НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І.М. ФРАНЦЕВИЧА

КИРИЛЮК ЄВГЕНІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 621.762.8

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФАЗО- І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВИХ ЗНОСОКОРОЗІЙНОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ХРОМИСТА СТАЛЬ-ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИЙ ФЕРОХРОМ

Спеціальність 05.16.06 – «Порошкова металургія і композиційні матеріали»

(13 Механічна інженерія)

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, **Маслюк Віталій Арсенійович** провідний науковий співробітник відділу зносостійких та корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, **Сизоненко Ольга Миколаївна** головний науковий співробітник в.о. зав. відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

доктор технічних наук, доцент **Богомол Юрій Іванович**, в.о. зав. кафедри «Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії» Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ

Захист відбудеться «01» березня **2021 р.** о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.207.03 Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ–142, вул. Кржижановського, 3.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ – 142, вул. Кржижановського, 3.

Автореферат розісланий « 25» січня **2021 р.**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради **Д 26.207.03**
кандидат технічних наук Хоменко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вдосконалення існуючих і розробка нових порошкових конструкційних матеріалів з підвищеними фізико-механічними, триботехнічними та функціональними властивостями є одним з напрямків розвитку сучасного матеріалознавства. Зростаючий дефіцит сировинних ресурсів для отримання основних і легуючих компонентів (Ni, Mo, Cr, V та ін.), що використовуються при створенні зносостійких матеріалів класу карбідосталей є визначальним і активує пошуки альтернативних складів матеріалів для виготовлення яких застосовуються доступні та недефіцитні складові вітчизняного виробництва.

Як відомо основу сучасних карбідосталей складають високолеговані нержавіючі, швидкоріжучі, хромомолібденові та мартенситостаріючі сталі, а в якості твердої складової в них використовуються переважно карбід або карбонітрид титану, що забезпечує високу твердість та зносостійкість виробів із них.

Вагомий внесок в розробку та застосування карбідосталей зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: М.С. Ковальченко, Г.А. Баглюк, Г.Г. Сердюк, В.А. Маслюк, О.М. Сизоненко, О.М. Шевченко, С.С. Кіпарісов, Ю.Г. Гуревич, В.К. Нарва, Н.Р. Фраге, Я.П. Кюбарсепп, F. Frehn, H.Gzewe, M.Mal Epner, P.H. David та ін.

До недоліків класичних карбідосталей відносяться відносно високі температури рідкофазного вакуумного спікання, схильність до росту зерна твердої складової, підвищена окислюваність, що приводить до погіршення фізико-механічних властивостей і недостатня корозійна стійкість.

Відомі також дослідження спрямовані на створення більш дешевших карбідосталей на основі системи залізо-карбід хрому Cr_3C_2 та хромиста сталь-карбід хрому. До недоліків цих розробок слід віднести використання дорогого і вже дефіцитного Cr_3C_2, недостатню стійкість до корозії заліза необхідність використання готових порошків хромистих сталей для підвищення корозійної стійкості карбідосталей. Композити типу нержавіюча сталь аустенітного класу – карбід хрому – дисиліцид молібдену належать до класу порошкових триботехнічних матеріалів, мають крупнозернисту пористу структуру, що негативно позначається на їх фізико-механічних властивостях і по суті вони не є карбідосталями.

На відміну від відомих рішень в роботі запропоновано для отримання хромистих карбідосталей використання замість високовартісного карбіду хрому Cr_3C_2 дешевого і недефіцитного високовуглецевого ферохрому ФХ800, а в якості вихідної металевої складової – заліза, яке в процесі рідкофазного спікання і взаємодії з високовуглецевим ферохромом перетворюється на хромисту феритно-аустенітну сталь типу Х17. Основу ферохрому ФХ800 складає подвійний залізохромовий карбід типу M_7C_3, який характеризується високою мікротвердістю, корозійною стійкістю, окалиностійкістю. Плавлений ферохром промислового виробництва, в кусковому або гранульованому стані, завдяки високій крихкості досить легко подрібнюється

в порошок придатний для одержання зносостійких і корозійностійких порошкових матеріалів і виробів із них. Тому дослідження умов отримання, структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі системи залізо–високовуглецевий ферохром типу карбідосталей є важливим і актуальним завданням, як в науковому так і в прикладному аспектах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає основним науковим напрямкам робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України і виконана в рамках відомчої і цільової тематики за темами: ІІІ-3-15, ІІІ-25-17(Ц), ІІ-10-16(Р).

- ІІІ-3-15 (№ 0112U002305) «Розробка фізико-хімічних основ процесів консолідації та структуроутворення високозносостійких металоматричних композитів на основі сплавів заліза, алюмінію та титану з високомодульними наповнювачами».
- ІІІ-25-17(Ц) (№ 0117U000251) «Фізико-технологічні основи процесів структуроутворення при синтезі високодисперсних порошкових систем і отриманні з їх використанням залізовуглецевих ливарних сплавів та спечених композитів з підвищеним рівнем механічних та функціональних властивостей».
- ІІ-10-16(Р) (№ 0113U005064) «Розробка і впровадження технології виготовлення новітніх високозносостійких дисперснозміцнених композитів на основі залізовуглецевих сплавів для деталей привалкової арматури і вузлів тертя металургійного та гірничовидобувного устаткування».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення на основі системи залізо-високовуглецевий ферохром нових зносокорозійностійких порошкових матеріалів класу карбідосталей за результатами дослідження закономірностей формування їх структури, фізико-механічних, триботехнічних, корозійних та функціональних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

1. За результатами критичного аналізу літературних джерел, з урахуванням сучасної будови діаграми стану Fe–Cr–C, даних про взаємодію складних хромозалізних карбідів з залізом і його сплавами обґрунтувати вибір перспективних складів хромистих карбідосталей.

2. Побудувати політермічний переріз діаграми стану Fe-Cr-C через Me_7C_3-Fe (Fe - ФХ800).

3.Встановити на підставі результатів мікроструктурного, рентгенофазового, мікродюрометричного і мікрорентгеноспектрального аналізів механізм фазових перетворень при спіканні і формуванні структури композиційних матеріалів Fe–ФХ800 отриманих методом рідкофазного спікання.

4. Дослідити вплив легуючих елементів та сполук на температуру спікання, фазовий склад, структуру і властивості карбідосталей. Визначити

перспективні склади і режими отримання карбідосталей. Дослідити основні фізико–механічні, триботехнічні і корозійні властивості отриманих матеріалів.

5. Встановити оптимальний склад і умови одержання карбідосталей.

6 Провести дослідно-виробничу апробацію зразків виробів і надати рекомендації з ефективних галузей застосування хромистих карбідосталей.

Об'єкт дослідження: процеси фазо- і структуроутворення і формування властивостей при спіканні композитів на основі системи залізо-високовуглецевий ферохром.

Предмет дослідження: вплив вмісту ферохрому, добавок боридів нікелю та титану на температуру спікання, ущільнення, структуру, фізико-механічні, триботехнічні, корозійні та функціональні властивості порошкових хромистих карбідосталей.

Методи дослідження: оптична та електронна мікроскопія, металографічний, хімічний, мас-спектрометричний, мікрорентгеноспектральний, рентгеноструктурний, диференціальний термічний аналізи, випробування на твердість, мікротвердість, міцність на згин та в'язкість руйнування. Триботехнічні випробовування, визначення абразивної і корозійної стійкості, дослідження функціональних властивостей матеріалів з використанням сучасного програмного забезпечення.

Експериментальна частина досліджень реалізована на сучасному науково-дослідному, випробувальному устаткуванні Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України та НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського.

Наукова новизна:

1. Вперше, для створення зносокорозійностійкого композиційного матеріалу класу хромистої карбідосталі, запропоновано і експериментально підтверджено ефективність використання вихідних сумішей з порошків заліза та високовуглецевого ферохрому.

2. Вперше, аналітично-графічним методом побудовано політермічний переріз діаграми стану Fe-Cr-C через $(Cr_{0,81}Fe_{0,19})_7C_3$-Fe (ФХ800-залізо). Це дозволило встановити існування широких областей 2-х фазних рівноваг $\alpha+(Cr,Fe)_7C_3$ та $\gamma+(Cr,Fe)_7C_3$ придатних для створення хромистих карбідосталей, оцінити концентрацію компонентів, температуру утворення евтектики і вибрати перспективні склади та доцільний інтервал температур спікання композитів з різним вмістом ФХ800.

3. На основі дослідження закономірностей процесів спікання фазо- і структуроутворення порошкових карбідосталей «залізо–ФХ800», результатів мікродюрометричного, рентгенофазового і мікрорентгеноспектрального аналізів вперше встановлено механізм взаємодії частинок порошку високовуглецевого ферохрому із матрицею на основі заліза. Показано, що він полягає в утворенні ряду складних залізо–хромистих карбідів, характерною особливістю яких є суттєві зміни хімічного і фазового складу карбідної

складової композиту в інтервалі температур спікання 1000-1300 °С, які описуються серією фазових перетворень: $M_7C_3 \rightarrow M_3C$ (1000-1150 °С) → M_7C_3 (1200 °С) → M_3C_2 (1250-1300 °С). Виявлено, що в результаті взаємодії заліза з високовуглецевим ферохромом, в процесі спікання, в структурі сплаву утворюється хромиста сталь у вигляді матричної металевої фази композиту.

4. Вперше запропоновано і досліджено вплив легуючих добавок боридів Ni та Ti, на особливості структуроутворення при спіканні хромистої карбідосталі. Показано, що борид нікелю активує усадку, знижує температуру спікання композиту на 50 °С, а диборид титану окрім зниження температури спікання, за рахунок утворення складних залізохромових карбоборидів і подвійного дибориду титану-хрому, приводить до підвищення на 10-13 % межі міцності на згин, в 1,8-2,5 рази зносостійкості матеріалу та 4-5 разів – корозійної стійкості композиту.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено новий склад карбідосталі на основі системи «Залізо-високовуглецевий ферохром ФХ800» з високим опором до зносу та корозії, яка може ефективно використовуватися в умовах інтенсивного абразивного зносу в корозійноактивному середовищі (Патент № 128532 від 25.09.18 р.).

2. Наведено рекомендації щодо використання розроблених матеріалів в залежності від кількості карбідної та металевої складових, які дозволяють відповідно до умов експлуатації деталей вибирати найбільш придатний склад карбідосталі.

3. Розроблено та відпрацьовано технологію виготовлення з хромистої карбідосталі вставок молотків дробарок для приготування кормів. Виробничі випробування молотків, на ВП НУБІП України «Агрономічна дослідна станція», армованих вставками із розробленої карбідосталі показали підвищення їх довговічності в 2,5–3 рази, порівняно з серійними молотками із термообробленої сталі 65Г при подрібненні фуражного зерна (пшениці, вівса, сої, ячменю, кукурудзи). Це забезпечує підвищення продуктивності кормо- подрібнення та зменшення витрат на заміну зношених деталей (Акт випробовувань від 20.11.2019 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні експериментальні результати роботи здобувачем отримано самостійно, або за його безпосередньої участі. Автором проведено аналіз літературних джерел, розроблено методику проведення досліджень, проведено обробку результатів та їх узагальнення, підготовлені наукові статті та доповіді для міжнародних конференцій. Автором разом з науковим керівником визначені мета, постановка задачі дослідження, обговорення та інтерпретація науково-експериментальних результатів. За результатами усіх етапів роботи здобувачем сформульовано основні висновки, положення та рекомендації дисертаційної роботи.

Апробація роботи. Головні результати дисертаційної роботи доповідались на наступних науково-технічних конференціях: XI Міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених

«Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, Україна, 2018), III Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием «Современные технологии композиционных материалов» (Уфа, Россия, 2018); 6th International Samsonov Conference «Materials Science of Refractory Compounds» (Kyiv, Ukraine, 2018); EURO PM2018 Congress & Exhibition. (Bilbao, Spain, 2018); Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (Київ,Україна, 2018); 10th international conference «Advanced materials and technologies». (Ninghai, China, 2018); 7-й Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее» (Днепр, Украина, 2018); 11-том Международном симпозиуме «Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (Минск, Белорусь, 2018); 13th Conference for young scientists in ceramics. (Novi Sad, Serbia, 2019); Eighteenth Young Researchers Conference «Materials Science and Engineering» (Belgrade, Serbia, 2019); 6th INTERNATIONAL CONFERENCE «HighMathTech» (Kyiv, Ukraine, 2019); XII Міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, Україна, 2019).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано **21** наукову працю, зокрема **8** статей у фахових вітчизняних та закордонних періодичних виданнях в галузі технічних наук, з яких **4** статті у виданні, що індексується в наукометричних базах даних «Scopus»**, 13** тез доповідей у збірниках відповідних наукових конференцій та отримано **1** патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, **5** розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Викладена на **6,4** авторських аркушах, включає **21** таблицю, **69** рисунків, **3** додатка, список використаних джерел із **124** найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертації, показано її актуальність, сформульовано мету і задачі дослідження, розглянуто наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі проаналізовано літературні дані щодо основних відомих порошкових зносостійких матеріалів, типу карбідосталей, конструкційного призначення, їх переваги та недоліки. Це дозволило зробити висновок про переважаючу роль фізико-механічних властивостей металевої складової, а також підкреслити внесок адгезійного зв'язку, на межі розділення тверда фаза – матриця, в проблемі забезпечення високих фізико-механічних та функціональних характеристик зносостійкого матеріалу.

