

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузь знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Вплив вмісту елементів та методу формування
антифрикційних композитних сплавів системи Al-Fe-Sn
на їх властивості»**

Шифр MPTAM 24.23623.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАм-23-1


Підпис

М. І. Середюк
Ініціали, прізвище

Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.


Підпис

С. Ф. Посонський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.


Підпис

О. В. Духа
Ініціали, прізвище

11 12 2024 р.

Хмельницький, 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*

Освітній рівень *магістр*

Спеціальність *132 «Матеріалознавство».*

Спеціалізація *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ



Диха О.В.
10 жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Середюку Михайлу Івановичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Вплив вмісту елементів та методу формування антифрикційних композитних сплавів системи Al-Fe-Sn на їх властивості.*

керівник роботи: *Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.*

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від *26.08.2024р. № 60 (Д 28)*

- 2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру** *16.12.2024 р.*
- 3. Вихідні дані до проекту (роботи)** *Матеріали курсових проектів, переддипломної практики.*
- 4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити)
 - 1) Аналітичний огляд антифрикційних композиційних матеріалів.*
 - 2) Методика та обладнання для дослідження властивостей і структури композитів Al-Fe-Sn*
 - 3) Дослідження властивостей та структури композитів Al-Fe-Sn, отриманих методом спікання та підданих подальшому гарячому доуцілюванню.*
- 5. Перелік графічного матеріалу (презентація):**

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналітичний огляд антифрикційних композиційних матеріалів.</i>	30.10.24	вик
2	<i>Методика та обладнання для дослідження властивостей і структури композитів Al-Fe-Sn</i>	15.11.24	вик
3	<i>Дослідження властивостей та структури композитів Al-Fe-Sn, отриманих методом спікання та підданих подальшому гарячому доуцілюванню</i>	23.11.24	вик
4	<i>Висновки, рекомендації</i>	4.12.24	вик
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	6.12.24	вик
6	<i>Допуск до захисту</i>	12.12.24	вик
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	16.12.24	

Студент


Підпис

Середюк М. І.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посонський С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-23-1 Середюк Михайло Іванович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Вплив вмісту елементів та методу формування антифрикційних композитних сплавів системи Al-Fe-Sn на їх властивості» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 18 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та 2 додатків розміщених на 9 сторінках. Роботу викладено на 77 сторінках, з них 69 сторінок основного тексту, на яких розміщено 17 рисунків і 8 таблиць.

Сплави на основі системи Al-Sn характеризуються низкою важливих властивостей для антифрикційних матеріалів:

- корозійна стійкість: сплави Al-Sn менш схильні до корозії, що збільшує їх довговічність у важких експлуатаційних умовах.

- втомна міцність: ці сплави здатні витримувати повторювані навантаження без руйнування, що є критично важливим для тривалого використання.

- висока теплопровідність: це властивість сприяє ефективному відведенню тепла від поверхонь тертя, що запобігає перегріву і забезпечує стабільну роботу підшипників.

Підвищення вмісту олова в сплаві на основі алюмінію також сприяє зростанню зносостійкості такого антифрикційного матеріалу, особливо при формуванні зв'язного матричного каркасу. Це дозволяє створювати більш довговічні та надійні антифрикційні вироби, здатні ефективно працювати в умовах високих навантажень і швидкостей ковзання.



Використання методу порошкової металургії для створення антифрикційних матеріалів на основі алюмінію з високим вмістом олова відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності вузлів тертя в сучасних машинах і механізмах.

Мета роботи: дослідження впливу вмісту елементів та режиму спікання порошкових пресувань композитів системи Al-Fe-Sn на їх структуру, трибологічні та механічні властивості.

Ключові слова: КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ, ОЛОВО, АЛЮМІНІЙ, ЗАЛІЗО, СПІКАННЯ, ГАРЯЧЕ ДОУЩІЛЬНЕННЯ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, СУХЕ ТЕРТЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	10
1.1 Композиційні антифрикційні матеріали.	10
1.2 Антифрикційні матеріали.	19
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ КОМПОЗИТІВ Al-Fe-Sn	37
2.1 Вихідні матеріали та методи отримання зразків.	37
2.2 Методика та обладнання для досліджень зразків композитів системи: Al-Fe-Sn	45
2.2.1 Процес підготовки зразків для металографічного дослідження.	45
2.2.2 Процедура проведення випробувань на стиск.	47
2.2.3 Методика і обладнання для трибологічних випробувань композитів системи: Al-Fe-Sn.	48
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ КОМПОЗИТІВ Al-Fe-Sn, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ СПІКАННЯ ТА ПІДДАНИХ ПОДАЛЬШОМУ ГАРЯЧОМУ ДОУЦІЛЬНЕННЮ	50
3.1 Аналіз структури композитів Al-Fe-Sn.	50
3.2 Аналіз властивостей композитів Al-Fe-Sn.	65
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
ДОДАТКИ	77

МРТАМ 24.23623.000 ПЗ									
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Вплив вмісту елементів та методу формування антифрикційних композитних сплавів системи Al-Fe-Sn на їх властивості	Літера	Аркш	Аркушів	
Виконав		Середюк						4	77
Перевір.		Посоцький							
Н.контр.		Бабак					ХНУ МТВАм-23-1		
Затвер.		Диха							

ВСТУП

Для сучасного обладнання, що працює в умовах високих швидкостей ковзання та значних навантажень, особливо важливо використовувати надійні антифрикційні матеріали у вузлах тертя. Традиційні металеві та неметалічні матеріали часто виявляються неефективними в таких умовах. Тому виникає необхідність у застосуванні деталей з композиційних матеріалів, зокрема на алюмінієвій основі, які здатні забезпечити необхідні механічні та трибологічні властивості [1].

Однією з найактуальніших проблем сьогодні є зниження інтенсивності зношування деталей відповідального обладнання під час тертя. Для цього необхідно модернізувати існуючі антифрикційні матеріали або розробляти принципово нові, що відрізняються підвищеними експлуатаційними характеристиками. Успішна розробка таких матеріалів призведе до зниження витрат на ремонт обладнання та в цілому буде економічно вигідною. Важливим кроком у цьому напрямку є створення композиційних матеріалів з покращеними властивостями, які можуть забезпечити тривалий термін служби та високу надійність вузлів тертя.

Композиційні матеріали на основі алюмінію та самі алюмінієві сплави дуже рідко використовуються для створення антифрикційних виробів через схильність до схоплювання зі сталевими деталями при недостатній кількості мастила на поверхні тертя. Проте, додавання олова до алюмінію може значно зменшити цю проблему. Олово, завдяки своїй здатності розмазуватися по поверхні тертя під час експлуатації підшипника, перешкоджає процесу схоплювання [2].

Сплави на основі системи Al-Sn характеризуються низкою важливих властивостей для антифрикційних матеріалів [1,2]:

- корозійна стійкість: сплави Al-Sn менш схильні до корозії, що збільшує їх довговічність у важких експлуатаційних умовах.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- втомна міцність: ці сплави здатні витримувати повторювані навантаження без руйнування, що є критично важливим для тривалого використання.

- висока теплопровідність: це властивість сприяє ефективному відведенню тепла від поверхонь тертя, що запобігає перегріву і забезпечує стабільну роботу підшипників.

Підвищення вмісту олова в сплаві на основі алюмінію також сприяє зростанню зносостійкості такого антифрикційного матеріалу, особливо при формуванні зв'язного матричного каркасу. Це дозволяє створювати більш довговічні та надійні антифрикційні вироби, здатні ефективно працювати в умовах високих навантажень і швидкостей ковзання [3].

Методом лиття можливо отримати алюмінієві сплави з вмістом олова не більше 20 %, що може бути недостатнім для умов високих контактних тисків і швидкостей ковзання, при яких експлуатуються підшипники сучасних машин і механізмів. Методом порошкової металургії можливо отримувати спечені композити з вмістом олова до 40 %, на основі алюмінію, зберігаючи при цьому високу зв'язаність алюмінієвого каркасу.

Переваги методу порошкової металургії включають:

1. Вищий вміст олова: можливість досягнення вмісту олова до 40 % дозволяє значно покращити антифрикційні властивості матеріалу, зменшуючи захоплювання та підвищуючи зносостійкість.

2. Збереження механічних властивостей: завдяки високій зв'язаності алюмінієвого каркасу, спечені композити зберігають необхідну міцність і твердість, що важливо для роботи в умовах високих навантажень.

3. Однорідність структури: метод порошкової металургії забезпечує рівномірний розподіл олова в алюмінієвій матриці, що сприяє стабільності властивостей матеріалу по всьому об'єму деталі.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

4. Контроль пористості: порошкова металургія дозволяє контролювати пористість матеріалу, що може бути корисним для підвищення здатності утримувати мастило і поліпшення змазування поверхонь тертя.

В результаті, використання методу порошкової металургії для створення антифрикційних матеріалів на основі алюмінію з високим вмістом олова відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності вузлів тертя в сучасних машинах і механізмах.

