

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

БАРАНОВСЬКА ОКСАНА ВАЛЕРІЇВНА

УДК 621.762.5;621.762.8;667.6:678.03

**ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ
СПЕЧЕНИХ МЕТАЛОМАТРИЧНИХ КОМПОЗИТІВ ТА
ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ З ДИСПЕРСНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ НА ОСНОВІ
СИСТЕМИ Ti-Fe-Si-Mn-C(B)**

Спеціальність 05.02.01 – «Матеріалознавство»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор **Баглюк Геннадій Анатолійович**, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, директор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Санін Анатолій Федорович**, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара МОН України, м. Дніпро, декан фізико-технічного факультету

кандидат технічних наук, **Торпаков Андрій Сергійович**, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв, старший науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем

Захист відбудеться «10» березня 2025 року об 11⁰⁰ 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. Омеляна Пріцака, 3.

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

Автореферат розісланий « » лютого 2025 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д **26.207.03**
доктор технічних наук, ст. наук. сп.

Олександр РАДЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасний розвиток авіакосмічної, автомобільної, медичної та інших галузей промисловості вимагає створення матеріалів із високими фізико-механічними властивостями, низькою щільністю та стійкістю до дії агресивних середовищ. Титаноматричні та епоксиполімерні композити є перспективними матеріалами, які можуть задовольнити ці вимоги завдяки їхнім унікальним характеристикам.

Титанові сплави, завдяки своїм унікальним властивостям, є перспективними матеріалами для широкого спектру застосувань. Проте сучасні технології висувають дедалі вищі вимоги до матеріалів: висока міцність, низька щільність, стійкість до агресивних середовищ та екстремальних температур. Тому останніми роками спостерігається активний пошук нових рішень для оптимізації властивостей титанових сплавів. Одним із таких напрямків є армування титанових сплавів. З метою підвищення стійкості та економічної ефективності, сучасні дослідження зосереджені на зміцненні титанових сплавів за допомогою широкодоступних елементів, таких як кремній, алюміній, залізо та марганець.

На сьогоднішній день створено велику кількість композитних титаноматричних сплавів для легування яких використовують різні армуючі сполуки типу Ti_5Si_3 , CrB , B_4C , SiC і TiC , TiN , TiB , та Al_2O_3 . Найбільш досліджені композити на основі титану та його сплавів, армовані волокнами SiC та Al_2O_3 або частинками TiC , демонструють високу міцність, твердість та зносостійкість. Останніми роками TiB визнано найбільш підходящим армуючим матеріалом для титанової системи через його термодинамічну та механічну стабільність, а також здатність створювати мінімальні залишкові напруження. Проте великий інтерес викликає можливість використання як армуючої добавки багатокомпонентного титаноматричного порошку, який в своєму складі поєднує більшість зазначених вище армуючих частинок.

Композиційні матеріали на основі полімерів забезпечують необхідний комплекс фізико-механічних властивостей виробів, їх високу стійкість до зносу та корозії, а також можливість багаторазового відновлення поверхонь деталей механізмів і машин шляхом нанесення композиційних покриттів. Однак, зростаючі вимоги сучасної промисловості до полімерів не повною мірою задовольняються сьогодні, зокрема, внаслідок недостатнього рівня їх триботехнічних та міцнісних характеристик. Одним із ефективних підходів до покращення механічних та функціональних властивостей полімерних композитів на основі епоксидних сполук є використання різноманітних наповнювачів (металів, кераміки та волокон), які мають різний хімічний склад, морфологію та дисперсність. Це обумовило **актуальність** даної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до відомчої та пошукової тематики Інституту проблем матеріалознавства НАН України за темами: «Науково-технологічні принципи синтезу та консолідації високозносостійких композитів на основі сплавів алюмінію та титану, армованих високомодульними сполуками» (№ державної реєстрації 0121U108663, шифр теми III-3-21), «Фізико-технологічні основи процесів консолідації та термічного синтезу високозносостійких керметів на основі WC , TiC та абразивних алмазовміщуючих композитів» (№ державної реєстрації 0119U101412, шифр теми III-15-19 (Ц)), «Науково-технологічні принципи термічного синтезу і консолідації порошків на основі

залізовуглецевих та нікелевих сплавів, армованих високомодульними сполуками з карбідів (карбоборидів) титану та вольфраму для отримання високозносостійких композиційних матеріалів та покриттів» (№ державної реєстрації 0120U101216, шифр теми П-7-20).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей процесів синтезу багатокомпонентної лігатури на основі системи $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn-C(B)}$ та впливу технологічних режимів виготовлення титаноматричних та металополімерних композитів з їх використанням на особливості структуроутворення та основні фізико-механічні і експлуатаційні властивості отриманих матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **завдання**:

1. Провести аналіз літературних даних щодо впливу армувальних частинок на особливості формування структури, фазового складу та механічних властивостей титаноматричних композитів.

2. Дослідити вплив режимів механоактивації порошкової суміші системи $\text{TiH}_2\text{-ФСМ-В}_4\text{С}$ на структуру та фазовий склад отриманої високодисперсної шихти.

3. Провести дослідження впливу технологічних режимів та складу вихідної шихти на процеси структуротворення при термічному синтезі лігатури на основі системи $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn-C(B)}$.

4. Встановити закономірності впливу компонентного складу вихідної шихти та технологічних режимів виготовлення на особливості структуроутворення та основні механічні властивості спечених титаноматричних композитів.

5. Дослідити закономірності впливу дисперсного багатокомпонентного титаноматричного наповнювача на основні фізико-механічні та функціональні властивості епоксиполімерного композиційного матеріалу.

Об'єкт дослідження: закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей титаноматричних та епоксиполімерних композитів, які вміщують високомодульні сполуки.

Предмет дослідження: процес отримання методом порошкової металургії композиційного матеріалу на основі титану та отримання епоксиполімерних композитів, зміцнених порошковими багатокомпонентними системати на основі $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn-C(B)}$.

Методи дослідження: оптична та електронна мікроскопія, металографічний, хімічний, мас-спектрометричний, мікрорентгеноспектральний, рентгеноструктурний, диференціальний термічний аналізи, випробування на твердість, мікротвердість, міцність на згин та повзучість, тріщиностійкість. Триботехнічні випробовування, 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, Херсонської державної морської академії та НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. **Вперше** запропоновано та експериментально підтверджено ефективність використання термічно синтезованої лігатури із багатокомпонентних порошкових сумішей на основі системи $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn-C(B)}$ для отримання спечених титаноматричних та епоксиполімерних дисперснонаповнених композитів з підвищеними фізико-механічними та функціональними властивостями.

2. **Вперше** встановлено закономірності впливу компонентного складу вихідної шихти на основі системи $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn-C(B)}$ на особливості структури та фазового складу термічно синтезованої лігатури. Показано, що при використанні феросплавів в якості одного з компонентів шихти відбувається їх активна взаємодія з гідридом титану, яка супроводжується дисоціацією вихідної лігатурної складової з утворенням складної гетерофазної системи, переважаючими фазами якої є карбід титану TiC , борид титану TiB , силіцид Ti_5Si_3 та інтерметалід типу $\text{Ti}_x(\text{Mn,Fe,Si})_y$.

3. **Вперше** встановлено вплив вмісту термічно синтезованої мультикомпонентної лігатури системи Ti-Fe-Si-Mn-C(B) та технологічних режимів виготовлення на особливості фазо- та структуроутворення і основні механічні властивості спечених титаноматричних композитів. Показано, що збільшення вмісту лігатурної складової у вихідній шихті з титаном з 10 до 30 % (мас.) призводить до підвищення твердості (до HRC 49-56) та границі плинності (до 1280 – 1520 МПа) композитів при кімнатній температурі, однак їх пластичність та тріщиностійкість зменшуються. Встановлено також, що легування сплаву з використанням мультикомпонентної лігатури, термічно синтезованої із порошкової суміші $\text{TiH}_2\text{-ФСМ-В}_4\text{С}$, призводить до суттєвого підвищення високотемпературних характеристик спеченого композиту. Границя плинності останнього $\sigma_{0,2}$ при 30 % (мас.) вмісту лігатури у вихідній шихті досягає значень 820 МПа при 600 °С та 440 МПа при 700 °С, а швидкість деформації $\dot{\epsilon}$ при випробуванні на повзучість при 750 °С на навантаженні в 100 МПа не перевищує $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

4. **Вперше** показано, що введення в епоксидну матрицю 10 - 20 % (мас.) композиційних дисперсних наповнювачів із мультикомпонентних титаноматричних композитів, значно підвищує рівень руйнівних напружень композиту: міцність на вигин збільшується до 1,8 разів, а ударна в'язкість — до 2,5 разів. Максимальні значення міцності і ударної в'язкості спостерігаються в композитах, армованих наповнювачами, синтезованими з порошкових сумішей, що містять карбід бору, а найвищим рівнем адгезійної міцності характеризується композит з 20 % (мас.) наповнювача, синтезованого із суміші $\text{TiH}_2\text{-FeSi-В}_4\text{С}$.

5. За результатами триботехнічних досліджень **отримало подальшого розвитку** уявлення про механізми зношування різнонаплавнених епоксикомпозитних матеріалів. Показано, що введення термічно синтезованого дисперсного наповнювача до складу полімеру та збільшення його концентрації призводить до зменшення коефіцієнта тертя μ на стадії сталого ковзання та суттєвого зменшення інтенсивності зношування у порівнянні із ненаповненим полімером.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Показана та обґрунтована технічна та економічна доцільність використання феросплавів як легуючої добавки до титану, що обумовлено економічними чинниками внаслідок суттєво меншої вартості феросплавів.

2. На основі проведених досліджень було обрано оптимальні склади та технологію отримання титаноматричних композиційних матеріалів, що вміщують лігатуру на основі системи 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 $\text{В}_4\text{С}$ з високим рівнем механічних властивостей при високотемпературних випробуваннях. Показано, що титаноматричні композити, які в своєму складі вміщують 20 та 30 % (мас.) лігатури при температурі випробування 600°С мають границю міцності на стиснення 721 та 821 МПа відповідно.

3. На основі проведених досліджень і отриманих результатів показано ефективність використання багатокомпонентних титаноматричних лігатур в якості наповнювача до епоксиполімерних композитів з метою підвищення фізико-механічних та триботехнічних характеристик.

4. Титаноматричний композит, розроблений у рамках дисертаційного дослідження, пройшов успішну дослідно-промислову апробацію на ТОВ «Інтер-Контакт-Пріор» та рекомендований до впровадження у виробництво сідел клапанів для насосів НМШ 5/25-2,5/6, призначених для перекачування високов'язких середовищ при підвищених температурах та знаходиться на стадії підготовки до серійного виробництва. (Акт використання результатів дисертаційної роботи від 21.01.2025 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні результати експериментальної роботи були отримані здобувачем особисто та з його безпосередньої участі. Автором проведено аналіз літературних джерел, розроблено методики проведення експерименту, проведено обробку результатів та їх узагальнення, підготовлені наукові статті та доповіді для міжнародних конференцій. Автором роботи було виготовлено всі досліджувані зразки, проведено металографічні дослідження, механічні випробування. 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. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на наступних науково-технічних конференціях: XIII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» (June 5-8, 2017) Varna, Bulgaria; 6th International Samsonov Conference «Materials Science of Refractory Compounds» (May 22-24, 2018), Kyiv, Ukraine; XV International Conference Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials «CORROSION-2020» (the 461st event of the European Federation of Corrosion) PROGRAM October 15–16, 2020 Lviv, Ukraine; All-Ukrainian scientific and Technical Conference «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ», 22-24 November 2022, Dnipro; 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023 October 2-6, 2023, Kyiv, Ukraine; конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2024» з міжнародною участю, Київ, 4 квітня 2024 року, Україна; IXth INTERNATIONAL SAMSONOV CONFERENCE «Materials science of refractory compounds» May 27-30, 2024, Kyiv, Ukraine.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 22 наукові праці, з яких 5 статей у виданнях, що індексуються у наукометричних базах даних «Scopus», 8 статей у фахових виданнях України та інших іноземних наукових виданнях, 7 тез доповідей у збірниках відповідних наукових конференцій та 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації – 254 сторінки. Дисертація містить 21 таблицю, 83 рисунки та список використаних джерел із 220 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, наведені дані щодо апробації роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану досліджень у галузі створення титаноматричних композитів із заданим комплексом характеристик. Розглянуто різні типи титаноматричних композитів, класифіковані за типом армування (дискретні частинки, волокна, пластини), матеріалом армування (кераміка, метали, інтерметаліди) та методами виробництва. Детально проаналізовано вплив різних армуючих компонентів (SiC , Al_2O_3 , TiC , TiB , B_4C , TiN та ін.) на механічні (міцність, жорсткість, пластичність, втомна міцність), фізичні (щільність, теплопровідність, коефіцієнт теплового розширення) та експлуатаційні (зносостійкість, корозійна стійкість, термостійкість) властивості ТМК. Розглянуто синергетичний ефект від комбінованого армування. Проаналізовано основні методи виробництва ТМК.