Розглянувши основні типи зносостійких матеріалів, до яких належать: матеріали з нерівноважною структурою, композиційні матеріали на основі нержавіючих сталей з добавками твердих сполук, металоматричні матеріали, зносокорозійностійкі тверді сплави та карбідосталі, зроблено висновок, що карбідосталі за участю високовуглецевого ферохрому та заліза є малодослідженими, що суттєво обмежує галузі їх застосування в техніці. Разом з тим, вони є перспективними для виготовлення деталей з підвищеною зносостійкістю, які працюють в умовах абразивного зношування, дії сил тертя і корозійноактивних середовищ, а залізо та ФХ800, як вихідні компоненти, з економічної та технологічної точок зору, а також за рівнем фізико-механічних властивостей є цілком придатними для створення нових, недефіцитних зносокорозійностійких порошкових матеріалів.

Критичний огляд літературних даних, щодо методів отримання та їх впливу на формування структури і властивостей порошкових зносостійких матеріалів, вказує на те, що отримання виробів із них спіканням за участю рідкої фази є найбільш вживаним методом і дозволяє отримувати матеріали з мінімальною пористістю, дрібнозернистою структурою, що забезпечує їх високі фізико-механічні, трибологічні та корозійні властивості.

На основі літературного огляду зроблено висновки щодо актуальності роботи, сформульовано мету і завдання дослідження.

У другому розділі описано матеріали, устаткування і експериментальні методи та методики дослідження структури, фазового та хімічного складу, фізико-механічних, триботехнічних та корозійних властивостей матеріалів. У якості вихідних компонентів використовували суміші, які складалися з порошків заліза, високовуглецевого ферохрому та боридів нікелю і титану.

Розмел і отримання сумішей проводили в кульовому млині за режимами, які застосовуються при виробництві карбідохромових славів, що забезпечувало одночасно з подрібненням, отримання однорідної суміші складових без їх окиснення.

Дисперсність частинок суміші після розмелювання контролювали методом лазерного аналізу на приладі «PRO-7000». Критерієм оцінки ступеня розмелювання суміші була присутність в ній переважної кількості частинок із середнім розміром до 10 мкм.

Зразки складу Fe–ФХ800; Fe–ФХ800–Ni_3B; Fe–ФХ800–TiB_2 отримували спіканням у вакуумі при температурах: – 1100, 1150, 1200, 1250°С; та ізотермічній витримці: 30 хв. Мікроструктурний і мікрорентгеноспектральний аналізи проводили на растровому електронному мікроскопі РЕМ–106И і мікроаналізаторі MS-46. Визначення твердості проводилось на приладі ТК–2 за методом Роквелла (шкала А). Випробування зразків на згин проводили на машині РМ 102М. Випробування на зносостійкість проводили в парі з алмазним кругом АСВ160/12 на машині тертя М–22М та в парі зі сталлю ШХ15 у відповідності до ГОСТ16167–80.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу умов одержання на фазовий склад та структуру порошкових зносокорозійностійких матеріалів,

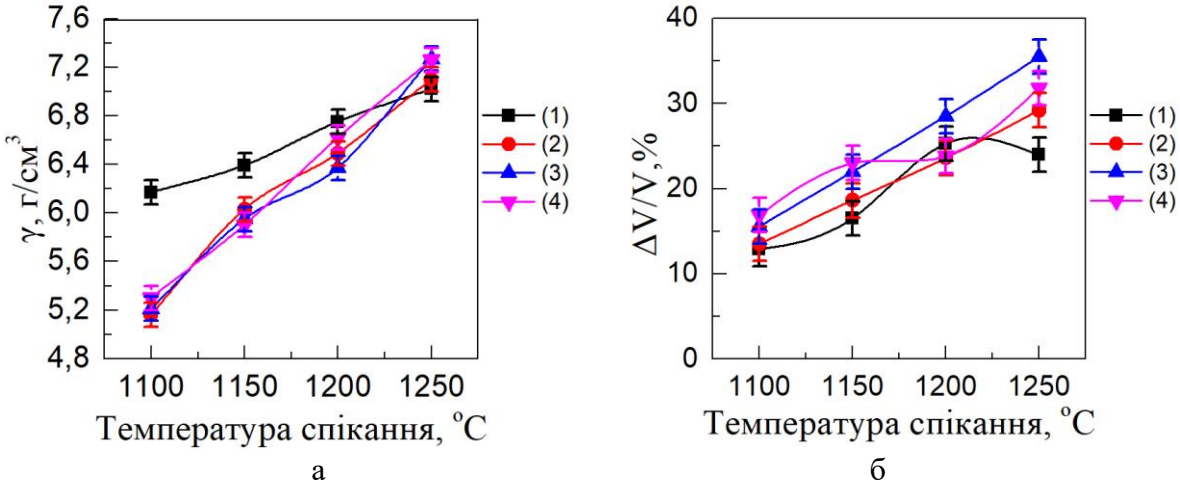
типу хромистих карбідосталей, отриманих спіканням. Встановлено, що високовуглецевий ферохром при спіканні активно взаємодіє із залізною основою, яка полягає у дифузії вуглецю і хрому із високовуглецевого ферохрому у матрицю, а заліза — із матриці в ФХ800 і супроводжується утворенням складних гетерофазних структур і збільшенням загальної кількості карбідної фази в матеріалі. В залежності від температури спікання, залізо, в результаті взаємодії з карбідною складовою ферохрому, утворює подвійні залізохромові карбіди різного хімічного складу. Оскільки основною твердою складовою високовуглецевого ферохрому ФХ800 є складний карбід типу $(Cr,Fe)_7C_3$, то така взаємодія зводиться до його розчинення в залізній матриці композиту.

Термічно активований процес фазових перетворень в системі 65%Fe-35%ФХ800 відбувається шляхом дифузії атомів хрому і вуглецю з карбіду M_7C_3 в залізо і зустрічного потоку атомів заліза із матриці в ФХ800.

Механізм карбідних перетворень досліджуваної системи можна представити у вигляді ланцюга: $M_7C_3 \rightarrow M_3C$ (1000-1150 °C) $\rightarrow M_7C_3$ (1200 °C) $\rightarrow M_3C_2$ (1250-1300 °C).

Згідно з мікрорентгеноспектральними дослідженнями, залізна матриця в процесі рідкофазного спікання збагачується хромом і за хімічним складом елементів представляє собою хромисту сталь типу Х17.

Для вибору оптимальних умов одержання і найбільш перспективного складу, досліджено вплив кількості високовуглецевого ферохрому (25-40 %, мас.) на густину, поруватість, об'ємну усадку (рис.1 *а,б*, рис.2), мікроструктуру та основні фізико-механічні властивості композитів Fe-ФХ800 спечених при 1100-1250°С.



а б

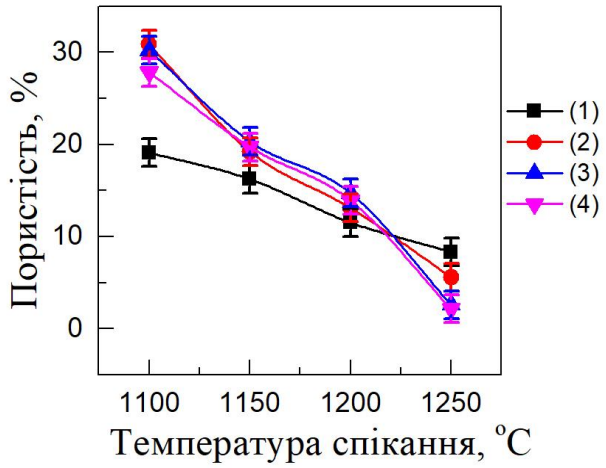
1-75Fe-25ФХ800; 2- 70Fe-30ФХ800; 3- 65Fe-35ФХ800; 4- 60Fe-40ФХ800 (%, мас.)

Рис.1 - Вплив температури спікання та кількості ФХ800 на густину (а) та об'ємну

Підвищення температури спікання до 1200–1250°С інтенсифікує процес ущільнення за рахунок механізму рідкофазного спікання (рис. 1 *а, б*). Встановлено, що максимальна усадка зразків спостерігається при

температурах спікання вище 1200°С та вмісті високовуглецевого ферохрому 35-40 (%, мас.) (рис. 1 *б*), що пояснюється утворенням значної кількості рідкої фази і реалізацією механізму рідкофазного спікання.

Підвищення температури спікання до 1250 °С приводить до зменшення поруватості карбідосталей. З рис.2 видно, що поруватість матеріалів, спечених при оптимальних температурах, з підвищенням вмісту ФХ800 зменшується від 8,3 до 2,6-2,15%.



1-75Fe-25ФХ800; 2- 70Fe-30ФХ800; 3- 65Fe-35ФХ800; 4- 60Fe-40ФХ800 (%, мас.)

Рис. 2 - Вплив температури спікання та кількості ФХ800 на поруватість матеріалів Fe-ФХ800

Порівняння властивостей сплавів з різним вмістом ФХ800 показало (табл. 1), що найкраще поєднання максимальної усадки, густини, мінімальної поруватості для усіх складів композитів, незалежно від вмісту ферохрому, спостерігається після спікання при 1250 °С та ізотермічній витримці 30 хв., що вказує на те, що ця температура є оптимальною.

Додаткова оцінка твердості і міцності на згин композитів, спечених при оптимальній температурі показало (табл.1), що максимальні значення цих характеристик забезпечуються при вмісті ферохрому 35-40(%, мас.).

Тому в подальших дослідженнях експерименти проводили з матеріалами вміст ферохрому в яких складав 35 (%, мас.).

Таблиця 1 – Вплив кількості високовуглецевого ферохрому на властивості композитів системи Fe-ФХ800, спечених при 1250 °С.

Склад матеріалу, % мас.	ΔV/V, %	γ, г/см^3	П $_{спечених}$, %	HRA	σ $_{згин}$, МПа
75Fe-25ФХ800	25,28	7,02	8,3	67	1100
70Fe-30ФХ800	29,2	7,1	5,6	73,2	1457
65Fe-35ФХ800	35,5	7,27	2,6	75,5	1712
60Fe-40ФХ800	31,8	7,13	2,15	75,17	1620,2

За результатами фазового аналізу, на рентгенограмі (рис.3) композиту 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) аустенітна структура представлена всім набором рентгенівських відображень, що належать γ-Fe фазі з параметром елементарної гратки 0,3607 нм. Рефлекси фаз (Cr, Fe) $_7C_3$ і α-Fe мають дуже

близькі кути відображення, тому на рентгенівському спектрі спеченого зразка вони збігаються. Однак, можна виділити рефлекс (220), за яким розрахований параметр гратки α-Fe. Значення a_{220} = 0,28694 нм свідчить про утворення твердого розчину на основі α-Fe.

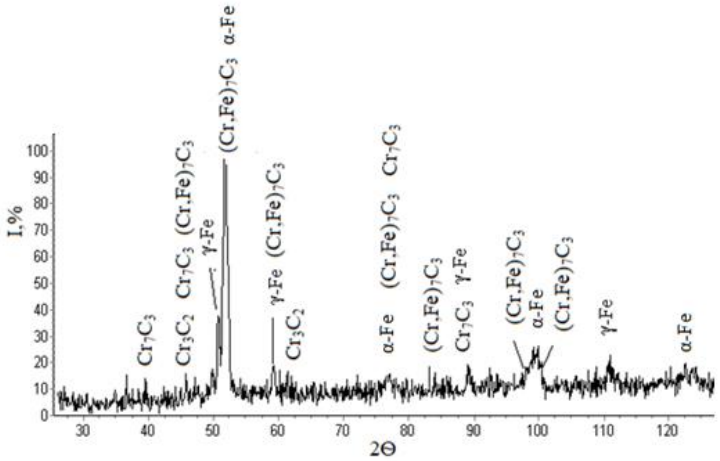


Рис. 3 - Дифрактограма спеченого при 1250 °С зразка матеріалу 65Fe–35ФХ800 (%, мас.)

Для порівняння, було досліджено вплив температури спікання на густину, об'ємну усадку, структуру та фазовий склад матеріалів систем хромиста сталь (Х13М2, Х17Н2)-35% ФХ800 та Fe-35% ФХ800. Встановлено, що заміна складу матричної фази несуттєво впливає на основні технологічні та фізико-механічні властивості матеріалів спечених при оптимальних температурах. Структура карбідосталей з твердою складовою із ФХ800 в кількості 35 (%, мас.) змінюється від 2-фазної, при використанні залізного порошку, до 3-фазної, при використанні порошків хромистих сталей Х13М2 і Х17Н2. Як уже було відмічено, залізна матриця в процесі рідкофазного спікання збагачується хромом і являє собою, за хімічним складом елементів, хромисту сталь типу Х17, що підтверджує економічну та технологічну доцільність використання більш дешевого порошку заліза замість готових легованих порошків хромистих сталей для одержання карбідосталі.