Композити на основі системи Al-Sn володіють відносно низькою твердістю, що заважає їм для використання в якості підшипників при значних навантаженнях. Для збільшення значення зносостійкості композиційних матеріалів можна впроваджувати зміцнювальні тверді частинки. Серед таких матеріалів мають місце гібридні композити (ГКМ), що містять як тверді частинки, так і м'які включення.

Особливості гібридних композитів наступні [4]:

1. Підвищення зносостійкості: додавання твердих частинок зміцнює матеріал, що збільшує його зносостійкість, зберігаючи при цьому достатню пластичність.

2. Несуча здатність: зміцнюючі частинки підвищують міцність і несучу здатність композиту, що важливо для роботи підшипників в умовах високих навантажень.

3. Розташування добавок: тверді частинки, розташовані на периферії алюмінієвих зерен, перешкоджають утворенню небажаних безперервних сіток, що покращує структуру матеріалу.

Система Al-Si-Sn є прикладом ідеального поєднання м'яких і твердих добавок в алюмінії. Олово і кремній практично не розчиняються в твердому алюмінії, що унеможливорює утворення з матрицею перехідних крихких шарів котрі призводять до зниження пластичності матеріалу.

Однак при експлуатації підшипників в умовах високих температур, потрібні зміцнюючі частинки, міцніші і жаростійкіші, ніж кремній. Крім

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

того, кремній має погану змочуваність оловом навіть при температурах, що перевищують температуру плавлення алюмінію, через що адгезійні межі «Si-Sn» виступають слабкими місцями в такому композиційному матеріалі.

Для вирішення цих проблем, можна використовувати інші зміцнюючі частинки, які забезпечують кращу змочуваність і адгезію з оловом, а також підвищену жаростійкість. Це дозволить створювати більш надійні і довговічні антифрикційні матеріали для вузлів тертя, що працюють в умовах високих температур і навантажень.

Для вирішення проблеми низької твердості композитів Al-Sn можна вводити інтерметаліди, що містять алюміній. Такі інтерметаліди забезпечують хорошу адгезію з алюмінієвою матрицею та міцні міжфазні зв'язки. Одним з таких є композиційний матеріал системи Al-Fe-Sn, при синтезі котрого можуть утворюватися тверді та тугоплавкі інтерметаліди типу FeAl₃ [4].

Метод порошкової металургії є оптимальним для створення композитів Al-Fe-Sn, оскільки він дозволяє:

- Контролювати розмір і розподіл частинок : це забезпечує рівномірне розподілення інтерметалідів у алюмінієвій матриці, що сприяє підвищенню механічних властивостей матеріалу.

- Зменшити розшарування фаз : під час спікання в матеріалі постійно наявні у великій кількості тверді частинки, що стикаються одна з одною з певною періодичністю, що забезпечує обмеження процесів розшарування фаз та одноріднішу структуру.

- Покращити властивості матеріалу: завдяки включенню тугоплавких і твердих інтерметалідів до складу композиту, підвищується зносостійкість, міцність і теплостійкість матеріалу, що є критично важливим для антифрикційних застосувань.

Очікується, що дослідження впливу процесу спікання та подальшого гарячого доущільнення на композити системи Al-Fe-Sn дозволить розробити

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

нові матеріали з покращеними механічними та трибологічними властивостями. Це, в свою чергу, сприятиме створенню більш надійних і довговічних антифрикційних матеріалів для використання у вузлах тертя сучасних машин і механізмів.

Метою роботи є дослідження впливу вмісту елементів та режиму спікання порошкових пресувань композитів системи Al-Fe-Sn на їх структуру, трибологічні та механічні властивості.

У роботі було поставлено такі завдання:

1. Визначити оптимальні склади сумішей порошків Al, Fe, та Sn та режими їх спікання для отримання щільних композиційних гібридних матеріалів:

2. Дослідити структуру та механічні властивості спечених композиційних матеріалів після гарячого доуцільнення.

3. Виконати оцінку трибологічних властивостей спечених композитів Al-Fe-Sn з різним вмістом олова після гарячого доуцільнення.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Композиційні антифрикційні матеріали.

Композиційними матеріалами (КМ) або композитом називається об'ємна гетерогенна система, у складі якої містяться компоненти з різними властивостями, які є взаємно нерозчинними. Такі матеріали мають структуру, яка поєднує всі компоненти системи, дозволяючи використовувати переваги кожного з них [1,2].

Основні принципи композиційних матеріалів.

1. Гетерогенність: композити складаються з двох або більше компонентів, які суттєво відрізняються своїми фізичними або хімічними властивостями.

2. Взаємна нерозчинність: компоненти композиту не розчиняються один в одному, що дозволяє зберігати їхні індивідуальні властивості.

3. Синергетичний ефект: поєднання різних компонентів дозволяє досягти властивостей, які перевершують властивості кожного окремого компонента.

Компоненти композитів.

1. Матриця: основна фаза, яка оточує та зв'язує інші компоненти. Матриця забезпечує цілісність структури і передає навантаження між включеннями.

2. Зміцнюючі фази (включення): частинки, волокна або інші форми, що додаються до матриці для покращення механічних властивостей, таких як міцність, жорсткість та зносостійкість.

Види наповнювачів:

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- Тверді включення: використовуються для підвищення міцності та твердості композиту. Прикладами таких включень є керамічні частинки, металеві волокна та інтерметаліди.

- М'які включення: використовуються для покращення пластичності та здатності до деформації композиту. Прикладами м'яких включень можуть бути полімерні волокна або частинки олова.

Гібридні композити або два види включень: якщо композит містить одночасно тверді та м'які включення, його називають гібридним композитом. Це дозволяє поєднати переваги обох типів включень, отримуючи матеріал з оптимальними властивостями.

Взаємодія компонентів формує властивості композитів, що залежать від:

- Характеристик основи: міцність, жорсткість, пластичність та інші властивості матриці визначають базові характеристики композиту.

- Характеристик наповнювачів: розмір, форма, розподіл та матеріал включень впливають на механічні та фізичні властивості композиту.

- Сили взаємодії між основою та наповнювачами: адгезія між матрицею та включеннями визначає ефективність передачі навантажень і впливає на міцність та довговічність композиту.

Переваги композиційних матеріалів.

1. Покращені механічні властивості: комбінація різних компонентів дозволяє досягти високої міцності, жорсткості та зносостійкості.

2. Легка вага: багато композитів мають високу міцність при низькій щільності, що робить їх ідеальними для використання в авіації, автомобільній промисловості та інших галузях.

3. Корозійна стійкість: композити можуть бути більш стійкими до корозії порівняно з традиційними матеріалами, такими як метали.

4. Термостійкість: деякі композити мають високу термостійкість, що дозволяє використовувати їх в умовах високих температур.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Композити широко застосовуються в різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Вони використовуються в авіаційній та космічній промисловості (для виготовлення легких і міцних конструкцій), автомобільній промисловості (для зниження ваги автомобілів та підвищення їхньої ефективності), будівництві (для створення міцних та стійких до корозії конструкцій) та спортивному обладнанні (для виготовлення легкого та міцного інвентарю).

Композиційні матеріали класифікуються залежно від виду матриці. Основні типи композитів за цією класифікацією [4, 5]:

1. Металеві композити (Metal Matrix Composites, MMCs):

- Матриця: Метал або сплав.
- Наповнювачі: Можуть бути металевими, керамічними або полімерними.
- Властивості: Висока міцність, жорсткість, теплопровідність, зносостійкість та здатність витримувати високі температури.
- Застосування: Авіація, автомобільна промисловість, теплові двигуни, броня.

2. Полімерні композити (Polymer Matrix Composites, PMCs):

- Матриця: Полімери (термопласти або термореактивні смоли).
- Наповнювачі: Волокна (скляні, вуглецеві, арамідні), частинки.
- Властивості: Легка вага, висока корозійна стійкість, гарні електричні та теплові ізоляційні властивості.
- Застосування: Будівництво, спортивне обладнання, електроніка, автомобільна промисловість.

3. Керамічні композити (Ceramic Matrix Composites, CMCs)

- Матриця: Кераміка (оксиди, карбіди, нітриди).
- Наповнювачі: Керамічні волокна, частинки.
- Властивості: Висока твердість, термостійкість, стійкість до корозії, хімічна інертність.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Волокнисті наповнювачі, рисунок 1.1, б, складаються з довгих, тонких волокон, які можуть бути розташовані у вигляді тканини, стрічки або бути спрямовані у певному напрямку. Їх виготовляють шлікерним литтям де волокна змочують рідкою суспензією матеріалу матриці, потім суспензію висушують і спікають. Іншим способом отримання є пресування матеріалу при високих температурах, На рисунку 1.2 зображено приклад виробництва КМ волокнистого. Першим етапом є зняття волокон з бобін, після чого їх піддають поверхневій обробці, що забезпечує підвищення адгезії. Заключним етапом є розміщення волокон у ванній з полімерною смолою. Смола допомагає поєднати волокна у стрічку (плоский джгут). Готові такі стрічки збирають в листовий шаруватий матеріал, а потім піддають термообробці для повного затвердіння матеріалу [4].