На основі проведеного аналізу літературних джерел виявлено ключові проблеми та невирішені питання в галузі створення ТМК з заданими властивостями, що стало підґрунтям для формулювання мети та завдань даного дослідження.

У другому розділі представлено дані про використані матеріали та методики дослідження структури, фазового та хімічного складу, фізико-механічних та триботехнічних властивостей титаноматричних та епоксиполімерних композитів.

В якості основи вихідних сумішей лігатур було використано вихідні порошки: гідрид титану, феросилікомарганець, ферокремній, вуглець (лампова сажа) та бору. Для дослідження впливу співвідношення компонентів суміші на структуру і фазовий склад лігатури вихідні порошки замішували у таких співвідношеннях: $50 \text{ TiH}_2 - 50 \text{ ФСМ}$ (% мас.); $65 \text{ TiH}_2 - 35 \text{ ФСМ}$ (% мас.); $50 \text{ TiH}_2 - 30 \text{ ФСМ} - 5 \text{ С (B}_4\text{C)}$ (% мас.).

Механоактивацію вихідної шихти проводили у планетарному млині при тривалості розмелювання від 5 до 18 хв. в середовищі спирту. Пресування заготовок проводили при 600 МПа на гідравлічному пресі в розбірних прес-формах. Для дослідження впливу середовища на формування структури та пористості термічний синтез проводили – в індукційній печі в середовищі аргону та у вакуумній – при температурі 1250 °С з витримкою 60 хв. Після термічного синтезу брикети розмелювали в планетарному млині протягом 10 хв. В результаті чого отримували порошок відповідної лігатури.

Для виготовлення армованого металокерамічного композиту на основі титану використовували порошок титану та подрібнену багатокомпонентну лігатуру системи $65 \text{ TiH}_2 - 30 \text{ ФСМ} - 5 \text{ B}_4\text{C}$ у кількості 10, 20 та 30 %. Порошкову шихту відповідних складів змішували в планетарному млині протягом 5 хв. в середовищі спирту. Заготовки під спікання отримували пресуванням на гідравлічному пресі під тиском 650 МПа шляхом двостороннього пресування в розбірній прес-формі. Спресовані заготовки спікали у вакуумі при температурах від 1100 до 1280 °С з ізотермічною витримкою протягом 60 хв.

Методами оптичної (XJL-17AT) та скануючої електронної (JEOL «Superprobe-733») мікроскопії досліджували морфологію частинок та мікроструктуру пресованих та спечених зразків на різних стадіях процесу. Рентгенівські дослідження фазового складу вихідної порошкової шихти та композиційних матеріалів проводились на дифрактометрі «Дрон-3» в Cu-K_α – випромінюванні.

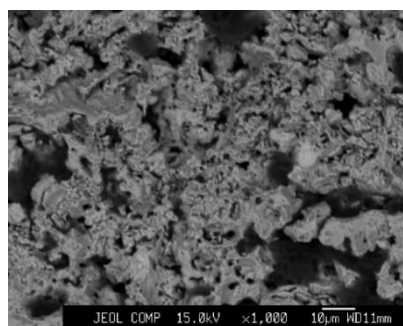
Дослідження механічних властивостей титаноматричних композиційних матеріалів проводилися: на установці РМ 102М (випробування на згин), на універсальній машині «Ceramtest» (випробування на стиснення та тріщиностійкість), випробування на повзучість проводили на установці «TermoTest», на приладі ТК-2 (твердість за методом Роквелла). Триботехнічні випробування проводилися на машині торцевого тертя М-22М у парі з швидкорізом Р18.

Для виготовлення епоксиполімерних композитів використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20, а для полімеризації епоксидних композицій використано затверджувач поліетиленполіамін ПЕПА у співвідношенні – ЕД-20 : ПЕПА = 10 : 1 по масі. В якості наповнювача використано дисперсні титаноматричні композиційні порошки, отримані методом термічного синтезу із сумішей: 65 TiH₂ – 30 ФСМ – 5 В₄С; 65 TiH₂ – 30 FeSi – 5 С; 65 TiH₂ – 30 FeSi – 5 В₄С.

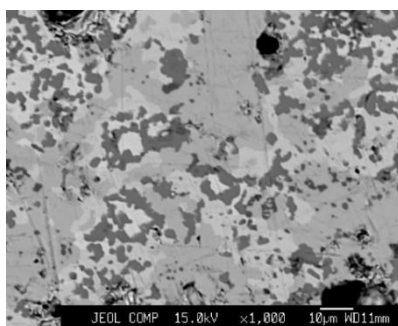
Формування композитів проводили шляхом попереднього змішування вихідної смоли, отверджувача та порошкового наповнювача. Наповнювачі вводили у зв'язувач за вмісту від 5 до 40 % (мас.) на 100 % (мас.) епоксидного олігомеру ЕД-20.

Показники руйнівних напружень при згинанні епоксиполімерних композитів визначали згідно з ASTM D 790-03 на розривній машині марки УМ-5, адгезійні властивості матеріалу – при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно з ASTM D 897-08. Залишкові напруження у КМ визначали консольним методом згідно ДСТУ ISO 16053:2019. Випробування на ударний згин проводили на маятниковому копрі МК-30 за методом Шарпі без надрізу згідно з ISO 179-1. Дослідження триботехнічних характеристик проводили на машині тертя М-22М за схемою «диск-колодка» в умовах сухого тертя при швидкостях $v = 0,5$ та $1,0$ м/с і питомому навантаженню $F_n = 1$ МПа відповідно, згідно ASTM G99-17. В якості контр-тіла слугував диск зі сталі 45 з твердістю 45...48 HRC та шорсткістю поверхні $R_a = 0,16...0,32$ μm .

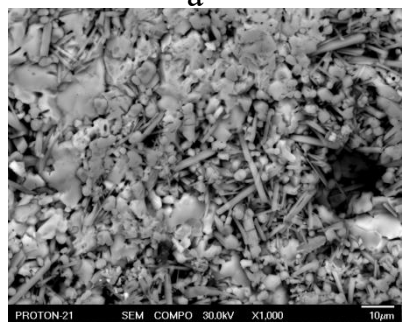
У **третьому розділі** досліджено особливості структуроутворення та фазового складу лігатури на основі системи TiH₂-Fe-Si-Mn-C(B) в процесі термічного синтезу.



а



б



в

а – 50 TiH₂ – 50 ФСМ;
б – 65 TiH₂ – 35 ФСМ;
в – 65 TiH₂ – 35 ФСМ
– 5 В₄С (% мас.)

Рисунок 1 –
Мікроструктура спечених
у вакуумі лігатур

Показано, що синтез при температурі 1000 °С не призводить до дифузії елементів між титаном, ФСМ та карбідом бору, тому з огляду на результати ДТА температурою термічного синтезу було обрано 1250 °С. Показано, що в процесі синтезу титан активно взаємодіє з ФСМ та карбідом бору з подальшим утворенням гетерофазної структури. Встановлено, що для всіх досліджуваних складів вихідних сумішей переважаючими фазами є карбід титану TiC, борид

титану TiB, силіцид Ti_5Si_3 та інтерметалід типу $Ti_x(Mn,Fe,Si)_y$.

Характер структури спечених лігатур суттєво залежить від вмісту гідриду титану. Структура лігатури складу 50 TiH_2 – 50 ФСМ (% мас) (рис. 1, а) складається переважно із інтерметалідних фаз і характеризується значною пористістю. В той час як лігатура, отримана із порошкової суміші 65 TiH_2 – 35 ФСМ (% мас), характеризується наявністю рівномірно розподілених в матричній фазі близьких до сферичної форми карбіду титану (середній розмір ≈ 2 мкм) та незначної кількості силіцидних фаз із середнім розміром близько 10÷20 мкм (рис. 1, б).

Мікроструктура лігатури (рис. 1, в), спеченої з додаванням 5 % B_4C , відзначається наявністю дисперсних частинок монобориду титану голкоподібної форми з розміром частинок 10–20 мкм, незначною кількістю дисперсних глобулярних зерен карбіду титану (3–5 мкм), відносно великими включеннями силіциду титану (~20 - 40 мкм), та матричною фазою на основі інтерметаліду $Ti(Mn,Fe,Si)_y$.

Дифракційна картина зразків, отриманих із сумішей 50 TiH_2 – 50 ФСМ та 65 TiH_2 – 35 ФСМ (% мас) дозволила ідентифікувати в їх складі карбід титану, силіцид титану та інтерметалід $Mn_{0,42}Ti_{0,48}$. Силіцидна фаза у сплаві 50 TiH_2 –50 ФСМ представлена Ti_5Si_4 з тетрагональною ґраткою ($a = 0,6713$ нм, $c = 1,2171$ нм), також на дифрактограмі ідентифікуються лінії ромбічного інтерметаліду $TiFeSi$ та рефлекси інтерметаліду $MnTi$. Основною фазою сплаву є карбід титану, параметр кристалічної ґратки якого становить 0,4307 нм, що відповідає складу вуглецю в карбіді 0,55. У сплаві з 65 TiH_2 – 35 ФСМ, вміст карбіду титану (параметр ґратки TiC 0,4280 нм) в складі зменшується, силіцидна фаза представлена Ti_5Si_3 гексагональної ґратки ($a = 0,7448$ нм, $c = 0,5114$ нм). Інтерметалід системи Mn-Ti представлений у вигляді сполуки $Mn_{0,42}Ti_{0,48}$. Крім вищеописаних фаз на дифрактограмі з'являються рефлекси потрібної сполуки титанокремнієвого карбіду Ti_5Si_3C гексагональної структури. При додаванні до вихідної суміші, що містить 65 % TiH_2 та 30 % ФСМ, 5 % B_4C на рентгенограмі з'являються лінії ромбічного бориду титану TiB, який стає основною фазою сплаву. Крім того на дифрактограмі фіксуються піки карбіду титану TiC, силіциду титану Ti_5Si_3 та потрібного титанокремнієвого карбіду Ti_5Si_3C .

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 2, табл. 1) лігатури, що містить 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 B_4C (% мас) вказують на складну багатофазну структуру матеріалу,

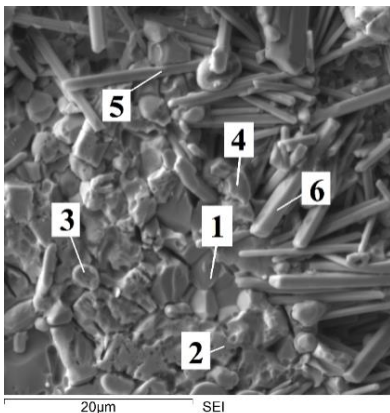


Рисунок 2 – СЕМ зображення лігатури 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 B_4C (% мас) після термічного синтезу у вакуумі

Таблиця 1 - Вміст (% ат.) елементів в різних точках зразку синтезованої лігатури 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 B_4C (% мас.)

№ спектру	Ti	Mn	Fe	Si	B	C	Фаза
1	34,6	30,0	5,5	5,7	13,8	10,5	$Ti_x(Mn,Fe,Si)_y$
2	34,0	31,6	6,1	7,6	11,9	8,9	$Ti_x(Mn,Fe,Si)_y$
3	47,2	–	–	–	17,4	35,4	TiC
4	49,7	1,2	–	28,1	11,1	10,0	Ti_5Si_3C
5	38,8	–	–	–	55,4	5,8	TiB
6	39,4	–	–	–	52,6	8,0	TiB

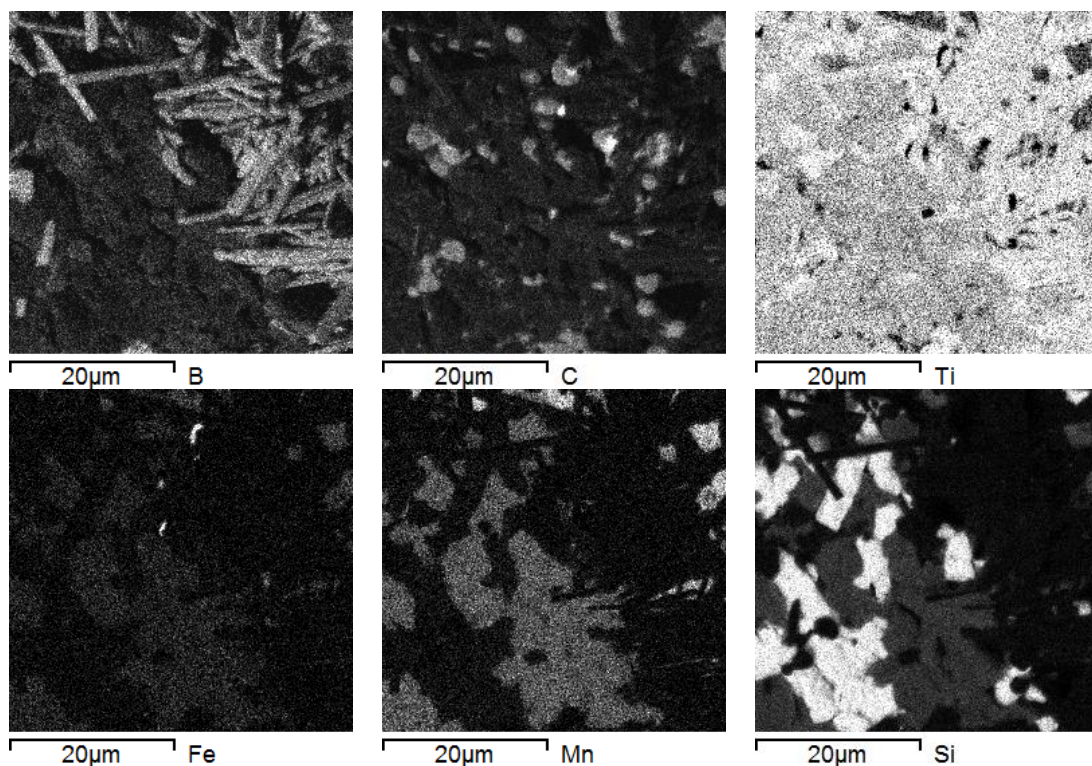


Рисунок 3 - Карта розподілу елементів після синтезу лігатури системи 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 B_4C (% мас.)

