодо застосування розроблених композиційних матеріалів системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–13%Mo) для нанесення захисних покриттів на деталі триботехнічного призначення. 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 (Акт від 22.04.2019). 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) (Акт від 22.04.2019). 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 сходи ескалатора типу «ЭТ-2» з метою їх відновлення забезпечує подовження ресурсу вказаних деталей в 2,0–2,5 рази (150-170 тис. км) (Акт від 12.04.2019).

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Здобувачу належать формулювання мети та наукових задач досліджень, організація та проведення експериментальних випробувань, обробка результатів досліджень, підготовка наукових статей до друку, участь у проведенні виробничих випробувань. Аналіз та обговорення отриманих результатів проводились за участю д.т.н., проф. Уманського О. П. За результатами усіх етапів дисертанткою було сформульовано наукову новизну та основні висновки за темою роботи.

Роботу виконано в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. В співавторстві з д.х.н. Красовським В. П. вивчено кінетику змочування в системах «MeB<sub>2</sub> – самофлюсівний сплав NiFeCrBSiC»; нанесення плазмових та детонаційних покриттів здійснено за участю співробітників відділу матеріалознавства та інженерії високоміцних поверхневих шарів – к.т.н. Терентьева О. Є., Гальцова К. М., Бондаренка О. А.; триботехнічні випробування покриттів системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–13%)Mo проведено на машині тертя МТ-68 за сприяння академіка Косторнова А. Г. спільно з Костенко О. Д.; поверхні тертя покриттів вивчено за участю к.ф.-м. н. Ковалю О. Ю.

Комплексні триботехнічні випробування розроблених дисертанткою покриттів виконано в співпраці з PhD Антоновим М. в Талліннському технічному університеті на триботестері CETR (Brucker) UMT Multi-Specimen Test System.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних наукових конференціях, в тому числі зарубіжних: XXI Міжнародній Балтійській конференції “Engineering Materials and Tribology” (Естонія, Таллінн, 18–19 жовтня 2012 р.), Міжнародній



конференції “Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва і утилізації виробів” – (Україна, Кацивелі, 24–28 вересня 2012 р.), IX Baltic-Buylgarian Conference on Biomechanic and Mechanics, (Латвія, Рига, 17–18 червня 2013 р.), XXI Міжнародній Балтійській конференції “Engineering Materials and Tribology” (Латвія, Рига, 14–15 листопада 2013 р.), Міжнародній конференції “HighMatTech–2013”, (Україна, Київ, 7–11 жовтня, 2013 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Авіа-2013” (Україна, Київ, 21–23 травня 2013 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “E–MRS 2014 Fall Meeting” (Польща, Варшава, 15–19 вересня 2014 р.), XXIII Міжнародній Балтійській конференції “Materials Engineering –2014” (Литва, Каунас, 23–24 жовтня 2014 р.), Міжнародній науково-практичній конференції “Матеріали та покриття в екстремальних умовах: теоретичні і експериментальні основи технологій виготовлення” (Україна, Луцьк, 30 травня – 3 червня 2017 р.), Міжнародній конференції “Nanotechnology and Nanomaterials – 2017” (Україна, Чернівці, 23–26 серпня, 2017 р.), XII Міжнародній конференції молодих вчених по кераміці (Сербія, Нові Сад, 21–24 жовтня 2017), VI Міжнародній Самсонівській конференції “Матеріалознавство тугоплавких сполук і компонентів” (Україна, Київ, 22–24 травня 2018 р.), X Міжнародній конференції “Advanced Materials and Technologies” (Нінхай, Китай, 2018 р.); Міжнародній конференції “Welding and Related Technologies – Present and Future” (Київ, Україна, 5–6 грудня 2018 р.), Міжнародній конференції “Modern Materials & Manufacturing” (Естонія, Таллінн, 23-26 квітня 2019 р.).

**Публікації:** за матеріалами дисертаційної роботи опубліковано **41** наукову працю: **23** статті 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.

**Структура та обсяг дисертації.** 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 рисунка, 95 таблиць, 8 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність і важливість теми, розкрито науково-технічну проблему підвищення зносостійкості захисних покриттів шляхом розробки нових композиційних матеріалів. Сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи, визначено об’єкт та предмет дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, окреслено особистий внесок автора.

*Перший розділ* присвячено аналізу сучасного стану досліджень і тенденцій розвитку технологій нанесення покриттів. Зроблено огляд науково-технічної інформації стосовно розробки нових композиційних матеріалів з метою підвищення експлуатаційних властивостей покриттів. Для забезпечення технологічності процесу нанесення захисних покриттів методами газотермічного напилення та електроіскрового легування доцільно використовувати матричні композиційні матеріали з керованою структурою.

Особливу увагу приділено питанням отримання і застосування самофлюсівних сплавів FeNiCrBSiC, які традиційно використовуються в якості зносостійких газотермічних покриттів. Встановлено, що в екстремальних умовах експлуатації (високі швидкості, навантаження та температури) розмір і кількість твердих частинок в структурі самофлюсівних покриттів недостатньо великі для запобігання адгезійної взаємодії з матеріалом контртіла чи абразивному зносу. Триботехнічні властивості FeNiCrSiBC покриттів можуть бути значно підвищені шляхом введення до сплаву частинок карбідів та боридів металів IV групи, які характеризуються високим рівнем зносостійкості.

В рамках дисертаційної роботи пропонується отримання компактних та порошкових композиційних матеріалів методом рідкофазного спікання в вакуумі. При такому способі отримання КМ процеси міжфазної взаємодії між металевим сплавом та тугоплавкою сполукою визначають структуру і властивості покриттів. Тому в роботі виконано огляд публікацій, присвячених вивченню закономірностей змочування та контактної взаємодії тугоплавких сполук металів IV групи (Ti, Cr, B) з металевими сплавами. Значну кількість наукових робіт присвячено створенню компактних композиційних матеріалів, але відсутні узагальнюючі дані щодо впливу процесів контактної взаємодії при створення композиційних порошкових матеріалів для нанесення покриттів.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дослідження, розроблено структурну схему дисертаційної роботи (рис.1).

*У другому розділі* наведено характеристику вихідних матеріалів, викладено методики дослідження, описано експериментальні установки.

Для створення композиційних порошкових матеріалів на основі самофлюсівних сплавів було обрано серійні порошки марок ПГ-CP3 (Cr–16 мас. %, Si–3.2 мас.%, C–0.75 мас.%, B–2.7 мас.%, Fe<5 мас.%, Ni–осн.) та ПГ-Ж14 (Ni–37 мас.%, Cr–14 мас. %, Si–2.5 мас.%, C–1.4 мас.%, B–2.2 мас.%, Mo<1 мас.%, Fe–осн); в якості зміцнюючих добавок – TiB<sub>2</sub> та CrB<sub>2</sub>. Для отримання композиційних матеріалів системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) використовували порошки дибориду титану, заліза та молібдену.

Для вибору компонентів композиційних матеріалів систем TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) та Fe(Ni)CrBSiC–MeB<sub>2</sub> вивчали закономірності кінетики змочування та контактної взаємодії в системах «металевий сплав – тугоплавка сполука» методом «лежачої» каплі в вакуумі із використанням гарячепресованих керамічних підкладок.

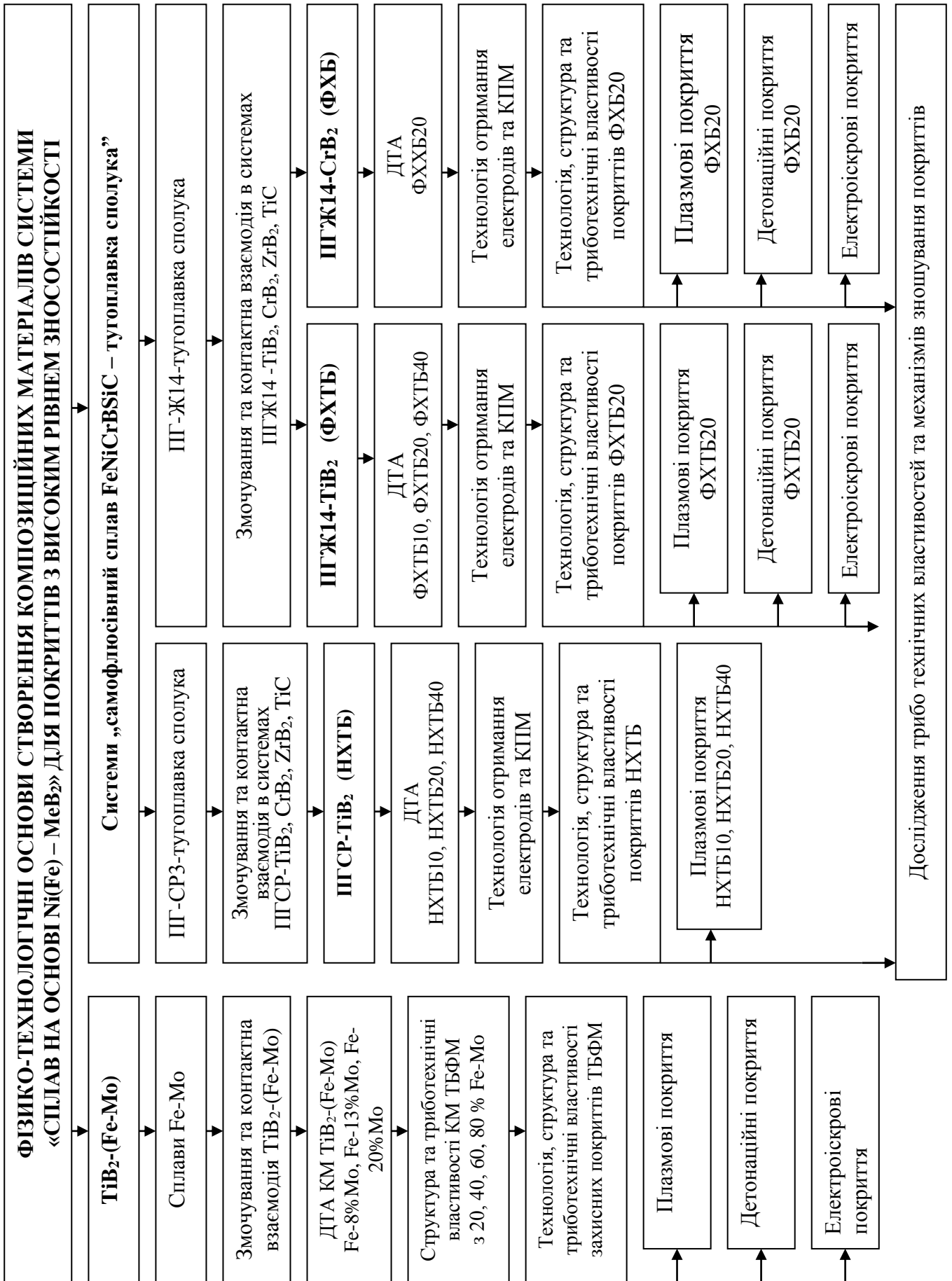


Рис. 1 – Структурна схема дисертаційної роботи

З метою моделювання процесів при рідкофазному спіканні, для визначення температурних діапазонів структурно-фазових перетворень в композиційних матеріалах систем  $TiB_2-(Fe-Mo)$  та  $Fe(Ni)CrBSiC-MeB_2$  спресовані зразки сумішей піддавали диференційному термічному аналізу (ДТА) на установці ВДТА-8М шляхом нагріву в середовищі гелію.

Для отримання шихти КМ вихідні порошки змішували у відповідних пропорціях та подрібнювали у лабораторному планетарному млині «Санд-1» в середовищі спирту. Гранулометричний склад порошків визначали на лазерному мікроаналізаторі «SK Lazer Micron Sizer».

Методом рідкофазного спікання у вакуумній печі СШВЛ отримували компактні композиційні матеріали, які використовували в якості електродів. Температуру спікання варіювали залежно від складу металевої фази. Для отримання композиційних порошків компактні матеріали механічно дробили та класифікували на фракції: для детонаційних покриттів –  $(-63 + 40)$  мкм; для плазмових –  $(-100 + 63)$  мкм.

Покриття з розроблених композиційних матеріалів наносили на сталеві зразки методами плазмового та детонаційного напилення, а також методом електроіскрового легування. Плазмове напилення здійснювали на установці УПУ-3Д у відкритій атмосфері з використанням в якості плазмоутворюючого газу суміші аргону і водню. Детонаційне напилення покриттів здійснювали за допомогою детонаційно-газової установки «Дніпро - 5 МА». В рамках роботи проводили оптимізацію технологічних параметрів газотермічного напилення покриттів залежно від співвідношення металевої та тугоплавкої складових в КМ.

Електроіскрове легування сталі 45 матеріалами систем  $TiB_2-(Fe-Mo)$  та  $Fe(Ni)CrBSiC-MeB_2$  проводили на установці ALIER-52. Кінетику масопереносу вивчали гравіметричним методом, вимірюючи питомий та сумарний приріст маси катоду, питому та сумарну ерозію аноду через кожну хвилину обробки  $1\text{ см}^2$  поверхні.

Для вивчення структурно-фазового складу композиційних матеріалів, порошків, покриттів, а також поверхонь тертя використовували методи рентгенофазового аналізу (РФА) (ДРОН-УМ1) та мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) з використанням мікроскопів РЕМ – 106И і JEOL JAMP-9500.

ДюрOMETричний аналіз проводили на мікротвердомірі ПМТ-3. Пористість спечених композитів та нанесених покриттів, а також співвідношення фаз в КМ і покриттях встановлювали методом січних. Адгезійну міцність зчеплення покриттів з підкладками визначали штифтовим методом.

Визначення температурних параметрів окиснення порошків композиційних матеріалів систем  $Fe(Ni)CrBSiC-MeB_2$  проводили на приладі Derivatograph Q-1500-D в діапазоні температур  $20 - 800\text{ }^\circ\text{C}$  на повітрі.

Дослідження зносостійкості компактних композиційних матеріалів та покриттів  $TiB_2-(Fe-Mo)$  проводили в умовах тертя ковзання без мастила на машині тертя МТ-68 за схемою вал-вкладиш у парі із загартованою сталлю 65Г (швидкість  $4-12\text{ м/с}$ , навантаження  $2-6\text{ МПа}$ ). Контролювали масовий знос зразка, лінійний знос пари тертя та коефіцієнт тертя. Стійкість покриттів системи  $TiB_2-(Fe-Mo)$  до абразивного зношування вивчали на машині тертя Х4-Б, на

експериментальній установці в абразивному середовищі та методом склерометрії на приладі «Мікрон-гамма».

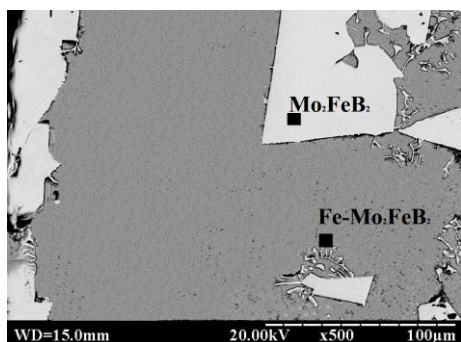
Триботехнічні властивості покриттів системи Fe(Ni)CrBSiC–MeB<sub>2</sub> досліджували за методикою pin-on-disc та ball-on-disc на триботестері CETR (Brucker) UMT Multi-Specimen Test System в умовах тертя ковзання без мастила в широкому діапазоні швидкостей та навантажень ( $v = 0,5; 1,0; 1,5$  м/с;  $P = 0,2 - 0,4$  МПа) в інтервалі температур 20 – 400 °С. Зносостійкість розроблених покриттів визначали в парі тертя з різними матеріалами: покриттям Fe(Ni)CrBSiC–MeB<sub>2</sub>, FeNiCrBSiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Після проведення триботехнічних випробувань знімали профілограми доріжок тертя в чотирьох різних точках і визначали об'ємний знос покриттів відповідно до вимог стандарту ASTM G99.9217. Для вивчення процесів формування захисних оксидних плівок на поверхнях тертя покриттів застосовували метод Оже-спектроскопії на мікроскопі JEOL JAMP-9500.