Приклади: скловолокна, вуглецеві волокна, арамідні волокна. Переваги: висока міцність на розтяг, низька вага, можливість створення матеріалів з анізотропними властивостями. Недоліки: вразливість до вологи та ультрафіолету (в разі полімерних волокон), складність обробки та виготовлення.

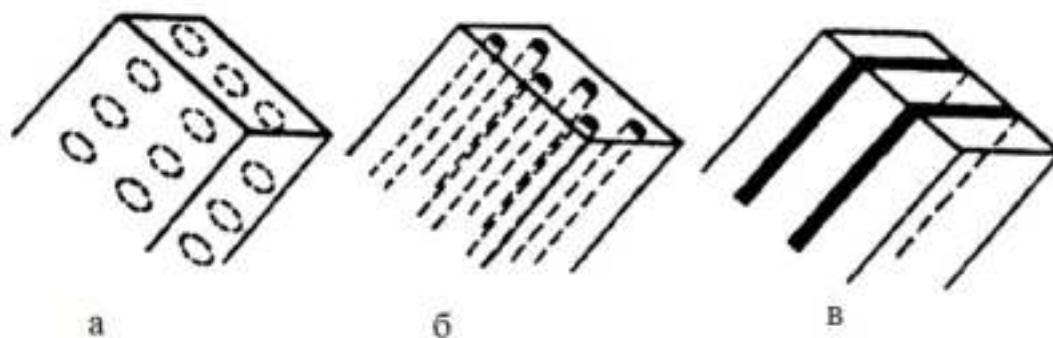


Рисунок 1.1 – Будова композитів:

а – дисперсно зміцнені, б – волокнисті, в – шаруваті.

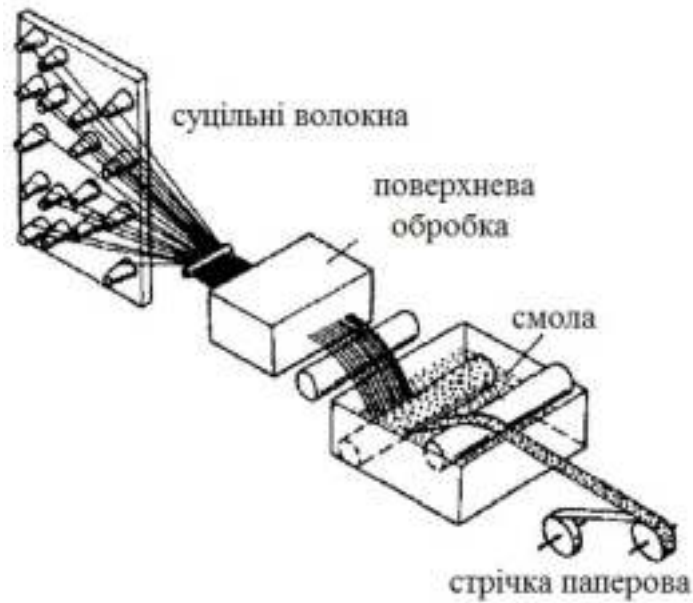


Рисунок 1.2 – Схема виробництва композиційного волокнистого матеріалу.

ВК з металевою матрицею застосовують для виробів при експлуатації з високими температурами. Як матриця часто підходить титан, алюміній, або магній, що володіють невеликою щільністю. Для металевих КМ характерні висока теплопровідність та електропровідність. Застосування кераміки, як основи композиту, дає можливість експлуатації виробів при значних значеннях робочих температур. Слід зазначити, що головним її недоліком є дуже низька пластичність, що унеможливорює застосування як основу композиту. Використання у якості основи: вуглецю аморфного, а наповнювача – графітового волокна, забезпечує роботу КМ при температурах до 2400 °С.

У таблиці 1.2 наведено основні характеристики для металевих матриць, серед яких [1, 2]: тимчасовий опір розриву (σ_v), густина речовини (ρ), температурний коефіцієнт лінійного розширення (α) та модуль нормальної пружності (E).

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Таблиця 1.2 – Характеристики матриць металевих.

№	Матриця	σ_v , МПа	ρ , г/см ³	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	E, ГПа
1	Магній	200 – 280	1,74 – 1,83	14 – 15	43 – 45
2	Алюміній	250 – 573	2,63 – 2,80	11 – 13	69 – 73
3	Мідь	220 – 400	8,94	17 – 18	132
4	Нікель	500 – 1200	4,5	9 – 10	113

Дисперснозміцнені наповнювачі, рисунок 1.1, а, складаються з дрібних, рівномірно розподілених частинок у матриці. Ці частинки можуть бути сферичними, кулястими або неправильної форми. Приклади: металеві частинки, керамічні частинки, оксиди, карбіди. Переваги: покращена зносостійкість, висока твердість, підвищена стабільність до термічних та механічних впливів. Недоліки: можливість агрегації частинок, що може призвести до утворення дефектів, складність рівномірного розподілу частинок у матриці.

Дисперснозміцнені композити отримують шляхом введення дрібних тугоплавких частинок, таких як карбіди, нітриди та оксиди. Чим менший розмір частинок і менше відстань між ними, тим міцнішим буде композит. Дисперсні частинки перешкоджають руху дислокацій, що сприяє підвищенню опору пластичної деформації. Це забезпечує високу стійкість до повзучості і жароміцність аж до температури плавлення основи.

До відомих дисперсних тугоплавких частинок відносяться як SiC, Al₂O₃, BN, SiO₂, що мають відносно високий модуль пружності і невелику щільність. Композитні матеріали, зміцнені такими частинками і отримані методом порошкової металургії, зазвичай мають ізотропні властивості, тобто однакові характеристики у всіх напрямках.

										Арк.
										73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 24.23623.000. ПЗ					

У промисловості широкого поширення набули дисперснозміцнені композити на основі алюмінію. Прикладом є спечена алюмінієва пудра, яка складається з алюмінієвої основи та зміцнюючих дисперсних частинок оксиду алюмінію.

Порошковий алюміній з розміром частинок до 1 мкм отримують методом розпилення металу розплавленого з наступним подрібнення у млинах кульових за наявності кисню. У процесі подрібнення збільшується концентрація оксиду алюмінію в частинках.

Наступні стадії виробництва включають холодне пресування, попереднє спікання, гаряче пресування, прокатку або видавлювання заготовок у форму готових виробів, які в деяких випадках піддаються термічній обробці. Ці методи забезпечують отримання виробів з високими механічними властивостями та однорідною структурою [6].

Такі сплави, у гарячому стані, мають властивість до деформування. Сплави з концентрацією 6...9 % оксиду алюмінію добре деформуються при кімнатній температурі. Також можуть застосовуватись такі сплави з вмістом 6...23 % оксиду алюмінію. Ці сплави знаходять широке застосування для виготовлення теплообмінників, а саме: оболонок труб, штоків поршнів та інших деталей компресорів, а також в авіаційній техніці. Висока механічна міцність і жароміцність роблять їх ідеальними для застосування в умовах високих температур і навантажень.

Головні фізико - механічні властивості де яких наповнювачів КМ з алюмінієвою основою наведено в таблиці 1.3, а саме: питома жорсткість (E/ρ) та питома міцність (σ/ρ) [4,5].

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

1.2 Антифрикційні матеріали.

Антифрикційними матеріалами називають спеціальні матеріали, що використовуються для деталей машин, які експлуатуються в умовах тертя. Вони мають такі характерні властивості [1, 2]:

- Низький коефіцієнт тертя: це зменшує енерговитрати на подолання тертя і підвищує ефективність роботи механізмів.
- Слабка адгезія: зменшує зчеплення між поверхнями, що контактують, і сприяє легшому ковзанню.
- Висока теплопровідність: забезпечує ефективне відведення тепла, яке утворюється під час тертя, і запобігає перегріву деталей.
- Висока зносостійкість: підвищує довговічність матеріалу і зменшує потребу в обслуговуванні.
- Здатність забезпечити рівномірне змащування: допомагає підтримувати оптимальні умови роботи поверхонь тертя.
- Відмінна оброблюваність: полегшує виготовлення та обробку деталей з антифрикційних матеріалів.

Ці властивості роблять антифрикційні матеріали незамінними в машинобудуванні та інших галузях, де важливо зменшити втрати на тертя і підвищити надійність та довговічність механічних систем.

Різні особливості умов експлуатації і конструкції вузлів тертя сприяли створенню багатьох антифрикційних матеріалів. До основних відносяться [3]:

- 1) Бабіти: сплави на основі свинцю та олова, які характеризуються гарними антифрикційними властивостями з високою зносостійкістю.
- 2) Сірий чавун: сплав на основі заліза, відомий своєю міцністю та відносно низьким коефіцієнтом тертя.
- 3) Бронза: сплав на основі міді, який відрізняється високою міцністю з корозійною стійкістю.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

4) Текстоліт та фторопласт - 4: тип пластмас, що мають низький коефіцієнт тертя, високу хімічну стійкість та гарну оброблюваність.