На рисунку 3 наведена карта розподілу елементів лігатури системи 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 B_4C (% мас.) підтверджує отримані результати рентгенофазового і мікрорентгеноспектрального аналізів. Карта розподілу титану демонструє суцільний фон за винятком декількох місць. На карті видно, що бор знаходиться в межах голок, утворюючи з титаном моноборид титану. Вуглець взаємодіє з титаном, утворюючи карбід титану, що підтверджуються округлими світлими ділянками на карті розподілу елементів. Чітко підсвічується Si, утворюючи з Ti силіцид титану. Fe та Mn спостерігаються в одній і тій же області, причому, Mn має яскравіше забарвлення, що може свідчити про його домінуючу присутність в інтерметалідній фазі $\text{Ti}_x(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})_y$, а також про можливість кристалографічного заміщення атомів марганцю атомами заліза в структурі.

В даному розділі також наведено результати впливу механоактивації на структуру та фазовий склад лігатури системи 65 TiH_2 – 30 ФСМ – 5 B_4C (% мас.). Для оцінки впливу механоактивації на фазо- та структуроутворення вихідну суміш піддавали високоенергетичному розмелюванню у планетарному млині в середовищі спирту протягом 5, 9, 12 та 18 хв., низькоенергетичному – в кульовому млині протягом 2 год, а також змішуванню в млині типу «п'яна бочка». Розмелювання суміші в млині типу «п'яна бочка» супроводжується утворенням агломератів розгалуженої форми (рис. 4, а) з великим розсіюванням розмірів та неоднорідним розподіленням вихідних матеріалів. Механоактивація в планетарному млині при 5 та 9 хв. оброблювання призводить до значного подрібнення вихідної шихти та збільшення їх сумарної площі поверхні (рис. 4, б, в). Збільшення ж тривалості розмелювання від 12 до 18 хв. призводить до формування лускатих шаруватих агрегатів.

Результати рентгенофазового аналізу засвідчили, що вихідний гідрид титану

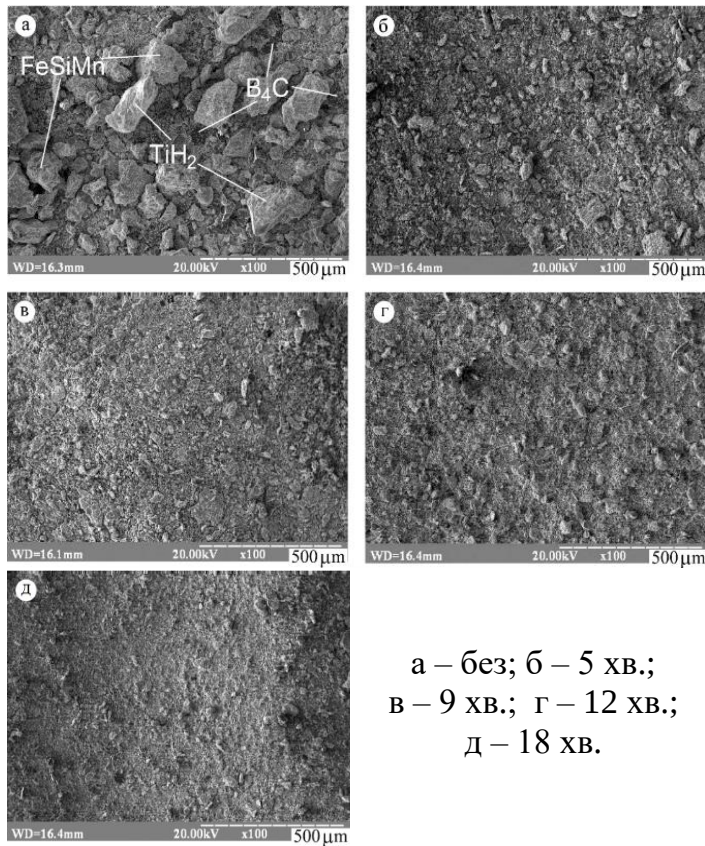


Рисунок 4 - СЕМ зображення порошків вихідних сумішей за різної тривалості механоактивації

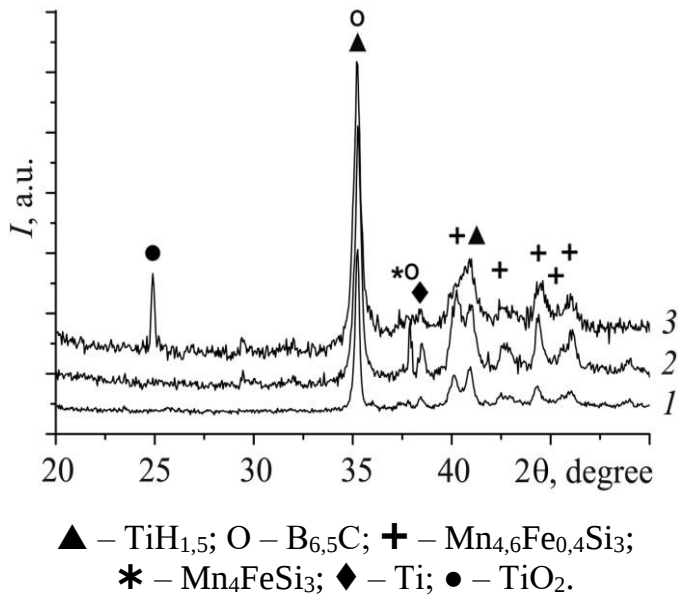
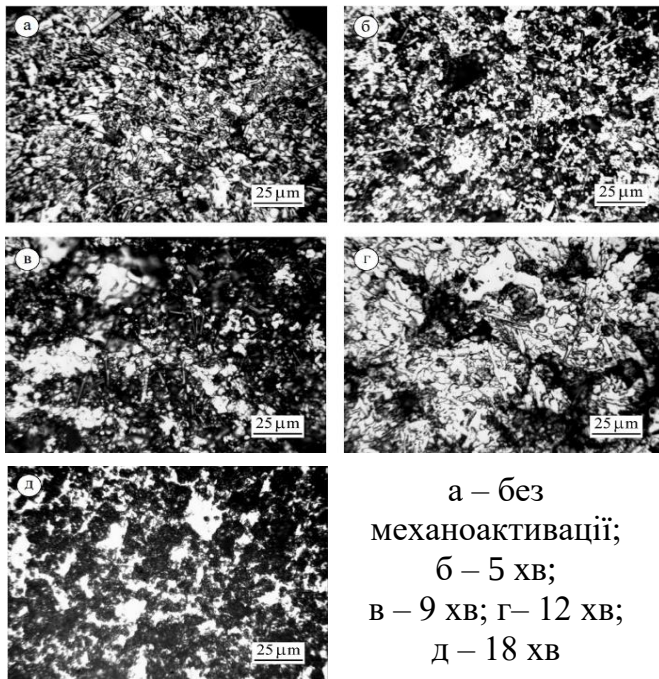


Рисунок 5 - Порівняння фрагментів дифрактограм суміші вихідних порошків (1) та розмеленої в планетарному млині при 9 (2) та 18 хв. (3)

відповідає формулі $\text{TiH}_{1.97}$, ФСМ складається з двох фаз з гексагональною кристалічною структурою: $\text{Mn}_{4.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Si}_3$ та Mn_4FeSi_3 . Вихідний карбід бору відповідає формулі B_{13}C_2 . Дифрактограма фіксує в ньому також деяку кількість вільного вуглецю (рис. 5).

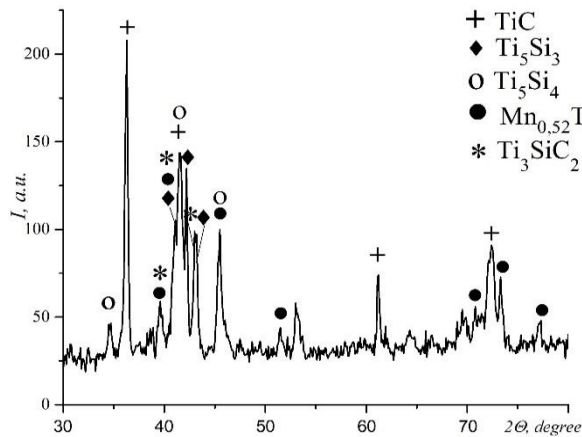
Під час розмелювання шихти в кульовому млині вихідні речовини дещо змінюються: гідрид титану втрачає частку водню, періоди його кристалічної ґратки зменшуються і він відповідає формулі $\text{TiH}_{1.5}$. За подальшого розмелювання 18 хв. всі вихідні речовини суттєво деформуються, на дифрактограмі з'являється чіткий пік оксидної фази TiO_2 , що формується, ймовірно, в результаті каталітичної дегідратації спирту. Тому недоцільно перевищувати тривалість розмелювання цієї суміші в планетарному млині понад 12 хв.

Порівняльний аналіз мікроструктур зразків (рис. 6), отриманих із шихти за різних режимів оброблення, засвідчив, що попередня механоактивація порошкової суміші з одночасним подрібненням зерен фазових складників сплаву призводить також і до деякої їх конгломерації, ступінь якої зростає зі збільшенням тривалості розмелювання до 12 хв. (рис. 6, а–г). Це можна пояснити як утворенням під час інтенсивного розмелювання лускоподібних конгломератів, так і значною активацією дифузійних процесів під час спікання зі збільшенням ступеня спотворення кристалічної ґратки сплаву через інтенсивну пластичну деформацію часток внаслідок розмелювання. Дещо менша конгломерація зерен у матеріалі,

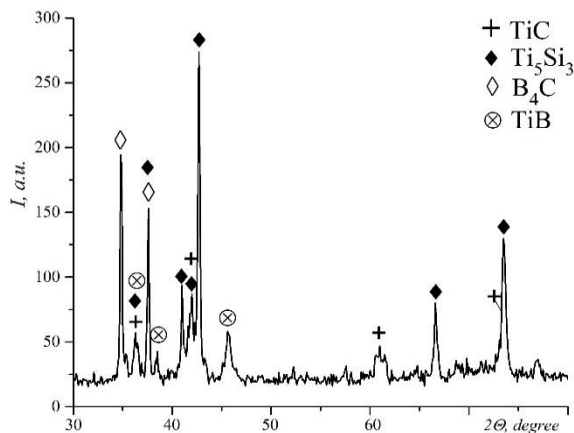


а – без
механоактивації;
б – 5 хв;
в – 9 хв; г– 12 хв;
д – 18 хв

Рисунок 6 – Мікроструктура спечених зразків, отриманих із порошкових сумішей, після різних видів механоактивації



а

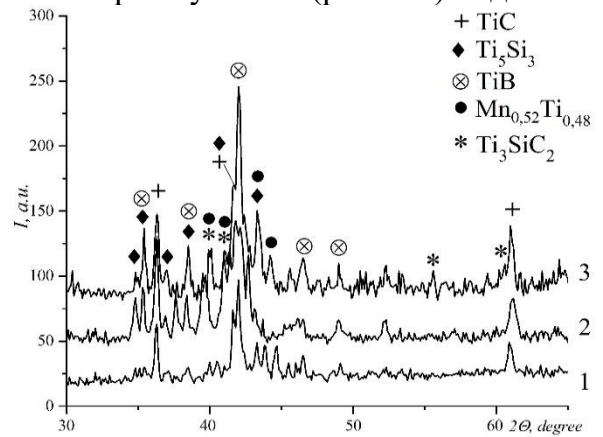


б

отриманому із шихти, обробленої в планетарному млині 18 хв. (рис. 6, д). Це, вочевидь, можна пояснити більшою крихкістю його фазових складників внаслідок підвищеного вмісту кисневих сполук.