*Третій розділ* роботи присвячено розробці композиційних матеріалів системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo). Вибір сплавів Fe–Mo обумовлений тим, що залізо є недорогим та недефіцитним металом, а молібден – широко використовується при виготовленні безвольфрамових твердих сплавів. Однак, згідно діаграми стану Fe–Mo при збільшенні вмісту молібдену в сплаві відбувається утворення інтерметалідів Fe<sub>2</sub>Mo та Fe<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub>, які призводять до крихкості. В роботі було зроблено припущення, що внаслідок взаємодії компонентів сплаву Fe–Mo з диборидом титану вдасться уникнути утворення в КМ крихких інтерметалідів.

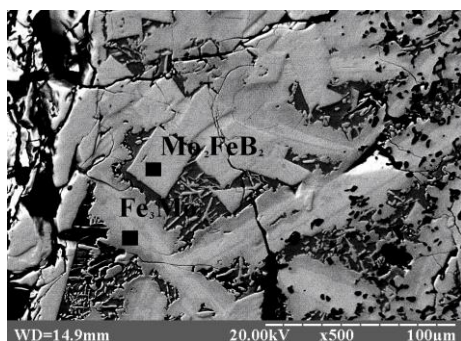
Для визначення складу нових композиційних матеріалів вивчено закономірності змочування та контактної взаємодії TiB<sub>2</sub> зі сплавами Fe–Mo в концентраційному діапазоні 2 – 30 мас.% Мо. Встановлено, що введення в залізо добавок молібдену в кількості 2 – 20 мас.% сприяє зниженню контактних кутів змочування та збільшенню адгезії сплаву до дибориду титану. Нульові контактні кути утворюються при розтіканні по поверхні тугоплавкої підкладки TiB<sub>2</sub> сплавів Fe–13мас.%Мо та Fe–20мас.%Мо (табл. 1).

**Таблиця 1 - Енергетичні параметри змочування дибориду титану сплавами Fe–Mo (вакуум —1,33 мПа, T=1500– 1550 °С)**

Сплав, мас.%	Температура змочування, °С	Час розтікання, хв	Контактний кут, град	Поверхневий натяг сплаву, мДж/м <sup>2</sup>	Робота адгезії, мДж/м <sup>2</sup>
Fe	1570	5	43	1630	2395
Fe-2Mo	1560	4,5	21	1630	3151
Fe-5Mo	1550	4	18	1630	3180
Fe-9Mo	1530	4	5	1630	3253
Fe-13Mo	1510	3,5	0	1630	3257
Fe-20Mo	1490	3	0	1630	3260
Fe-30Mo	1470	4	27	1630	3082



а



б

а –  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13мас. %Mo);б –  $\text{TiB}_2$ –(Fe–20мас. %Mo)

Рис. 2 – Структура каплі

Система  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13мас. %Mo) характеризується хімічною взаємодією між компонентами тугоплавкої сполуки ( $\text{TiB}_2$ ) та металевого сплаву (Fe–Mo), що призводить до утворення складних боридів  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  (рис. 2 а). При цьому методом МРСА не виявлено крихких інтерметалідів  $\text{Fe}_3\text{Mo}_2$ , які присутні в структурі вихідного сплаву Fe–13мас. %Mo.

Зі збільшенням вмісту молібдену в сплаві до 20мас. % в зонах каплі та контактної взаємодії системи  $\text{TiB}_2$ –(Fe–Mo) виявлено утворення боридів  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  та інтерметалідних сполук  $\text{Fe}_3\text{Mo}_2$ , що може призвести до крихкості КМ (рис. 2 б).

Таким чином, для подальших досліджень було обрано систему  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13мас. %Mo), що характеризується нульовими кутами змочування та утворенням високоміцних боридів  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  ( $H_\mu=20\text{--}22$  ГПа).

В роботі методом рідкофазного спікання отримували КМ системи  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13мас. %Mo) з вмістом металевої фази 20, 40, 60, 80 мас. % (ТБФМ20, ТБФМ40, ТБФМ60, ТБФМ80

відповідно) у вигляді компактних електродів для ЕІЛ та порошків для наплення газотермічних покриттів (рис. 3). Спікання при температурі 1520–1550 °С протягом 40 хвилин забезпечує отримання компактних зразків ТБФМ з залишковою пористістю до 5–8%.

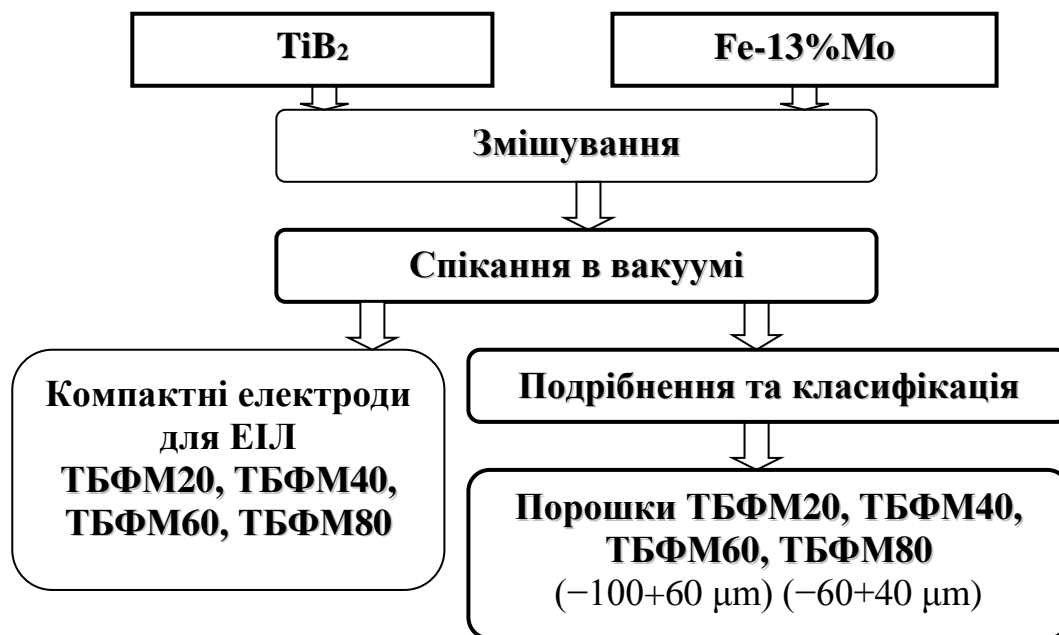
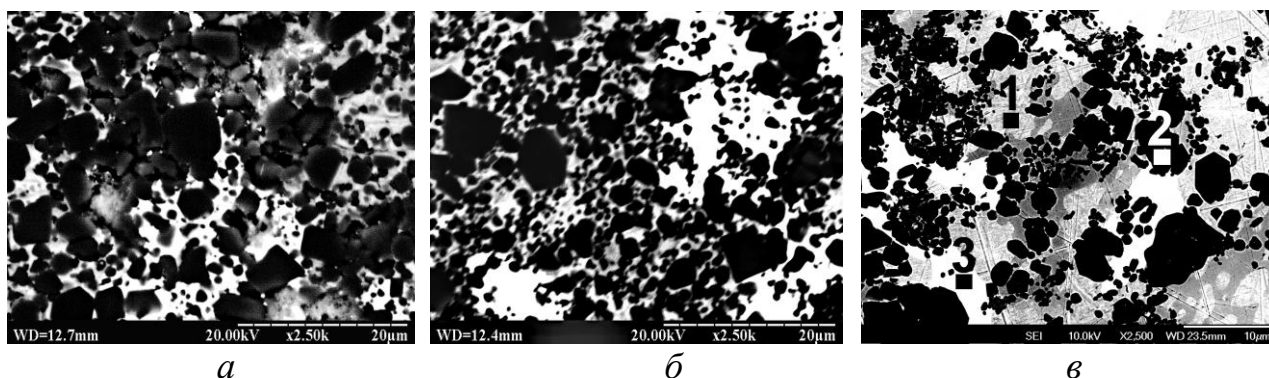


Рис. 3 – Технологічна схема отримання електродів та порошків ТБФМ

За даними МРСА та РФА компактні КМ ТБФМ системи  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13%Mo) мають гетерофазну структуру, що складається з твердого розчину на основі Fe, частинок  $\text{TiB}_2$  розміром 5–7 мкм та боридів  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  розміром 10–20 мкм (рис. 4).

*a**б**в*

*a* – ТБФМ20; *б* – ТБФМ40; *в* – ТБФМ80

1 – твердий розчин на основі Fe; 2 –  $\text{TiB}_2$ ; 3 –  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$

Рис. 4. Структура композиційних матеріалів системи  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13%Mo)

Рівень механічних властивостей КМ ТБФМ варіюється залежно від співвідношення тугоплавкої та металевої складових в їх структурі. Зі збільшенням вмісту  $\text{TiB}_2$  твердість композитів ТБФМ збільшується, а міцність на згин та коефіцієнт тріщиностійкості зменшуються (табл. 2). Композиційний матеріал ТБФМ20 має відносно низькі механічні характеристики, що можна пояснити більшою пористістю цього КМ (8%).

**Таблиця 2 – Механічні властивості композиційних матеріалів системи  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13мас.%Mo)**

Матеріал	Властивості розроблених матеріалів		
	Твердість HRA	Міцність на згин $\sigma_{зг}$ , МПа	Коефіцієнт тріщиностійкості $K_{Ic}$ , МН·м <sup>-3/2</sup>
ТБФМ20 $\text{TiB}_2$ –20%(Fe–13%Mo)	86,2	860	6,3
ТБФМ40 $\text{TiB}_2$ –40%(Fe–13%Mo)	84	1220	9,7
ТБФМ80 $\text{TiB}_2$ –80%(Fe–13%Mo)	68	1370	10,8
ВК–6	88,5	1520	12,1

Для нанесення газотермічних покриттів з компактних КМ ТБФМ було отримано композиційні порошкові матеріали (КПМ) методом механічного подрібнення з наступною класифікацією (рис. 3). КПМ ТБФМ з вмістом металевої фази 20, 40, 60, та 80 мас.% є конгломератами неправильної форми, що містять тугоплавку і металеву фази, адгезійно міцно пов'язані між собою (рис. 5).

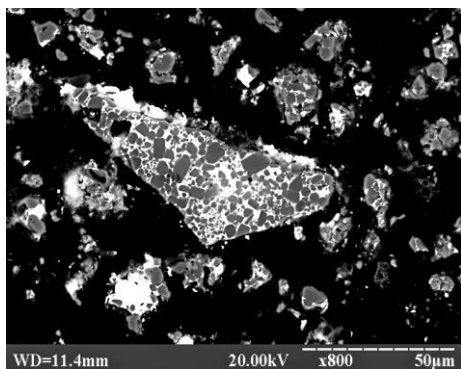


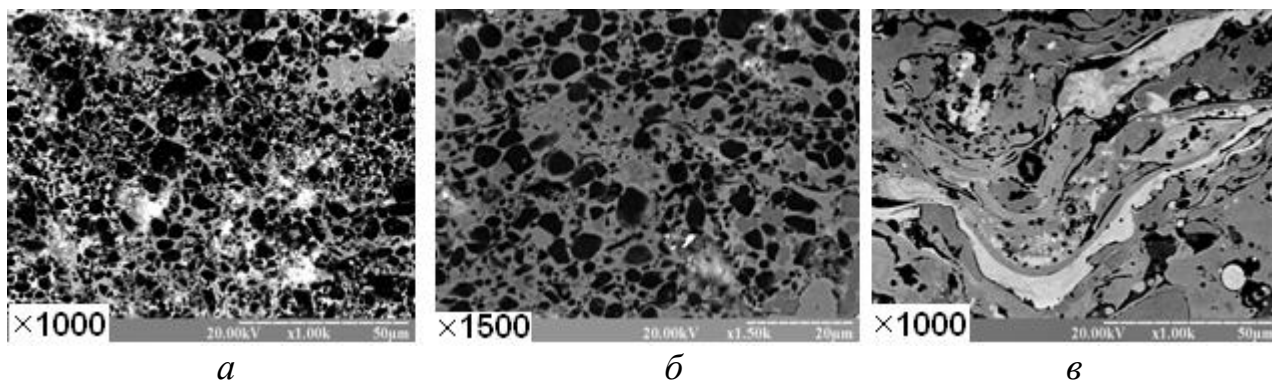
Рис. 5 – Поперечний переріз КПМ ТБФМ40

Такий метод отримання порошків (рис. 3) дозволяє запобігати сегрегації компонентів під час плазмового та детонаційного напилення, що сприяє формуванню рівномірної структури покриттів.

Структура плазмових покриттів ТБФМ подібна до структури компактних КМ, а детонаційних покриттів – більш дрібнодисперсна порівняно з компактними КМ та плазмовими покриттями, що обумовлено технологічними особливостями процесу детонаційного напилення (рис. 6, 7)

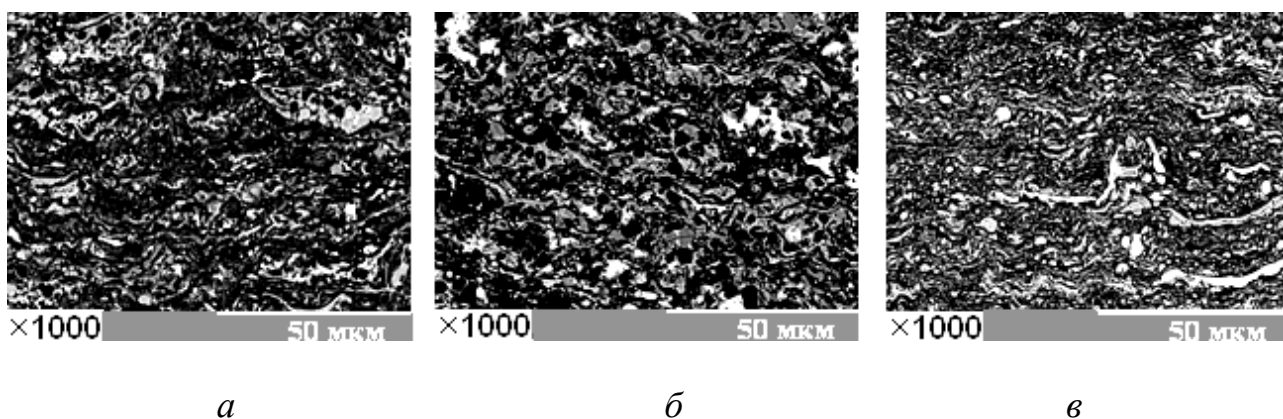
Загалом, згідно даних МРСА та РФА структурно-фазовий склад плазмових та детонаційних покриттів системи  $TiB_2-(Fe-13\%Mo)$  наслідуює склад компактних та порошкових КМ і визначається співвідношенням тугоплавкої та металевої складових.