5) Бронзографіт та залізографіт: металокерамічні сплави, які поєднують властивості металів та графіту, забезпечуючи низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість.

6) Алюмінієві сплави: відомі своєю легкою вагою, високою теплопровідністю та добрими антифрикційними характеристиками.

7) Композиційні матеріали типу "метал-пластмаса": матеріали, які поєднують властивості металів і пластмас, забезпечуючи високу зносостійкість і добрі антифрикційні властивості.

Ці матеріали дозволяють оптимізувати роботу вузлів тертя в різних механізмах і забезпечують їх надійність та довговічність.

На сьогодні, для виробництва підшипників ковзання, широко використовують дорогі сплави, серед яких найбільш популярні бронзи. Це створює потребу в розробці дешевших, але не менш надійних матеріалів. Алюмінієві сплави відповідають необхідним вимогам та мають антифрикційні властивості, схожі із бронзовими. Останнім часом алюмінієві сплави також часто використовують як заміну сплавів на олов'яній та свинцевій основі.

Антифрикційні металеві матеріали за структурою поділяються на дві категорії [2, 6]:

1) Матеріали з м'якими наповнювачами та твердою основою: ці матеріали забезпечують високу міцність і зносостійкість завдяки твердій основі, а м'які наповнювачі знижують коефіцієнт тертя і покращують антифрикційні властивості.

2) Матеріали з твердими наповнювачами та м'якою основою: м'яка основа забезпечує гнучкість і здатність до деформації, тоді як тверді наповнювачі підвищують зносостійкість і міцність матеріалу.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Вибір структури залежить від конкретних умов експлуатації та вимог до матеріалу, що дозволяє оптимізувати його характеристики для певних застосувань.

Сплави алюмінієві, за своїм складом, поділяються на дві групи:

1. Сплави на основі металу з твердими структурними складовими: до цієї групи відносяться сплави, до складу яких входять тверді структурні фази, такі як Mg_2Si , Al_3Ni , $CuAl_2$, $FeAl_3$, та інші. Ці сплави використовуються при великих швидкостях обертання та незначних навантаженнях із використанням мастила. Їх недоліком є схильність до захоплювання з контртілом при припиненні мастила.

2. Сплави, леговані оловом: для уникнення захоплювання в разі припинення мастила були розроблені сплави, леговані оловом. М'яке олово виконує функцію мастила, запобігаючи контакту заліза з алюмінієм, що знижує ризик захоплювання деталей. Однак висока концентрація олова негативно впливає на пластичність через погіршення зв'язаності алюмінієвого каркасу.

Для зміцнення алюмінієвої основи в сплави можуть вводитися інші елементи: мідь (для підвищення міцності алюмінієвої основи); залізо, кремній, нікель (як добавки, що зміцнюють структуру сплаву).

Проте збільшення концентрації цих додатків може знизити несучу здатність і зносостійкість алюмінієвого сплаву. Тому баланс між підвищенням міцності та збереженням пластичності й зносостійкості є важливим аспектом у розробці ефективних алюмінієвих сплавів для антифрикційних матеріалів [6].

Силумін, який широко застосовується для виготовлення двигунів, характеризується низьким коефіцієнтом термічного розширення, хорошою рідкотекучістю та зносостійкістю. Проте велика кількість крихких і великих кристалів кремнію в силуміні знижує пластичність, теплопровідність та оброблюваність тиском.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Таким чином, і кремній, і олово при певній концентрації можуть сприяти зменшенню пластичності алюмінієвого сплаву.

Існує припущення, що присутність двох легуючих компонентів, один з яких може виконувати функцію мащення, тобто мастила, (наприклад, олово), а інший – твердих та інертних до контртіла частинок (наприклад, кремній), може сприяти підвищенню зносостійкості при збереженні необхідної пластичності. Це дозволить створювати алюмінієві сплави з покращеними механічними властивостями, які будуть ефективно працювати в умовах тертя та навантаження.

Наприклад, у роботі [7] наведено, що зносостійкість сплаву системи: Al-17Si-10Sn, що отримали на мідній підкладці методом напилення, виявилася суттєво вищою за зносостійкість силуміну, при однакових умовах отримання та випробувань. Цей результат свідчить про ефективність поєднання кремнію та олова в алюмінієвих сплавах, що забезпечує підвищену зносостійкість, зберігаючи при цьому необхідну пластичність та інші важливі експлуатаційні характеристики. Тобто, метод напилення дозволяє досягти рівномірного розподілу легуючих компонентів і створити більш однорідну структуру сплаву, що сприяє покращенню його механічних властивостей. Використання мідної підкладки може додатково покращити теплопровідність і сприяти більш ефективному відведенню тепла під час експлуатації, що також впливає на зносостійкість.

Таким чином, сплав Al-17Si-10Sn є перспективним матеріалом для застосування в умовах, де необхідні висока зносостійкість і надійність, зокрема в двигунах і інших компонентах, що працюють в умовах тертя.

Тоді можливе припущення, що при підвищенні концентрації олова трибологічні властивості композиту можуть покращитися, за умови збереження міцних зв'язків алюмінієвої матриці та виключення контакту частинок олова та кремнію. Це важливо, оскільки між фазні межі між

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

частинками олова та кремнію можуть бути неміцними, що негативно впливає на загальну міцність композиту.

Для досягнення цього можна застосовувати такі підходи:

1. Контроль за мікроструктурою: оптимізація процесу виготовлення композиту для досягнення рівномірного розподілу частинок олова та кремнію, що мінімізує їх взаємодію та формування неміцних між фазних зон.

2. Використання проміжних елементів: введення додаткових легуючих елементів, які можуть утворювати міцніші зв'язки з алюмінієвою матрицею і сприяти стабілізації структури композиту.

3. Оптимізація процесу напилення: використання передових методів напилення, які дозволяють досягти більш однорідного розподілу компонентів та мінімізувати утворення дефектів у структурі.

Таким чином, можна створити композит з покращеними трибологічними властивостями, зберігаючи при цьому високу міцність і зносостійкість матеріалу.

У роботі [5] наведено, що метод порошкової металургії дозволяє створити сплав алюмінію з оловом, з концентрацією олова 40 %, при цьому зберігається зв'язаність алюмінієвого каркасу. Цей підхід дозволяє досягти рівномірного розподілу олова в алюмінієвій матриці, що сприяє покращенню трибологічних властивостей матеріалу без втрати його структурної цілісності. Переваги такого сплаву:

1. Покращені трибологічні властивості: висока концентрація олова забезпечує добрі антифрикційні властивості, зменшуючи коефіцієнт тертя і підвищуючи зносостійкість.

2. Збереження міцності: метод порошкової металургії дозволяє зберегти міцні зв'язки алюмінієвого каркасу, що забезпечує високу механічну міцність і надійність матеріалу.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

3. Однорідність структури: порошкова металургія дозволяє досягти однорідного розподілу компонентів, що мінімізує утворення дефектів і покращує експлуатаційні характеристики сплаву.

Цей підхід є перспективним для створення матеріалів, які будуть ефективно працювати в умовах тертя та високих навантажень, зокрема для використання в двигунах, підшипниках та інших вузлах тертя.

З дослідження [5, 7] по створенню композиційного матеріалу системи (Al-12Si)-xSn за допомогою метода рідкофазного спікання з пресуванням суміші порошків олова та евтектичного сплаву (Al-12Si) було встановлено наступне:

1. Зносостійкість композитів: зростає із збільшенням концентрації олова. Зразки з підвищеним вмістом олова демонструють найменшу інтенсивність зношування при сухому терті з сталевим контртілом. Ця закономірність стає більш вираженою зі збільшенням тиску на поверхні тертя.

2. Міцність композитів: спостерігається зворотна залежність між концентрацією олова та міцністю матеріалу. Зі збільшенням вмісту олова міцність знижується.

3. Міцна матриця: незважаючи на зниження міцності з підвищенням вмісту олова, всі отримані композиційні матеріали характеризуються досить міцною матрицею.

Ці результати свідчать про те, що в композиційному матеріалі (Al-12Si)-xSn можна досягти оптимального балансу між зносостійкістю та міцністю, регулюючи концентрацію олова. Високий вміст олова покращує антифрикційні властивості, що є важливим для застосувань, де важлива зносостійкість, зокрема при високих тисках на поверхні тертя (таблиця 1.4).

Такі матеріали можуть бути корисними в умовах сухого тертя, де зносостійкість має вирішальне значення, наприклад, в підшипниках, рухомих з'єднаннях і інших вузлах тертя.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Таблиця 1.4 – Вплив тиску та вмісту олова на інтенсивність зношування композитів спечених типу (Al-12Si)-xSn, що піддаються подальшому доущільненню при температурі 250 °С.