Для подальших досліджень фізико – механічних, триботехнічних та корозійних властивостей матеріалів на основі базового складу (65% Fe-35% ФХ800), були розроблені композити з легуючими добавками такими, як борид нікелю та борид титану.

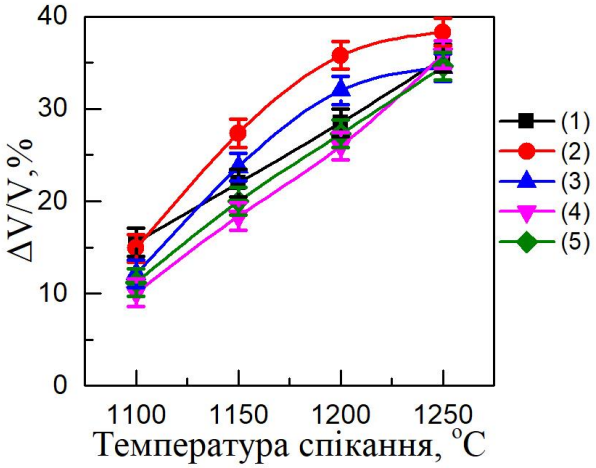
Відомо, що для активації процесу спікання і підвищення фізико-механічних властивостей порошкових зносостійких матеріалів на основі заліза ефективно використовуються добавки бору та боровмістних сполук.

Вибір вказаних добавок пояснюється тим, що окрім бору, нікель чинить позитивний вплив на сплави на залізній основі, розширюючи аустенітну область, знижує температуру початку і кінця мартенситного перетворення, підвищує окалиностійкість і опір корозії. Також відомо, що невеликі добавки (меньше 1%) бориду титану використовуються для підвищення твердості при

збереженні міцності класичних карбідосталей та безвольфрамових твердих сплавів.

Матеріли системи Fe-ФХ800-Ni_3B

Дослідження впливу температури спікання при ізотермічній витримці 30 хвилин і добавок Ni_3B на об'ємну усадку показало (рис.4), що зі збільшенням температури спікання від 1100 до 1250°С вона монотонно зростає за закономірностями – близькими до лінійних (сплав без добавок Ni_3B), або за параболічними кривими з пологими максимумами (сплави з мінімальними добавками Ni_3B).



1-65Fe-35ФХ800; 2- 61,5Fe-35ФХ800-3,5Ni_3B; 3- 59,8Fe-35ФХ800-5,2Ni_3B; 4- 58,1Fe-35ФХ800-6,9Ni_3B; 5- 56,3Fe-35ФХ800-8,7Ni_3B (%, мас.)

Рис. 4 – Вплив температури спікання та вмісту Ni_3B на об'ємну усадку зразків сплавів Fe - 35ФХ800-(3,5-8,7) Ni_3B (%, мас.)

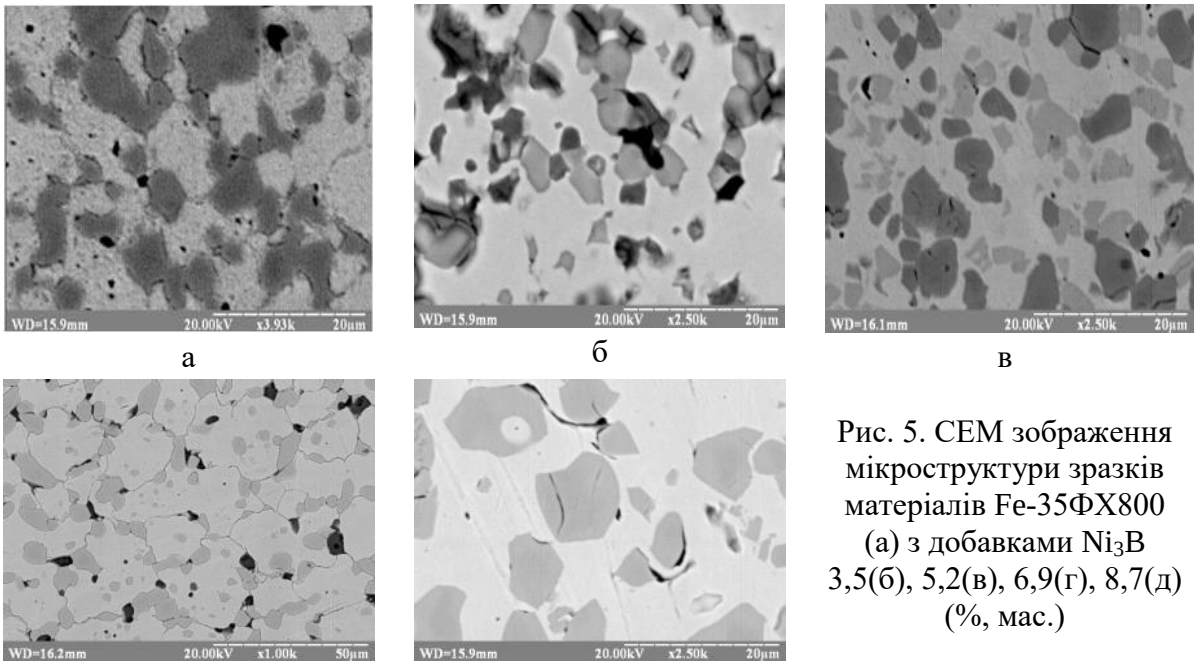
Так введення уже 3,5 і 5,2 (%, мас.) Ni_3B приводить до зростання об'ємної усадки зразків матеріалів, цих складів, спечених при 1200°С до 33-35% ,що на 3-5% перевершує усадку зразків матеріалу без легуючої добавки. Проте, як показали експерименти, максимальна усадка зразків сплавів усіх складів (34,5-37 %) досягається при спіканні на 1250°С (рис.4).

Для уточнення оптимальних умов отримання дослідили вплив температури спікання в інтервалі 1100-1250 °С та кількості бориду нікелю на твердість та межу міцності на згин карбідосталі 65Fe-35ФХ800 (%, мас.).

Встановлено, що підвищення температури спікання від 1100 до 1250°С приводить до монотонного зростання твердості з 42-64 до 68-75 HRA та межі міцності на згин композитів з 380-850 до 980-1712 МПа. Це пов'язано як із зростанням густини від 7,19 до 7,46 г/см^3, так і зі зменшенням з 12,5 до 1,08 % поруватості зразків. Детальне дослідження структури сплавів Fe–ФХ800 з добавками Ni_3B на скануючому електронному мікроскопі (СЕМ) показало (рис.5), що їх мікроструктура гетерогенна і відноситься до матрично-наповненого типу з мікротвердістю твердих включень 9,76–11,65 ГПа, що близько до твердості складного залізохромового карбіду $(Fe,Cr)_7C_3$. Мікротвердість металевої матриці складає 2,8–3,85 ГПа, що відповідає мікротвердості хромистого фериту в якому розчинений вуглець (табл. 2).

Склад матричної (світло-сірої) фази у всіх карбідосталей близький за вмістом Fe і Cr. Однак слід зазначити, що ділянки сірих фаз карбідосталей з

підвищенням вмісту Ni_3B (від 3,5 до 8,7 (%, мас.)), істотно відрізняються за вмістом заліза і хрому.



а б в

г д

Рис. 5. СЕМ зображення мікроструктури зразків матеріалів Fe-35ФХ800 (а) з добавками Ni_3B 3,5(б), 5,2(в), 6,9(г), 8,7(д) (%, мас.)

Мікротвердість матриці матеріалів з добавками бориду нікелю загалом дещо вища ніж вихідного складу, що пояснюється присутністю в ній нікелю який, утворюючи твердий розчин з залізом, впливає на його мікротвердість.

З табл.2 випливає, що мікротвердість твердої фази зі збільшенням кількості Ni_3B зростає, досягаючи максимуму при 5,2Ni_3B (%, мас.), що може бути обумовлено утворенням карбоборидів заліза типу $Me_3(C,B)$ і Me(CB).

Таблиця 2 - Мікротвердість фаз карбідосталі 65Fe -35ФХ800, легованої добавками Ni_3B

Вміст добавки, % (мас.)	Структурна складова	Мікротвердість, ГПа
0	металева фаза	2,8
	карбідна фаза	10,5
3,5	металева фаза	2,46
	карбідна фаза	8,32
5,2	металева фаза	3,65
	карбідна фаза	11,65
6,9	металева фаза	3,85
	карбідна фаза	9,76
8,7	металева фаза	3,62
	карбідна фаза	5,98

Рентгенофазові і рентгеноструктурні дослідження спечених зразків Fe-ФХ800-Ni_3B свідчать про утворення гетерогенної структури незалежно від відсоткового вмісту Ni_3B в вихідній шихті. Основною фазою спечених матеріалів є структура ГЦК, що представляє твердорозчинну аустенітну γ-фазу (рис.6). Це вказує на те, що добавка Ni_3B стимулює утворення аустенітної структури матриці композиту.

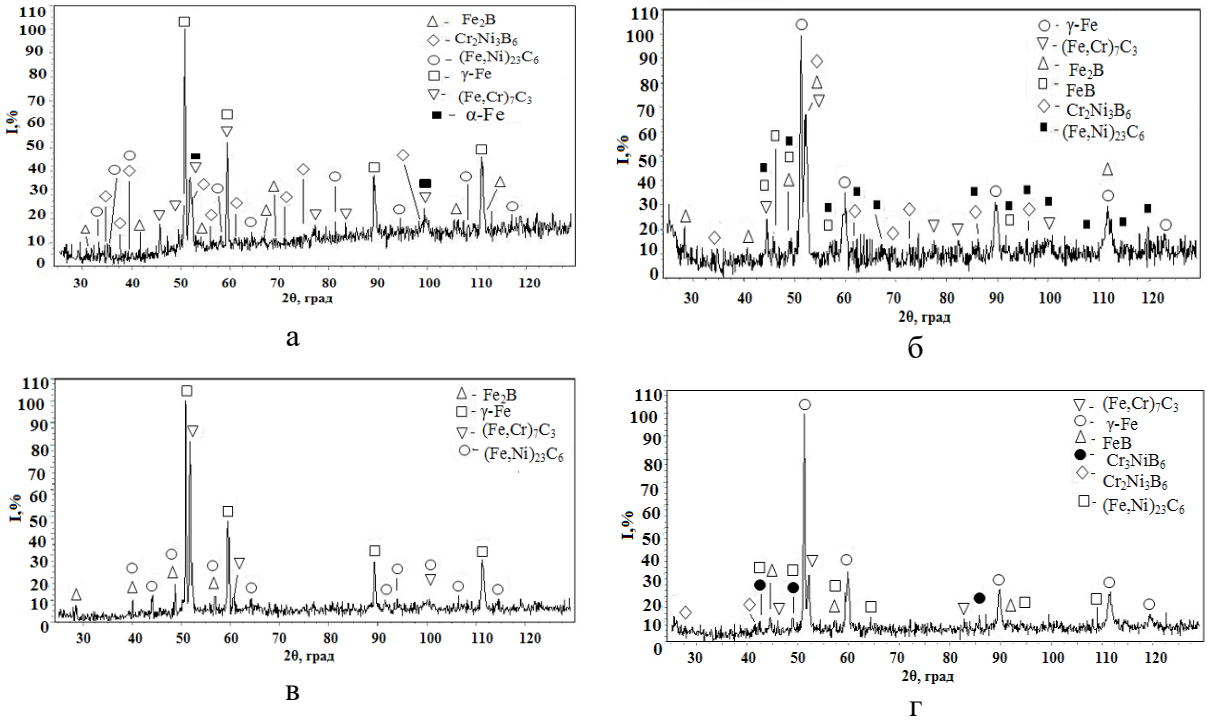
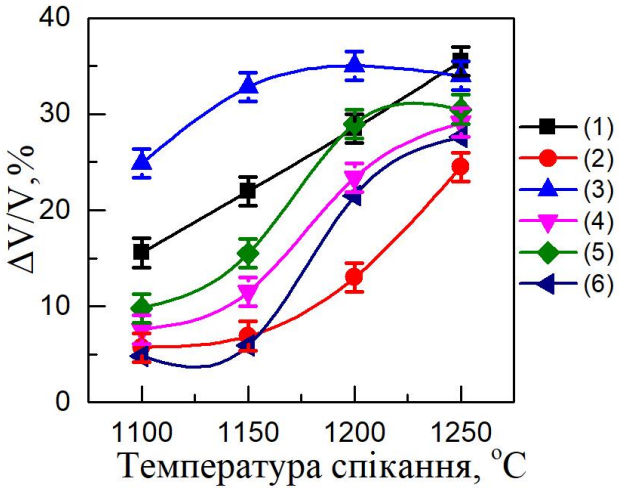


Рис. 6 - Дифрактограми спечених композитів Fe-ФХ800 з добавками Ni_3B 3,5(а); 5,2(б); 6,9(в); 8,7(г) (%, мас.)