Виявлено, що під час спікання при 1250 °С фазовий склад сплавів, одержаних із розмелених за різними режимами порошкових сумішей, суттєво змінюється. Зокрема, у зразках, отриманих зі суміші після низькоенергетичного розмелювання (рис. 7, а) в кульовому млині, з'являється значна кількість чітких ліній карбіду титану та силіцидних фаз, представлених сполуками Ti_5Si_3 та Ti_5Si_4 . Матрична фаза представлена у вигляді сполуки системи $Ti-Mn$. Спостерігали також рефлекси титанокремнієвого карбіду Ti_5Si_3C .

Дифрактограми спечених із сумішей зразків після 5, 9 та 12 хв. механоактивації у планетарному млині (рис. 7 б) подібні.



б

а – низькоенергетичний розмел;
б – механоактивація при 1) 5 хв., 2) 9 хв., 3) 12 хв.; у планетарному млині
в – механоактивація 18 хв. у планетарному млині

Рисунок 7 - Фрагменти дифрактограм сплавів, синтезованих при 1250 °С із суміші TiH_2 – ФСМ – B_4C після різних видів механоактивації

Під час механоактивації з'являються лінії бориду титану TiB , який змінює відносну інтенсивність рефлексів на фоні зменшення відносної інтенсивності ліній карбіду титану. З'являється також силіцидна фаза Ti_5Si_3 , збільшується кількість ліній карбіду Ti_5Si_3C , інтенсивність якого зростає з тривалістю механоактивації.

Сплав, отриманий з механоактивованої суміші протягом 18 хв. (рис. 7, в), характеризується великою кількістю силіцидної фази Ti_5Si_3 , яка стає основною на рентгенограмі. Також з'являються піки нерозкладеного карбіду бору, ймовірно, як результат впливу діоксиду титану, який утворився під час тривалого процесу розмелювання. Присутні рефлекси карбіду та бориду титану.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу технологічних режимів та компонентних складів на особливості структури та основні фізико-механічні характеристики титаноматничного композитного матеріалу. Для виготовлення армованого металокерамічного композиту на основі титану використовували порошок титану марки ПТМ-1 та багатокомпонентну лігатуру системи TiH_2 – ФСМ – B_4C у кількостях 10, 20 та 30 % (мас.). Спресовані заготовки спікали у вакуумі при температурах від 1100 до 1280 °C з ізотермічною витримкою протягом 60 хв.

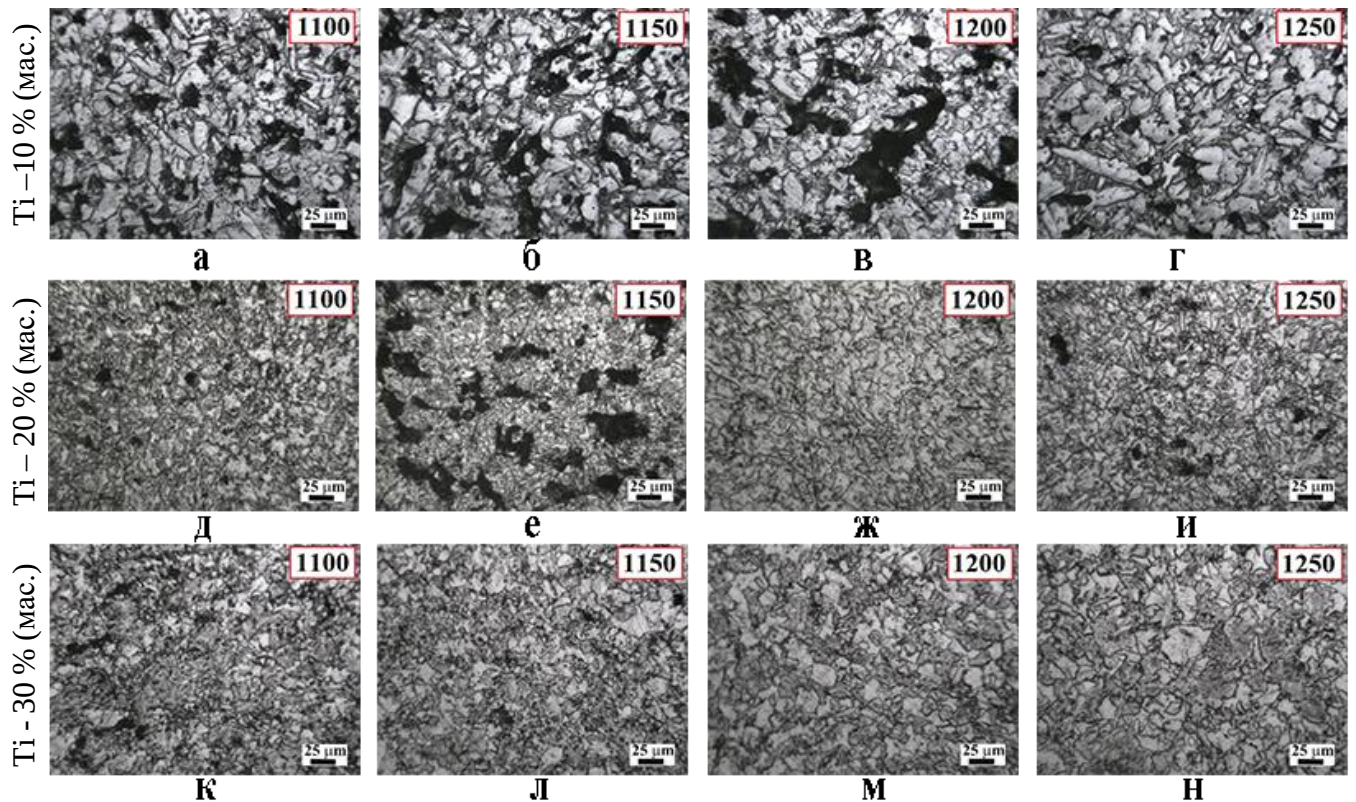


Рисунок 8 – Мікроструктури композитів різного компонентного складу спечених при температурах спікання від 1100 до 1280 °C

При введенні 10 % (мас.) лігатури та спіканню при температурах 1100 – 1150 °C в структурі спостерігається значна кількість пор (рис. 8 а, б). Пори залишаються досить великими, навіть при збільшенні температури до 1200 °C (рис. 8, в). При температурі 1250 °C (рис. 8, г) спостерігається збільшення розмірів зерен внаслідок процесів коалесценції та росту зерен титану.

Введення до складу титану 20 % (мас.) та температури спікання вище 1100 °C (рис. 8, д) призводить до більш плавного зростання зерен, які, в свою чергу, є меншими за

розмірами, порівняно із введенням 10 % лігатури. Найщільніша структура з мінімальною кількістю пор спостерігається за температури 1200 °С (рис. 8, ж). Введення 30 % (мас.) лігатури призводить до значно більшого об'єму рідкої фази, що забезпечує краще заповнення міжзернових просторів, що сприяє утворенню більш щільної і однорідної структури. Спінання при температурах вище 1200 °С (рис. 8, м, н) для даного складу лігатури демонструє тенденцію до формування крупніших і більш рівномірно розподілених зерен, що є результатом активнішого процесу коалесценції.

Дослідження фазово-структурного стану зразків показали, що для всіх отриманих композитів спостерігається високий вміст ГЦУ твердого розчину на основі α -Ti: від ~20–

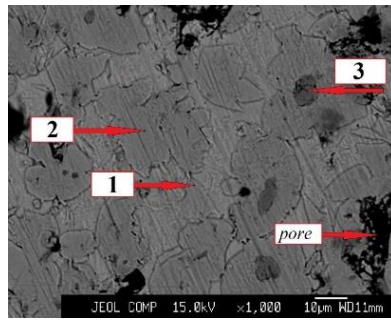
Таблиця 2 - Фазовий склад спечених зразків із вмістом 10, 20 та 30 лігатури, % (мас.) за результатами рентгенівського фазового аналізу при температурах 1100-1280 °С

Склад композиту, % (мас.)	Температура спікання, °С	Фазовий склад, % об.				
		α -Ti	β -Ti	TiB	TiC	Ti ₅ Si ₃ B
90 Ti – 10 лігатури	1100	82	4	3	5	6
	1150	80	12	6	2	—
	1200	66	26	6	2	—
	1250	65	29	3	3	—
80 Ti – 20 лігатури	1100	63	3	10	16	8
	1150	34	34	14	9	8
	1200	46	25	8	10	10
	1250	64	27	5	2	2
70 Ti – 30 лігатури	1100	39	2	28	19	12
	1150	23	39	7	12	14
	1200	33	5	21	4	37
	1250	46	2	9	13	29
	1280	65	5	8	7	6

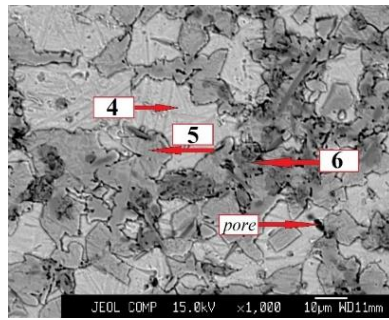
30 % до ~80 % (об.) (табл. 2). Вміст стабілізованої ОЦК фази на основі β -Ti суттєво різний: від рівня домішок 2–5 % (мас.) до ~30–40 % (мас.). Після відпалу при 1100 °С спостерігається низький вміст β -фази у всіх зразках, але він суттєво зростає після такої ж термообробки при 1150 °С. Це можна пояснити різним вмістом β -стабілізаторів у титанових фазах. При температурах 1200 °С і вище розподіл β -стабілізаторів у композитах із вмістом лігатури 10 та 20 % (мас.)

суттєво відрізняється від ситуації із композитами 70 % Ti – 30 % лігатури (мас.): перші містять багато β -фази, а другі – мало. Піки кубічного карбіду титану TiC_x спостерігаються після відпалу шихти композиту із 10 % (мас.) лігатури при 1100 °С. Підвищення температури відпалу і збільшення вмісту лігатури супроводжуються ростом вмісту TiC_x. При збільшенні температури спікання до 1200 °С на дифрактограмі з'являються піки ромбічного TiB також збільшуються. При збільшенні вмісту армувальних часток до 20 % (мас.) паралельно з TiC та TiB спостерігається утворення невеликої кількості фаз потрібного Ti₅Si₃B. Вміст 30 % (мас.) призводить до збільшення кількості та інтенсивності піків TiC та Ti₅Si₃B.

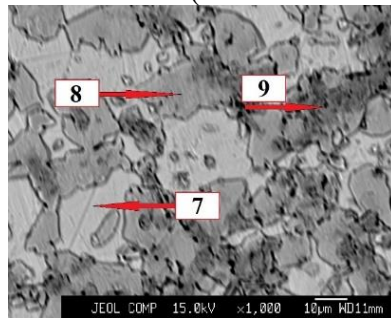
Показано, що дані отримані з ЛРСА (рис. 9, табл. 3) повністю корелюють із рентгенофазовим аналізом. Сірі зерна представляють собою твердий розчин на основі β -титану, темно-сірі - твердий розчин на основі α -титану (табл. 3, спектри 2, 5, 8).



(a)



б



в

Рисунок 9 – Електронно-мікроскопічне зображення мікроструктури зразків із вмістом 10 %, мас. (а); 20 %, мас. (б) 30 %, мас. (в) у відбитих електронах після спікання при 1200 °С

Основними армуючими фазами в досліджених композитах є ті самі високомодульні сполуки TiB, TiC_{0,5} і Ti₅Si₃B, що містилися в лігатурі. Хоча візуальна ідентифікація фази типу β -Ti на

мікроструктурних зображеннях є складною, дані рентгенофазового аналізу (табл. 2), а також розраховані МоЕ за Чжоу та Вангом однозначно підтверджують присутність даної фази.

Таблиця 3 - Вміст (% , ат.) елементів в різних точках зразків титаноматричних композитів спечених при температурі 1200 °С

№ спектру	Ti	Mn	Fe	Si	B	C	Структурні складові	(MoE) _w	(MoE) _{zh}
1	94,75	0,61	2,82	0,23	—	1,60	(β -Ti)*	8,4	8,5
2	97,72	0,01	0,00	0,24	—	2,03	(α -Ti)*	0,5	0,0
3	71,97	0,02	0,02	0,02	19,87	8,10	HMR**	—	—
4	93,67	0,67	3,72	0,24	—	1,70	(β -Ti)	10,6	10,9
5	97,80	0,06	0,06	0,29	—	1,79	(α -Ti)	0,8	0,3
6	52,05	0,00	0,12	0,11	43,57	4,15	HMR	—	—
7	91,87	1,37	4,94	0,89	—	0,93	(β -Ti)	16,3	15,3
8	97,27	0,10	0,03	0,62	—	1,98	(α -Ti)	1,4	0,3
9	52,40	0,04	0,04	0,32	42,58	4,62	HMR	—	—

* () – дужки вказують, що це твердий розчин на основі α - або β -Ti

**HMR (High-Modulus Reinforcements) - високомодульні сполуки (TiC, TiB, Ti₅Si₃B)

Дослідження фізико-механічних властивостей отриманих композитів показує, що вміст лігатури значно впливає на зміцнення матеріалу, особливо на його пластичність. Найнижчі показники твердості має композит із вмістом 10 % лігатури і становить на рівні 22 – 24 HRC, найбільші значення твердості має композит із вмістом 30 % лігатури (45 – 56 HRC).