композиція	Інтенсивність зношування, мкм/м			
	Тиск, Па			
	1000	2000	3000	4000
(Al-12Si)-40Sn	0,10	0,14	0,21	0,18
(Al-12Si)-30Sn	0,13	0,17	0,22	0,20
(Al-12Si)-20Sn	0,10	0,16	0,24	0,21
(Al-12Si)-10Sn	0,11	0,19	0,26	0,34

Згідно з даними, наведеними в таблиці 1.3, випливає, що при збільшенні тиску від 1 до 4 МПа інтенсивність зношування композитів, що порівнюються, збільшується. При тиску понад 4МПа відбувається зниження інтенсивності зношування, крім композиту (Al-12Si)-10Sn.

Тобто, при зростанні тиску до 4000 Па інтенсивність зношування композитів зростає, що вказує на підвищене тертя та знос при зростанні навантаження. Однак при більшому тиску наявне зниження інтенсивності зношування, за винятком композиту (Al-12Si)-10Sn. Цей результат може бути пояснений наступним чином:

1. Збільшення тиску (1-4 МПа): при зростанні тиску зростають сили тертя між поверхнями, що веде до більш інтенсивного зношування композитів. Це може бути пов'язано з підвищенням навантаження на поверхні тертя, що збільшує утворення тріщин та зношування.

2. Зниження інтенсивності зношування при тиску понад 4000 Па: може вказувати на те, що при високих тисках відбувається ущільнення поверхні або утворення захисного шару, який зменшує інтенсивність зношування. Цей ефект може бути особливо вираженим у композитів, що містять підвищену концентрацію олова, оскільки м'яке олово може діяти як мастило, зменшуючи тертя та знос.

3. Виняток композиту (Al-12Si)-10Sn: може бути обумовлений специфічною взаємодією між оловом і кремнієм при високих тисках, що призводить до погіршення антифрикційних властивостей або зменшення ефекту захисного шару. Можливо, що при високих тисках цей композит має особливі структурні чи фазові зміни, які впливають на його зносостійкість.

Таким чином, ці результати свідчать про важливість оптимізації концентрації олова та інших компонентів для досягнення найкращих трибологічних властивостей у широкому діапазоні навантажень.

У роботі [8] виконано дослідження 8 алюмінієвих сплавів, що були отримані методом лиття. У складі кожного з цих сплавів були наявні наступні елементи: свинець, олово, кремній, мідь, цинк та магній. Характеристики і хімічний склад дослідних сплавів наведено в таблиці 1.5. У процесі тертя по сталевому контртілу зі змащуванням маслом M14V2, сплав АТ-5,8 продемонстрував найнижчий знос, перевищивши показники еталонної бронзи в 5-6 разів. Це свідчить про видатні трибологічні властивості сплаву АТ-5,8 у порівнянні з традиційними матеріалами, такими як бронза.

Цей результат може бути пояснений наступними факторами:

1. Покращені антифрикційні властивості: сплав АТ-5,8, ймовірно, має особливу композицію або мікроструктуру, яка забезпечує ефективніше зменшення тертя та зношування, особливо в умовах змащення.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

2. Взаємодія з мастилом: масло M14V2 може краще взаємодіяти зі сплавом АТ-5,8, забезпечуючи кращий захист поверхонь від зносу і утворення належного мастильного шару.

3. Сумісність матеріалів: сплав АТ-5,8, можливо, має такі властивості, які сприяють зниженню тертя і зношування в поєднанні з мастилом, що робить його переважним у порівнянні з традиційною бронзою.

Ці результати підкреслюють потенціал сплаву АТ-5,8 як високоефективного матеріалу для застосувань, де критично важлива зносостійкість і тривала робота під навантаженням, особливо в умовах змащення.

Таблиця 1.5 – Характеристики експериментальних композиційних матеріалів після 40 годин тертя.

Сплав	Масовий вміст, %							σ , МПа	Зношув. сталі, мг	Знос мет., мг	Темп., °C
	Pb	Sn	Cu	Zn	Si	Al	Mg				
BrO4Z4S17 (еталон)	16,9	4,1	75,2	3,8	-	-	-	148	4,0	2,7	38
АТ-11	2,6	11,0	3,9	2,6	0,1	79,8	-	173	0,6	1,2	33
АТ-9,8	2,5	9,8	4,5	2,4	0,6	79,0	1,2	163	0,7	0,1	31
АТ-9,6	3,2	9,6	4,9	4,4	0,1	77,5	0,3	185	2,1	2,0	37
АТ-8,7	3,2	8,7	3,4	2,9	0,5	80,9	0,4	168	0,8	2,4	32
АТ-7,6	3,3	7,6	4,0	0,5	1,0	83,5	0,07	159	0,8	0,5	42
АТ-6,4	3,0	6,4	4,1	1,9	0,9	82,3	1,4	139	1,0	0,9	38
АТ-5,8	2,7	5,8	4,1	2,3	1,5	82,1	1,5	140	0,6	0,4	40
АТ-5,4	2,6	5,4	3,5	2,3	0,8	83,7	1,7	144	0,7	0,5	36

Після 40 годин випробувань тертям на сплаві виявлено структурні зміни, зокрема утворення вторинних структур по поверхні тертя. Ці

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						73

структурні зміни, які сприяють меншому зношуванню алюмінієвої матриці, можуть пояснюватися наступним чином:

1. Утворення мікрорельєфу: вторинні структури на поверхні тертя формують мікрорельєф, який покращує здатність утримувати мастило. Це зменшує прямий контакт між тертьовими поверхнями і знижує інтенсивність зношування.

2. Процеси, що сприяють утворенню вторинних структур:

- Масообмін: переміщення матеріалу між тертьовими поверхнями може сприяти формуванню нових структурних елементів.

- Дифузія: взаємодія елементів на поверхні може призвести до утворення нових фаз або структур, які впливають на властивості тертя.

- Окислення: взаємодія з киснем може сприяти утворенню оксидних плівок, які можуть виступати як захисний шар.

- Трибохімічні реакції: хімічні реакції, що відбуваються під час тертя, можуть призводити до формування нових фаз або зміни властивостей поверхні.

Ці процеси разом сприяють створенню поверхні, яка краще утримує мастило, знижуючи тертя і знос. Таким чином, структурні зміни на поверхні тертя, які відбуваються в результаті тривалого тертя, позитивно впливають на довговічність і ефективність матеріалу в умовах тривалої експлуатації [8].

У роботі [9] наведено вплив вмісту різних легуючих елементів на зміну триботехнічних властивостей алюмінієвих антифрикційних сплавів. Введення різних легуючих компонентів у складі антифрикційних сплавів може суттєво вплинути на їх експлуатаційні властивості. Ось як зазначені компоненти впливають на властивості матеріалів:

1. Олово (8,5 – 11 %):

- Зниження питомого опору: олово може знижувати питомий електричний опір сплаву, що може бути корисно в деяких електричних або електронних застосуваннях.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- Збільшення зносостійкості: олово утворює тверді фази в сплаві, які покращують його зносостійкість і здатність протистояти тертю.

2. Свинець (2,5 – 3,2 %):

- Покращення оброблюваності: свинець робить сплав більш м'яким і легшим для обробки, що полегшує механічну обробку і виготовлення деталей.

- Зносостійкість: свинець також підвищує зносостійкість завдяки утворенню м'яких тривких частин, які можуть зменшити тертя.

3. Цинк (2,41 – 3,39 %):

- Покращення продуктивності: цинк може підвищити механічні властивості сплаву, включаючи міцність і твердість.

- Зменшення зносу: Цинк також сприяє зменшенню зносу контртіла завдяки своєму впливу на структуру і властивості сплаву.

4. Залізо (до 0,13 %):

- Збільшення зносостійкості: невелика концентрація заліза може покращити зносостійкість сплаву за рахунок зміцнення структури і утворення твердих фаз.

Таким чином, оптимальне поєднання цих легуючих елементів може значно поліпшити антифрикційні властивості сплавів, підвищуючи їх зносостійкість, оброблюваність і продуктивність. Важливо враховувати ці ефекти при розробці нових антифрикційних матеріалів для досягнення бажаних експлуатаційних характеристик [9].

В дослідженнях [5] встановлено, що спікання порошків олова та алюмінію за температури 600 °С на протязі однієї години сприяє створенню високо щільних композитів з суттєво зміцненою основою на алюмінії та досить рівномірно розподіленими часточками олова. Основні особливості та результати цього процесу можна підсумувати так:

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

1. Висока зносостійкість: композити з концентрацією олова до 20% показують високу зносостійкість при сухому терті сталі, що робить їх ефективними для використання в умовах тертя.

2. Розмір частинок алюмінію: розмір частинок алюмінію в спечених композитах не залежить від вмісту олова. Це обумовлено єдиним механізмом формування алюмінієвої матриці.

3. Механізм формування матриці:

- Фрагментація алюмінієвих порошків: рідке олово спочатку фрагментує алюмінієві порошки.