Матеріли системи Fe-ФХ800- TiB_2

Дослідженя впливу температури спікання на об'ємну усадку, густину, поруватість карбідосталей з добавками TiB_2, введених у кількості 0,38–2,2 (%, мас.) до сплаву Fe–35ФХ800 (%, мас.), показали (рис. 7), що із збільшенням температури спікання від 1100 до 1250 °С об'ємна усадка зразків монотонно зростає. Уже при температурах спікання 1100 – 1150 °С об'ємна усадка матеріалу з 0,74 TiB_2 (%, мас.) становить 24,9 - 32,8%, що в 2,0-1,8 разів вище ніж у зразка базового складу. З підвищенням температури спікання до 1200°С для композиту з 0,74 TiB_2 (%, мас.) вона досягає 34-35%, що є найвищим значенням серед усіх наведених складів карбідосталей.

Це вказує на те, що такий вміст бориду титану приводить до активації ущільнення і зниження на 50 °С температури спікання композиту без легуючої добавки. Підвищення температури спікання з 1100 до 1200 °С також приводить до монотонного зростання твердості та міцності на згин базового матеріалу легованого добавками бориду титану. З подальшим підвищенням температури спікання до 1250 °С, спостерігається деяке падіння твердості та міцності на згин композитів, що пов'язано з ростом розміру зерен і втратою форми зразків в результаті початку їх оплавлення.



1- 65Fe-35ФХ800; 2- 64,8Fe-34,8ФХ800-0,38TiB_2; 3- 64,6Fe-34,6ФХ800-0,74TiB_2; 4- 64,4Fe-34,4ФХ800-1,12TiB_2; 5- 64,2Fe-34,2ФХ800-1,48TiB_2; 6- 63,9Fe-33,9ФХ800-2,2TiB_2 (%, мас.)

Рис. 7 - Влив добавок TiB_2 та температури спікання на об'ємну усадку зразків із композиційного матеріалу Fe–35%ФХ800

Це дає підстави стверджувати, що температура спікання 1200 °С є оптимально для більшості зразків матеріалів з добавками TiB_2.

Електронномікроскопічні дослідження і локальний мікрорентгеноспектральний аналіз матеріалів системи Fe–ФХ800 легованих добавками TiB_2 показав, що їх структура мікрогетерогенна, багатофазна і складається з світло-сірої, сірої, темно-сірої та чорної фаз (рис.8). Введення добавок TiB_2 впливає на розмір зерна структурних складових композиту, особливо це помітно при вмісті TiB_2 0,74-1,48 (%, мас.) (рис.8 *в-д*).

При цьому, розмір зерен карбідів зменшується від 8-13 у базовому композиті до 4-6 мкм в композитах з TiB_2.

Це пояснюється одночасною дією двох факторів, з однієї сторони бор впливає на зниження температури спікання, а з іншої - добавки титану, сприяють гальмуванню росту зерен.

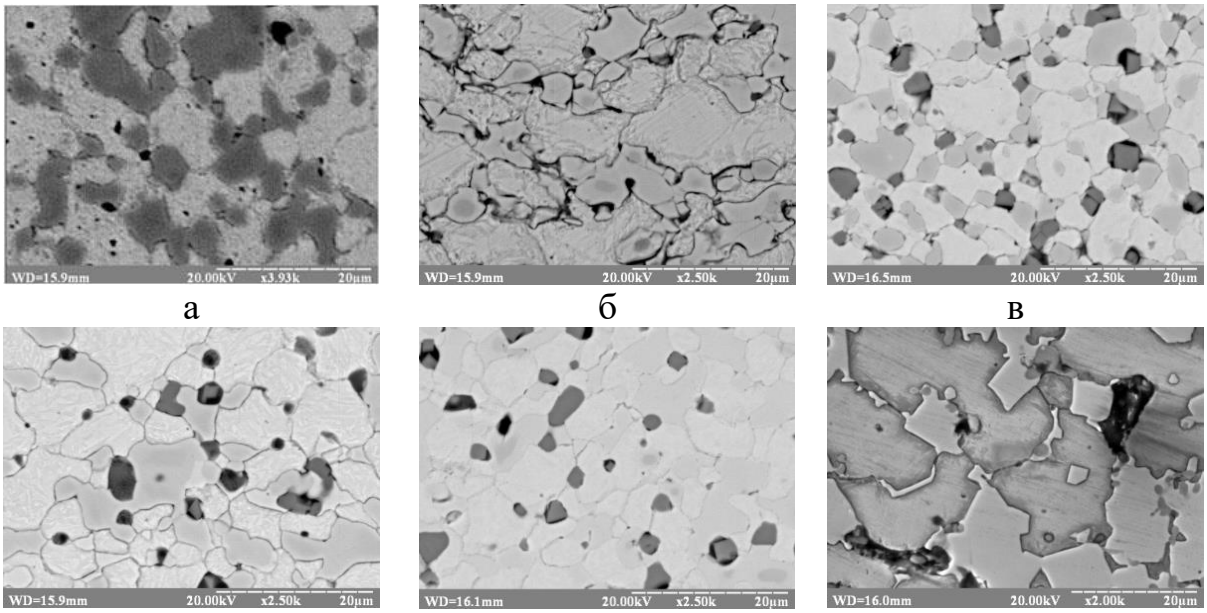
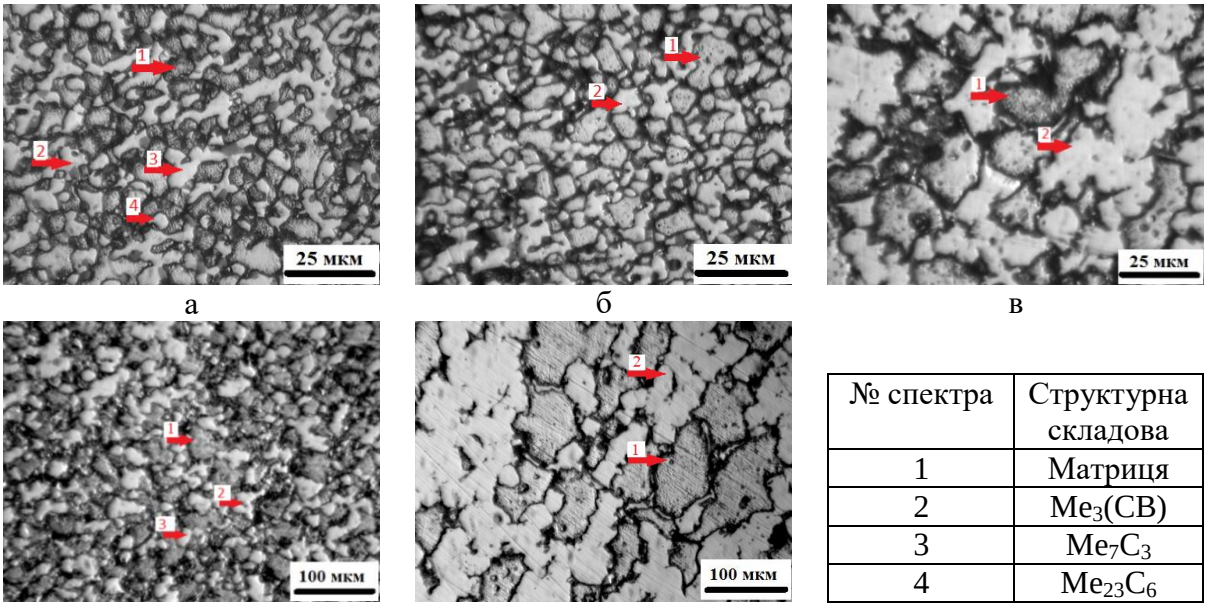


Рис. 8 – СЕМ зображення мікроструктури зразків матеріалів Fe-35%ФХ800 (а) з добавками TiB_2 0,38(б), 0,74(в), 1,12(г), 1,48(д), 2,2(є) (%, мас.)

Зі збільшенням кількості добавок бориду титану в структурі матеріалу з'являються темно-сірі фази, розмір яких складає 3-5 мкм. Проте, їх кількість суттєво зменшується при вмісті добавки 2,2 (%, мас.).

За результатами локального рентгеноспектрального аналізу, склад темно-сірої фази вказує на те, що це складний карбід Me_7C_3, а сірі фази це карбобориди типу $Me_3(CB)$. Зі збільшенням вмісту легуючої добавки від 0,38 до 2,2 (%, мас.) в структурі матеріалу (рис.9) кількість карбоборидних фаз типу $Me_3(CB)$ зростає.



№ спектра	Структурна складова
1	Матриця
2	$Me_3(CB)$
3	Me_7C_3
4	$Me_{23}C_6$

Рис. 9 - Мікроструктури з точками локального рентгеноспектрального аналізу зразків матеріалів Fe-ФХ800 з добавками TiB_2 0,38(а), 0,74(б), 1,12(в), 1,48(г), 2,2(д) (%, мас.)

Рентгеноструктурний аналіз спечених зразків системи Fe-ФХ800-TiB_2 з різним відсотковим вмістом легуючої добавки показав (рис. 10), що в процесі спікання формується багатофазовий склад. Металева основа спеченого композиту представлена феритною матрицею α - Fe, в невеликій кількості фіксуються γ - Fe, $(Fe,Cr)_7C_3$, а також ряд карбідів: Cr_3C_2, Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$, Fe_3C; титанохромовий борид $Cr_{0,5}Ti_{0,5}B_2$ з гексагональною структурою. Таким чином, на відміну від Ni_3B добавки бориду титану забезпечують утворення феритної матриці композиту.

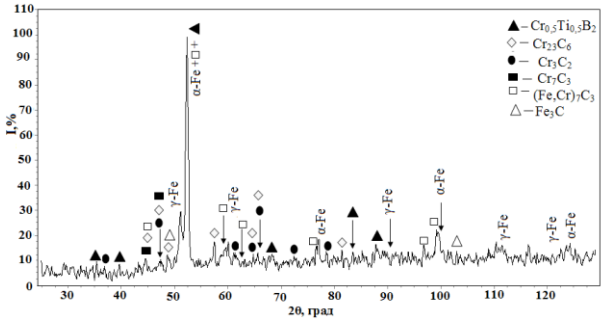


Рис. 10 - Дифрактограми спечених композитів на основі 65Fe-35ФХ00 з добавками TiB_2: а) - 0,38; - аркуш 1

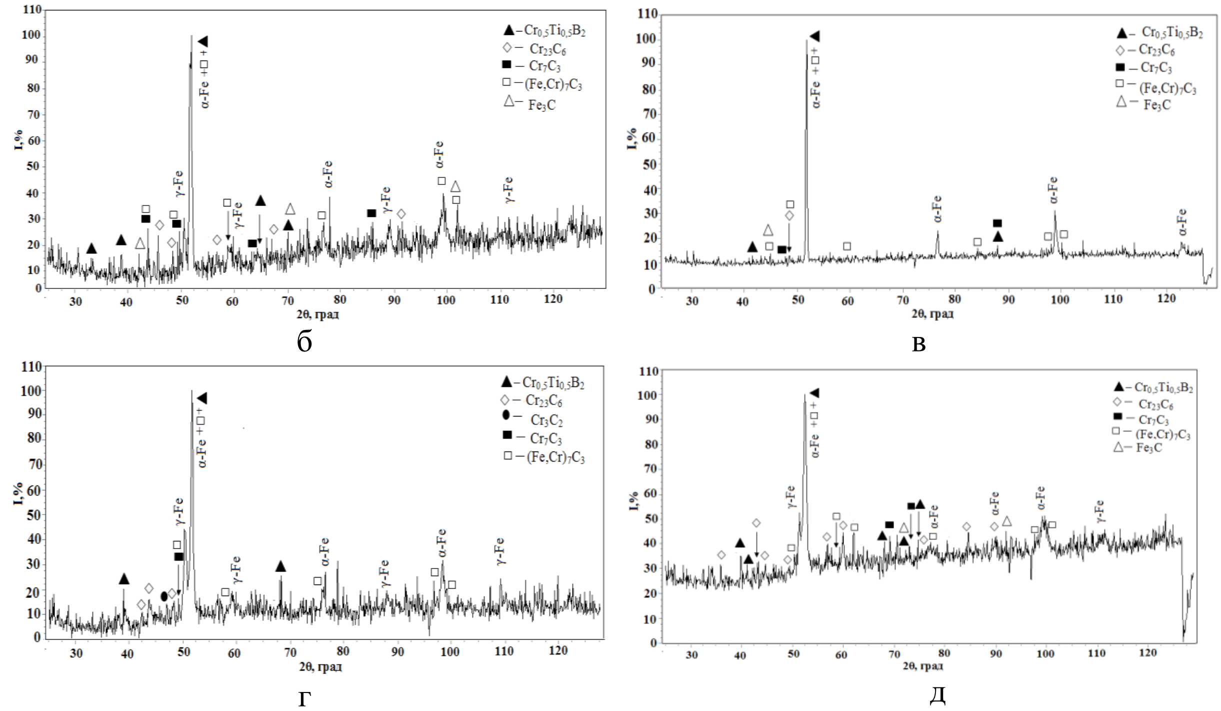


Рис. 10 – аркуш 2: б) - 0,74; в) - 1,12; г) - 1,48; д) - 2,2, (%, мас.).