Газотермічні покриття з розроблених КПМ ТБФМ40, ТБФМ60 та ТБФМ80 мають адгезію до основи – 30–34 МПА. Пористість плазмових покриттів ТБФМ становить 5-7 %, детонаційних – 3-5 %. Товщину газотермічних покриттів ТБФМ можна варіювати в межах 300–600 мкм.



*a* – ТБФМ20; *б* – ТБФМ40; *в* – ТБФМ80

Рис. 6 – Структура плазмових покриттів системи  $TiB_2-(Fe-13\%Mo)$



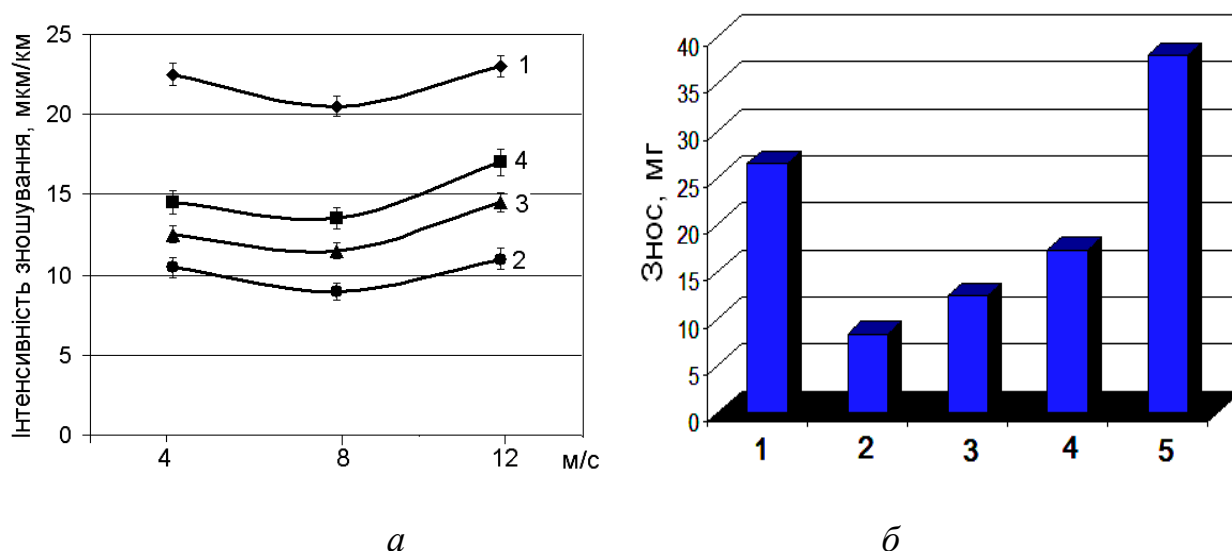
*a* – ТБФМ20; *б* – ТБФМ40; *в* – ТБФМ80

Рис. 7 – Структура детонаційних покриттів системи  $TiB_2-(Fe-13\%Mo)$



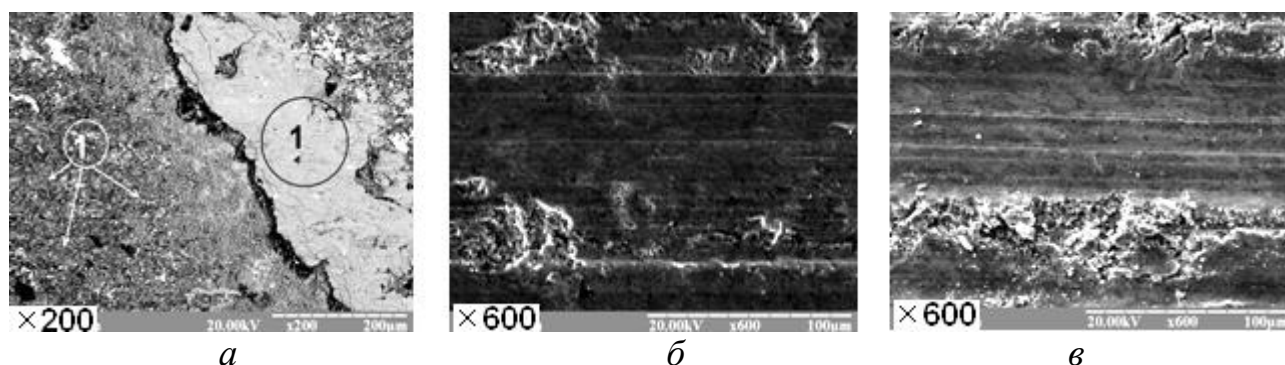
Встановлено, що в умовах тертя ковзання без мастила серед розроблених покриттів найвищою зносостійкістю характеризуються плазмові покриття з КПМ з вмістом металевої складової 40мас.% (ТБФМ40) (рис. 8 а). Поверхні покриттів ТБФМ40 після триботехнічних випробувань не містять слідів адгезійного чи абразивного пошкодження (рис. 9 б). Методами МРСА та РФА виявлено формування на поверхнях тертя покриттів ТБФМ40 оксидних плівок, що свідчить про окиснювальний механізм зношування. З одного боку, покриття ТБФМ40 містять значну кількість частинок твердих боридів  $TiB_2$  і  $Mo_2FeB_2$ , які сприймають навантаження при терті, а з іншого боку – кількості металевої фази достатньо для того, щоб міцно утримувати частинки боридів в структурі покриттів.

Зі збільшенням кількості металевої складової в структурі плазмових покриттів ТБФМ до 60–80 мас.% їх зносостійкість в умовах тертя ковзання зменшується. На поверхнях тертя покриттів ТБФМ60 та ТБФМ80 виявлено сліди адгезійної взаємодії зі сталевим контртілом (рис. 9 в). Механізм зношування плазмових покриттів ТБФМ20 полягає в зрізанні мікрооб'ємів сталевого контртіла в процесі тертя під дією прикладеного навантаження (рис. 9 а).



1 – ТБФМ20; 2 – ТБФМ40; 3 – ТБФМ60; 4 – ТБФМ80; 5 – ВК-6

Рис. 8 – Інтенсивність зношування плазмових покриттів в парі зі сталлю 65Г в умовах тертя ковзання без мастила при  $P=2$ МПа (а) та в середовищі абразиву (б)



а – ТБФМ20; б – ТБФМ40; в – ТБФМ80

1 – шар заліза, перенесеного з матеріалу сталевого контртіла

Рис. 9 – Поверхні тертя плазмових покриттів системи  $TiB_2$ –(Fe–13мас.%Mo)

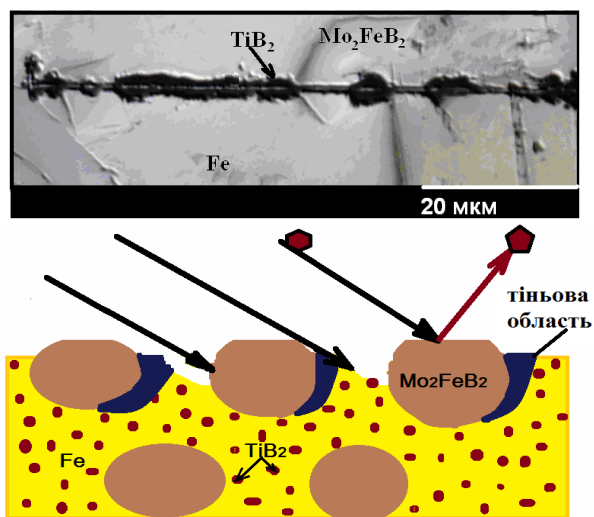
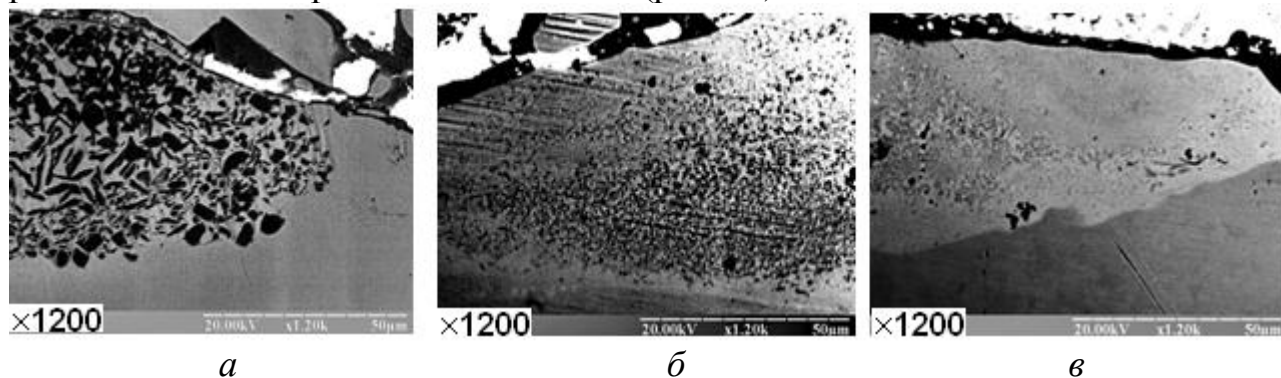


Рис. 10 – Схема процесу зношування газотермічних покриттів ТБФМ в абразивному середовищі

Для моделювання процесів зношування покриттів в абразивному середовищі проводили склерометричні дослідження (рис. 10). Виявлено, що частинки абразиву в основному зношують металеву матрицю. Включення складних боридів  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  за рахунок великих розмірів та твердості, ефективно екранують дію абразивних частинок при кутах атаки менших  $90^\circ$  і тим самим запобігають контакту абразивних частинок з матрицею і таким чином підвищують зносостійкість матеріалу.

Для детонаційних покриттів ТБФМ спостерігаються ті ж закономірності зношування, що й для плазмових, але інтенсивність їх зношування на 15-20% менша, що пояснюється більш дрібнодисперсною структурою та меншою пористістю.

Компактні КМ ТБФМ використовували в якості електродів для нанесення ЕІЛ-покриттів. Структурно-фазовий склад ЕІЛ-покриттів ТБФМ суттєво відрізняється від газотермічних покриттів, що обумовлено дією електроіскрового розряду та взаємодією компонентів електроду з матеріалом підкладки. В результаті ЕІЛ на сталі формуються дискретні покриття з гетерофазною структурою, яка складається з частинок  $\text{TiB}_2$  розміром 1–2 мкм, розподілених в матриці на основі заліза (рис. 11).



*a* – ТБФМ20; *б* – ТБФМ40; *в* – ТБФМ80

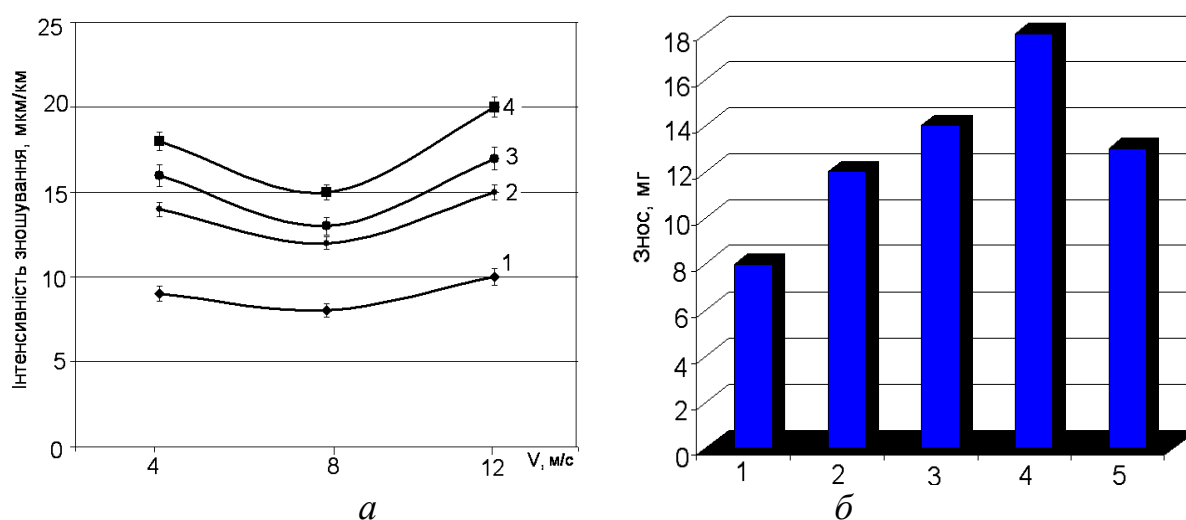
Рис. 11 – Структура електроіскрових покриттів системи  $\text{TiB}_2$ –(Fe–13мас.%Mo)

При випробуваннях на абразивний знос відносна зносостійкість газотермічних покриттів збільшується в ряду ТБФМ20 → ТБФМ80 → ТБФМ60 → ТБФМ40 (рис. 8 б). Зносостійкість збільшується зі зменшенням кількості металевої зв'язки, а також зі збільшенням твердості покриття. Винятком є покриття з КПМ ТБФМ20, в якому очікуване підвищення зносостійкості не відбулося внаслідок низької адгезії і когезії покриття, що, імовірно, обумовлено недостатньою кількістю металевої зв'язки.

Для моделювання процесів зношування покриттів в абразивному

Зі збільшенням вмісту металевої складової в матеріалі електродів ТБФМ поліпшується технологічність процесу ЕІЛ, але зменшується мікротвердість ЕІЛ-покриттів: для ТБФМ40  $H_{\mu}=14-16$  ГПа, а для ТБФМ80 -  $H_{\mu}=8-10$  ГПа. Товщина легованого шару варіюється залежно від режиму ЕІЛ та складу електродів в межах 120–200 мкм.

На відміну від газотермічних покриттів ТБФМ, найбільшою зносостійкістю в парі тертя зі сталлю 65Г та в умовах абразивного зношування характеризується ЕІЛ-покриття ТБФМ20. Зі збільшенням кількості металевої фази і зменшенням вмісту твердих боридів в структурі ЕІЛ-покриттів їх зносостійкість зменшується (рис. 12). Тому для електроіскрового зміцнення та відновлення поверхонь деталей в якості електроду доцільно використовувати композиційний матеріал ТБФМ20.



1 – ТБФМ20; 2 – ТБФМ40; 3 – ТБФМ60; 4 – ТБФМ80; 5 – ВК6

Рис. 12. Інтенсивність зношування ЕІЛ-покриттів в парі зі сталлю в умовах тертя ковзання без мастила  $P=2$  МПа (а) та в середовищі абразиву (б)

Таким чином, було розроблено компактні та порошкові КМ ТБФМ системи  $TiB_2-(Fe-13\text{мас.}\%Mo)$  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.

**Четвертий розділ** роботи присвячено розробці композиційних матеріалів на основі серійного самофлюсівного сплаву  $NiCrBSiC$  з добавками тугоплавких сполук для підвищення зносостійкості покриттів.

Для вибору зміцнюючої добавки для КМ на основі самофлюсівних сплавів проведено комплексне дослідження процесів змочування та міжфазної взаємодії в системах « $NiCrBSiC - TiC, ZrB_2, TiB_2, CrB_2$ ». Встановлено, що для зміцнення самофлюсівного сплаву  $NiCrBSiC$  доцільно використовувати добавки  $TiB_2$ . Контактний кут змочування дибориду титану самофлюсівним сплавом

становить  $\sim 34^\circ$ , при цьому в системі «NiCrBSiC-TiB<sub>2</sub>» відбувається утворення боридів хрому та карбоборидів титану-хрому, які сприятимуть збільшенню зносостійкості композиційних матеріалів (рис 13).