- Укрупнення частинок: в подальшому відбувається укрупнення алюмінієвих частинок через розчинення дрібних частинок і перекристалізацію атомів через рідку фазу.

4. Зміни з концентрацією олова:

- Товщина прошарків олова: зі збільшенням концентрації олова товщина прошарків олова в композиті зростає.

- Погіршення зв'язку частинок: зі збільшенням концентрації олова зв'язок частинок алюмінієвої матриці погіршується, що може вплинути на міцність і загальні властивості матеріалу.

Цей процес спікання дозволяє досягти рівномірного розподілу частинок олова, що є важливим для забезпечення високих зносостійких властивостей композитів. Водночас, зростання концентрації олова веде до погіршення зв'язку в матриці, що може бути враховане при розробці і оптимізації складу композитів для досягнення бажаних експлуатаційних характеристик.

Виявлено, що спечені композиційні матеріали з об'ємною часткою олова до 20 % зберігають міцний і зв'язаний каркас, що перевищує міцність промислових литих сплавів алюмінію з оловом. Основні висновки:

1. Міцність каркасу: спечені композити з об'ємною часткою олова до 20% демонструють міцний і стабільний каркас, що вдвічі перевищує міцність

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналогічних промислових литих сплавів алюмінію з оловом. Це вказує на високу якість спечених композитів і їх потенціал для застосування в умовах високих навантажень.

2. Міцність при стисканні: міцність спечених композитів при стисканні є аддитивною величиною, яка визначається об'ємним співвідношенням фаз Al і Sn. Це означає, що міцність композиту може бути передбачена як сума міцностей окремих фаз в залежності від їхнього об'ємного співвідношення.

3. Механічна суміш: Al і Sn фази в спечених композитах є механічною сумішшю не взаємодіючих частинок. Це передбачає, що обидві фази відчують однакову деформацію незалежно від їх розташування у матриці. Іншими словами, окремі частинки кожної фази не взаємодіють між собою, а просто сумісно впливають на загальну міцність і зносостійкість композиту.

Ці результати підтверджують, що спікання порошкових композиційних матеріалів може забезпечити не тільки високу зносостійкість, але і міцність каркасу, що є важливим для їх використання в різноманітних інженерних і промислових застосуваннях. Для прикладу, на рисунку 1.4, наведено структуру композитів Al-Sn, що отримані шляхом спікання за температури 600 °C протягом 60 хвилин [5].

Результати механічних досліджень зображені у вигляді кривих стиску дослідних композитів (рисунок 1.5). Згідно з отриманою залежністю, досліджувані спечені композити демонструють здатність до зміцнення під час деформації, при цьому процес зміцнення відбувається практично з однаковою швидкістю для різних фракцій. Це можна пояснити наступним чином:

1. Однакова швидкість зміцнення: оскільки Al і Sn фази є механічною сумішшю, не взаємодіючих частинок, і відчують однакову деформацію, їх зміцнення відбувається з подібною швидкістю. Це означає, що обидві фази

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримують міцність композиту при деформації, завдяки чому загальне зміцнення матеріалу залишається стабільним.

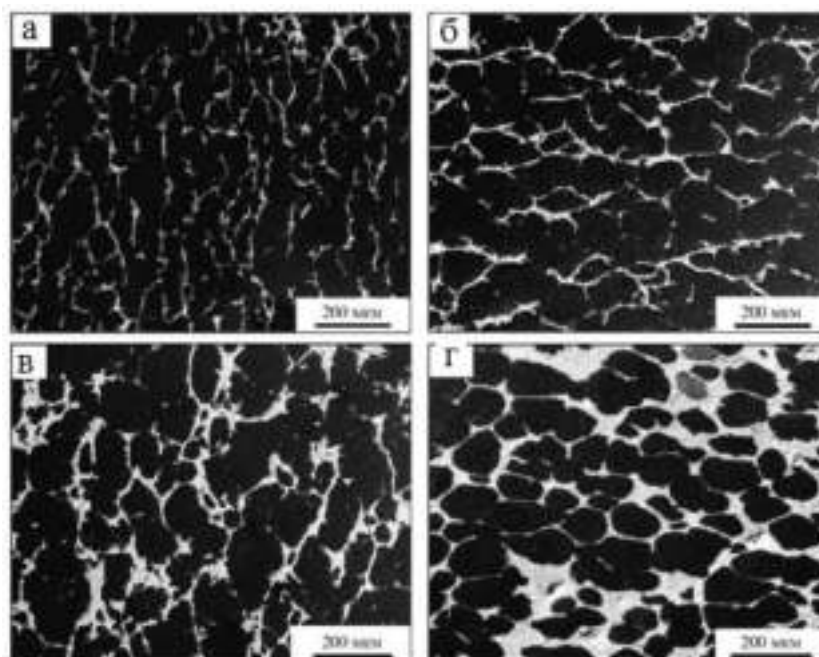


Рисунок 1.4 – Мікроструктура алюмінієвих композитів з оловом, після спікання за температури 600 °С протягом 60 хвилин:

а – 10 % Sn; б – 20 % Sn; в – 30 % Sn; г – 40 % Sn.

2. Механізм зміцнення: зміцнення під час деформації в таких композитах може бути пов'язане з процесами, такими як:

- Дислокаційне зміцнення: зміна розподілу дислокацій у матриці може сприяти підвищенню міцності.
- Утворення нових фаз: під час деформації можуть утворюватися нові фази або структури, що також можуть сприяти зміцненню матеріалу.
- Механічна взаємодія частинок: хоча фази не взаємодіють між собою, їх присутність в матриці може все ще впливати на загальну міцність композиту.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

3. Однаковий механізм деформації: тому що всі частинки в композиті відчувають однакову деформацію, зусилля, що діє на матеріал, розподіляється рівномірно між фрагментами різних фаз, що забезпечує сталу швидкість зміцнення при деформації.

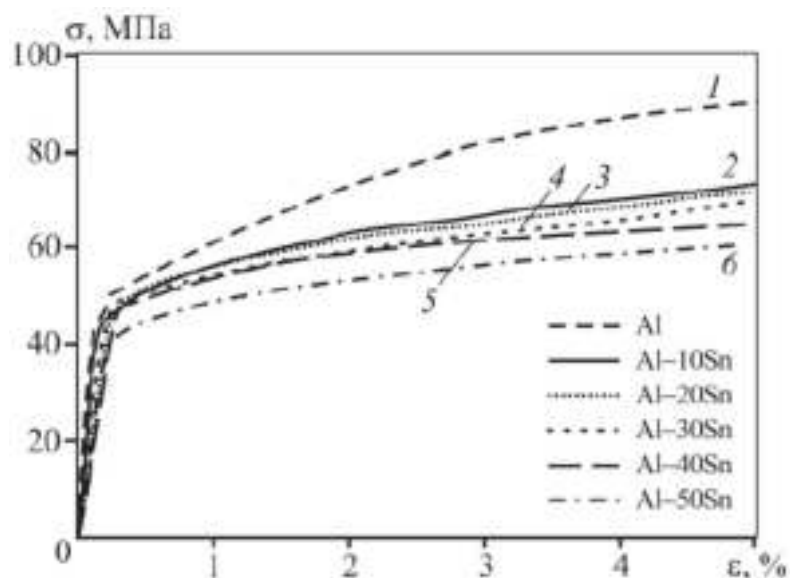


Рисунок 1.5 – Криві стиснення спечених (600 °С, 60 хв.) КМ Al–Sn: де Sn %: 0 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5), 50 (6)

Ці характеристики роблять спечені композити перспективними для використання в умовах, де потрібна висока міцність та стабільність при деформації, завдяки їх здатності до рівномірного зміцнення в процесі експлуатації.

У дослідженнях [10], де використовується алюмінієвий сплав Al–6%Sn–5%Si–4%Cu з додаванням вісмуту, заліза, марганцю та свинцю виявлено важливі аспекти, що впливають на властивості композиту:

1. Сфероїдизація фаз:

- Легкоплавкі фази (Sn-Pb-Bi): незалежно від режиму охолодження, спостерігається сфероїдизація легкоплавких фаз, таких як сплави олово-свинець-вісмут. Сфероїдизація може покращити зносостійкість і зменшити

тертя, оскільки сферичні частинки часто забезпечують краще розподілення навантаження і зменшують концентрацію напружень.

- Кремнієва фаза (Al-Si): також спостерігається сфероїдизація кремнієвих частинок. Сферичні частинки Si можуть покращувати механічні властивості сплаву, зокрема його міцність і зносостійкість.

2. Режими охолодження:

- Швидке охолодження (гартування у воді): показано, що найкращі результати досягаються при швидкому охолодженні. Швидке охолодження сприяє утворенню дрібнозернистих структур і може покращити механічні властивості сплаву, такі як твердість і міцність.

3. Вплив добавок:

- Залізо: додавання заліза (близько 1 %) в сплав призводить до формування фаз $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ скелетоподібної форми. Ці фази можуть позитивно впливати на міцність і зносостійкість сплаву завдяки своїй структурі.