Четвертий розділ присвячено дослідженню механічних властивостей, зносо- та корозійної стійкості матеріалів на основі заліза з різним вмістом ФХ800. Експерименти показали, що при збільшенні кількості ФХ800 від 25 до 40 (%, мас.) підвищуються твердість та межа міцності на згин (рис.11). Зростання твердості матеріалів від 68 до 75,5 HRA відбувається за рахунок зростання кількості твердої складової і вторинних карбідів які утворились в результаті інтенсивної взаємодії високовуглецевого ферохрому із залізною основою при спіканні. Максимальною межею міцності на згин 1712 МПа відзначається карбідосталь на основі заліза з 35 ФХ800 (%, мас.).

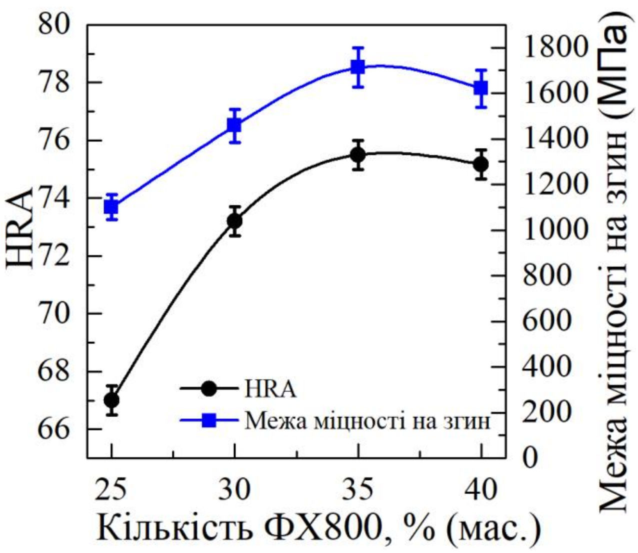


Рис. 11 - Вплив вмісту ФХ800 на твердість та межу міцності на згин композиційних матеріалів на основі системи Fe-ФХ800

Підвищення вмісту добавки ФХ800 до 40 (%, мас.) знижує межу міцності на згин до 1620,2 МПа в зв’язку із збільшенням кількості твердої складової і окрихчуванням композиту (рис.11).

Наряду з міцністю на згин, важливою характеристикою є тріщиностійкість або в’язкість руйнування яка є властивістю матеріалу поглинати енергію тріщин, що розвиваються в ньому. Дослідження залежності тріщиностійкості карбідосталей від вмісту високовуглецевого ферохрому отриманих за

оптимальними режимами показало, що, як і передбачалось, збільшення кількості твердої складової від 25 до 40 ФХ800 (%, мас.) приводить до підвищення твердості та зменшення тріщиностійкості карбідосталей з 24,9 до 19,4 МПа*м$^{1/2}$.

З результатів досліджень випливає, що найкраще поєднання механічних властивостей спостерігається при вмісті в хромистій карбідосталі 35 ФХ800 (%, мас.), спеченої при температурі 1250 ^{o}C.

Дослідження впливу кількості бориду нікелю на фізико-механічні властивості композиту 65Fe-35ФХ800 (%, мас.) показало, що введення легуючої добавки Ni_3B в кількості 3,5 і 5,2 (%, мас.) мало впливає на твердість матеріалу. Це може бути пов'язано, як зі зміною складу карбідної фази, так і зі збільшенням розміру зерен матричного (Fe) компонента. Подальше підвищення вмісту Ni_3B до 6,9 і 8,7 (%, мас.) приводить до суттєвого зниження твердості композиту від 75,5 до 68 HRA.

На відміну від твердості, межа міцності на згин матеріалів з підвищенням кількості Ni_3B, монотонно знижується від 1712 до 844 МПа. Такий вплив легуючої добавки, також, пов'язаний зі зміною структури та складу твердої та металевої фаз карбідосталі.

Добавки бориду титану в кількості до 1,12 (%, мас.) не впливають на твердість карбідосталей, проте зростання вмісту TiB_2 до 1,48 (%, мас.) викликає деяке підвищення твердості до 78 HRA (рис.12) з наступним її зниженням при 2,2 TiB_2 (%, мас.). Дану залежність можна пояснити тим, що в результаті взаємодії бориду титану з високовуглецевим ферохромом і залізом відбувається утворення складних карбоборидів типу $Me_3(CB)$, а також залізохромових карбідів з підвищеним вмістом хрому типу Me_7C_3 які сприяють підвищенню твердості композитів.

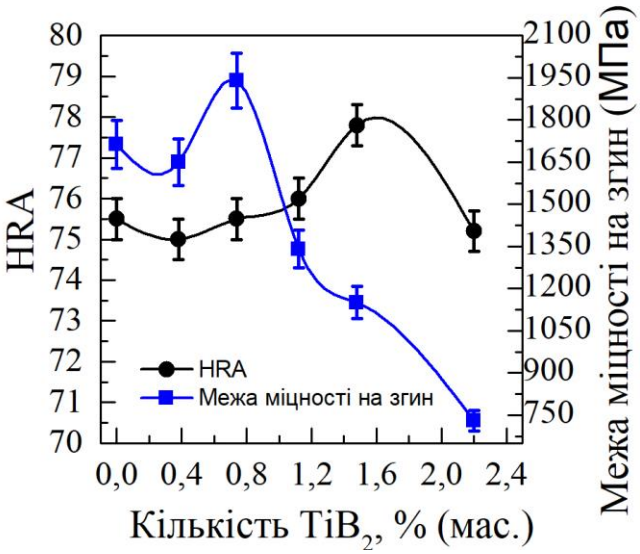


Рис. 12 - Вплив кількості добавок TiB_2 на твердість та межу міцності на згин порошкових карбідосталей Fe-35%ФХ800

Межа міцності на згин композиту Fe-35%ФХ800 із підвищенням вмісту TiB_2 змінюється за кривою з максимумом при 0,74TiB_2 (%, мас.) після чого подальше збільшення кількості бориду титану приводить до її суттєвого падіння (рис.12). Це можна пояснити досягненням оптимального співвідношенням кількості карбідів Me_7C_3 і карбоборидів $Me_3(CB)$ при 0,74 TiB_2 (%, мас.).

Досліджено вплив добавок Ni_3B на стійкість матеріалів Fe-35ФХ800 (%, мас.) проти абразивного зношування закріпленими частинками алмазного кругу за

схемою контакту: вал (контртіло) - площина (зразок). Експерименти показали (рис.13), що збільшення вмісту легуючої добавки від 3,5 до 6,9 (%, мас.) приводить до монотонного зниження інтенсивності масового (W_m) зносу та, до зростання зносостійкості ($1/I_л$) композиту від 5,1 до 7,25-12,2 км/мм.

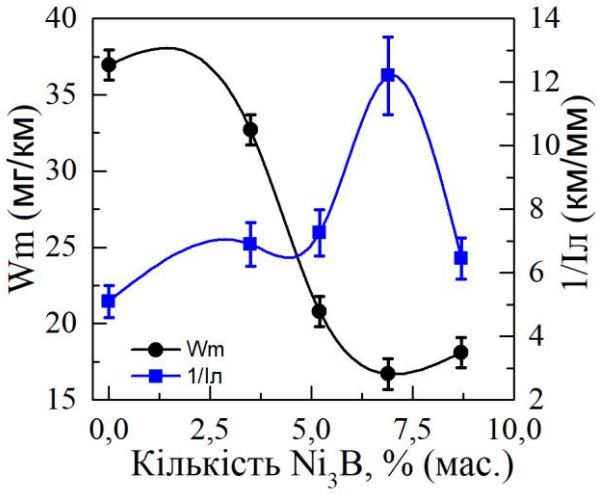
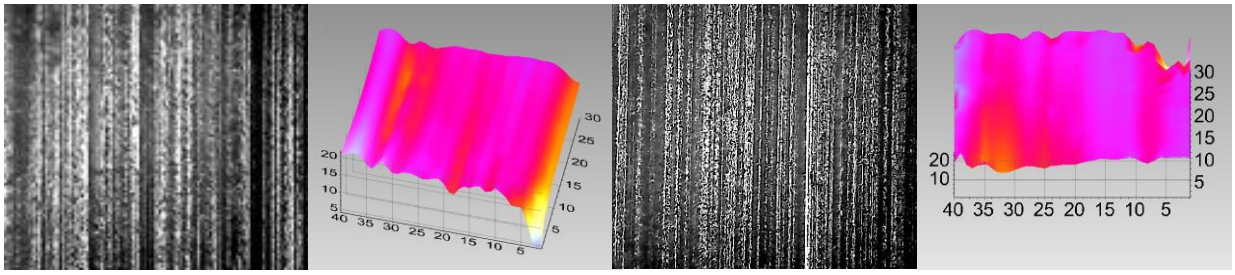


Рис. 13 - Вплив кількості добавок Ni_3B на інтенсивність масового W_m (мг/км) зношування та зносостійкість матеріалів системи Fe-ФХ800- Ni_3B

Додатковим підтвердженням цієї залежності є результати оптичної профілометрії поверхонь зразків карбідосталей після випробувань на абразивний знос в 2D- і 3D-зображеннях (рис. 14).

Максимальна зносостійкість (12,2 км/мм) спостерігається для матеріалу 58,1Fe-35ФХ800-6,9Ni_3B (%, мас.), що в 2,4 рази перевищує зносостійкість матеріалу без легуючої добавки (рис. 13). За результатами 3D-профілометрії (рис. 14) чітко видно ознаки абразивного зношування, провідним процесом якого є мікрорізання складових матеріалів надтвердими алмазними зернами. На зношених поверхнях, також спостерігаються сліди пластичної деформації дна та бічних поверхонь борозенок.



а б в г

а, б – 65Fe–35ФХ800 ; в, г – 58,1Fe–35ФХ800–6,9Ni_3B, (%, мас.)

Рис. 14 - Зображення топографії поверхонь зношування 2D- (а, в) та 3D-профілів (б, г) зразків матеріалів Fe-35% ФХ800-Ni_3B

Підвищення зносостійкості пояснюється додатковим утворенням в структурі композиту боридів заліза Fe_2B, FeB, складного бориду Cr_3Ni_3B та можливим деформаційним перетворенням аустеніту матриці в мартенсит під дією абразивних зерен, що, як відомо, збільшує абразивну стійкість сталей.

Дослідження стійкості проти абразивного зношування матеріалів Fe-35ФХ800 (%, мас.) легованих TiB_2 показало (рис.15), що підвищення вмісту дибориду титану від 0,38 до 1,48 (%, мас.) приводить до зниження інтенсивності масового зносу (W_m) від 36,94 до 14,8 мг/км та підвищення зносостійкості (1/Іл) карбідосталей від 5,1 до 12,6 км/мм.

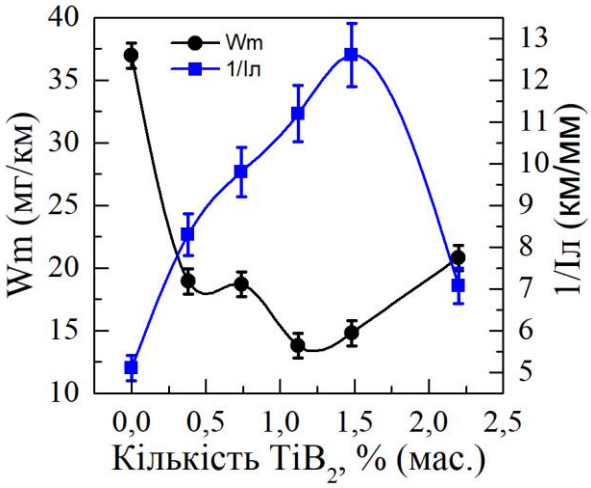
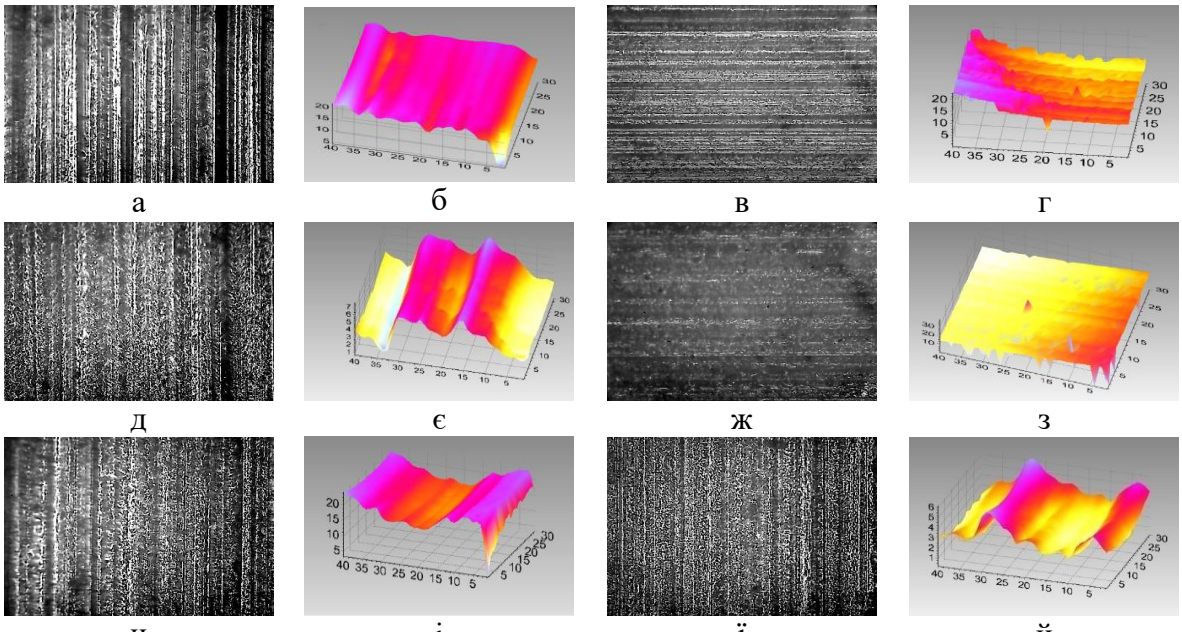