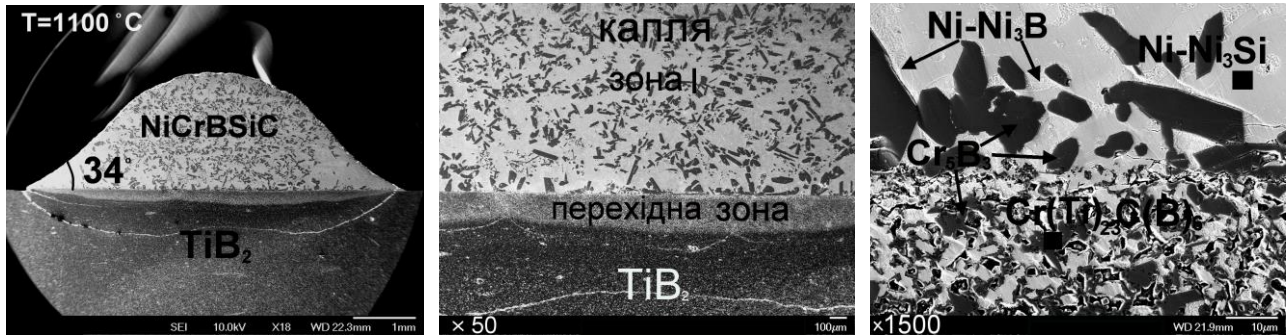
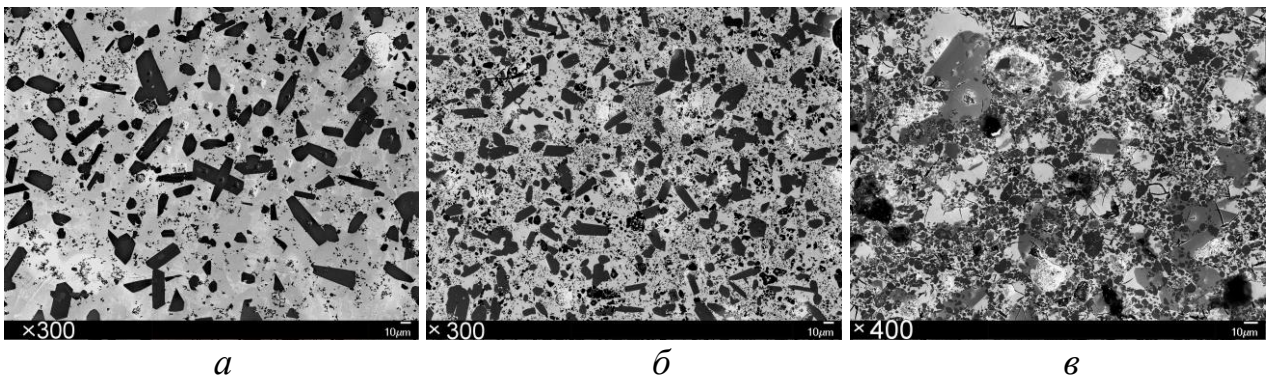


Рис. 13 – Зона контактної взаємодії в системі NiCrBSiC–TiB<sub>2</sub>

На наступному етапі роботи визначали оптимальну кількість добавок TiB<sub>2</sub> до самофлюсівного сплаву NiCrBSiC. Для цього досліджували особливості формування структурно-фазового складу КМ НХТБ системи NiCrBSiC–TiB<sub>2</sub> з 10, 20 та 40 мас.% TiB<sub>2</sub>. Встановлено, що кількістю добавок TiB<sub>2</sub> можна впливати на кількість та розмір тугоплавких сполук (Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>, Cr(Ti)<sub>23</sub>C(B)<sub>6</sub>), що утворюються in-situ в процесі рідкофазного спікання (рис. 14).

Збільшення кількості добавок TiB<sub>2</sub> призводить до зменшення розмірів зерен боридів хрому Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub> та карбоборидів Cr(Ti)<sub>23</sub>C(B)<sub>6</sub>, які утворюються in-situ в процесі рідкофазного спікання: в структурі композиту НХТБ10, що містить 10% TiB<sub>2</sub> розмір боридів хрому становить  $\sim 50$ – $60$  мкм, а в структурі НХТБ20 з вмістом 20% TiB<sub>2</sub> – до  $\sim 25$ – $30$  мкм (рис. 13 а, б). Найменші розміри зерен боридів хрому та складних карбоборидів (до  $\sim 15$  мкм) спостерігаються в структурі композиційного матеріалу НХТБ40, що містить 40 мас.% TiB<sub>2</sub> (рис. 13 в). Така тенденція до зменшення розмірів Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub> та Cr(Ti)<sub>23</sub>C(B)<sub>6</sub> при збільшенні вмісту добавок TiB<sub>2</sub> пов'язана, з одного боку, зі збільшенням кількості центрів кристалізації, а з іншого – тим, що частинки TiB<sub>2</sub> є перешкодою для дифузійних процесів в сплаві.



а – НХТБ10; б – НХТБ20; в – НХТБ40

Рис. 14 – Структура композиційних матеріалів НХТБ системи NiCrBSiC–TiB<sub>2</sub>

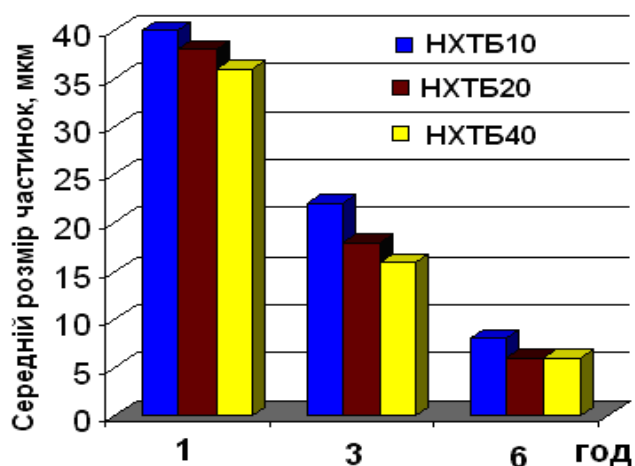
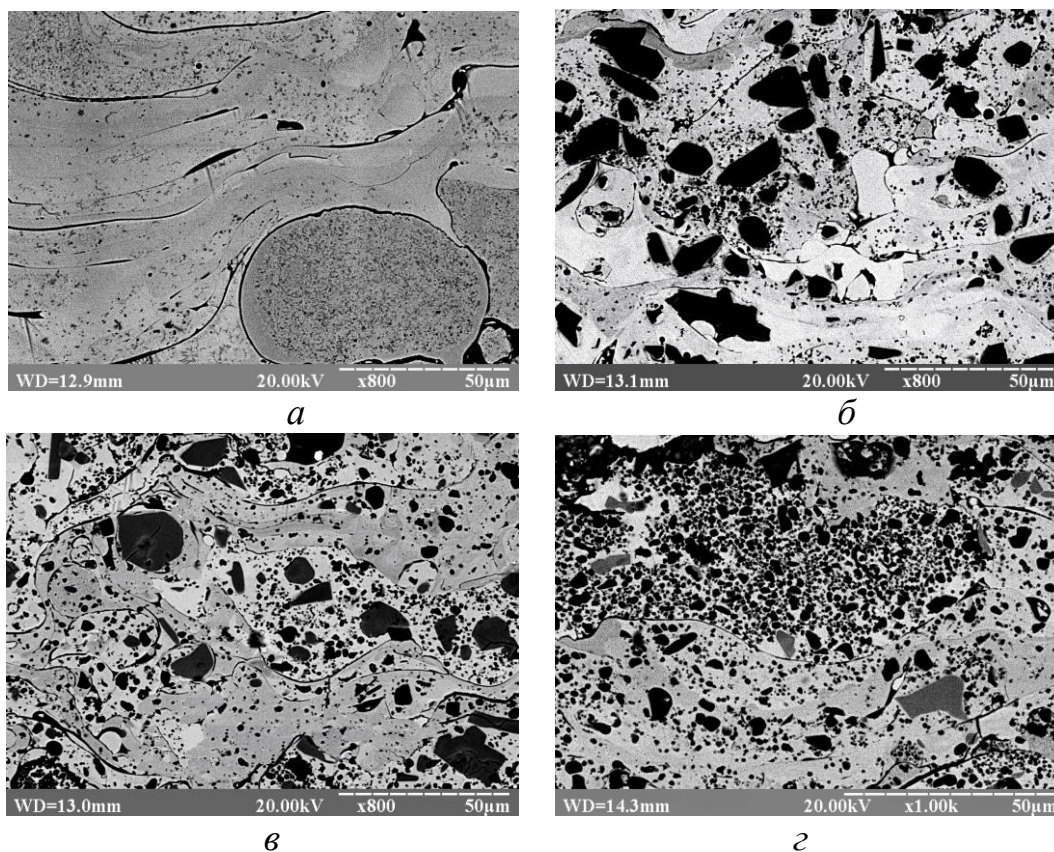


Рис. 15 – Середній розмір частинок шихти НХТБ залежно від часу

Порошки НХТБ10, НХТБ20, НХТБ40 для нанесення плазмових покриттів отримували шляхом рідкофазного спікання КМ на основі самофлюсівного сплаву  $\text{NiCrBSiC}$  з добавками відповідно 10, 20, 40 мас.%  $\text{TiB}_2$  з наступним подрібненням за технологією аналогічною до наведеної на рис. 3. Для отримання компактних зразків НХТБ час розмолу шихти вихідних порошків  $\text{NiCrBSiC}$  (40-60 мкм) та  $\text{TiB}_2$  (3-4 мкм) має становити не менше 3 год (рис. 15), температура спікання – 1100–1400 °С.

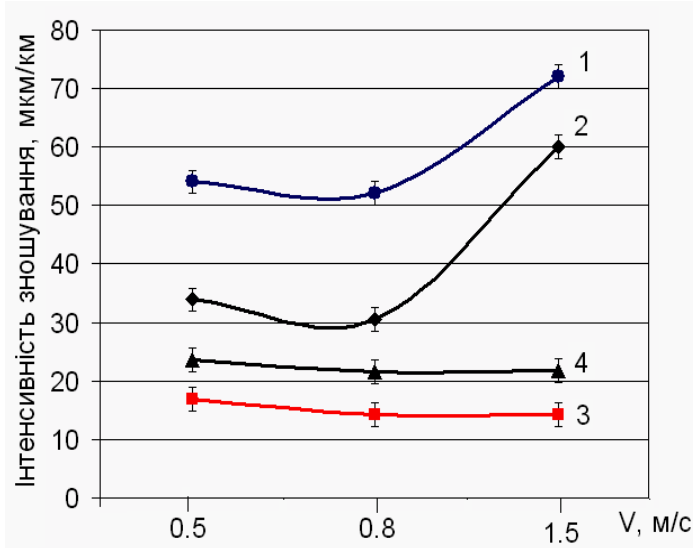
Кожна частинка отриманих таким способом порошків НХТБ є композитом, завдяки чому вдається уникнути сегрегації компонентів під час газотермічного напилення і реалізувати в покриттях структуру компактних КМ.

З розроблених порошків НХТБ отримували покриття методом плазмового напилення на установці УПУ-3Д. Плазмові покриття НХТБ характеризуються 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  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{V}_3$  та  $\text{Cr}(\text{Ti})_{23}\text{C}(\text{V})_6$  (рис.16).



*a* –  $\text{NiCrBSiC}$ ; *б* – НХТБ10; *в* – НХТБ20; *г* – НХТБ40

Рис. 16 – Структура плазмових покриттів НХТБ системи  $\text{NiCrBSiC-TiB}_2$



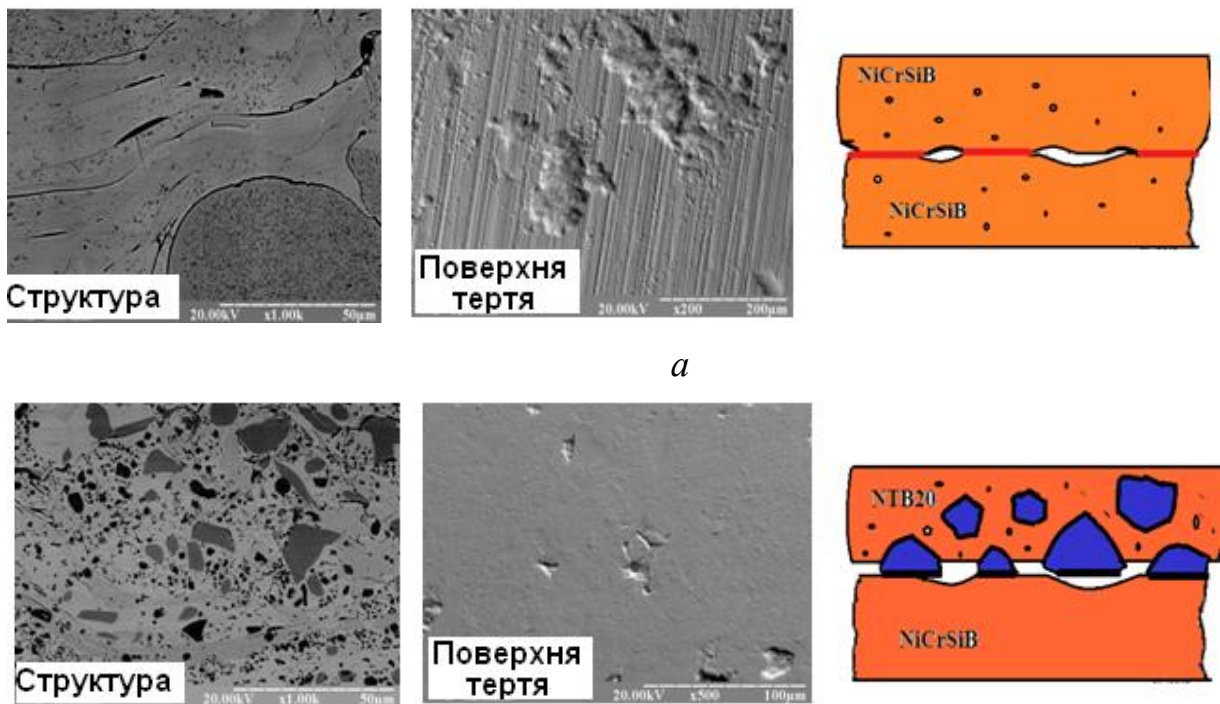
1 – NiCrBSiC; 2 – НХТБ10;  
3 – НХТБ20; 4 – НХТБ40

Рис. 17 – Інтенсивність зношування плазмових покриттів

При введенні до сплаву NiCrBSiC 10% TiB<sub>2</sub> зносостійкість покриттів збільшується – інтенсивність зношування пари тертя НХТБ10–NiCrBSiC становить 42–60 мкм/км (Рис. 17). Загалом механізм зношування пари тертя НХТБ10–NiCrBSiC подібний до механізму зношування пари тертя NiCrBSi–NiCrBSiC і полягає в утворенні та руйнуванні адгезійних зв'язків між поверхнями контактуючих тіл.

Триботехнічні випробування плазмових покриттів з розроблених КМ НХТБ проводили на триботестері CETR UMT Multi-Specimen Test System в умовах тертя ковзання без мастила за схемою pin-on-disc. В якості контртіла використовували плазмове покриття з самофлюсівного сплаву NiCrBSiC.

Найбільшою інтенсивністю зношування ( $I=54-70$  мкм/км) характеризується пара тертя NiCrBSiC–NiCrBSiC внаслідок реалізації адгезійного механізму зношування, що супроводжується значним пошкодженням поверхонь (рис. 17, 18).