Таблиця 4 - Залежність механічних властивостей титаноматричних композитів від вмісту лігатури та температури спікання

Склад композиту, % (мас.)	Т спікання, °C	σ_{zg} , МПа	HRC	σ_{001} , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_v , МПа	$\delta_{пл}$, МПа
90 Ti – 10 лігатура	1100	705	22,0	640	897	1522	15
	1150	578	20,0	571	772	1319	15
	1200	596	20,0	715	1064	1800	21
	1250	746	24,0	556	919	1886	19
80 Ti – 20 лігатура	1100	539	22,0	604	1015	1674	9
	1150	458	28,5	766	1283	1885	5
	1200	437	42,0	869	1528	2291	1
	1250	381	40,0	529	880	1655	11
70 Ti – 30 лігатура	1100	432	41,0	785	1310	1905	2
	1150	293	46,0	518	1172	2293	2
	1200	408	49,0	574	1235	2277	2
	1250	506	56,0	855	1417	2180	7

Зразки, леговані 10 % лігатури (табл. 4), демонструють значно вищу пластичність (15 – 20 %) порівняно зі зразками з більшим вмістом лігатури, у яких варіюється в межах від 2 до 10 %. Збільшення вмісту високомодульної складової в шихті до 20 та 30 % (мас.) призводить до підвищення значень границі плинності, але в свою чергу знижує його пластичні характеристики порівняно з композитом із 10 % лігатури.

Найкращими значеннями границі плинності ($\sigma_{0.2} = 1000 - 1500$ МПа) характеризуються композити спечені при температурі 1200 °C, тому саме ці зразки були обрані для подальшого дослідження. Твердість композитів зростає зі збільшенням армуючої фази та температури відпалу.

Тріщиностійкість (рис. 10) композитів, відпалених за температури 1200 °C знижується зі збільшенням вмісту лігатури, що пов'язано із збільшенням об'ємної частки керамічної фази у структурі сплавів.

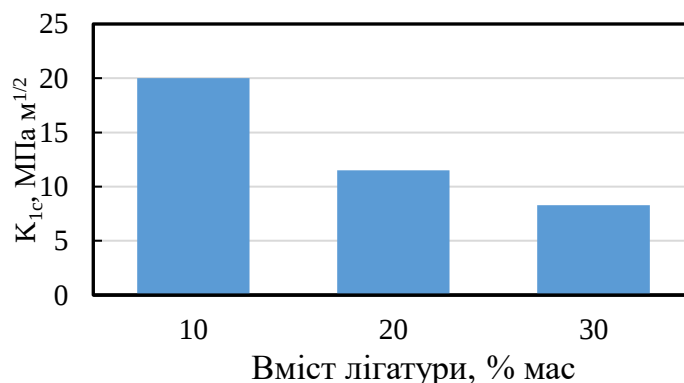


Рисунок 10 - Вплив кількості лігатури на тріщиностійкість композиту

Високотемпературні випробування на стиснення (рис. 11) показали, що композити з вмістом лігатури 20 та 30 % (мас.) мають найвищі значення границі плинності, рівні ~ 821 МПа та ~ 721 МПа відповідно при температурі випробування 600 °C, тоді як границя

плинності композиту із вмістом 10 % (мас.) лігатури становить ~ 322 МПа, що в 2,2 – 2,5 рази менше. Подальше підвищення температури випробування призводить до зниження значень границі плинності.

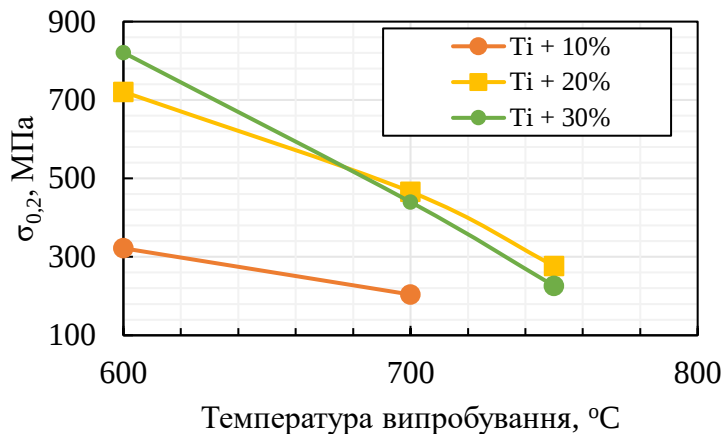
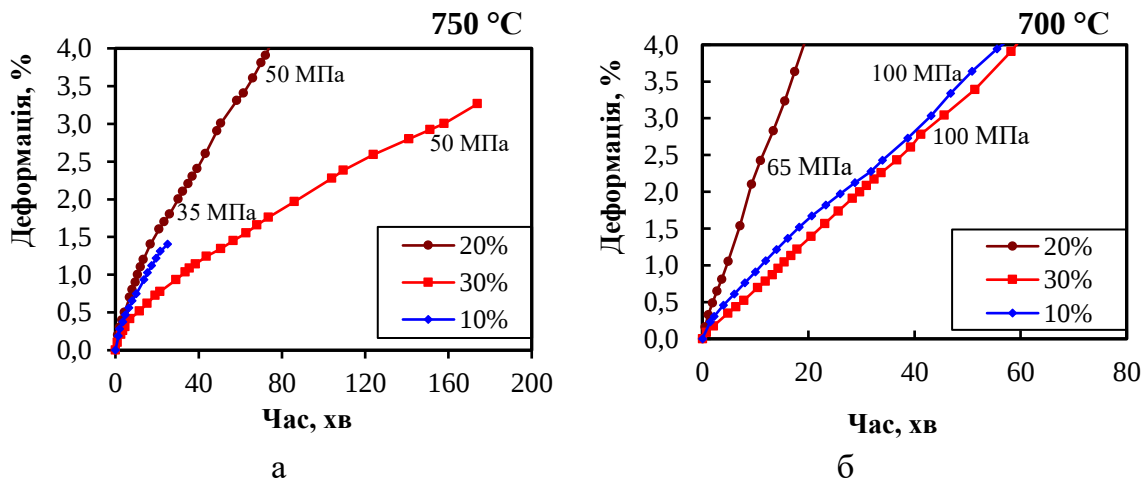


Рисунок 11 - Вплив температури випробування на границю плинності композитів з різним вмістом лігатури

Випробування на повзучість (рис. 12) показали, що сплав з 30 % (мас.) лігатури дещо краще опирається повзучості, ніж сплав з 20 % (мас.) і значно краще, ніж сплав з 10 % (мас.) лігатури. Значення прикладеного напруження, за якого швидкість повзучості стає задовільною для сплаву з 10 % (мас.) лігатури є 35 МПа та 50 МПа для температур 750 та 700 °C, відповідно, для сплаву з 20 та 30 % (мас.) лігатури ці значення становлять 50 та 100 МПа.



а – 50 МПа для композитів 20 та 30 % (мас.), 35 МПа для 10 % (мас.);

б – 100 МПа для композитів 20 та 30 % (мас.), 65 МПа для 10 % (мас.)

Рисунок 12 - Залежність швидкості повзучості композитів із різним вмістом лігатури при температурах випробування 750 °C (а) та 700 °C (б) та різного навантаження

Триботехнічні властивості композитів спечених при температурі 1200 °С проводили у парі зі швидкорізом Р18. За результатами випробувань показано, що при швидкості ковзання 2 м/с (рис. 13, а) найвищим коефіцієнтом тертя μ на рівні 0,6-0,65 відзначається композит із вмістом 20 % (мас.) армувальних частинок, при чому після проходження шляху 1 км відбувається його катастрофічний знос, при якому даний матеріал перестає працювати. Аналогічний ефект проявляється також для композиту із вмістом 10 % (мас.) високомодульних сполук, але стадія катастрофічного зношування для нього проявляється при меншій відстані ковзання (~0,78 км) та дещо менших значеннях μ (~0,52). Збільшення ж кількості лігатури до 30 % (мас.) призводить до зниження коефіцієнту тертя до значень 0,4 – 0,5. Найбільшим коефіцієнтом тертя при швидкості ковзання 4 м/с μ (~0,3 – 0,49) володіє композит із вмістом 30 % (мас.) лігатури (рис. 13, б). Показано, що при швидкостях ковзання 2 та 4 м/с спостерігається коливання даних коефіцієнту тертя, що свідчить про адгезійне зношування характерне для титанових сплавів.

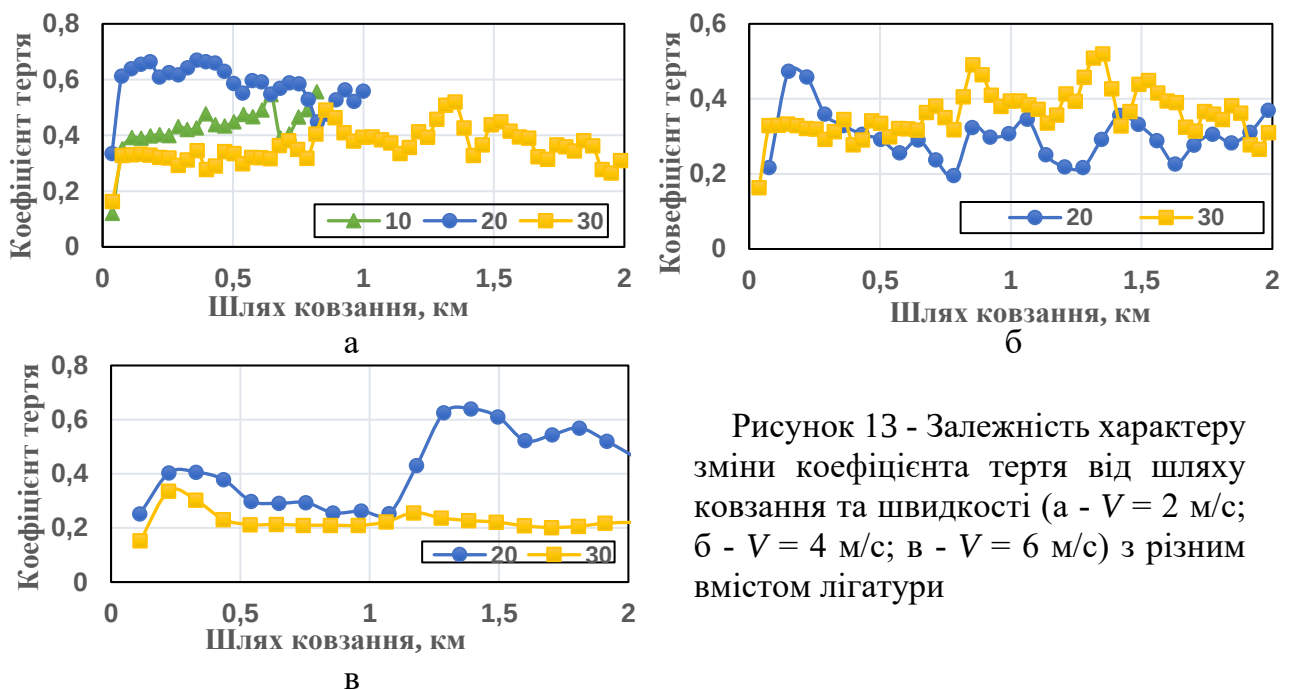


Рисунок 13 - Залежність характеру зміни коефіцієнта тертя від шляху ковзання та швидкості (а - $V = 2$ м/с; б - $V = 4$ м/с; в - $V = 6$ м/с) з різним вмістом лігатури

Із збільшенням швидкості ковзання до 6 м/с (рис. 13, в) для композиту із вмістом 30 % (мас.) армувальних частинок коефіцієнт тертя зменшується до значень ~0,2 - 0,23, що може пояснюватись утворенням захисних оксидних плівок під дією навантаження та зростання температури в зоні трибоконтакту під час випробувань, тобто відбувається окисне зношування.

П'ятий розділ присвячений дослідженню впливу дисперсних порошкових наповнювачів, отриманих методом термічного синтезу на головні фізико-механічні властивості полімерного композита на основі епоксидного діанового олігомера ЕД-20. На основі проведених досліджень встановлено, що введення до епоксидної матриці 5 % (мас.) дисперсних наповнювачів призводить до підвищення показників руйнівних напружень (рис. 14). Найкращими показниками міцності на вигин (рис. 14, а) характеризуються композити які вміщують 10-20 % (мас.) наповнювачів. Максимальні значення ударної в'язкості (рис. 14, б) досягаються при введенні наповнювача $q = 10$ % (мас.) для матеріалів

з частками $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$ та $\text{TiH}_2\text{-FeSi-C}$, що корелює з результатами руйнівних напружень при згинанні.