Рис. 15 - Вплив кількості добавок TiB_2 на масове W_m (мг/км) зношування і зносостійкість матеріалів системи Fe-ФХ800-TiB_2 закріпленими абразивними частинками алмазного кругу

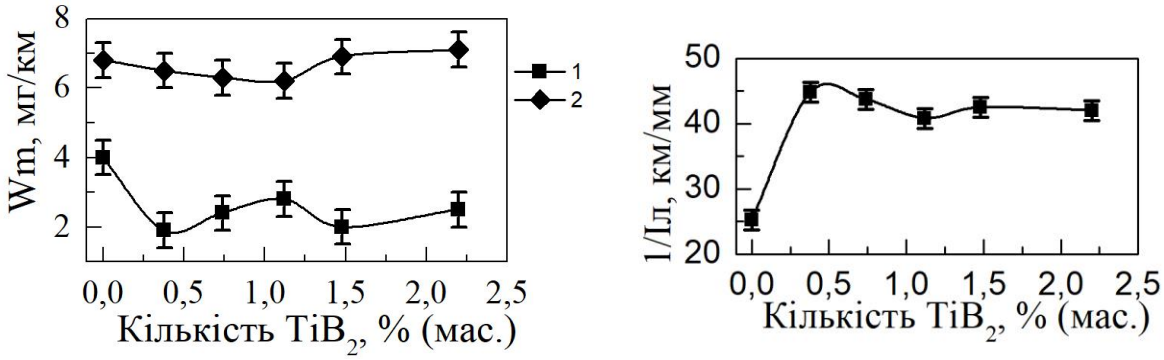
Це можна пояснити додатковим утворенням при спіканні складних карбоборидів типу $Me_3(CB)$ які збільшують твердість матеріалу, а також можливим підвищенням адгезійної міцності, утримування твердих зерен матрицею. На зображеннях топографії поверхонь після абразивного зношування, в 3D-профілях (рис.16 г,з), спостерігаються зони із частково викришеними карбідними зернами.



а,б – 65Fe- 35ФХ800; в,г - 64,8Fe-34,8ФХ800 – 0,38TiB_2; д,є - 64,6Fe- 34,6ФХ800 – 0,74TiB_2; ж,з - 64,4Fe- 34,4ФХ800 – 1,12TiB_2; и,і - 64,2Fe- 34,2ФХ800 – 1,48TiB_2; ї,й - 63,9Fe- 33,9ФХ800 – 2,2TiB_2 (%, мас.)

Рис. 16 - Зображення топографії поверхонь після абразивного зношування 2D- (а, в, д, ж, и,ї) і 3D-профілів (б, г, є, з, і, й) зразків матеріалів Fe-35% ФХ800 з різними добавками TiB_2

Враховуючи, що карбідосталі застосовують для виготовлення зносостійких конструкційних деталей і деталей вузлів тертя, було досліджено вплив добавок бориду титану 0,38-2,2 (%, мас.) на зносостійкість зразків карбідосталі Fe-35% ФХ800 при сухому терті в парі з контртілом зі сталі ШХ15. Встановлено, що добавки бориду титану знижують інтенсивність масового зношування (від 4 до 1,9 мг/км) та підвищують зносостійкість композитів від 25,2 до 44,8 км/мм (рис. 17). При триботехнічних дослідженнях також було визначено масовий знос контртіла з ШХ15, який становить 6,2-7,1 мг/км. Окрім того доведено, що добавки бориду титану у кількості 0,38-2,2 (%, мас.), за рахунок утворення складних карбоборидів титану-хрому, знижують коефіцієнт сухого тертя композиту по сталі ШХ15 від 0,49 до 0,38.



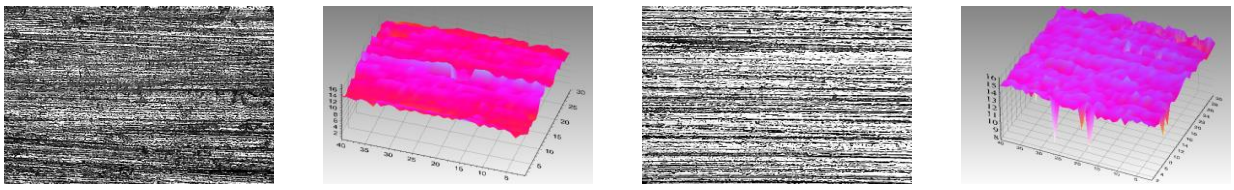
а б

1- масовий знос карбідосталей легованих різною кількістю TiB_2

2- масовий знос контртіла зі сталі ШХ15

Рис. 17 - Вплив кількості добавок TiB_2 на інтенсивність масового W_m (мг/км) зношування *(а)* і зносостійкість $1/I_л$ (км/мм) *(б)* матеріалів системи Fe-ФХ800-TiB_2 по сталі ШХ15

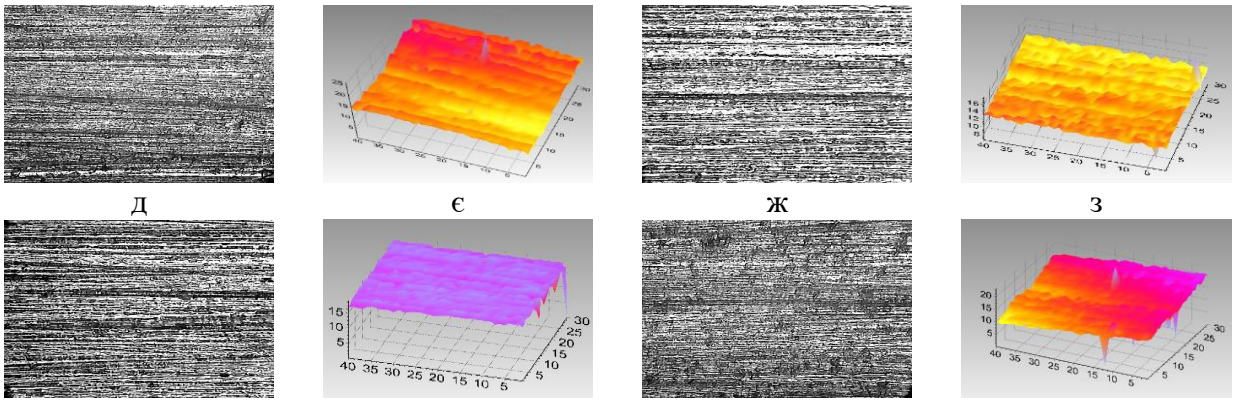
На зображеннях топографії поверхонь сухого тертя зі сталлю ШХ15 спостерігається часткове викришування та виривання твердих зерен, що найбільш помітно у зразках без TiB_2, а також при мінімальному 0,38 (%, мас.) та максимальному 2,2 (%, мас.) вмісті TiB_2 (рис.18 *б, г, й*).



а б в г

а,б – 65Fe- 35ФХ800; в,г - 64,8Fe-34,8ФХ800 – 0,38TiB_2;

Рис. 18 - Зображення топографії поверхонь зношування після тертя по сталі ШХ15 в 2D- (а, в, д, ж, и, ї) і 3D-профілів (б, г, є, з, і, й) зразків матеріалів Fe-35% ФХ800 з легуючими добавками TiB_2 – аркуш 1



д,є - 64,6Fe- 34,6ФХ800 – 0,74TiB_2; ж,з - 64,4Fe- 34,4ФХ800 – 1,12TiB_2; и,і - 64,2Fe- 34,2ФХ800 – 1,48%(мас.)TiB_2; ї,й - 63,9Fe- 33,9ФХ800 – 2,2TiB_2 (%, мас.)

Рис. 18 – аркуш 2

Досліджено корозійну стійкість матеріалів в 3%–му розчині NaCl, 30%–му розчині NaOH та 20%–му розчині HNO_3 при кімнатній температурі за прискореним методом. Корозійні середовища для дослідження обирали виходячи з літературних даних по корозійній стійкості вихідних компонентів матеріалів та можливих сферах їх застосування.

Експерименти показали, що корозійна стійкість у вказаних середовищах матеріалів на основі хромистих сталей Х17Н2 та Х13М2 та композиту 65Fe-35ФХ800 (%, мас.) відповідають 4-5 балу (табл.3). Тобто, матеріали на основі заліза і хромистих сталей, які містять 35% високовуглецевого ферохрому мають практично однакову стійкість проти корозії. Це пояснюється тим, що при температурах спікання 1200-1250ºС взаємодія хромозалізного карбіду з залізною основою приводить до утворення корозійностійкої хромистої сталі типу Х17.

Таблиця 3 - Корозійна стійкість спечених хромистих карбідосталей

Склад, % (мас.)	Корозійні властивості					
	30%–вий NaOH		3 %–вий NaCl		20%–вий HNO_3	
	П, мм/рік	Бал *	П, мм/рік	Бал	П, мм/рік	Бал
65Fe-35ФХ800	0,081	5	0,0602	5	0,0387	4
35ФХ800-65 Х17Н2	0,0367	4	0,0774	5	0,0357	4
35ФХ800-65Х13М2	0,0768	5	0,0395	4	0,0346	4

Вивчення корозійної стійкості матеріалів, легованих добавками бориду нікелю (3,5, 5,2, 6,9, 8,7 (%, мас.)), в 30%–му розчині NaOH показали, що найвищу корозійну стійкість демонструють матеріали леговані 5,2 та 6,9 (%, мас.) бориду нікелю, які мають 1 бал (повністю стійкі). Стійкість проти корозії карбідосталі легованої добавками бориду нікелю в 20%–му розчині HNO_3, і в 3% розчині NaCl відповідає 4-5 балу (стійкі).

Отримані результати можна пояснити як підвищеною густиною (мінімальною пористістю) зразків даних матеріалів, яка становить 7,3-

7,4 г/см^3, так і тим, що нікель, як аустенітоутворюючий елемент збільшує розчинність вуглецю (карбідів хрому) в аустеніті, що приводить до збільшення вмісту хрому в твердому розчині і покращує корозійну стійкість сплаву.

Таблиця 4 – Корозійна стійкість карбідосталей системи 65Fe–35ФХ800. легованих добавками (3,5-8,7) Ni_3B (%, мас.)

Склад, % (мас.)	Корозійні властивості					
	30%– вий NaOH		3 %– вий NaCl		20%–вий HNO_3	
	П, мм/рік	Бал*	П, мм/рік	Бал	П, мм/рік	Бал
65Fe-35ФХ800	0,081	5	0,0602	5	0,0387	4
35ФХ800-61,53Fe-3,5Ni_3B	0,0738	5	0,0759	5	0,0407	4
35ФХ800-59,8Fe-5,2Ni3B	0,0006	1	0,0715	4	0,1104	5
35ФХ800-58,1Fe-6,9Ni_3B	0,0005	1	0,0356	4	0,0343	4
35ФХ800-56,3Fe-8,7Ni_3B	0,0317	4	0,0371	4	0,0377	4

Досліджено корозійну стійкість матеріалів 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) легованих різною кількістю бориду титану у зазначених вище середовищах. Встановлено (табл.5), що зі збільшенням кількості добавки TiB_2 з 1,48 до 2,2 (%, мас.) значно покращується корозійна стійкість матеріалів у 30%–вому NaOH та у 20%–вій HNO_3. Така поведінка композитів, легованих добавками TiB_2, може обумовлюватись присутністю в їх складі до 2% Ті, який розчиняючись в аустеніті і фериті підвищує корозійну стійкість карбідосталей.

Таблиця 5 - Корозійна стійкість карбідосталай системи 65Fe–35ФХ800 легованих добавками (0,38-2,2) TiB_2 (%, мас.)

Склад, % (мас.)	Корозійні властивості					
	30% – вий NaOH		3 %–вий NaCl		20%–вий HNO_3	
	П, мм/рік	Бал*	П, мм/рік	Бал	П, мм/рік	Бал
65Fe-35ФХ800	0,081	5	0,0602	5	0,0387	4
34,8ФХ800-64,8Fe-0,38TiB_2	0,0685	5	0,1369	6	0,0664	5
34,63ФХ800-64,63Fe-0,74TiB_2	0,0435	4	0,0871	5	0,0871	5
34,44ФХ800-64,44Fe-1,12TiB_2	0,0668	5	0,1339	6	0,0669	5
34,26ФХ800-64,26Fe-1,48TiB_2	0,0005	1	0,0918	5	0,0008	1
33,9ФХ800-63,9Fe-2,2TiB_2	0,0007	1	0,0760	5	0,0760	5

Порівняння результатів легування добавками Ni_3B і TiB_2 вказує на те, що більш ефективний вплив на формування дрібнозернистої структури, підвищення фізико-механічних, трибологічних і корозійних властивостей

хромистої карбідосталі 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) чинить застосування дибориду титану в кількості 0,74-1,48 (%, мас.).