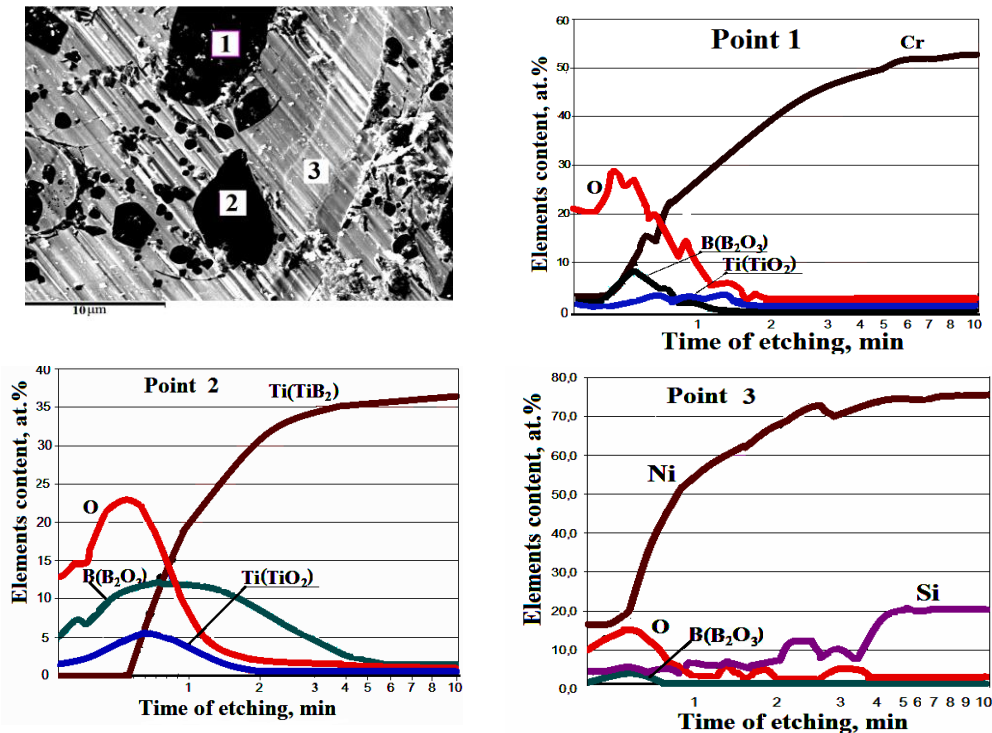
*a*

*б*

*a* – NiCrBSiC-NiCrBSiC; *б* – НХТБ20-NiCrBSiC

Рис.18 – Структура, поверхня тертя та схема процесу зношування пар тертя

Найбільшим рівнем зносостійкості ( $I=14-18$  мкм/км) характеризується пара тертя НХТБ20–NiCrBSiC за рахунок реалізації окиснювального механізму зношування. Методом МРСА виявлено формування на поверхнях тертя покриттів НХТБ20 складних оксидних плівок, які сприяють зменшенню пошкоджень та забезпечують високу зносостійкість покриттів (рис. 18). Формування захисних оксидних плівок підтверджено результатами пошарового Оже-аналізу, згідно яких частинки тугоплавких боридів сприяють утворенню вторинних структур на основі оксидів  $TiO_2$ ,  $B_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $SiO_2$  (рис. 19). Під впливом високих контактних навантажень та температур в зоні тертя оксиди ущільнюються і формують суцільну захисну плівку.



1 – зерно бориду хрому; 2 – зерно дибориду титану; 3 – матриця на основі нікелю  
Рис. 19 – Оже-спектри поверхні покриття НХТБ20

При збільшенні вмісту дибориду титану в покриттях до 40мас.% спостерігається збільшення інтенсивності зношування ( $I=21-24$  мкм/км), що пов'язано з підвищеною крихкістю покриття НХТБ40 (рис. 18).

Таким чином, було розроблено нові композиційні порошкові матеріали НХТБ системи NiCrBSiC– $TiB_2$  для нанесення плазмових покриттів. Встановлено, що введення частинок  $TiB_2$  до складу серійного самофлюсівного сплаву дозволяє керувати процесами структуроутворення при рідкофазному спіканні, а саме впливати на розмір та кількість in-situ зерен бориду хрому, що дозволяє отримувати оптимальну для заданих умов експлуатації структуру покриттів. Виявлено, що для забезпечення високої зносостійкості покриттів доцільно використовувати КМ НХТБ20 з 20мас.%  $TiB_2$ . Добавки дибориду титану в структурі покриттів НХТБ20 сприяють формуванню оксидних плівок, які захищають поверхні тертя від ушкоджень в процесі тертя.

Ідею про позитивний вплив хімічної взаємодії між компонентами КМ з утворенням in-situ високотвердих боридів та карбідів, які ефективно впливають на триботехнічні властивості покриттів, було також реалізовано при створенні КПМ системи FeNiCrBSiC-MeV<sub>2</sub>. В рамках **п'ятого розділу** дисертаційної роботи в якості основи нових КМ використовували серійний самофлюсівний сплав на основі заліза FeNiCrBSiC (ПГ-Ж14).

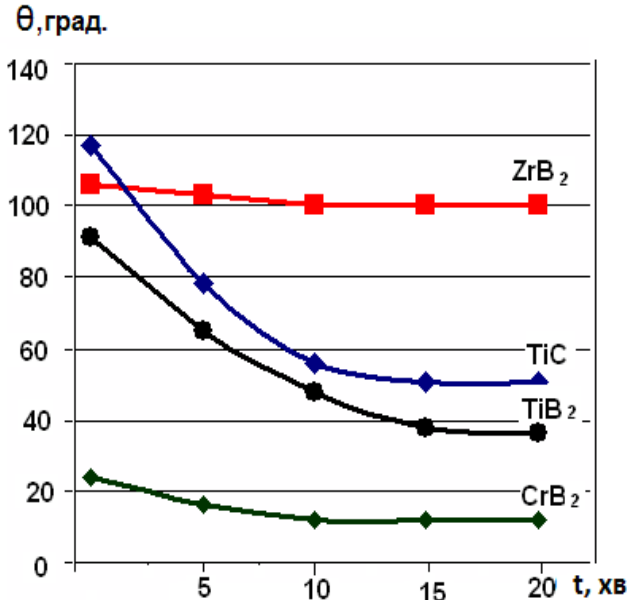


Рис. 20 – Кінетика змочування TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub> та TiC самофлюсівним сплавом FeNiCrBSiC (T=1100 °C)

Для вибору зміцнюючих добавок вивчали кінетику змочування тугоплавких сполук TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, TiC сплавом FeNiCrBSiC.

Встановлено, що системи FeNiCrBSiC-TiB<sub>2</sub>, FeNiCrBSiC-CrB<sub>2</sub> характеризуються малими контактними кутами змочування (рис. 20), а тому TiB<sub>2</sub> та CrB<sub>2</sub> є перспективними зміцнюючими добавками для самофлюсівного сплаву FeNiCrBSiC.

Дослідження зони міжфазної взаємодії та каплі виявили, що в системах FeNiCrBSiC-TiB<sub>2</sub>, та FeNiCrBSiC-CrB<sub>2</sub> відбувається хімічна взаємодія з утворенням складних карбоборидів хрому-молібдену, які мають досить високу мікротвердість (до 24 ГПа) (рис. 21).

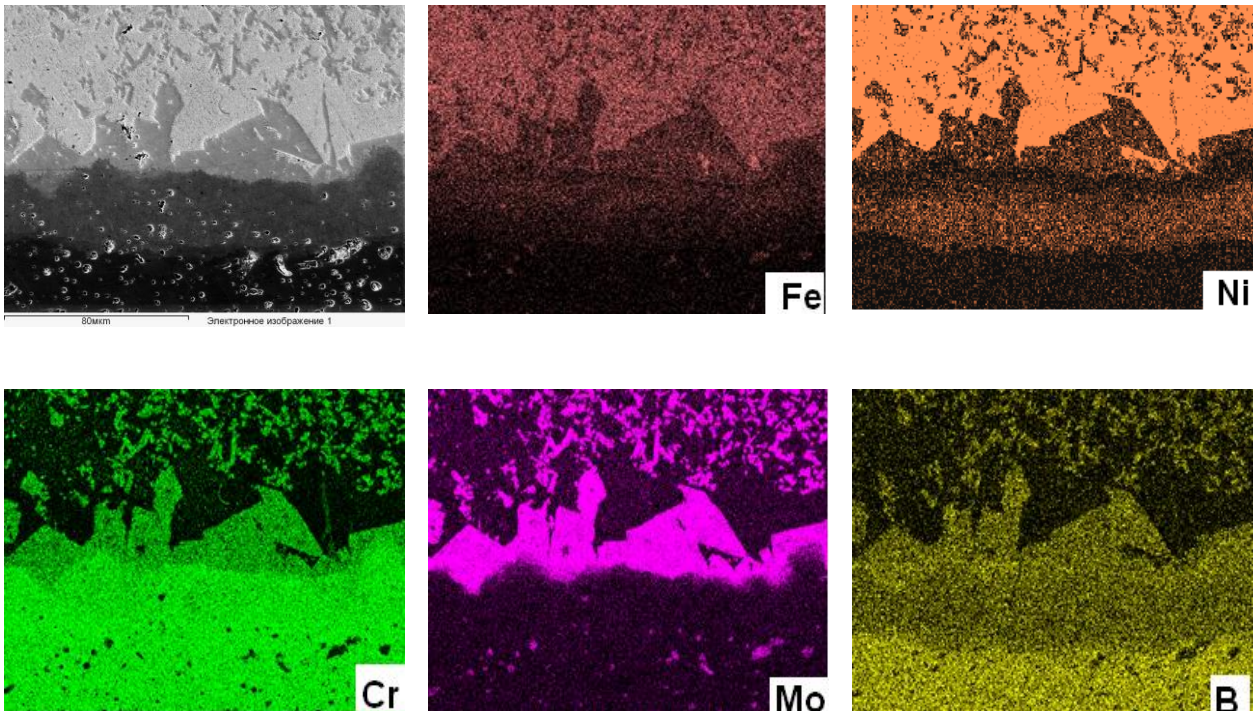
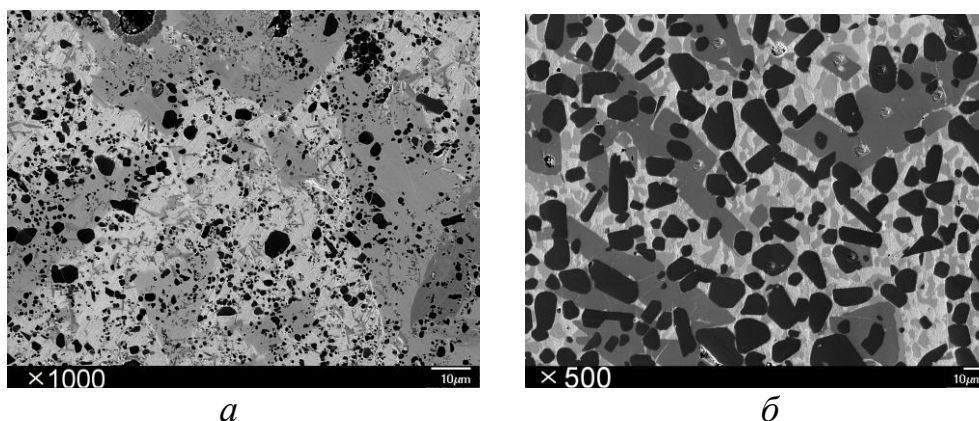


Рис. 21 – Розподіл хімічних елементів в зоні контактної взаємодії системи FeNiCrBSiC-CrB<sub>2</sub>



Структура компактних КМ ФХТБ20 ( $\text{FeNiCrBSiC-20\%TiB}_2$ ) та ФХБ20 ( $\text{FeNiCrBSiC-20\%CrB}_2$ ) складається з матриці на основі нікелю-заліза, в якій розміщено включення складних карбоборидів титану, хрому та молібдену (рис. 22).



*a* – ФХТБ20; *б* – ФХБ20

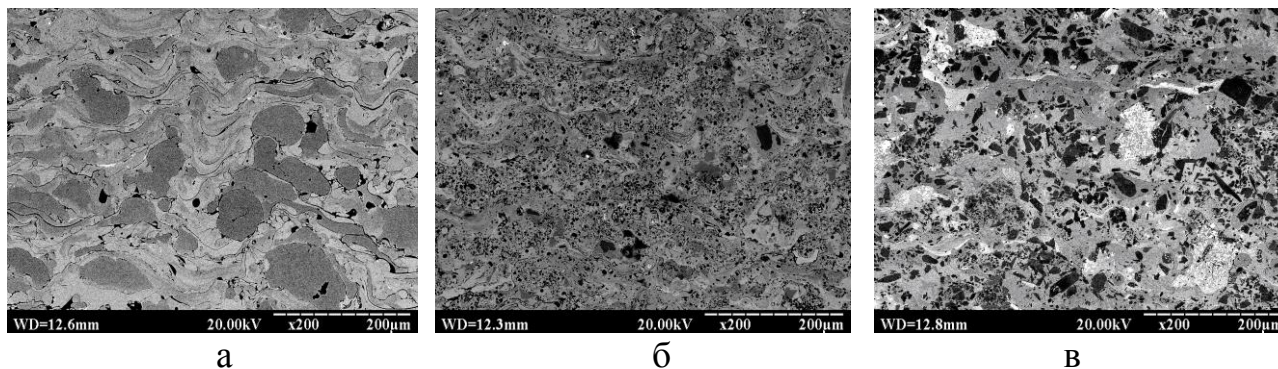
Рис. 22 – Структура композиційних матеріалів

В рамках дисертаційної роботи методом рідкофазного спікання за технологічною схемою, наведеною на рис. 3, отримували порошки з розроблених композиційних матеріалів ФХТБ20 та ФХБ20.

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 (рис. 23), що свідчить про відсутність сегрегації компонентів металевого сплаву та тугоплавкої сполуки в процесі напилення.

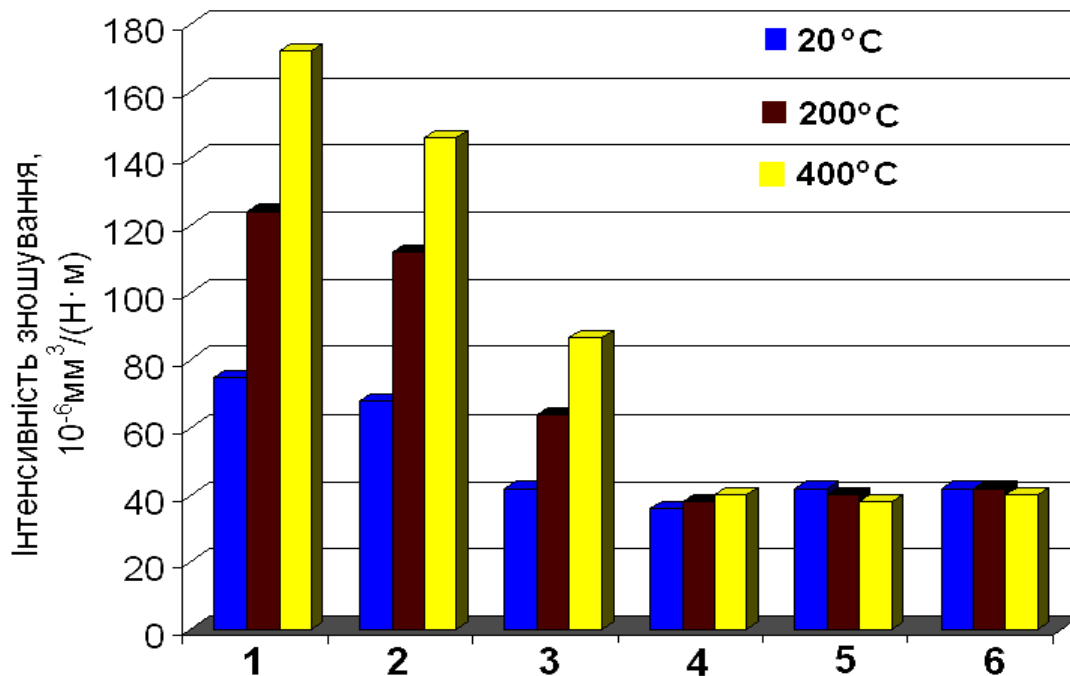
Триботехнічні випробування розроблених покриттів ФХТБ20 та ФХБ20 проводили на триботестері SETR UMT Multi-Specimen Test System в умовах тертя ковзання без мастила за схемою «ball-on-disc» в парі тертя з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при температурах 20, 200, 400 °С. Для порівняння випробовували плазмові покриття з розробленого КПМ НХТБ20 та серійних порошків ПГ-СР3, ПГ-Ж14 та ПС-12НВК-01.