- Марганець (0,5 %): марганець разом із залізом формує скелетоподібні фази, що сприяють покращенню механічних властивостей матеріалу.

Ці результати демонструють, що належний вибір компонентів і режимів термічної обробки може суттєво покращити властивості алюмінієвих сплавів. Сфероїдизація фази та ефект додавання легуючих елементів, таких як залізо і марганець, можуть забезпечити підвищену зносостійкість, міцність і довговічність матеріалу.

Трибологічні випробування підтвердили, що алюмінієвий сплав з додаванням заліза має підвищену твердість і зносостійкість. Це можна пояснити формуванням скелетоподібних фаз, які сприяють покращенню властивостей матеріалу. Основні результати та висновки з дослідження включають:

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

1. Підвищена твердість: додавання заліза в алюмінієвий сплав веде до утворення скелетоподібних фаз, таких як $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$. Ці фази, завдяки своїй структурі, сприяють підвищенню твердості сплаву.

2. Зносостійкість: випробування показали, що сплави з залізом демонструють кращу зносостійкість у порівнянні з іншими сплавами. Це зумовлено здатністю скелетоподібних фаз підтримувати структуру і знижувати швидкість зношування.

3. Перспективність застосування: результати вказують на перспективність використання залізовмісних алюмінієвих сплавів для виробництва антифрикційних матеріалів. Підвищення твердості та зносостійкості робить такі сплави придатними для використання в умовах тертя і навантажень.

4. Можливості удосконалення: Оскільки сплави на основі заліза показують обіцяючі результати, подальші дослідження можуть зосередитися на оптимізації складу сплавів, щоб максимізувати їх антифрикційні властивості і зносостійкість.

Загалом, використання заліза як легуючого елемента в алюмінієвих сплавах є ефективним способом покращення їх експлуатаційних характеристик, і ці сплави мають великий потенціал для застосування в різних інженерних і промислових сферах.

Дійсно, інтерметаліди можуть бути ефективною альтернативою для твердих частинок у алюмінієвих сплавах. Вони забезпечують хорошу адгезію до алюмінієвої матриці і формують міцні міжфазні межі. Основні переваги та особливості використання інтерметалідів, зокрема в системі Al-Fe-Sn, включають:

1. Твердість і жароміцність: інтерметаліди, що утворюються в системі Al-Fe-Sn, такі як $FeAl_3$, є тугоплавкими і твердими, що дозволяє покращити зносостійкість сплаву. Ці фази сприяють підвищенню міцності матриці і забезпечують краще розподілення навантаження.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

2. Адгезія з матрицею: наявність алюмінію в складі інтерметалідів покращує їх адгезію з алюмінієвою матрицею. Це забезпечує міцні міжфазні межі, що важливо для забезпечення структурної цілісності сплаву.

3. Форми інтерметалідів: В системі Al-Fe-Sn можуть утворюватися різні інтерметаліди:

- $FeAl_3$: інтерметалід заліза і алюмінію, який володіє хорошою твердістю і жароміцністю.

- Сполуки заліза з оловом: можуть забезпечувати додаткові механічні та трибологічні властивості.

4. Міжфазні межі: інтерметаліди часто забезпечують міцніші міжфазні межі в порівнянні з неорганічними частинками. Це допомагає знизити ймовірність розшарування та покращує загальні експлуатаційні характеристики сплаву.

5. Технологічні можливості: синтез сплавів системи Al-Fe-Sn з інтерметалідами може бути здійснений за допомогою різних методів, включаючи порошкову металургію або плавлення з подальшим термічним обробленням.

Використання інтерметалідів у складі алюмінієвих сплавів може значно підвищити їх механічні та трибологічні властивості, забезпечуючи при цьому хорошу адгезію і міцність міжфазних меж. Це робить такі сплави перспективними для застосування в умовах високих навантажень і тертя.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ КОМПОЗИТІВ AL-FE-SN.

2.1 Вихідні матеріали та методи отримання зразків.

Для виготовлення композитів Al-Fe-Sn використовувалися три види порошків: алюмінію, карбонільного заліза та олова. Нижче характеристики деталі про кожен з них [2, 6]:

1. Алюмінієвий порошок АСД-4:

- Склад: 99,7 % алюмінію та 0,3 % домішок.
- Колір: світло-сірий з металевим блиском.
- Характеристики: легкий, корозійно стійкий, стійкий до високих температур та ультрафіолету. Застосовується в теплоенергетиці, космічній промисловості, хімічній та парфумерній галузях.

- Підготовка: перед приготуванням сумішей порошок сушився при температурі 120 °С протягом двох годин у вакуумі для видалення вологи та забезпечення більшої чистоти й реакційної здатності.

2. Порошок карбонільного заліза:

- Розмір частинок: менше 50 мкм.
- Характеристики: забезпечує високу чистоту заліза, що важливо для утворення інтерметалідів у складі композиту.

3. Олов'яний порошок марки ПО-2:

- Мінімальний вміст олова: 99 % згідно з ГОСТ 9723-73.
- Колір: сірий.
- Характеристики: негорючий, надає антикорозійні властивості поверхні, що виправдано в різних галузях промисловості.

Процес виготовлення композитів наступний:

1. Сушіння алюмінієвого порошку: необхідне для видалення вологи, що може впливати на кінцеві властивості композиту. Висушування при 120

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

°C протягом двох годин у вакуумі забезпечує оптимальну підготовку порошку для подальшого використання.

2. Змішування порошків: карбонільне залізо, олов'яний порошок ПО-2 та алюмінієвий порошок АСД-4 змішуються в певних пропорціях для отримання бажаного складу композиту.

Характеристики готового композиту наступні:

- Утворення інтерметалідів: у процесі спікання можуть утворюватися тугоплавкі та тверді інтерметаліди, такі як $FeAl_3$, що підвищують міцність і зносостійкість матеріалу.

- Антикорозійні властивості: завдяки олов'яному порошку ПО-2, композити можуть мати підвищену стійкість до корозії.

- Механічні властивості: алюмінієвий порошок забезпечує легкість і корозійну стійкість, а також можливість використання в умовах високих температур.

Ці композити мають перспективні властивості для застосування в різних галузях промисловості, де потрібні міцні, зносостійкі та корозійно стійкі матеріали.

Для виготовлення композитів Al-Fe-Sn були використані суміші з вмістом заліза 5 %. Це було зроблено з урахуванням того, що в процесі спікання та пресування композитів Al-Fe-Sn повинні формуватися інтерметаліди, такі як $FeAl_3$ або $FeSn_2$. Обсяг нової фази повинен зрости приблизно в 4 та 3 рази відповідно.

Концентрації олова. Для експерименту використовувалися дві концентрації олова:

1. Концентрація, що відповідає найбільш широко застосовуваному антифрикційному алюмінієвому сплаву АО20.

2. Концентрація, при якій спостерігалася максимальна зносостійкість двофазних спечених композитів Al-Sn при сухому терті сталі.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Ваговий вміст даних компонентів у пропонованій суміші обчислюється за формулою [6]:

$$C_a = \frac{A_a \cdot a}{A_a \cdot a + B_b \cdot b + C_c \cdot c} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де A_a, B_b, C_c – атомні маси даних компонентів А, В і С, a, b, c – атомні концентрації цих компонентів.

Тоді, ваговий вміст олова і заліза в механічній суміші розрахуємо наступним чином:

$$C_{Fe} = \frac{A_{Fe} \cdot a}{A_{Fe} \cdot a + B_{Sn} \cdot b + C_{Al} \cdot c} \cdot 100\%$$

$$C_{Sn} = \frac{B_{Sn} \cdot b}{B_{Sn} \cdot b + A_{Fe} \cdot a + C_{Al} \cdot c} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де C_{Al} – атомна маса алюмінію, що рівна 26,982 а.е.м., B_{Sn} – атомна маса олова, що рівна 118,710 а.е.м.; A_{Fe} – атомна маса заліза, що рівна 55,847 а.е.м. [2];

Визначимо ваговий вміст заліза в 1 механічній суміші: Al-5 % Fe-6 % Sn:

$$C_{Fe} = \frac{55,847 \cdot 5}{55,847 \cdot 0,05 + 118,710 \cdot 0,06 + 26,982 \cdot 0,89} \cdot 100\% = 8 \%$$

Визначимо ваговий вміст олова в 1 механічній суміші: Al-5 % Fe-6 % Sn:

$$C_{Sn} = \frac{118,710 \cdot 6}{118,710 \cdot 0,06 + 55,847 \cdot 0,05 + 26,982 \cdot 0,89} \cdot 100\% = 21 \%$$

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо ваговий вміст заліза в 2 механічній суміші: Al-5 % Fe-13 %

Sn:

$$C_{Fe} = \frac{55,847 \cdot 5}{55,847 \cdot 0,05 + 118,710 \cdot 0,13 + 26,982 \cdot 0,82} \cdot 100\% = 7 \%$$

Визначимо ваговий вміст заліза у 2 механічній суміші: Al-5 % Fe-13 %

Sn:

$$C_{Sn} = \frac{118,710 \cdot 13}{118,710 \cdot 0,13 + 55,847 \cdot 0,05 + 26,982 \cdot 0,82} \cdot 100\% = 38 \%$$

Таким способом розрахунку, нами були отримані значення (по вазі) компонентів у двох варіантах досліджуваних композитів, а саме: Al-7%Fe-38%Sn та Al-8%Fe-21Sn (далі – Al-7Fe-38Sn і Al-8Fe-21Sn, відповідно). Коли відомі значення вагового вмісту компонентів у дослідній суміші можна визначити її теоретичну густину з наступного співвідношення:

$$\rho_{теор} = \frac{100}{C_{Al}/\rho_{Al} + C_{Fe}/\rho_{Fe} + C_{Sn}/\rho_{Sn}} \quad (2.3)$$

де C_{Al}, C_{Fe}, C_{Sn} – ваговий вміст компонентів; ρ_{Fe} – щільність заліза, що дорівнює 7,874 г/см³; ρ_{Al} – щільність алюмінію, рівна 2,699 г/см³; ρ_{Sn} – щільність олова, рівна 7,290 г/см³.