Збільшення ж вмісту наповнювача більше 20 % (мас.) призводить до зменшення показників руйнівних напружень КМ незалежно від складу лігатури. Тобто, при збільшенні вмісту наповнювачів у об'ємі КМ утворюються концентратори напружень, які погіршують стійкість матеріалу в умовах впливу динамічних навантажень.

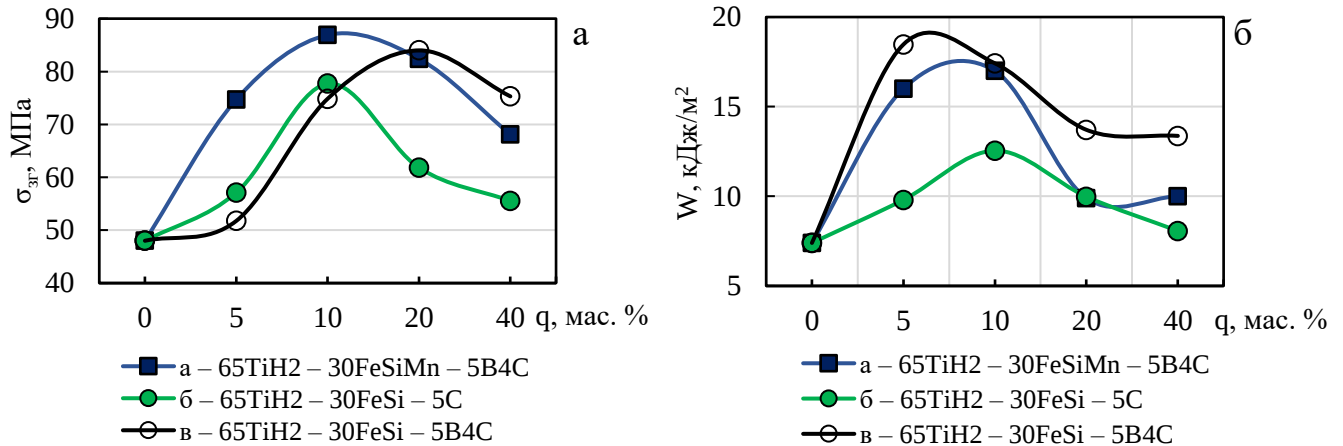


Рисунок 14 - Залежність міцності на вигин ($\sigma_{зг}$) та ударної вязкості (W) КМ від вмісту наповнювачів, % (мас.)

Результати дослідження адгезійної міцності покриттів з отриманих композитів дозволили виявити наступні закономірності. Введення у епоксидний олігомер часток дрібнодисперсного наповнювача $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$ та $\text{TiH}_2\text{-FeSi-C}$ за вмісту $q = 5$ % (мас.) призводить до незначного зниження показників адгезійної міцності при відриві відносно матриці і становить $\sigma_a = 22,05$ МПа та $23,09$ МПа (рис. 15) відповідно. При збільшенні вмісту наповнювачів до $q = 10\text{-}20$ % (мас.) показники адгезійної міцності матеріалів підвищуються. У випадку наповнення КМ дисперсними частками $\text{TiH}_2\text{-FeSi-B}_4\text{C}$ (рис. 15, а) динаміка адгезійної міцності значно відрізняється. Властивості матеріалу поліпшуються при незначному вмісті наповнювача $q = 5$ % (мас.), при цьому адгезійна міцність становить $\sigma_a = 30,74$ МПа і може бути пов'язана з утворенням у матеріалі структурної сітки з оптимальною кількістю вузлів зшивання. Збільшення вмісту даного наповнювача понад $q = 10$ % (мас) призводить до зменшення адгезійної міцності при відриві.

Збільшення наповнювачів понад 20 % (мас.) призводить до різкого зниження адгезійної міцності, де величина σ_a знаходиться в інтервалі 19–20 МПа, це пов'язано з тим, що додавання частинок наповнювача поза межами критичного вмісту призводить до збільшення в'язкості системи і водночас зменшує ступінь його змочування.

Встановлено, що результати дослідження залишкових напружень підтверджують динаміку адгезійної міцності при відриві. Для всіх КМ при введенні часток наповнювачів $q = 5$ % (мас.) залишкові напруження суттєво зменшуються від $\sigma_z = 1,4$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_z = 0,29\text{...}0,59$ МПа (рис. 15, б). При подальшому введенні наповнювача криві залишкових напружень монотонно коливаються в діапазоні $\sigma_z = 0,33\text{...}0,69$ МПа (рис. 15, б).

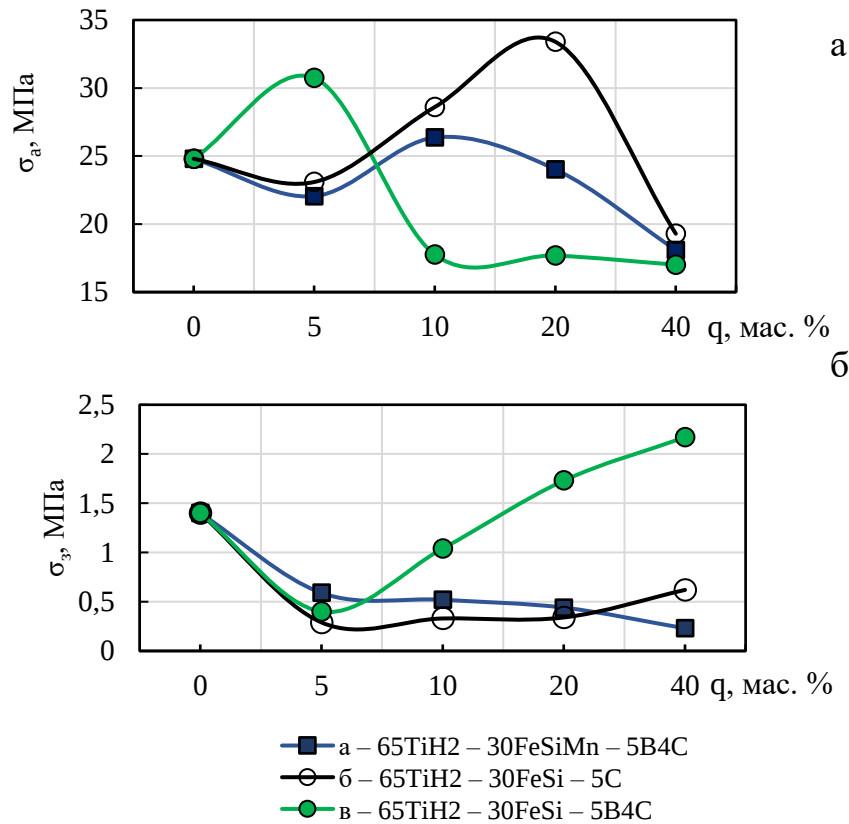
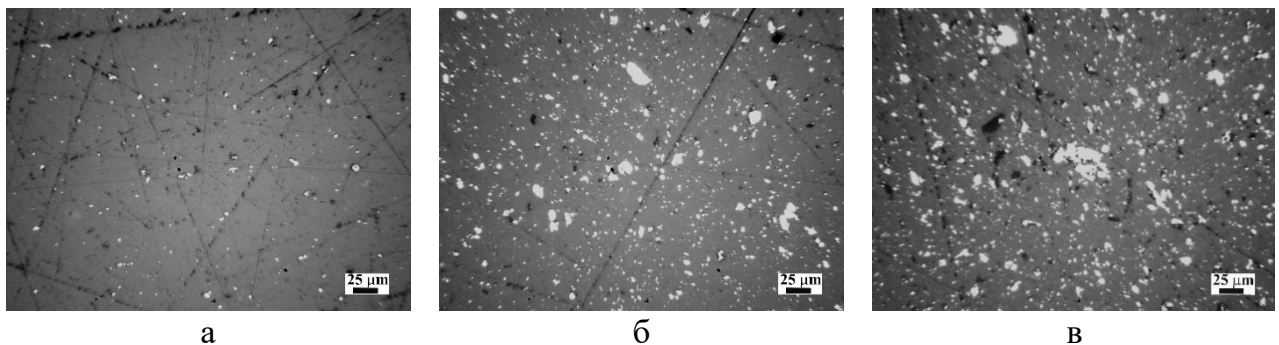


Рисунок 15 – Залежність адгезійної міцності (σ_a) та залишкових напружень (σ_3) у композиті від вмісту дисперсного наповнювача, % (мас.)

За результатами мікроструктурного аналізу встановлено, що структура отриманих композитів змінюється відповідно до зміни концентрації дисперсної складової (рис. 16) і характеризується рівномірним розподіленням частинок синтезованого порошку у матриці. Розмір цих частинок становить від 2 до 5 мікрон. Площа їх розташування на поверхні зразка зростає зі збільшенням концентрації дисперсних складових. При збільшенні концентрації дисперсних складових понад 10%, починають утворюватися агломерати.



а – 5 % (мас.); б - 20 % (мас.); в - 40 % (мас.)

Рисунок 16 – Типова мікроструктура епоксиполімерного композиту з різним вмістом наповнювача системи TiH₂-FeSiMn-B₄C

Агломерація частинок наповнювача відбувається через високу питому поверхню, яка підвищує поверхневу енергію порошку і призводить до утворення великих пор між агломератами, що призводить до помітного зниження механічних властивостей композитів. Пори утворюють порожнини в структурі композиту, сприяючи поширенню тріщин і руйнуванню композиту навіть при незначному навантаженні.

В ході експериментальних досліджень було показано, що введення синтезованого дисперсного порошку до складу полімеру призводить до зменшення коефіцієнта тертя μ на стадії сталого ковзання у порівнянні із ненаповненим полімером. При швидкості

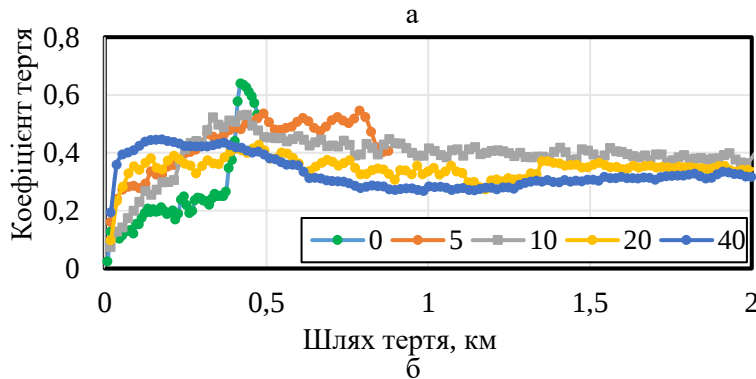
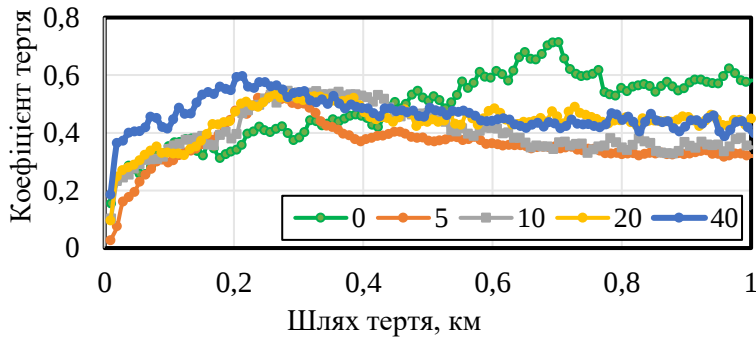


Рисунок 17 - Залежність характеру зміни коефіцієнта тертя від шляху ковзання та швидкості ковзання (а – 0,5 м/с, б – 1 м/с) для полімерів з різним вмістом наповнювача

ковзання 0,5 м/с та збільшення концентрації наповнювача з 5 до 40 % призводить до незначного підвищення коефіцієнта тертя (рис. 17, а), тоді як із збільшенням швидкості ковзання до 1 м/с (рис. 17, б) значення μ

монотонно зменшується при збільшенні вмісту дисперсної складової композиту. Таку закономірність можна пояснити тим, що високі рівні теплового впливу сприяють переходу матеріалів у контактних мікрооб'ємах з твердого склоподібного стану у більш м'який високоеластичний стан.

На поверхні тертя утворюється так зване «третє тіло» у вигляді еластичної плівки полімеру з частинками наповнювача товщина, структура, склад та тривалість існування якої

визначають коефіцієнт тертя та зносостійкість системи. Поява тонкої термопластичної плівки в області контактної поверхні призводить до помітного зменшення коефіцієнта тертя.

Результати оцінки зносостійкості полімерів в залежності від наявності та концентрації наповнювача, наведені в таблиці 5 (абсолютні значення інтенсивності зношування) та рисунку 18 (значення питомого зношування) показали, що масовий знос при терті полімера без наповнювача більш ніж в 100 разів перевищує рівень зносу наповнених дисперсними частинками композитів (табл. 5). Необхідно, однак, зауважити, що характер залежності величини лінійного зношування полімерів від шляху ковзання досить близько корелює із залежністю зміни коефіцієнтів тертя та температури в зоні трибоконтакту та вказує на стрибкоподібний характер їх зміни.