*a* –  $\text{FeNiCrBSiC}$ ; *б* – плазмове покриття ФХТБ20; *в* – плазмове покриття ФХБ20

Рис. 23 – Структура газотермічних покриттів

При кімнатній температурі всі розроблені покриття мають приблизно однакову інтенсивність зношування ( $\sim 40 \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ ). Підвищення температури до  $200 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$  не впливає суттєво на інтенсивність зношування розроблених покриттів НХТБ20, ФХТБ20, ФХБ20, тоді як інтенсивність зношування серійних покриттів ПГ-СР3, ПГ-Ж14 і ПС-12НВК-01 зростає в 2-3 рази (рис. 24).

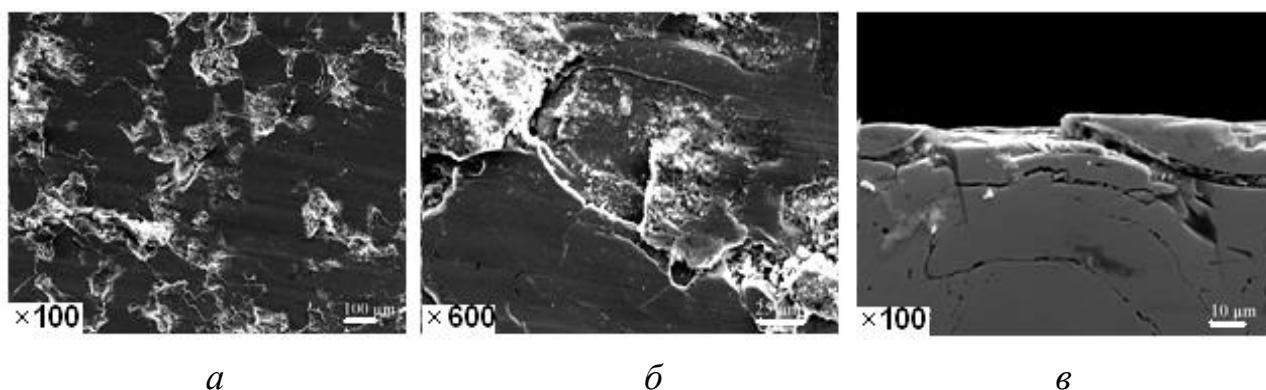


1 – ПГ-СР3; 2 – ПГ-Ж14; 3 – ПС-12НВК-01;

4 – НХТБ20; 5 – ФХТБ20; 6 – ФХБ20

Рис. 24 – Інтенсивність зношування плазмових покриттів

На поверхнях тертя покриттів з серійних сплавів ПГ-СР3 та ПГ-Ж14 виявлено значні пошкодження, що свідчить про адгезійну взаємодію в процесі тертя, при цьому має місце руйнування поверхневого шару по ламелях внаслідок їх відшаровування (рис. 23). При підвищенні температури процеси пластичної деформації та адгезійної взаємодії інтенсифікуються, що призводить до збільшення зносу покриттів.



*a*

*б*

*в*

Рис. 25 – Поверхня тертя (*a*, *б*) та поперечний переріз (*в*) покриття ПГ-Ж14 після триботехнічних випробувань при температурі  $400 \text{ }^\circ\text{C}$

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 (рис. 26 *а, б*). За результатами МРСА на поверхнях тертя формуються вторинні структури, які містять значну кількість оксигену (57 ат.%) і сприяють «заліковуванню» дефектів продуктами зносу (рис 26).

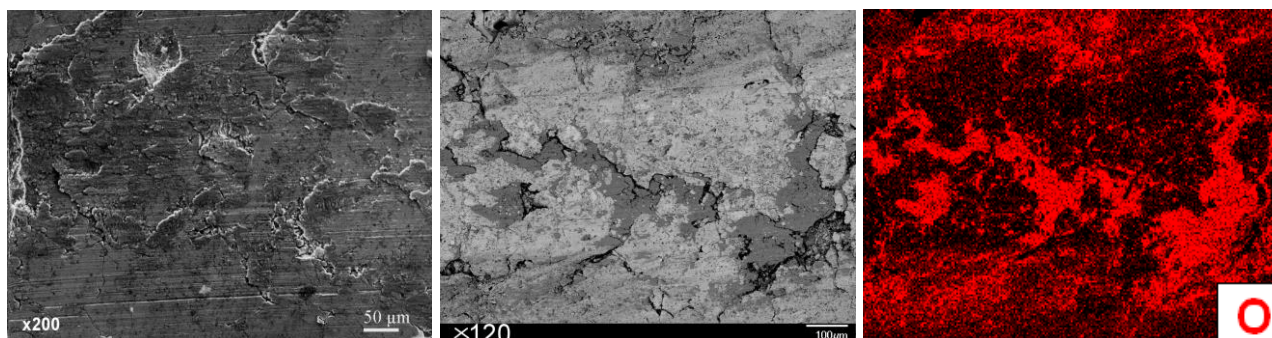
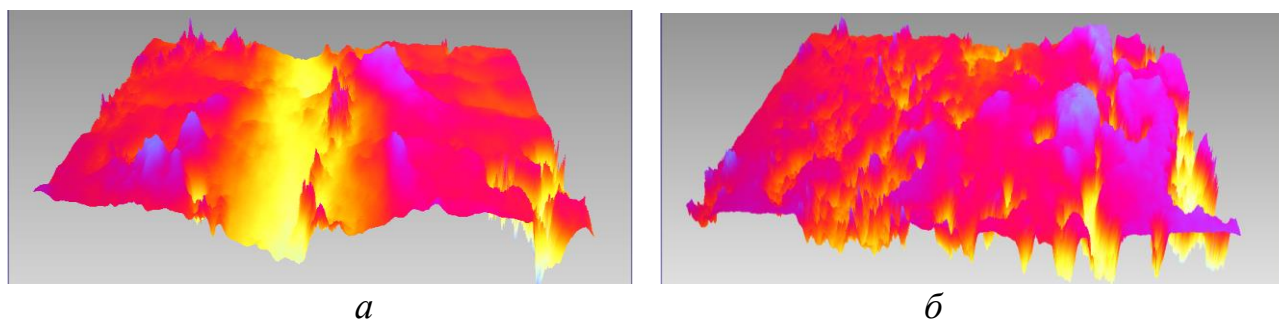


Рис. 26 – Поверхня тертя покриття ФХТБ20 після триботехнічних випробувань при 400 °С

Відсутність значних пошкоджень поверхонь покриттів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ2 після триботехнічних випробувань при 400 °С також підтверджується 3D профілограмами доріжок тертя (рис. 27).

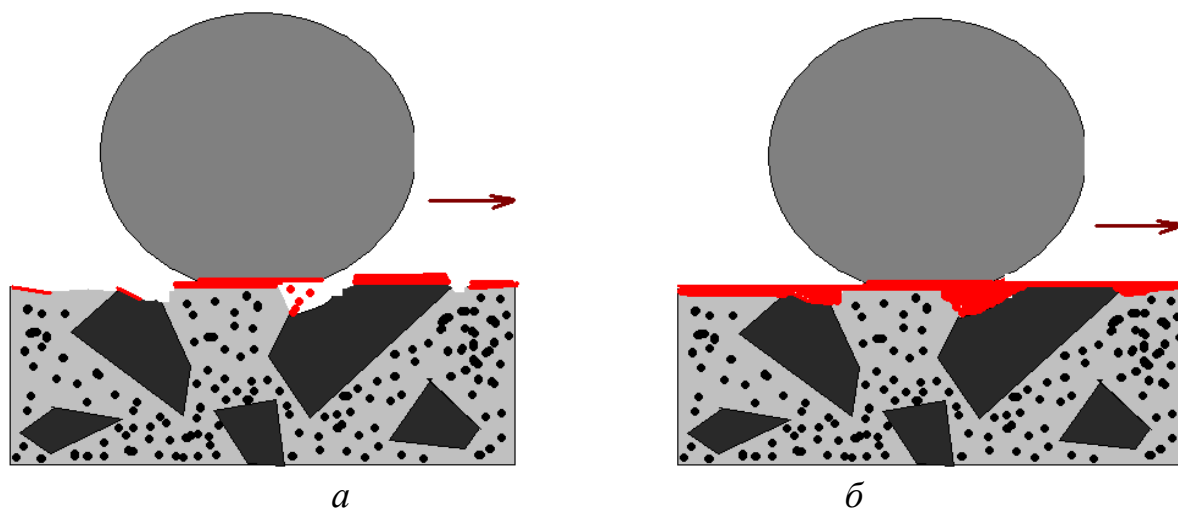


*а* – 200 °С; *б* – 400 °С

Рис. 27 – 3D профіль на поверхні тертя плазмового покриття ФХТБ20 після триботехнічних випробувань ( $\times 100$ )

На основі отриманих даних процес зношування покриттів з розроблених композиційних матеріалів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 при 400 °С можна представити наступним чином (рис. 28).

В результаті трибоокиснення на поверхнях тертя розроблених покриттів формуються оксидні плівки. При досягненні ними критичної товщини плівки руйнуються під дією механічних та термічних впливів тертя. Частинки зносу, що при цьому утворюються, потрапляють у дефекти покриттів, накопичуються і з часом повністю їх заповнюють. Під дією високих контактних навантажень та температур відбувається «триботехнічне спікання» накопичених частинок зносу в суцільну оксидну плівку (рис. 28).



*а* - початкова стадія тертя; *б* - сталий режим тертя

Рис. 28. Схема окиснювального механізму зношування покриттів на основі самофлюсівних сплавів з добавками тугоплавких боридів

Таким чином, 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. В процесі 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 порівнянні з покриттями з серійних порошків самофлюсівних сплавів.

## ВИСНОВКИ

В рамках дисертаційної роботи вирішено науково-технічну проблему 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) – MeB<sub>2</sub>» з керованим структурно-фазовим складом.

1. Проведено системне дослідження закономірностей змочування та вивчено механізм міжфазної взаємодії в системах «самофлюсівний сплав FeNiCrBSiC – тугоплавка сполука TiC, ZrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>». Встановлено, що для розробки нових композиційних матеріалів для нанесення захисних покриттів перспективними є системи NiCrBSiC–TiB<sub>2</sub>, FeNiCrBSiC–TiB<sub>2</sub> та FeNiCrBSiC–CrB<sub>2</sub>, які характеризуються малими кутами змочування ( $\theta \ll 90^\circ$ ) та хімічною взаємодією між компонентами сплаву та тугоплавкої сполуки з утворенням високотвердих складних боридів та карбоборидів хрому, які можуть позитивно впливати на зносостійкість покриттів.

2. Досліджено механізми формування структурно-фазового складу композиційних матеріалів на основі самофлюсівних евтектичних сплавів NiCrBSiC (ПГ-СР3) та FeNiCrBSiC (ПГ-Ж14) з добавками TiB<sub>2</sub> та CrB<sub>2</sub> в процесі рідкофазного спікання в вакуумі. Встановлено, що кількістю зміцнюючих добавок можна впливати на інтенсивність хімічної взаємодії між компонентами сплаву та тугоплавкої сполуки, а отже і керувати структурно-фазовим складом композиційних матеріалів та покриттів. Оптимальний вміст добавок тугоплавких боридів до самофлюсівних сплавів на основі нікелю NiCrBSiC та заліза FeNiCrBSiC становить 20мас.%, що дозволяє забезпечити високу зносостійкість покриттів за рахунок оптимального співвідношення включень твердих частинок та пластичної металевої матриці.

3. Отримано композиційні порошкові матеріали НХТБ20 (NiCrBSiC–20мас.%TiB<sub>2</sub>), ФХТБ20 (FeNiCrBSiC–20мас.%TiB<sub>2</sub>) та ФХБ20 (FeNiCrBSiC–20мас.%CrB<sub>2</sub>) методом рідкофазного спікання в вакуумі з подальшим подрібненням. Оптимізовано технологічні параметри отримання композиційних порошкових матеріалів методом рідкофазного спікання в вакуумі. Вивчено морфологію, структурно-фазовий склад отриманих порошків. За рахунок запропонованих в роботі технологічних рішень кожна частинка порошку має гетерофазну структуру, в якій зерна зміцнюючих фаз рівномірно розподілені в металевій матриці на основі нікелю–заліза. Структурно-фазовий склад розроблених композиційних порошків відповідає прогнозованому.

4. Досліджено структуру газотермічних покриттів з порошків НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20. Встановлено, що в процесі напилення розроблених порошків методами плазмового та детонаційного напилення не відбувається сегрегації компонентів металевого сплаву та тугоплавкої сполуки, що призводить до формування гетерофазної структури покриття з рівномірним розподілом частинок дибориду титану в металевій матриці. Структура покриттів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 відрізняється високою щільністю та малою кількістю оксидних плівок, за рахунок чого забезпечується високий когезійний зв'язок в покриттях.

5. В результаті проведення комплексних триботехнічних випробувань встановлено механізм зношування газотермічних покриттів з розроблених композиційних порошкових матеріалів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 на основі самофлюсівних евтектичних сплавів з добавками тугоплавких боридів в умовах тертя ковзання без мастила при підвищених температурах (до 400 °С), який полягає в реалізації ефекту самозаліковування дефектів поверхонь тертя продуктами зносу, що утворилися в результаті трибоокиснення. За рахунок збільшення вмісту в структурі покриттів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20 кількості та розміру твердих боридних фаз вдається запобігти процесам інтенсивної пластичної деформації та адгезійної взаємодії з матеріалом контртіла в умовах тертя при високих температурах і таким чином підвищити зносостійкість в 2–3 рази в порівнянні з покриттями з серійних сплавів ПГ-СР3 та ПГ-Ж14.

6. Вивчено закономірності змочування та міжфазної взаємодії TiB<sub>2</sub> зі сплавами Fe-Mo встановлено, що для створення нових композиційних матеріалів для нанесення зносостійких покриттів перспективною є система

$TiB_2$ –(Fe–13мас.%Мо), яка характеризується утворенням нульових контактних кутів змочування та хімічною взаємодією з утворенням високотвердих боридів  $Mo_2FeB_2$ . Структура композиційних компактних та порошкових матеріалів ТБФМ системи  $TiB_2$ –(Fe–13мас.%Мо), отриманих методом рідкофазного спікання в вакуумі, складається з зерен дибориду титану, складних боридів  $Mo_2FeB_2$  та металевої фази на основі заліза.