Розроблені матеріали типу Fe–35ФХ800-TiB_2 мають ряд переваг над уже відомими аналогами такими як: хромиста сталь-карбід хрому, залізо-карбід хрому. А саме, вони відзначаються більш високими фізико-механічними характеристиками, підвищеною зносостійкістю, а також ефективнішою технологією отримання.

У п'ятому розділі приведено результати дослідно-виробничої апробації та практичного використання результатів досліджень. На рис. 19 представлено розроблену і відпрацьовану технологічну схему виготовлення, із нової хромистої карбідосталі, зносокорозійностійких вставок для зміцнення молотків кормодробарок.

Результати виконаних експериментальних та технологічних досліджень знайшли практичне застосування у виготовленні (з розробленої нової карбідосталі) дослідної партії вставок для зміцнення робочих органів кормоподрібнювачів фуражного зерна.

Експлуатаційні випробування молотків проведені в лабораторії кормоприготування ВП НУБІП України "Агрономічна дослідна станція" на установці БМК–1 при помелі фуражного зерна. Одночасно на одному роторі з молотками, армованими вставками із карбідосталі 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) (рис.20), випробовували молотки з базового матеріалу — загартованої сталі 65Г

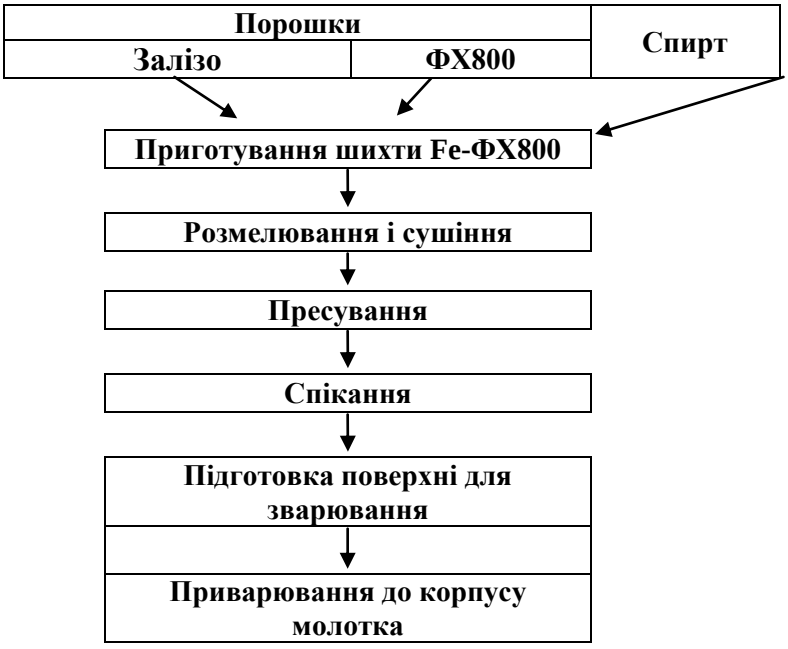


Рис. 19 - Технологічна схема виготовлення зносокорозійностійких вставок молотків кормодробарок із хромистої карбідосталі

Зносостійкість молотків визначали за зміною їх маси. Випробування показали, що експериментальні молотки, армовані вставками з хромистої карбідосталі 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) в 2,5-3,0 рази довговічніші за серійні. Наробіток на одну грань серійного молотка зі сталі 65Г, до граничного

зношування, складає 105 тон, а експериментального - 300 тон. При цьому, відмічено покращення якості подрібнення кормів і зменшення оперативної трудомісткості при технічному обслуговуванні кормоприготувальних машин. За результатами випробувань, молотки армовані вставками із хромистої карбідосталі 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) рекомендовані до практичного використання в конструкціях фермерських та промислових кормоподрібнювачів.

Рис. 20 - Молоток дробарки БМК–1 зі вставками із карбідосталі 65Fe–35ФХ800 (%, мас.), привареними електрозварюванням
(до випробовувань; після виробничих випробовувань)

ВИСНОВКИ

На основі узагальнення результатів аналітичних і експериментальних досліджень, особливостей фазо-структуроутворення, вивчення основних фізико-механічних, триботехнічних та корозійних властивостей вирішено актуальне науково-технічне завдання – створення нових порошкових, економно легованих зносокорозійностійких карбідосталей на основі системи залізо (хромиста сталь)-високовуглецевий (ФХ800) ферохром для деталей працюючих в умовах абразивного зношування і корозійноактивних середовищ.

1. З використанням проекцій поверхонь ліквідуса і солідуса та ізотермічних перерізів діаграми стану Fe-Cr-C вперше побудовано політермічний переріз через $(Cr_{0.81}Fe_{0.19})_7C_3$-Fe цієї діаграми. Встановлено існування широких областей двофазних рівноваг $\gamma+(Cr,Fe)_7C_3$ та $\alpha+(Cr,Fe)_7C_3$ перспективних для створення зносостійких композиційних матеріалів класу карбідосталей і найбільш вірогідні температури появи в них рідкої фази та інтервалів температур спікання при різному вмісті заліза.

2. Вперше за результатами комплексного дослідження процесів фазо-структуроутворення з’ясовано механізм взаємодії частинок порошку високовуглецевого ферохрому з залізною матрицею. Встановлено, що спікання пресовок суміші 65Fe–35ФХ800 (%, мас.) в інтервалі температур 1000-1300 ^{o}C протягом 30 хв. приводить до суттєвих змін хімічного і фазового складу твердої і металевої складових композиту, які описуються серією карбідних перетворень: $M_7C_3 \rightarrow M_3C$ (1000-1150 $^{\circ}$C) $\rightarrow M_7C_3$ (1200 $^{\circ}$C) $\rightarrow M_3C_2$ (1250-1300 $^{\circ}$C). Додаткова механоактивація і рідкофазне спікання порошкової шихти забезпечують утворення на основі заліза нової фази, яка за хімічним складом близька до хромистої сталі Х17 і являє собою

корзійностійку металеву матрицю композиту. Це вказує на економічну і технологічну доцільність використання дешевого залізного порошку замість готових порошків хромистих сталей.

3. Досліджено вплив легуючих добавок Ni_3B і TiB_2 на температуру спікання, структуроутворення, фізико-механічні і функціональні властивості матеріалів системи Fe-35ФХ800 (%, мас.). Встановлено, що введення в шихту базового матеріалу 65Fe-35ФХ800 (%, мас.) борвмісних присадок, за рахунок утворення легкоплавких евтектик на основі заліза знижує температуру спікання пресовок композитів на 50 °С. Використання вказаних добавок забезпечує формування багатофазної, мікрогетерогенної структури композиту матрично-наповненого типу, яка складається з хромистої сталі, подвійних залізохромових карбідів M_7C_3, M_3C і складних карбоборидів типу $Me_3(CB)$. Показано, що введення в базовий склад композиту 3,5-5,2Ni_3B (%, мас.) не впливає на твердість, але з підвищенням вмісту легуючої добавки до 6,9-8,7 (%, мас.) спостерігається зниження твердості з 75,5 до 68 HRA і суттєве падіння межі міцності на згин у вивченому діапазоні концентрацій бориду нікелю. На відміну від Ni_3B добавки бориду титану в межах 0,38-0,74 (%, мас.) забезпечують, при деякому підвищенні твердості, зростання на 10-13 % межі міцності на згин композиту 65Fe-35ФХ800 (%, мас.).

4. Вивчено вплив добавок Ni_3B і TiB_2 на стійкість композитів проти зношування закріпленими частинками алмазного кругу і в умовах сухого тертя в парі зі сталлю ШХ15. Встановлено що збільшення вмісту Ni_3B з 3,5 до 6,9 (%, мас.) і добавок TiB_2 в межах від 0,38-1,48 (%, мас.) приводить до зниження інтенсивності абразивного масового зносу з 37 до 17,5 і з 14,8 мг/км відповідно і до зростання зносостійкості композитів в 1,8-2,5 рази.

Присадки TiB_2 в інтервалі 0,38-2,2 (%, мас.) зменшують інтенсивність масового зношування при сухому терті композиту по контртілу зі сталі ШХ15, твердістю 50-55 HRC, з 4,9 до 1,9 мг/км і знижують коефіцієнт тертя від 0,49 до 0,38.

5. Дослідження корозійної стійкості в розчинах хлориду натрію, лугу і кислоти показало, що введення 1,48-2,2% добавок бориду титану і 5,2-6,9 (% мас.) бориду нікелю значно підвищує стійкість карбідосталей в 30%–му розчині NaOH і 20%–му розчині HNO_3, що відповідає 1 балу (повністю стійкі) за десятибальною шкалою. В 3%–му розчині NaCl, композити леговані бористими добавками продемонстрували практично однакову корозійну стійкість 4,5 бал (стійкі) з хромистою карбідосталлю 65Fe-35ФХ800 (%, мас.).

6. Дослідно-виробничі випробування молотків, армованих вставками із нової хромистої карбідосталі на ВП НУБІП України «Агрономічна дослідна станція» показали підвищення зносостійкості робочих органів кормодробарки в 2,5-3 рази порівняно з серійними молотками із загартованої сталі 65Г. Результати випробувань вказують на доцільність використання порошкової економно легованої хромистої карбідосталі для зміцнення і підвищення довговічності швидкозношуваних деталей машин і механізмів

працюючих в умовах абразивного зношування, сухого тертя і корозійноактивних середовищ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИССЕРТАЦІЇ

Статті:

1. Maslyuk. V. A. Structure and mechanical and tribotechnical properties of iron–high-carbon ferrochrome doped with Ni_3B additions / V. A. Maslyuk, **E. S. Karaimchuk (Kyryliuk)**, M. I. Podoprygora, V. T. Varchenko, I. A. Sytnyk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. - Vol. 57, Nos. 3-4. – p. 175-181. *Особистий внесок здобувача: дослідження мікроструктури та фазового складу, фізико-механічних та триботехнічних характеристик композитів легованих добавками бориду нікелю, обробка та аналіз результатів.* DOI 10.1007/s11106-018-9965-1.

2. Maslyuk V. A. The structure and properties of high-carbon ferrochromium powder produced from FKh800 ferroalloy / V. A. Maslyuk, **E. S. Karaimchuk (Kyryliuk)**, V. D. Kurochkin, A. A. Mamonova, O. I. Khomenko // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. - Vol. 57, Nos. 5-6. – p. 251-256. *Особистий внесок здобувача: вивчення структури, хімічного, фазового складу і фізико-технологічні властивості порошку високовуглецевого ферохрому, аналіз мікроструктури та дифрактограми, обробка результатів мас-спектрометричного аналізу.* DOI 10.1007/s11106-018-9976-y.

3. Maslyuk V.A. Production, structurization, and properties of wear-resistant ‘iron–carbon alloy–granular hardmetal reinforcement’ materials / V.A. Maslyuk, **E.S. Karaimchuk (Kyryliuk)**, V.I. Alekseev, A.M. Verkhovlyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2019. - Vol. 58, Nos. 7-8. – p. 431-438. *Особистий внесок здобувача: дослідження умов отримання металоматричних зносостійких матеріалів, вивчення мікроструктури та механічних властивостей композитів, випробовування матеріалів на зносостійкість при ударно-абразивному зношуванні, аналіз результатів.* DOI 10.1007/s11106-019-00092-x.

4. **Karaimchuk E.S. (Kyryliuk).** Structure and Properties of Iron (Chromium Steel)–High-Carbon Ferrochrome Powder Composites / E.S. Karaimchuk, V.A. Maslyuk, M.I. Podoprygora, I.A. Sytnyk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2020. - Vol. 58, Nos. 9-10. – p. 503-507. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу умов отримання на фазовий склад, структуру та властивості порошкових матеріалів на основі заліза та хромистих сталей (Х17Н2, Х13М2) з 35% (мас.)ферохрому ФХ800, дослідження стійкості до абразивного зношування в парі з алмазним кругом карбідосталей на основі заліза та хромистих сталей Х13М2 і Х17Н2.* DOI 10.1007/s11106-020-00103-2.