Таблиця 5 - Залежність інтенсивності зношування $\Delta m/L$ (мг/км) полімерних композитів та контртіла від концентрації наповнювача та швидкості ковзання

Кількість наповнювача, % (мас.)	Швидкість ковзання, м/с	Інтенсивність масового зносу ЕПК, (мг/км)	Інтенсивність масового зносу контртіла, (мг/км)
0	0,5	172	0,1
5	0,5	1,5	0,075
10	0,5	1,1	0,1
20	0,5	0,6	0,1
40	0,5	1,1	0,12
0	1	344	0,3
5	1	2,1	1,4
10	1	1,85	1,12
20	1	0,95	0,65
40	1	1,33	0,1

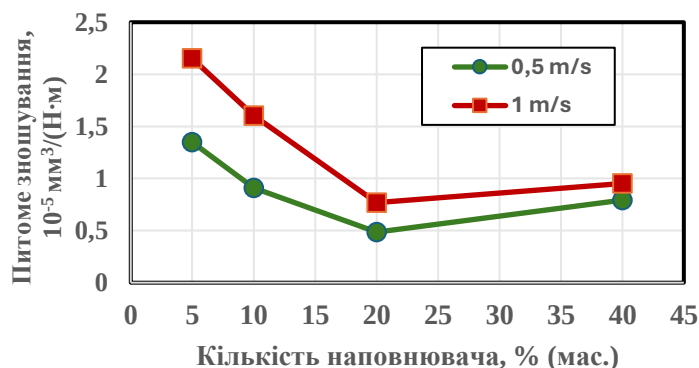


Рисунок 18 - Вплив концентрації наповнювача в ЕПК на питомий знос композиту

При введенні в склад полімеру частинок кермету та із збільшенням його концентрації в полімері з 5 до 20 % (мас.) для обох швидкостей ковзання спостерігається суттєве зниження інтенсивності зношування (зменшується питомий знос). Однак при збільшенні вмісту наповнювача до 40 % рівень катастрофічного зношування дещо зростає, що добре корелює із залежністю міцності композиту від вмісту дисперсного наповнювача.

Інтенсивність зношування контртіла при швидкості ковзання 0,5 м/с знаходиться на рівні 0,1 мг/км і вкрай несуттєво змінюється при зміні концентрації наповнювача в полімері (табл. 5). В той же час, при збільшенні швидкості ковзання до 1,0 м/с інтенсивність зношування контртіла при терті в парі з полімером без наповнювача збільшується практично втричі (до 0,3 мг/км), а при введенні в склад полімеру навіть мінімального вмісту часток твердого наповнювача в 5 % (мас.) - навіть до 1,4 мг/км. Однак підвищення концентрації наповнювача супроводжується зменшенням інтенсивності зношування контртіла і при 40 % (мас.) наповнювача в полімері досягає мінімального рівня 0,1 мг/км.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки нових титаноматричних та металополімерних композитів різних компонентних груп функціонального призначення на основі результатів дослідження процесів фазо- та структуроутворення, а також впливу технологічних режимів виготовлення на основні фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів.

1. Показано, що використання комплексних феросплавів при термічному синтезі мультикомпонентних титаноматричних композитів призводить до їх активної взаємодії з титановою матричною фазою, що супроводжується дисоціацією вихідної лігатурної компоненти з утворенням складної гетерофазної системи, переважаючими фазами якої є карбід титану TiC , силіцид Ti_5Si_3 , інтерметалід типу $Ti_x(Mn,Fe,Si)_y$, моноборид титану TiB та карбосиліцидна фаза Ti_5Si_3C . При введенні в склад шихти карбіду бору основною фазою сплаву стає вже карбід титану TiC і помітно зростає інтенсивність ліній орторомбічної фази монобориду титану. Поряд з карбідом титану в рентгенівському спектрі композиту виділяються також інтерметалідна фаза Mn_5Ti та силіцидна фаза Ti_5Si_3 .

2. Вивчено вплив механоактивації на структурно-фазовий стан та технологічні властивості порошкових шихт на основі системи $TiH_2-Mn-Si-Fe-B_4C$. Встановлено, що механоактивація вихідної шихти протягом 5...12 хв. суттєво активує усадку зразків (до 25...30 %) при спіканні та забезпечує зменшення пористості вихідних пресовок. В той час, як усадка після розмелювання в кульовому млині, не перевищує 8 %. Механоактивація протягом 12 хв. призводить до підвищення інтенсивності ліній бориду титану та появи титанокремнієвого карбіду. Показано недоцільність збільшення тривалості розмелювання понад 12 хв. через можливість формування лускатих шаруватих агрегатів та інтенсифікацію окиснення титану.

3. Встановлено вплив компонентного складу порошкової суміші «лігатура – титан» та режимів спікання шихти на структуру та основні механічні властивості композитів. Показано, що із збільшенням вмісту лігатури в шихті відбувається інтенсифікація усадки при спіканні спресованих зразків. Рентгеноструктурний аналіз показав, що всі зразки після спікання при 1200 °C складаються переважно з гексагонального $\alpha-Ti$, а також деякою кількістю фази на основі $\beta-Ti$, карбіду титану TiC та бориду титану TiB . Збільшення вмісту лігатури призводить до утворення потрійного Ti_5Si_3B . Показано, що із збільшенням вмісту лігатурної складової у вихідній шихті як твердість, так і характеристики міцності зразків зростають, а показники пластичності закономірно зменшуються. Збільшення об'ємної частки керамічної складової в структурі призводить до зниження тріщиностійкості титаноматричних композитів. Найкращими значеннями міцності при стисненні при кімнатній температурі характеризуються композити спечені при температурі 1200 °C.

4. Дослідження фізико-механічних властивостей титаноматричних композитів показали, що найкращими значеннями границі плинності при стисненні за кімнатної температури (~1280 – 1520 МПа) відзначаються композити із вмістом 20 та 30 % (мас.) лігатури. Водночас спостерігалось зниження їхньої пластичності та тріщиностійкості. Результати високотемпературних випробувань показали, що композити із вмістом лігатури 20 % та 30 % (мас.) досягають значень границі плинності ~ 721 МПа та ~ 821 МПа при температурі випробовування 600 °C та 466 і 440 МПа при 700 °C відповідно. Експериментально визначені значення швидкості деформації, які змінюються в діапазоні $\dot{\epsilon} \sim 10^{-5}—10^{-6} \text{ c}^{-1}$. Результати випробування на повзучість показали, що сплав з 30 %

лігатури краще опирається повзучості, ніж сплав з 20 % і значно краще, ніж сплав з 10 % лігатури.

5. За результатами комплексних триботехнічних випробувань титаноматричних композитів показано, що найкращими триботехнічними характеристиками відзначаються композити з вмістом 30 % лігатури при швидкості тертя 6 м/с, що забезпечує збільшення зносостійкості при стабільному коефіцієнті тертя ($0,2 \div 0,23$) у порівнянні із композитами із вмістом 10 та 20 % (мас.). Відзначається, що механізм зношування змінюється від адгезійного (при швидкості ковзання 2 м/с) до адгезійно-абразивного (при 4 м/с) та до окисного при швидкості ковзання 6 м/с. Показано, що збільшення швидкості ковзання до 6 м/с призводить до утворення щільного трибошара з більшою кількістю трибооксидів, що запобігає прямому металевому контакту в парах тертя та зниженню коефіцієнта тертя.

6. За результатами дослідження впливу дисперсних наповнювачів, отриманих із синтезованих порошкових сумішей систем $\text{TiH}_2\text{-Mn-Si-Fe-B}_4\text{C}$, $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-B}_4\text{C}$ та $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-C}$, на фізико-механічні та триботехнічні характеристики епоксиполімерних композитів встановлено, що введення часток порошкової шихти у кількості 10-20 % (мас.) на 100 % (мас.) епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує значне підвищення їх фізико-механічних характеристик. Зокрема, міцність на вигин збільшується до 1,8 разів, а ударна в'язкість — до 2,5 разів. Максимальні значення міцності і ударної в'язкості спостерігаються в композитах, армованих наповнювачами, синтезованими з порошкових сумішей, що містять карбід бору. Найвищим рівнем адгезійної міцності характеризується композит з вмістом 20 % (мас.) наповнювача, синтезованого із суміші $\text{TiH}_2\text{-FeSi-B}_4\text{C}$. Показано, що залишкові напруження з наповнювачем, до складу якого входить бор, зменшуються майже в 3 рази. Було визначено, що оптимальний вміст для формування адгезійного шару покриття становить 10 % (мас.) для наповнювачів $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$ та $\text{TiH}_2\text{-FeSi-B}_4\text{C}$ або 5 % (мас.) для наповнювача $\text{TiH}_2\text{-FeSi-C}$.

7. Трибологічні дослідження епоксиполімерних композитів показали, що введення синтезованого дисперсного порошку до складу полімеру призводить до зменшення коефіцієнта тертя μ на стадії сталого ковзання. Показано, що при введенні в склад полімеру частинок керметів (на основі систем $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$, $\text{TiH}_2\text{-FeSi-B}_4\text{C}$ та $\text{TiH}_2\text{-FeSi-C}$) та із збільшенням їх концентрації в полімері з 5 до 20 % (мас.) для швидкостей ковзання 0,5 м/с та 1 м/с спостерігається суттєве зниження інтенсивності зношування. Показано, що зношування контртіла при терті в парі з полімером без наповнювача та при вмісті наповнювача 5-10 % (мас.) суттєво підвищується. Подальше збільшення вмісту дисперсної складової та швидкості ковзання 1,0 м/с призводить до утворення захисної плівки на поверхні тертя, зменшуючи тим самим інтенсивність зношування контртіла. Вміст наповнювача у кількості 40 % призводить до найменшої інтенсивності зношування контртіла.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, які індексуються у міжнародних наукометричних базах даних:

1. Bagliuk G.A., Suprun O.V. (Baranovska O.V.), Mamonova A.A. The Influence of Synthesis Temperature on the Phase Composition and Structure of Ternary Compounds Produced from $\text{TiH}_2\text{-Si-C}$ Powder Mixtures // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2019. - Vol. 58, № 1-2, P.1–6. <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00040-9>. *Особистий внесок*

здобувача: виконано підготовку порошкових сумішей та оптимізацію параметрів синтезу з урахуванням вибраних температурних режимів. Проведено експериментальні дослідження фазового складу та мікроструктури отриманих зразків.

2. **Baranovska O.V.**, Bykov O.I., Bagliuk G.A., Kyryliuk S.F. Influence of the Mechanical Activation of Charge on the Structure and Phase Composition of Sintered Multicomponent Composites Based on Titanium // Materials Science. – 2021. – Vol. 57, № 2. – P. 201-208. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00532-3>. *Особистий внесок здобувача:* виконано підготовку порошкових матеріалів, розроблено експериментальні методики та проведено дослідження фазового складу і структури спечених зразків. Здійснено аналіз отриманих експериментальних результатів та їх інтерпретацію.

3. Baglyuk G.A., **Baranovska O.V.**, Buketov A.V., Saprionov O.O., Smetankin S.O., Bykov O.M. and Baranovskyi D.I. Physicomechanical properties and structure of multicomponent titanium-matrix-base alloy dispersion epoxy composites // Strength of Materials. – 2023. - Vol. 55, No. 3 – P. 534-543. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00546-z>. *Особистий внесок здобувача:* проведено підготовку дисперсних багатокомпонентних порошків. Проведено експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей і структури отриманих композитів. Виконано аналіз та інтерпретацію отриманих результатів.

4. **Baranovska O.V.**, Bagliuk G.A., Buketov A.V., Saprionov O.O., Baranovskyi D.I. The Influence of the Dispersed Filler of the Ti–Fe–Si–C System on the Physicomechanical Properties and Structure of Epoxy Composites // Materials Science. – 2024. - Vol. 59, No. 5 – P. 608–615. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00817-3>. *Особистий внесок здобувача:* проведено підготовку дисперсних багатокомпонентних наповнювачів, аналіз результатів дослідження механічних властивостей композитів залежно від вмісту дисперсного наповнювача.

5. **Baranovska O.**, Bagliuk G., Buketov A., Saprionov O., Baranovskyi D. Exploration of Titanium-Based Fine-Particle Additive Influence on Cohesive and Adhesive Strength Enhancement in Epoxy-Polymer Composites // Physics and Chemistry of Solid State. – 2024. – Vol. 25, No.3. – P. 453–460. <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.453-460>. *Особистий внесок здобувача:* дослідження адгезійних та когезійних властивостей композитів залежно від вмісту модифікатора і обґрунтування результатів експерименту.