7. Досліджено структурно-фазовий склад покриттів з композиційних матеріалів ТБФМ отриманих методами плазмового і детонаційного напилення. Для нанесення газотермічних покриттів оптимальним є композиційний порошок матеріал ТБФМ40, який містить 40мас.%(Fe–13мас.%Мо). В плазмовому та детонаційному покриттях ТБФМ40 реалізується така структура, в якій пластична матриця запобігає крихкому руйнуванню, а тверді зерна дибориду титану сприймають основне навантаження при терті ковзання та сприяють формуванню захисних оксидних плівок на поверхні тертя і таким чином ефективно підвищують зносостійкість. В умовах абразивного зносу тверді частинки боридів в структурі покриттів ТБФМ40 запобігають впровадженню частинок абразиву, а металева матриця ефективно утримує частинки  $TiB_2$  та  $Mo_2FeB_2$  в структурі покриття, що забезпечує високу абразивну стійкість покриттів.

8. В процесі електроіскрового легування сталі розробленими електродами ТБФМ з 20, 40 і 60% (Fe–Мо) формуються дискретні покриття з гетерофазною структурою, яка складається з дрібнодисперсних зерен дибориду титану, розподілених в матриці на основі заліза. При електроіскровому легуванні сталевих поверхонь найбільша зносостійкість в умовах тертя ковзання без мастила та в умовах абразивного зношування забезпечуються при використанні електродного матеріалу ТБФМ20, що містить 20% металевої фази.

9. Розроблені плазмові покриття ТБФМ40, НХТБ20, ФХТБ20 пройшли дослідно-виробничі випробування на промислових підприємствах України, а саме ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», ПАТ «Сумське НВО», ТОВ ПМТЗ «Сервіс», а електроіскрові покриття ФХТБ20 та ТБФМ20 – на КП «Київський метрополітен», за результатами отримано позитивні акти випробувань.

Розроблено технічні умови ТУ У 25.9–05416930–049–014:2019 «Електроди FeNiCrBSiC– $TiB_2$  для електроіскрового зміцнення деталей триботехнічного призначення».

За результатами триботехнічних випробувань, проведених згідно міжнародного стандарту ASTM G99.9217 сумісно з Талліннським технічним університетом, встановлено перспективність застосування розроблених покриттів НХТБ20, ФХТБ20 та ФХБ20, що підтверджується відповідним актом.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

## Статті:

1. Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Krasovskyi V., Terentjev O., Antonov M. Wetting and interfacial behavior in  $TiB_2$ -NiCrBSiC system. *Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 778. P. 15–22. (Швейцарія, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85056669615&origin=resultslist&sort=>).

*Особистий внесок дисертантки полягає у вивченні особливостей міжфазної взаємодії в системі  $TiB_2$ -NiCrBSiC.*

2. Panasyuk A., Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Akopyan V. Development of  $TiB_2$ -based cermets with Fe-Mo binder. *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 527. P. 9–13. (Швейцарія, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84870946555&origin=resultslist&sort=>).

*Авторкою визначено вплив добавок молибдену в концентраційному діапазоні 2–30 мас.% до заліза на кінетику змочування дибориду титану, обґрунтовано вибір компонентів нових композиційних матеріалів.*

3. Umanskyi O., Hussainova I., **Storozhenko M.**, Terentiev O., Antonov M. Effect of oxidation on sliding wear behavior of NiCrSiB- $TiB_2$  plasma sprayed coatings. *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 604. P. 16–19. (Швейцарія, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84898889559&origin=resultslist&sort=>).

*Авторкою досліджено триботехнічні характеристики та вплив структурних складових плазмового покриття NiCrSiB-20% $TiB_2$  на формування захисних оксидних плівок на поверхнях тертя.*

4. Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Hussainova I., Terentyev O., Kovalchenko A., Antonov M. Effect of  $TiB_2$  additives on wear behavior of NiCrSiB-based plasma sprayed coatings. *Materials Science*. 2016. Vol. 22. P. 15–19. (Литва, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84958739891&origin=resultslist&sort=>).

*Особистий внесок дисертантки в дану роботу – дослідження впливу добавок 10, 20, 40 мас.% дибориду титану на структурно-фазовий склад та триботехнічні властивості плазмових покриттів на основі сплаву NiCrBSiC.*

5. Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Antonov M., Terentjev O., Koval O., Goljandin D. Effect of thermal spraying method on the microstructure and wear behaviour of FeNiCrBSiC-CrB<sub>2</sub> coating. *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 604. P. 16–19. (Швейцарія, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85070962066&origin=resultslist&sort=>).

*Дисертанткою виявлено вплив методів плазмового та детонаційного напилення покриттів системи FeNiCrBSiC-CrB<sub>2</sub> на їх структурно-фазовий склад та механізми зношування шляхом вивчення їх структури, зносостійкості та поверхонь тертя.*

6. Umanskii A. P., **Storozhenko M. S.**, Terentiev A. E., Martsenyuk I. S. Structurization of composites from self-fluxing alloys with titanium diboride additions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Vol. 53, № 5–6. P. 359–367. (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84925465177&origin=resultslist&sort=>).

*Особистий внесок здобувачки полягає у вивченні впливу добавок 10, 20 та 40 мас.%  $TiB_2$  на особливості формування структурно-фазового складу композиційних матеріалів на основі самофлюсівного сплаву  $NiCrSiBC$  в процесі рідкофазного спікання в вакуумі.*

7. Umanskii A. P., **Storozhenko M. S.**, Hussainova I.V., Terentiev A. E., Kovalchenko A. M., Antonov M. Structure, phase composition and wear mechanisms of plasma-sprayed  $NiCrBSi-20wt.\%TiB_2$  coating. *Powder metallurgy and Metal Ceramics*. 2015. Vol. 53, №11–12. P. 663–671 (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0.084953352133&origin=resultslist&sort>).

*Авторкою проведено триботехнічні випробування та вивчено поверхні тертя плазмових покриттів системи  $NiCrSiB-20\%TiB_2$  після триботехнічних випробувань в парі тертя з різними контртілами, що дозволило пояснити механізми зношування.*

8. **Storozhenko M.** Effect of molybdenum additions on the structurization of Fe–Mo alloys and contact interaction in the  $TiB_2-(Fe-Mo)$  systems. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. Vol. 55, № 9–10. P. 617–624. (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85012899526&origin=resultslist&sort>).

*Дисертанткою вивчено структурно-фазовий склад сплавів Fe–Mo в концентраційному діапазоні молібдену 2–30 мас.% та встановлено особливості їх контактної взаємодії з диборидом титану.*

9. **Storozhenko M. S.**, Umanskii A. P., Terentiev A. E., Zakiev I. M. Effect of the structure of  $TiB_2-(Fe-Mo)$  plasma coatings on mechanical and tribotechnical properties. *Powder metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. Vol. 56, № 1–2. P. 60–69. (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85043770974&origin=resultslist&sort>).

*Авторкою оптимізовано технологічні параметри отримання композиційних порошків методом рідкофазного спікання, досліджено вплив співвідношення тугоплавкої та металеві складових системи  $TiB_2-(Fe-Mo)$  на структуру порошків та плазмових покриттів, визначено механізми зношування покриттів в умовах абразивного середовища.*

10. Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Krasovskyi V., Pareyko M.. Wettability and interfacial behavior "Fe-based self-fluxing alloy – refractory compound" systems. *Journal of Superhard Materials*. 2017. Vol. 39. С. 99–105. (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85018883005&origin=resultslist&sort>).

*Дисертантці належить вивчення особливостей контактної взаємодії в системах  $FeNiCrBSiC-MeB_2$ .*

11. **Storozhenko M.**, Umanskii A., Stelmach O., Pukhachevska Ye., Kostenko O., Bondarenko O. Effect of molybdenum additions on the structure of  $TiB_2-(Fe-Mo)$  Composite Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 57, № 3–4. P. 200–208. (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052395244&origin=resultslist&sort>).

*Особистий внесок дисертантки полягає в аналізі результатів ДТА та вивченні особливостей структурно-фазового складу композиційних матеріалів  $TiB_2-80\%мас.(Fe-Mo)$  з різним вмістом молібдену.*



12. Umanskyi O. P., **Storozhenko M. S.**, Koshelev M. V., Vasylykivska M. A., Tymofeeva I. I. Effect of FeNiCrBSiC–MeB<sub>2</sub> material composition on the oxidation behavior at high temperatures. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 2019. Vol. 57, № 11–12. P. 670–678. (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85065500526&origin=resultslist&sort>).

*Дисертантці належить аналіз результатів ДТА та вивчення хімічного складу продуктів окислення композиційних матеріалів систем Fe(Ni)CrBSiC–MeB<sub>2</sub>, що дозволило пояснити закономірності окислення розроблених композитів.*

13. Уманский А. П., **Стороженко М. С.**, Акопян В. В. Дослідження контактної взаємодії TiB<sub>2</sub> з сплавами Fe–Mo. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2011. Вып. 44. С. 38–45.

*Авторкою проведено дослідження закономірностей кінетики змочування в системі TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo).*

14. Уманский А. П., Терентьев А. Е., **Стороженко М. С.**, Бондаренко А. А. Влияние добавок TiB<sub>2</sub> на структуру и свойства плазменных покрытий на основе NiCrSiB. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 10 (97). С. 50–55.

*Авторкою проведено триботехнічні випробування та виявлено вплив кількості добавок TiB<sub>2</sub> (10–40 мас.%) до самофлюсівного сплаву на зносостійкість плазмових покриттів*

15. Уманский А. П., **Стороженко М. С.**, Акопян В. В., Марценюк И. С. Электроискровое упрочнение стали композиционными материалами системы TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo). *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 9 (96). С. 214–219.

*Дисертанткою отримано електроіскрові покриття на сталі розробленими електродами ТБФМ системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo), вивчено особливості формування структури та механізми зношування отриманих покриттів.*

16. Уманский А. П., Терентьев А. Е., Красовский В. П., **Стороженко М. С.**, Марценюк И. С. Исследование закономерностей смачивания боридов циркония, титана, хрома и карбида титана самофлюсующимся сплавом на никелевой основе. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2012. Вып. 45. С. 79 – 86.

*На основі даних по вивченню кінетики змочування та міжфазної взаємодії в системах «самофлюсівний сплав NiCrBSiC – MeB<sub>2</sub>» авторкою обґрунтовано вибір зміцнюючої добавки до сплаву NiCrBSiC.*

17. Уманский А. П., Акопян В. В., **Стороженко М. С.**, Бондаренко А. А., Гальцов К. Н. Структура и свойства детонационных покрытий из композиционных порошков системы TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo). *Наукові нотатки* 2013. Выпуск 41, часть 1. С. 247–253.

*Особистий внесок дисертантки – дослідження структури композиційних порошкових матеріалів та детонаційних покриттів системи TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo).*

18. Уманский А. П., Терентьев А. Е., **Стороженко М. С.**, Кисель В. М., Евдокименко Ю. И., Варченко В. Т. Влияние дисперсных добавок диборида титана на структуру и свойства HVOF-покрытий системы (Ni–Cr–B–Si)–TiB<sub>2</sub>. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 9 (106). С. 188–194.

*Авторкою отримано композиційні порошки для HVOF-напилення, вивчено структурно-фазовий склад та механізми зношування отриманих покриттів.*

19. **Стороженко М. С.** Механізми зношування плазмових покриттів системи  $\text{NiCrSiB-TiB}_2$  в умовах тертя ковзання без мастила. *Проблеми трибології*. 2013. № 4. С. 121–128.

*Авторкою отримано композиційні порошки для напилення, вивчено зносостійкість та механізми зношування плазмових покриттів системи  $\text{NiCrSiB-TiB}_2$  в умовах тертя ковзання без мастила в парі зі сталлю.*

20. Уманский А. П., **Стороженко М. С.**, Терентьев А. Е., Акопян В. В. Плазменные покрытия системы  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-Mo)}$ . *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 7 (114). С. 6–11.

*Дисертанткою вивчено структуру плазмових покриттів системи  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-Mo)}$  та їх зносостійкість, видано рекомендації щодо застосування.*

21. **Storozhenko M.**, Umanskyi O., Terentjev O., Kostenko O. Influence of counterbody material on sliding wear behavior of  $\text{NiCrBSi-TiB}_2$  plasma sprayed material. *Проблеми трибології*. 2016. № 4. С. 32–39.

*Особистий внесок дисертантки полягає у вивченні механізмів зношування плазмового покриття  $\text{NiCrSiB-20мас \%TiB}_2$  в парі з покриттями  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .*

22. Уманский А. П., **Стороженко М. С.**, Стельмах А. У., Костенко А. Д. Формирование структурно-фазового состава композиционных материалов системы  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-13мас.\%Mo)}$ . *Наукові нотатки*. 2017. Випуск 59. С. 294–299.

*Авторкою досліджено вплив співвідношення тугоплавкої та металеві складових на структуру, зносостійкість та механізми зношування композиційних матеріалів системи  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-13мас.\%Mo)}$ .*

23. Уманский А. П., Сироватка В. Л., **Стороженко М. С.**, др. Особенности получения композиционных порошковых материалов на основе диборида титана и покрытий из них. *Порошковая металлургия*. 2019. № 5/6. С. 137–144.

*Особистий внесок дисертантки полягає в дослідженні впливу технологій отримання композиційних порошків  $\text{TiB}_2\text{-40мас.\%(Fe-13мас.\%Mo)}$  на структуру плазмових покриттів.*

#### Матеріали конференцій:

24. Уманський О. П., **Стороженко М. С.**, Акопян В. В. Дослідження закономірностей змочування та контактної взаємодії в системах  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-Mo)}$ . *Інженерна механіка та транспорт: матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених (Львів, 24-26 листопада 2011 р)*. Львів, 2011. С. 62.

*Авторкою виконано аналіз структур зон контактної взаємодії в системах  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-Mo)}$ .*

25. Акопян В. В., **Стороженко М. С.**, Уманский А. П., Марценюк И. С. Формирование структурно-фазового состава композиционных материалов на основе диборида титана с железо-молибденовой связкой. *Материаловедение тугоплавких соединений: труды III международной Самсоновской конференции (Киев, 23–25 мая 2012 г)*. Киев, 2012. С. 25.

*Авторкою вивчено особливості формування структури композиційних матеріалів на основі  $\text{TiB}_2$  з металевою зв'язкою  $\text{Fe-13мас.\%Mo}$ .*

26. Уманский А. П., Акоюн В. В., **Стороженко М. С.**, Марценюк И. С. Формирование износостойких ЭИЛ покрытий системы  $TiB_2-(Fe-Mo)$ . *Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва і утилізації виробів: матеріали міжнародної конференції* (Кацивелі, 24-28 вересня 2012 р.). Кацивелі, 2012. С. 156.

*Особистий внесок дисертантки – оптимізація технологічних параметрів електроіскрового легування сталі розробленими електродами ТБФМ.*

27. Уманский А. П. **Стороженко М. С.**, Акоюн В. В. Упрочнение деталей авиационной наземной техники газотермическими покрытиями системы  $TiB_2-(Fe-Mo)$ . *Авіа-2013: матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції*. Київ, 2013. С. 13.9–13.12.

*Авторкою встановлено вплив технологій детонаційного та плазмового напилення на особливості формування структури та триботехнічні властивості покриттів системи  $TiB_2-(Fe-Mo)$ .*

28. Umanskyi O., Hussainova I., **Storozhenko M.**, Terentjev O., Antonov M. Sliding wear behaviour of NiCrSiB– $TiB_2$  plasma sprayed coatings. *Biomechanic and Mechanic: Processing of the 9<sup>th</sup> Baltic-Buylgarian Conference* (Riga, June 17-18, 2013). Riga, 2013. – P. 250 –258.