5. Маслюк В.А. Вплив добавок бориду нікелю на структуру та властивості спеченого сплаву залізо - високовуглецевий ферохром / В.А. Маслюк, Г.А. Баглюк, **Є.С. Караїмчук (Кирилюк)**, М.І. Підопригора // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2016. – Вип. 54. С. 203-

208. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу добавок бориду нікелю на температуру спікання та процес ущільнення композитів на основі заліза, аналіз мікроструктур та обробка результатів мікрорентгеноспектрального аналізу, побудування графіків залежності щільності, твердості, межі міцності на згин та пористості від температури спікання та кількості боридної добавки.*

6. Маслюк В.А. Тенденції створення і додаткового легування зносостійких матеріалів на основі системи Fe-Cr-C (огляд) / В.А. Маслюк, **Є.С. Караїмчук (Кирилюк)**, А.А. Бондар // Металознавство та обробка металів. – 2018. - №2. – С.45 – 55. *Особистий внесок здобувача: проведено огляд вітчизняних і зарубіжних робіт щодо отримання і вдосконалення, шляхом додаткового легування, структури та властивостей залізохромвуглецевих сплавів.*

7. Maslyuk V. Peculiarities of the interaction of a highly carbonized ferrochrome with iron during sintering of 65% Fe-35% FH800 composite / V. Maslyuk, **E. Karaimchuk (Kyryliuk)**, O. Gripachevsky, G. Bagliuk, I. Sytnyk // Machines. Technologies. Materials. – 2019. – Issue № 8. - P.370-372. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу температури спікання на формування структури та фазового складу композитів, вимірювання мікротвердості складових порошкового композиту, вивчення механізму карбідних перетворень та зміни хімічного і фазового складу металевої складової в залежності від температури спікання.*

8. **Караимчук Е.С. (Кирилюк)**, Маслюк В.А., Мамонова А.А., Умерова С.А. Фазо-структурообразование и особенности поведения порошковых материалов «железо–высокоуглеродистый феррохром–борид никеля» в условиях абразивного изнашивания. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020.No. 1. С. 55–64. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу добавок бориду нікелю на структуру, фазовий склад, фізико-механічні та триботехнічні властивості карбідосталей, аналіз дифрактограм та результатів локального мікрорентгеноспектрального аналізу в залежності від кількості легуючої добавки, дослідження інтенсивності зношування і зносостійкості при обробці закріпленими частинками алмазного круга, дослідження поверхні зразків після випробувань, визначення механізму зношування.* DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-55-64.

Матеріали конференцій:

9. **Караїмчук Є.С. (Кирилюк).** Дослідження корозійної стійкості матеріалів на основі системи Fe-ФХ800 / Є.С. Караїмчук, В.А. Маслюк, М.І. Підопригора // XI Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів». - Київ, Україна. – Квітень 19-20, 2018. – с.66-68. *Особистий внесок здобувача: дослідження корозійної стійкості матеріалів на основі заліза та на основі хромистих*

сталей Х17Н2, Х13М2 у трьох різних агресивних середовищах, обговорення результатів (очна форма).

10. **Караимчук Е.С. (Кирилюк).** Влияние количества высокоуглеродистого феррохрома ФХ800 на структуру и свойства порошковых износостойких материалов / Е.С. Караимчук, В.А.Маслюк // Материалы III Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием «Современные технологии композиционных материалов». – Уфа, Россия. – Февраль 21-22, 2018. – с.59-62. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу кількості ФХ800 та температури спікання на формування структури та властивості хромистих карбідосталей (заочна форма).*

11. **Karaimchuk E.S. (Kyryliuk).** Influence of sintering temperature on the structure and properties of weak-resistant powder materials of the Fe-FH800 system / E.S. Karaimchuk, V.A. Maslyuk, O.M. Gripachevsky, I.A. Sytnyk // 6th International Samsonov Conference «Materials Science of Refractory Compounds». - Kyiv, Ukraine. - May 22-24, 2018. - P. 74. *Особистий внесок здобувача: підготування сумішей вихідних порошків для отримання композитів, дослідження оптимальних умов отримання хромистих карбідосталей, дослідження впливу температури спікання на зміну структури і фазового складу композитів (очна форма).*

12. **Karaimchuk E. (Kyryliuk).** Effect of Ni_3B additives on the structure and properties of iron-high-carbon ferrochrome / E. Karaimchuk, V. Maslyuk, I. Sytnyk, M. Podoprygora, V. Varchenco // EURO PM2018 Congress & Exhibition.- Bilbao, Spain. – October 14-18, 2018. *Особистий внесок здобувача: дослідження фізико-механічних та трибологічних властивостей карбідосталей, побудування графіків залежності твердості і міцності на згин від кількості легуючої добавки, вивчення зміни масового та лінійного зношування композитів в залежності від кількості легуючої добавки (заочна форма).*

13. **Караїмчук Є.С. (Кирилюк).** Нові порошкові зносокорозійностійкі композиційні матеріали на основі хромистих сталей / Є.С. Караїмчук, В.А. Маслюк // Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах». - Київ, Україна. – Грудень 6-7, 2018. – С.55-56. *Особистий внесок здобувача: приготування зразків, виготовлення шліфів, дослідження особливостей структуроутворення та триботехнічних властивостей карбідосталей (очна форма).*

14. **Karaimchuk Y. (Kyryliuk).** Phase - structure formation and features of the behavior of iron – high-carbon ferrochromium-nickel boride powder materials under abrasive wear conditions / Y. Karaimchuk, V. Maslyuk, G. Bagliuk // 10th international conference «Advanced materials and technologies». - Ninghai, China. – October 24-26, 2018. - P. 30. *Особистий внесок здобувача: дослідження структури композитів, вимірювання мікротвердості складових композитів, вивчення топографічних особливостей морфології зношуваних поверхонь, обговорення та аналіз результатів (заочна форма).*

15. **Караимчук Е.С. (Кирилюк).** Использование порошковых композиционных износостойких материалов в области ракетно-космических технологий / Е.С. Караимчук, В.А. Маслюк // 7-я Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее». - Днипро, Украина. – Май 21-24, 2018. – С.78. *Особистий внесок здобувача: підготування суміші вихідних порошків для отримання композитів, дослідження їх структури та міцнісних характеристик (заочна форма).*

16. Маслюк В.А. Влияние добавок борида никеля Ni_3B на фазовый состав и тонкую структуру порошковых материалов железо - высокоуглеродистый феррохром / В.А. Маслюк, А.А. Мамонова, **Е.С. Караимчук (Кирилюк)**, Г.М. Молчановская, Г.А. Баглюк// Сборник докладов 11-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Минск, Белоруссия. – Апрель 10-12, 2019. – С.557-567. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу бориду нікелю на структуру та фазовий склад карбідосталей, аналіз дифрактограм карбідосталей, обговорення та аналіз розрахунків параметрів тонкої структури композитів (заочна форма).*

17. **Karaimchuk E.S. (Kyryliuk).** The effect of titanium boride additives on the mechanical and tribological properties of materials in Fe-Cr-C system / E.S. Karaimchuk, V.A. Maslyuk, V.T. Varchenko // 13th CONFERENCE for YOUNG SCIENTISTS in CERAMICS. - Novi Sad, Serbia. – October 16-19, 2019. - P.152. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу добавок боридів титану на структуроутворення, фізико - механічні та трибологічні властивості, аналіз мікроструктур та дифрактограм композитів (заочна форма).*

18. **Karaimchuk Y. (Kyryliuk).** The effect of additives of ultrafine titanium nitride nanopowder on the structure, phase composition and mechanical properties of chromium carbidesteel / Y. Karaimchuk, V. Maslyuk, S. Kyryliuk // Eighteenth Young Researchers Conference «Materials Science and Engineering». - Belgrade, Serbia. – December 4-6, 2019. - P.69. *Особистий внесок здобувача: дослідження впливу модифікуючих добавок в ультрадисперсному стані на структуру та властивості композитів на основі заліза (заочна форма).*

19. **Karaimchuk E. (Kyryliuk)**. Powder wear-and-corrosion-resistant materials based on the Fe-Cr-C system alloyed with additives of nickel and titanium borides / E. Karaimchuk, V. Maslyuk, G. Bagliuk, O. Gripachevsky // 6th INTERNATIONAL CONFERENCE «HighMathTech». - Kyiv, Ukraine. - October 28-30, 2019. - P.89. *Особистий внесок здобувача: обговорення та порівняння фізико-механічних, триботехнічних властивостей хромистих карбідосталей на основі заліза з різними легуючими добавками, аналіз мікроструктур та результатів локального мікрорентгеноспектрального аналізу композитів, дослідження структури, фазового складу та властивостей карбідосталей на основі хромистих сталей (очна форма).*

20. **Караїмчук Є.С. (Кирилюк)**. Вплив температури спікання на структуру, елементний та фазовий склад карбідної та металевої фаз порошкових композитів Fe–ФХ800 / Є.С Караїмчук, В.А. Маслюк, О.М.

Грипачевський // XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів». - Київ, Україна. – Квітень 18-29, 2019. - С. 62-64. *Особистий внесок здобувача: вивчення впливу температури спікання на структуру хромистих карбідосталей, описання механізму розчинення високовуглецевого ферохрому в залізній матриці, аналіз результатів мікрорентгеноспектрального аналізу, вимірювання мікротвердості складових композитів (очна форма).*

Патент:

21. Пат. №128532 Україна, МПК C22C 38/00, C22C 38/18. Порошковий зносокорозійностійкий матеріал на основі хромистої сталі / **Є.С. Караїмчук (Кирилюк)**, В.А. Маслюк, М.І. Підопригора, заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України - № u2018 02640; заявлено 15.03.2018; опубл. 25.09.2018, Бюл. № 18/2018.

АНОТАЦІЯ

Кирилюк Є.С. Закономірності фазо- і структуроутворення та властивості порошкових зносокорозійностійких матеріалів на основі системи хромиста сталь-високовуглецевий ферохром.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 «Порошкова металургія і композиційні матеріали» (13 Механічна інженерія). – Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, 2020.

Робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання- розробки та дослідженню умов отримання, структури та властивостей зносокорозійностійких порошкових композиційних матеріалів на основі системи залізо, (хромиста сталь)-високовуглецевий ферохром функціонального призначення. У зв'язку з чим проведено дослідження впливу температури спікання та легуючих добавок на особливості структуроутворення та основні фізико-механічні, триботехнічні, корозійні і функціональні властивості хромистих карбідосталей.

В роботі на основі суміші порошків заліза та високовуглецевого ферохрому, отримано хромисту карбідосталь, встановлено вплив компонентного складу вихідної шихти на особливості структури, фазовий склад та властивості композиту.

Розроблено і відпрацьовано технологічну схему виготовлення порошкової хромистої карбідосталі, методом вакуумного спікання, і проведені дослідно-виробничі випробовування зразків виробів із неї. Надані рекомендації з ефективних галузей застосування розроблених матеріалів.

Ключові слова: карбідосталь, високовуглецевий ферохром, спікання, міцність, твердість, зносостійкість, корозійна стійкість.

АННОТАЦИЯ

Кирилюк Е.С. Закономерности фазо- и структурообразования и свойства порошковых износокоррозионностойких материалов на основе системы хромистая сталь-высокоуглеродистый феррохром.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы» (13 Механическая инженерия). – Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2020.

Работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи разработки и исследованию условий получения, структуры и свойств порошковых композиционных материалов на основе системы железо-высокоуглеродистый феррохром функционального назначения. В связи, с чем проведено исследование влияния температуры спекания и легирующих добавок на особенности структурообразования и основные физико-механические, триботехнические и функциональные свойства хромистых карбидосталей.

В работе на основе смеси порошков железа и высокоуглеродистого феррохрома, получено хромистую карбидосталь, установлено влияние компонентного состава исходной шихты на особенности структуры, фазовый состав и свойства композита.

Разработана технологическая схема изготовления порошковой хромистой карбидостали, методом вакуумного спекания, и проведены опытно-производственные испытания образцов изделий из неё. Выданы рекомендации по эффективным отраслям использования разработанных материалов.

Ключевые слова: карбидосталь, высокоуглеродистый феррохром, спекание, прочность, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость.

ABSTRACT

Kyryliuk Y.S. Patterns of phase and structure formation and properties of powder wear-corrosion-resistant materials based on the high chromium steel- -carbon ferrochrome system.

The thesis for candidate degree of technical science on specialty 05.16.06 – «Powder metallurgy and composite materials» (13 Mechanical engineering). – Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, 2020.

The work is devoted to solving the urgent scientific and technical development problem and to study the conditions for the production, structure and properties of powder composite materials based on the functional high-carbon ferrochrome system. In this connection, a study was made of the influence of sintering temperature and alloying additives on the features of structure formation and the main physical, mechanical, tribotechnical and functional properties of chromium carbidesteels.

In the work on the basis of a mixture of iron powders and high-carbon ferrochrome, chromium carbide steel was obtained, the influence of the component composition of the initial charge on the structural features, phase composition and properties of the composite was established.

The paper investigates the effect of alloying additives - borides Ni and Ti, on the features of structure formation and properties during sintering of chromium carbidesteels. It is shown that boride additives lead to an improvement in the tribotechnical characteristics of composites, while improving the wear resistance of the material by a factor of 1.8-2.5 in comparison with the unalloyed composite. Additions of titanium diboride due to the formation of complex iron-chromium carboborides and double titanium-chromium diboride lead to an increase of 10-13% between the flexural strength and 4-5 times - the corrosion resistance of the composite.

A technological scheme for the manufacture of powder chromium carbide steel was developed using the vacuum sintering method, and pilot production tests of samples of products from it were carried out. Recommendations on effective industries using developed materials were issued.

Keywords: carbidesteels, highcarbon ferrochrome, sintering, strength, hardness, wear resistance, corrosion resistance.

Підписано до друку 18.01.2021. Формат 60x90x16

Ум. Друк арк. 0,9. Обл.-вид. 0,9

Тираж 70 прим. Замовлення № 200

Дільниця оперативної поліграфії Інституту проблем матеріалознавства

ім. І. М. Францевича НАН України

03142, м. Київ–142, вул. Кржижановського, 3.