Публікації у інших іноземних наукових виданнях та фахових виданнях України:

6. Bagliuk G.A., **Suprun O.V. (Baranovska O.V.)**, Mamonova A.A. The Influence of the Synthesis Temperature on Phase Composition and Structure of Ternary Compounds Obtained from the Powder Mixture of the TiH₂-Al-C System // Physics and Chemistry of Solid State. - 2017. - Vol. 18, № 4. – p. 438-443. <https://doi.org/10.15330/pcss.18.4.443>. *Особистий внесок здобувача:* проведено підготовку вихідних порошкових складів для синтезу матеріалів, проведено дослідження впливу температури на мікроструктуру та фазового складу.

7. **Супрун О. В. (Барановська О.В.)** Особливості фазоутворення при термічному синтезі композитів типу МАХ-фаз, отриманих із порошкових сумішей на основі систем TiH₂-Al-C та TiH₂-Si-C / О.В. Супрун, Г.А. Баглюк // Кераміка: наука і життя. – 2017. – 4 (37). – С. 16-24. <https://doi.org/10.26909/csl.4.2017.3>. *Особистий внесок здобувача:* вивчення структури, хімічного, фазового складу, аналіз мікроструктури та дифрактограми, обробка результатів.

8. Г.А. Баглюк, **О.В. Супрун (Барановська О.В.)**, А.А. Мамонова. Особливості структуроутворення при термічному синтезі багатокомпонентних сполук із порошкових сумішей на основі системи $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn-C(B}_4\text{C)}$ // Наукові нотатки. – 2017. – №58. – С. 27–35. *Особистий внесок здобувача*: дослідження фазового складу і структури багатокомпонентних сполук синтезованих із порошкових сумішей.

9. **Suprun O. (Baranovska O.)**, Bagliuk G., Shirokov O. Features of the phase and structure formation of multi-component compounds on the basis of $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-Mn}$ system with different content of B_4C // Наукові нотатки. – 2019. – №66. – С. 344–350. *Особистий внесок здобувача*: дослідження впливу кількості B_4C на формування структури та фазового складу багатокомпонентного композиту.

10. **Baranovska O.**, Bagliuk G., Bykov O., Hrypachevsky O., Talash V., Rudenko Yu., Baranovskyi D. The Influence of Electrochemical Corrosion on the Structure and Phase Composition of a Sintered Multicomponent Titanium-Based Composite in a 3% NaCl Solution // Machines. Technologies. Materials. – 2023. – Vol. 17, Issue 2 – P. 90-92. *Особистий внесок здобувача*: проведено експериментальні дослідження змін структури та фазового складу композиту після впливу корозійного середовища у розчині 3% NaCl. Здійснено аналіз отриманих результатів.

11. **Baranovska O.**, Bagliuk G., Sudavtsova V., Romanova L. Thermodynamic properties of melts of binary and ternary systems containing Fe, Mn, Si or Ti // Machines. Technologies. Materials. – 2024. – Vol. 18, Issue 6 – P. 207-209. *Особистий внесок здобувача*: побудова графіків, аналіз отриманих результатів і їх узагальнення.

12. **Baranovska O.**, Bagliuk G., Olifan O., Korichev S., Sytnyk Ya., Ahanov A. Structural and phase transformations in titanium alloys induced by ferrosilicon alloying // BOHR International Journal of Material Sciences and Engineering. – 2024. - Vol. 1, No. 2, pp. 1–7. <https://doi.org/10.54646/bjmse.2024.10>. *Особистий внесок здобувача*: вивчення структури, хімічного, фазового складу, аналіз мікроструктури та дифрактограми, обробка результатів.

13. Судацова В.С., Романова Л.О., **Барановська О.В.**, Баглюк Г.А. Термодинамічні властивості розплавів подвійних і потрійних систем, що містять Fe, Mn, Si, Ti або C // Наукові нотатки. – 2024. – №78. – С. 43-50. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.6>. *Особистий внесок здобувача*: проведено моделювання термодинамічних властивостей розплавів системи Ti-Fe-Mn-Si-C .

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. **Suprun O.V. (Baranovska O.V.)**, Baglyuk G.A., Mamonova A.A. Features of Structure Formation in $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-C/B}_4\text{C}$ Titanium Matrix Composite after Thermal Synthesis // XIII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» (June 5-8, 2017) Varna, Bulgaria, PP. – 157-162. *Особистий внесок здобувача*: дослідження умов отримання титаноматричних зносостійких матеріалів, вивчення температури термічного синтезу на мікроструктуру і фазовий склад композиту.

15. **Suprun O.V. (Baranovska O.V.)**, Baglyuk G.A. Features of structure formation after thermal synthesis of composite materials based on $\text{TiH}_2\text{-Si-C}$ system // 6th International Samsonov Conference “Materials Science of Refractory Compounds” (May 22-24, 2018), Kyiv, Ukraine – P. 72. *Особистий внесок здобувача*: дослідження особливостей структуроутворення композитних матеріалів після термічного синтезу.

16. **Baranovska O.**, Bagliuk G., Talash V. Electrochemical and corrosion properties of the Multi-Component Composite of the $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$ system // XV International

Conference Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials “CORROSION-2020” (the 461st event of the European Federation of Corrosion) PROGRAM October 15–16, 2020 Lviv, Ukraine, PP. – 37. *Особистий внесок здобувача:* проведено підготовку зразків для дослідження корозійної стійкості матеріалів у розчині 3% NaCl, побудова графіків, аналіз даних.

17. **Baranovska O.** Features of Phase Formation of a Sintered Multicomponent Composite from a Powder Mixture Based on the $\text{TiH}_2\text{-Fe-Si-C}$ System // All-Ukrainian scientific and Technical Conference «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». Conference organizers: Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, 22-24 November, Dnipro. – 2022. – Р. 45. *Особистий внесок здобувача:* підготовка сумішей шихт для отримання композитів, дослідження оптимальних умов отримання композитів на основі гідриду титану, дослідження впливу температури спікання на зміну структури і фазового складу композитів.

18. Bagliuk G., **Baranovska O.**, Buketov A., Sapronov O., Bykov O. Influence of The Dispersed Filler on the Physical and Mechanical Properties of The Epoxy Composite // 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023 October 2-6, 2023, Kyiv, Ukraine, P. - 46. *Особистий внесок здобувача:* формування дисперсних наповнювачів, побудова графіків, виконано оцінку впливу дисперсного наповнювача на фізико-механічні властивості епоксидних композитів.

19. **Барановська О.В.**, Судацова, В.С., Баглюк Г.А. Моделирование термодинамических свойств расплавов системы Fe-Mn-Si // Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2024» з міжнародною участю, Київ, 4 квітня 2024 року, Україна. – С. 29-30. *Особистий внесок здобувача:* проведено моделювання термодинамічних властивостей расплавів системи Fe-Mn-Si.

20. **Baranovska O.**, Romanova L., Sudavtsova V., Bagliuk G. Interaction Energy in the Melts of the Fe-Mn-Si-C-Ti System // IXth INTERNATIONAL SAMSONOV CONFERENCE “MATERIALS SCIENCE OF REFRACTORY COMPOUNDS” May 27-30, 2024, Kyiv, Ukraine, P. – 49. *Особистий внесок здобувача:* Виконано розрахунки енергії взаємодії в расплавах системи Fe-Mn-Si-C-Ti, побудова графіків.

Патенти:

21. Патент України на корисну модель UA 129662, C22C 33/02, C22C 14/00, C22C 38/54. Зносостійкий композиційний матеріал / **О.В. Супрун (О.В. Барановська)**, Г.А. ОБаглюк. - № у 2018 04189; заявл. 17.04.2018; опубл. 12.11.2018. – Бюл. № 21. *Особистий внесок здобувача:* створення зносостійкого композиційного матеріалу методом порошкової металургії, дослідження мікроструктури та фізико-механічних властивостей отриманого матеріалу.

22. Патент України на корисну модель UA 152763, C09D 4/00, C08L 63/00. Спосіб одержання наповненої епоксидної композиції з поліпшеною теплостійкістю / А.В. Букетов, А.Г. Кулініч, В.М. Гусев, Г.А. Баглюк, **О.В. Барановська**, В.Л. Алексенко, В.І. Палагній. - № у 2022 00160; заявл. 17.01.2022; опубл. 13.04.2023. – Бюл. № 15. *Особистий внесок здобувача:* дослідження впливу вмісту модифікатора на теплостійкість епоксикомпозиту.

АННОТАЦІЯ

Барановська О.В. Вплив високомодульних сполук на формування структури та фізико-механічних властивостей титаноматричних та епоксиполімерних композитів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство» (13 Механічна інженерія). Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2025.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки нових титаноматричних та металополімерних композитів різних компонентних груп функціонального призначення на основі результатів дослідження процесів фазо- та структуроутворення, а також впливу технологічних режимів виготовлення на основні фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів.

В роботі на основі суміші системи $\text{TiH}_2\text{-Mn-Si-Fe-C(B)}$, отримані карбідо- та боридовміщуючі лігатури, а також встановлено вплив компонентного складу вихідної шихти на особливості структури та фазового складу термічно синтезованої лігатури. Вивчено вплив механоактивації на структурно-фазові властивості порошкових шихт на основі системи $\text{TiH}_2\text{-ФСМ-В}_4\text{С}$. Встановлено ефективність застосування високоенергетичного розмелу вихідної порошкової суміші в планетарному млині, а також необхідний час розмелу для отримання оптимальних структурно-фазових властивостей. Використання механоактивації суміші призводить до зменшення вмісту карбіду титану і появи боридної фази TiB , яка стає основною фазою. Встановлено, що механоактивація вихідної шихти суттєво інтенсифікує усадку до 25-30 %.

Показано особливості структуро- та фазоутворення композиту на основі титану, армованого багатокомпонентними зміцнюючими частинками TiC , Ti_5Si_3 , TiB . Показано вплив температурних режимів спікання та кількості зміцнюючих частинок на формування структури та фазового складу титаноматричного композиту. Вміст армувальних частинок в кількості 20 та 30 % (мас.) призводить до покращення рівня механічних властивостей.

В роботі також розглянуто вплив дисперсних порошкових наповнювачів на основні фізико-механічні властивості полімерного композиту на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20. Показано, що наповнювачі в кількості 5 – 10 % (мас.) значно підвищують ударну в'язкість, зменшують залишкові напруження, покращують адгезійну міцність матеріалу. Запропоновано модель, що пояснює встановлені залежності механічних характеристик композиту від вмісту наповнювача, яка ґрунтується на гіпотезі щодо незалежного впливу на властивості композиту механічного та структурного факторів.

Ключові слова: лігатура, термічний синтез, гідрид титану, карбід титану, борид титану, інтерметалід, титаноматричний композиційний матеріал, стиснення, епоксиполімерний композит, адгезія, міцність, коефіцієнт тертя.

ANNOTATION

Baranovska O.V. Influence of high-modulus compounds on the structure formation and physical and mechanical properties of titanium matrix and epoxy polymer composites.

– The qualification scientific work presented as a manuscript.

The thesis for candidate degree of technical science on specialty 05.02.01 – «Materials Science». – Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, 2025.

The work is devoted to solving the actual scientific and technical problem of developing new titanium matrix and metal-polymer composites of various functional component groups. This is based on the results of research into phase and structure formation processes, as well as the influence of manufacturing technological modes on the fundamental physical, mechanical, and operational properties of the materials.

Carbide- and boride-containing master alloys were obtained based on the $\text{TiH}_2\text{-Mn-Si-Fe-C(B)}$ system. The influence of the component composition of the initial charge on the structure and phase composition of thermally synthesized master alloys was established. The impact of mechanical activation on the structural and phase properties of powder charges based on the $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$ system was studied. The effectiveness of high-energy milling of the initial powder mixture in a planetary ball mill was confirmed, along with the required milling time to achieve optimal structural and phase properties. Mechanical activation of the mixture resulted in reduced titanium carbide content and the emergence of the titanium boride phase (TiB), which became the primary phase. It was determined that mechanical activation of the initial charge significantly intensifies shrinkage, reaching 25–30 %.

The structural and phase formation features of titanium-based composites reinforced with multicomponent strengthening particles (TiC , Ti_5Si_3 , TiB) were demonstrated. The influence of sintering temperature regimes and the volume fraction of strengthening particles on the structure and phase composition of titanium matrix composites was investigated. An increase in the reinforcing particle content to 20–30 % (wt.) led to an improvement in mechanical properties..

The study also examined the effects of dispersed powder fillers on the primary physical and mechanical properties of a polymer composite based on the ED-20 epoxy resin. The addition of 5–10 % (wt.) fillers significantly increased impact toughness, reduced residual stresses, and enhanced adhesion strength. A model explaining the observed dependencies of composite mechanical properties on filler content was proposed, which is based on the hypothesis of the independent influence of mechanical and structural factors on the composite properties.

Keywords: master alloy, thermal synthesis, titanium hydride, titanium carbide, titanium boride, intermetallic, titanium matrix composite material, compression strength, epoxy polymer composite, adhesion, strength, friction coefficient.

Підписано до друку 03.02.2025 р. Формат 60х90¹/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк 0,9
Тираж 100 прим. Замовлення № 26
Дільниця оперативної поліграфії Інституту проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України
03142, м. Київ–142, вул. Омеляна Пріцака, 3