*Авторкою проведено триботехнічні випробування плазмового покриття NiCrSiB-20мас.%  $TiB_2$  в парі тертя з різними контртілами.*

29. **Стороженко М. С.** Акоюн В. В. Формирование износостойких плазменных покрытий системы  $TiB_2-(Fe-Mo)$ . *HighMatTech-2013: материалы международной конференции* (Киев, 7–11 октября 2013). Киев, 2013. С. 315.

*Дисертанткою розроблено порошки та вивчено структурно-фазовий склад плазмових покриттів системи  $TiB_2-(Fe-Mo)$ .*

30. Ильющенко А. Ф., Лецко А. И., Реутенко Ю. А., Гамзелева Т. В., **Стороженко М. С.**, Яковлева М. С., Уманский А. П. Композиционные СВС-порошки  $TiB_2/Fe-Mo$  для износостойких газотермических покрытий с повышенными свойствами. *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы XI международной научно-технической конференции* (Минск, 28–30 мая 2014 г.). Минск, 2014. С. 374–375.

*Особистий внесок дисертантки в дану роботу – обґрунтування складу композиційних порошків для нанесення плазмових покриттів.*

31. Umanskyi O., Hussainova I., **Storozhenko M.**, Terentjev O., Antonov M. Effect of speed on sliding wear behavior of NiCrSiB– $TiB_2$  plasma sprayed coatings. *The 22<sup>th</sup> International Baltic Conference of Engineering Materials&Tribology: Abstract book* (Riga, November 14–15, 2013). Riga, 2013. P. 17.

*Авторкою вивчено вплив швидкості на зносостійкість та механізми зношування плазмових покриттів NiCrSiB-20мас.% $TiB_2$ .*

32. Umanskyi O., Hussainova I., **Storozhenko M.**, Terentjev O., Antonov M. Effect of  $TiB_2$  additives on wear behavior of NiCrBSiC-based plasma sprayed coatings under unlubricated conditions. *The 23<sup>th</sup> International Baltic Conference Materials Engineering: Abstract book* (Kaunas, October 23-24, 2014). Kaunas, 2014. P. 45.

*Дисертанткою обґрунтовано механізми зношування покриттів на основі самофлюсівного сплаву з добавками 10, 20, 40 мас.%.  $TiB_2$ .*

33. Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Krasovskiy V., Pareyko M. Development of FeNiCrBSiMo– $TiB_2$  composite materials for the thermal spraying of protective coatings. *E–MRS 2014 Fall Meeting: Abstract book*. Warsaw, 2014. P. 266.

*Авторці належить отримання композиційних порошків системи FeNiCrBSiMo– $TiB_2$  методом рідкофазного спікання з наступним подрібненням.*

34. Pareyko M., **Storozhenko M.**, Umanskyi O., O.Poliarus. Self-fluxing alloy with  $TiB_2$  additives for the spraying wear-resistant coatings. *The 11<sup>th</sup> conference for young scientists in ceramics: Programme and book of abstracts* (Novi Sad, Oktober 21–24, 2015). Novi Sad. 2015. P. 99.

*Особистий внесок дисертантки полягає в обґрунтуванні складу композиційних порошків для нанесення плазмових покриттів.*

35. **Storozhenko M. S.**, Umanskyi O. P., Martzenuk I. S. The effect of  $TiB_2$  nanoparticles on the structure of  $TiB_2$ –(Fe–13wt.%Mo) composite materials *Nanotechnology and nanomaterials: Abstract book* (Chernivtsy, August 21–26, 2017). Chernivtsy, 2017. P. 324.

*Дисертанткою вивчено вплив нанорозмірних частинок  $TiB_2$  на формування структурно-фазового складу композиційних матеріалів  $TiB_2$ –(Fe–13мас.%Mo).*

36. **Storozhenko M.**, Umanskyi O., Bondarenko O., Kostenko O. Composite powder materials of FeNiCrBSiC– $CrB_2$  system for plasma-sprayed coatings. *The 12<sup>th</sup> conference for young scientists in ceramics: Programme and book of abstracts* (Novi Sad, Oktober 21–24, 2017). Novi Sad, 2017. P. 99.

*Авторкою оптимізовано технологічні параметри рідкофазного спікання і вивчено структуру композиційних порошкових матеріалів системи FeNiCrBSiC– $CrB_2$ .*

37. Umanskyi O. P., **Storozhenko M. S.**, Koshelev M. B., Vasylykivska M. A., Tymofeeva. I. I. High-temperature oxidation behaviour of Fe(Ni)CrBSiC– $TiB_2$  composite powder materials. *Materials Science of refractory compounds: Processing of the 6<sup>th</sup> International Samsonov Conference* (Kyiv, May 22–24, 2018.) Kyiv, 2018. C. 130.

*Авторці належить підготовка зразків для проведення ДТА, вивчення складу оксидів, що формуються при окисленні порошків та компактних композиційних матеріалів системи Fe(Ni)CrBSiC– $TiB_2$ .*

38. **Storozhenko M.**, Umanskyi O., Terentjev O., Martsenyuk I., Umanskyi O. Development of NiFeCrBSiC– $MeB_2$  composite materials for wear-resistant coatings deposition. *Advanced Materials and Technologie: catalogue of the 10<sup>th</sup> International conference* (Ninghai, October 24–26, 2018). Ninghai, 2018. P. 26.

*Особистий внесок дисертантки в дану роботу – вивчення структури композиційних матеріалів та покриттів системи NiFeCrBSiC– $MeB_2$ , проведення триботехнічних випробувань.*

39. Umanskyi O., **Storozhenko M.**, Antonov M., Koval O., Terentyev O., Martsenyuk I. Improvement of wear-resistance of NiFeCrBSiC plasma-sprayed coatings with  $MeB_2$  additives. *Welding and Related Technologies – Present and future* (Kyiv, December 5–6, 2018). Kyiv, 2018. C.125–126.

*Дисертанткою обґрунтовано вплив добавок  $TiB_2$  та  $CrB_2$  на підвищення зносостійкості покриттів на основі самофлюсівних сплавів.*

**Список публікацій здобувача, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

40. Пат. на корисну модель №78156 Україна, МПК С22С 29/14. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану / Уманський О. П., Акопян В. В., **Стороженко М. С.**, Закієв І. М., Костенко О. Д.; заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – № u 201210411; заявл. 03.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.
41. Пат. на корисну модель №86595 Україна, МПК С22С 32/00. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану / Уманський О. П., Терентьєв О. Є., **Стороженко М. С.**, Полярус О. М.; заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – № u 201306383; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. №10.

**АНОТАЦІЯ**

**Стороженко М. С. Фізико-технологічні засади створення композиційних матеріалів системи «сплав на основі Ni(Fe) – MeB<sub>2</sub>» для покриттів з високим рівнем зносостійкості – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми 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) – MeB<sub>2</sub>» з керованим структурно-фазовим складом.

Для отримання композиційних порошкових матеріалів систем TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) та NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub> пропонується метод рідкофазного спіканням спресованих заготовок в вакуумі з подальшим подрібненням. При такому способі отримання порошків процеси міжфазної взаємодії між сплавом та тугоплавкою сполукою визначають структуру і властивості покриттів. Тому визначення оптимального складу композиційних матеріалів систем TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) та NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub> здійснено шляхом вивчення закономірностей змочування та міжфазної взаємодії між тугоплавкими сполуками та металевими сплавами.

В процесі рідкофазного спікання композиційних матеріалів TiB<sub>2</sub>–(Fe–13мас.%Mo) відбувається хімічна взаємодія з утворенням in-situ складних боридів Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>. За рахунок високої твердості (22–24 ГПа) бориди Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> ефективно підвищують зносостійкість газотермічних та електроіскрових покриттів в умовах абразивного зношування та тертя ковзання. За рахунок оптимального співвідношення зміцнюючих частинок боридів (TiB<sub>2</sub> та Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>) та металевої матриці плазмові та детонаційні покриття з розробленого композиційного матеріалу TiB<sub>2</sub>–40мас.%(Fe–13мас.%Mo) характеризуються зносостійкістю вищою за покриття з стандартного твердого сплаву ВК-6.

За результатами вивчення змочування та контактної взаємодії для зміцнення серійних самофлюсівних сплавів NiCrBSiC (ПГ-CP3) та FeNiCrBSiC (ПГ-Ж14) обрано добавки TiB<sub>2</sub> та CrB<sub>2</sub>. Встановлено що в результаті хімічної взаємодії при рідкофазному спіканні в системах NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub> відбувається утворення in-situ складних боридів та карборидів хрому, які за рахунок високої твердості (20-24 ГПа) зміцнюють структуру покриттів. Запропоновані в роботі технологічні рішення дають можливість керувати структурно-фазовим складом композиційних матеріалів та газотермічних покриттів систем NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub>, а саме кількістю та розміром утворених in-situ боридних та карборидних фаз.

В умовах тертя при підвищених температурах (200–400 °C) розроблені покриття систем NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub> характеризуються зносостійкістю в 2–3 рази вищою порівняно з серійними покриттями ПГ-CP3, ПГ-Ж14 та ПС-12НВК-01.

Розроблені газотермічні та електроіскрові покриття пройшли випробування на промислових підприємствах України.

**Ключові слова:** композиційний порошковий матеріал, покриття, структура, міжфазна взаємодія, змочування, рідкофазне спікання, зносостійкість, плазмове і детонаційне напилення, електроіскрове легування.

**Стороженко М. С. Физико-технологические основы создания композиционных материалов системы «сплав на основе Ni(Fe) – MeB<sub>2</sub>» для покрытий с высоким уровнем износостойкости – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы повышения износостойкости покрытий в условиях трения скольжения и абразивного износа путем разработки и апробации новых подходов к созданию композиционных материалов системы «сплав на основе Ni(Fe) – MeB<sub>2</sub>» с управляемым структурно-фазовым составом.

Для получения композиционных порошковых материалов систем TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) и NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub> предлагается метод жидкофазного спекания спресованных заготовок в вакууме с последующим измельчением спеков. При таком способе получения порошков процессы межфазного взаимодействия между сплавом и тугоплавким соединением определяют структуру и свойства покрытий. Поэтому определение оптимального состава композиционных материалов систем TiB<sub>2</sub>–(Fe–Mo) и NiFeCrBSiC–MeB<sub>2</sub> проведено путем изучения закономерностей смачивания и межфазного взаимодействия между тугоплавкими соединениями и металлическими сплавами.

В процессе жидкофазного спекания композиционных материалов TiB<sub>2</sub>–(Fe–13мас.%Mo) происходит химическое взаимодействие с образованием in-situ сложных боридов Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>. За счет высокой твердости (22–24 ГПа) бориды Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> эффективно повышают износостойкость газотермических и электроискровых покрытий в условиях абразивного износа и трения скольжения. За счет оптимального соотношения упрочняющих частиц боридов (TiB<sub>2</sub> и

$\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ ) и металлической матрицы плазменные и детонационные покрытия из разработанного композиционного материала  $\text{TiB}_2$ -40мас.%(Fe-13мас.%Mo) характеризуются износостойкостью выше по сравнению с покрытиями из стандартного твердого сплава ВК-6.

По результатам изучения смачивания и контактного взаимодействия для упрочнения серийных самофлюсующихся сплавов NiCrBSiC (ПГ-СР3) и FeNiCrBSiC (ПГ-Ж14) выбрано добавки  $\text{TiB}_2$  и  $\text{CrB}_2$ . Установлено, что в результате химического взаимодействия при жидкофазном спекании в системах NiFeCrBSiC- $\text{MeB}_2$  происходит образование in-situ сложных боридов и карборидов хрома, которые за счет высокой твердости (20–24 ГПа) способствуют упрочнению структуры покрытий. Предложенные в работе технологические решения дают возможность управлять структурно-фазовым составом композиционных материалов и газотермических покрытий систем NiFeCrBSiC- $\text{MeB}_2$ , а именно количеством и размером образованных in-situ боридных и карборидных фаз.

В условиях трения скольжения при повышенных температурах (200–400 °С) разработанные покрытия систем NiFeCrBSiC- $\text{MeB}_2$  характеризуются износостойкостью в 2–3 раза выше по сравнению с серийными покрытиями ПГ-СР3, ПГ-Ж14 и ПС-12НВК-01.

Разработанные газотермические и электроискровые покрытия прошли испытания на промышленных предприятиях Украины.

**Ключевые слова:** композиционный порошковый материал, покрытие, структура, межфазная взаимодействие, смачивание, жидкофазное спекание, износостойкость, плазменное и детонационное напыление, электроискровое легирование.

**Storozhenko M. S. Physical-technological fundamentals of the creation of "Ni(Fe)-based alloy  $\text{MeB}_2$ " composite materials for coatings with high wear-resistance – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Science Degree in specialty 05.02.01 – Materials Science. – Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis deals with the solution of important scientific and technical problem of increasing the coatings wear resistance by the development and testing of new approaches to the creation of "Ni(Fe)-based alloy  $\text{MeB}_2$ " composite materials with controlled structural-phase composition.

The method of liquid-phase sintering in a vacuum environment, followed by grinding and classification, is proposed for obtaining the composite powder materials of  $\text{TiB}_2$ -(Fe-Mo) and NiFeCrBSiC –  $\text{MeB}_2$  systems. The processes of interfacial interaction between the alloy and the refractory compound during sintering define the coatings structure and properties. Therefore, the composite materials composition was determined by studying the wetting behaviour and interfacial interaction between the refractory compounds and the metal alloys.

The chemical interaction during the  $\text{TiB}_2$ -(Fe-13wt.%Mo) composite materials sintering leads to the in-situ formation of  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  borides. Due to the high hardness

(22–24 GPa) the  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  borides effectively increase the wear resistance of gas-thermal and electro-spark coatings under the conditions of abrasive wear and sliding friction. Due to the optimum ratio of boride reinforcements ( $\text{TiB}_2$  and  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  particles) and metal matrix, the developed  $\text{TiB}_2$ -40wt.%(Fe-13wt.% Mo) plasma and detonation coatings are characterized by higher wear resistance than that of the WC-6%Co coatings.

According to the results of wetting behaviour investigation, the  $\text{TiB}_2$  and  $\text{CrB}_2$  additives were selected to reinforce the NiCrBSiC (ПГ-CP3) and FeNiCrBSiC (ПГ-Ж14) self-fluxing alloys. The chemical interaction in NiFeCrBSiC –  $\text{MeB}_2$  systems results in the in-situ formation of chromium borides and carbides, which due to high hardness (20–24 GPa) reinforce additionally the coatings structure. The technological solutions, proposed in the term of thesis, make it possible to control the structural-phase composition of composite materials and thermal-sprayed coatings of NiFeCrBSiC- $\text{MeB}_2$  systems, namely the amount and size of in-situ formed chromium boride and carboboride phases.

Under the conditions of sliding friction at high temperatures (200–400 °C), the developed thermal-sprayed coatings NiFeCrBSiC- $\text{MeB}_2$  have wear resistance by 2-3 times higher than that of commercial coatings FeNiCrBSiC (ПГ-CP3, ПГ-Ж14) and NiCrBSiC-35wt.WC (ПГ-12HBK-01).

The developed thermal-sprayed and electrospark coatings were tested at industrial enterprises of Ukraine.

**Keywords:** composite powder material, coating, structure, interfacial interaction, wetting, liquid-phase sintering, wear resistance, plasma and detonation spraying, electrospark alloying.