Тоді теоретична щільність 1 суміші зі складом Al-8Fe-21Sn:

$$\rho_{теор} = \frac{100}{71/2,699 + 8/7,847 + 21/7,290} = \frac{100}{26,31 + 1,02 + 2,88} = 3,31 \text{ г/см}^3$$

теоретична щільність 2 суміші зі складом Al-7Fe-38Sn:

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\rho_{теор} = \frac{100}{55/2,699 + 7/7,847 + 38/7,290} = \frac{100}{20,38 + 0,89 + 5,21} = 3,78 \text{ г/см}^3$$

Для отримання однорідної механічної суміші порошоків застосовувався кульовий млин. Після перемішування суміші піддавали холодному пресуванню з двох сторін у циліндричній сталевій прес-формі за допомогою прес-машини МС-500, рис. 2.1. Тиск пресування варіювався в межах 8...10 тонн [11].

Підготовка прес-форми. Бічні стінки прес-форми попередньо покриваються суцільним шаром мазуто-графітної суміші, щоб запобігти появи задирів. Це допомагає зменшити тертя між стінками прес-форми та порошками, забезпечуючи більш рівномірний розподіл тиску та зменшуючи ризик пошкодження зразків під час пресування.

Процес пресування.

1. Змішування: порошки алюмінію, олова та заліза ретельно змішувалися протягом 5 годин у кульовому млині для досягнення однорідності суміші.

2. Підготовка прес-форми: стінки прес-форми покривалися сумішшю мазуту та графіту для зменшення тертя.

3. Холодне пресування: суміші піддавалися пресуванню на прес-машині МС-500 при тиску 8...10 тонн.

Результат пресування. Отримані після пресування зразки мали високу щільність та механічну міцність, необхідні для подальшої обробки та використання у виготовленні композитних матеріалів Al-Fe-Sn.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 – MS-500, прес машина.

Після пресування суміші порошків утворились зразки у вигляді брикетів висотою 7 мм. і діаметром 20 мм. Схема такого пресування зразка зображена на рисунку 2.2.

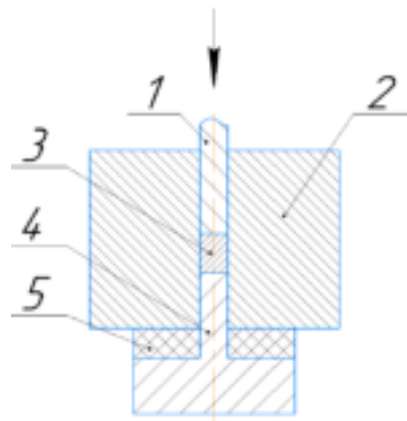


Рисунок 2.2 – Схема пресування зразка:

1 – пуансон верхній; 2 – циліндр порожнистий; 3 – зразок; 4 – пуансон нижній; 5 – гумова манжета.

За розмірами зразків та теоретичною щільністю, розрахуємо вагу зразків за формулою:

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m = \rho_{\text{теор}} \cdot V, \quad (2.4)$$

де V – об'єм зразка; m – маса зразка;

$$V = \pi R^2 \cdot h, \quad (2.5)$$

де h – висота зразків, 7 мм, R – радіус зразків, 10 мм;

Тоді, $m = \rho_{\text{теор}} \cdot \pi R^2 \cdot h$. Вага зразків при пористості у 10 %, виготовлених з порошкової суміші: Al-8Fe-21Sn складає:

$$m = 3,31 \cdot \pi \cdot 1^2 \cdot 0,7 \cdot 0,9 = 6,55 \text{ г}$$

Вага зразків при пористості у 10 %, виготовлених з порошкової суміші: Al-7Fe-38Sn:

$$m = 3,78 \cdot \pi \cdot 1^2 \cdot 0,7 \cdot 0,9 = 7,48 \text{ г}$$

Вимірювання розмірів і маси зразків. Для точного контролю параметрів зразків після пресування були проведені вимірювання розмірів і маси з використанням високоточних приладів. Вимірювання розмірів [11]:

- Прилад: мікрометр.
- Точність: до 0,01 мм.
- Процедура: кожен зразок був виміряний для визначення діаметра і висоти з метою забезпечення точності виготовлення та відповідності необхідним параметрам.

Вимірювання ваги:

- Прилад: аналітичні ваги.
- Точність: до 0,001 г.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Процедура: Кожен зразок був зважений для визначення точної маси з метою контролю щільності та відповідності розрахунковим наважкам.

Вимірювання розмірів і маси зразків підтвердили високу точність процесу пресування та відповідність зразків заданим параметрам. Це забезпечує якість та однорідність матеріалів, що важливо для подальших досліджень і застосування отриманих композитів.

Наступним етапом виготовлення зразків з алюмінієвих композитів було їх спікання у вигляді сформованих брикетів в електропечі типу СНВЕ-1.3.1/16 (рисунок 2.3) [11].



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд СНВЕ-1.3.1/16.

Для досягнення необхідної однорідності і високої щільності композитів системи: Al-Fe-Sn виконувалось спікання зразків в умовах контрольованої температури і низького тиску в декілька етапів.

Перший етап спікання.

- Залишковий тиск газів: не вище 10^{-2} Па.
- Температура: 530 °С.
- Тривалість витримки: 60 хвилин.

Мета: дозволити олову рівномірно розтектися за обсягом композиту, уникнувши значного випаровування олова.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Другий етап спікання:

- Температура: 570-590 °С.
- Тривалість витримки: 60 хвилин.

Мета: завершити процес спікання для забезпечення високої щільності та міцності композиту.

Доущільнення зразків:

- Температура: 250 °С.
- Процедура: частина зразків після спікання піддавалася подальшому доущільненню у вихідній прес-формі.

Мета: додатково покращити щільність та міцність композитів.

Процес спікання був розроблений таким чином, щоб забезпечити рівномірне розподілення олова в об'ємі композиту, формування інтерметалідів та мінімізацію пористості. Додаткове доущільнення при зниженій температурі сприяло підвищенню загальної щільності зразків та покращенню їх механічних властивостей.

2.2 Методика та обладнання для досліджень зразків композитів системи: Al-Fe-Sn.

2.2.1 Процес підготовки зразків для металографічного дослідження.

Для забезпечення належної якості поверхні та можливості проведення детального металографічного аналізу, зразки були підготовлені за наступною методикою [11]:

1. Шліфування.

- Мета: видалення нерівностей та отримання рівної поверхні.
- Обладнання: наждаковий папір з різною зернистістю абразиву.
- Процес: шліфування здійснювалося послідовно, з використанням паперу з більшою до меншої зернистістю.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

2. Полірування.

- Мета: отримання дзеркальної поверхні для подальшого аналізу мікроструктури.

- Обладнання: полірувальний верстат "MECAPOL P 230" (рис. 2.4).

- Матеріали: сукно та алмазна паста з розміром абразивних частинок менше 1 мкм.

- Процес: полірування проводилося на сукні, покритому алмазною пастою, до отримання гладкої дзеркальної поверхні.

3. Травлення.

- Мета: виявлення мікроструктури зразків для аналізу.

- Розчин: 4 % розчин кислоти азотної у спирті.

- Процес: зразки травилися в розчині, що дозволяло розкрити мікроструктуру для подальшого спостереження під мікроскопом.

Підготовлені за цією методикою зразки мали високоякісну поверхню, що дозволило провести детальне металографічне дослідження, виявити мікроструктуру, розподіл фаз та інтерметалідів у композитах Al-Fe-Sn. Така підготовка є критично важливою для точного аналізу та отримання достовірних результатів дослідження.



Рисунок 2.4 – Верстат полірувальний модель «MECAPOL-P230».

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

2.2.2 Процедура проведення випробувань на стиск.

Для оцінки механічних властивостей, зокрема міцності на стиск, з спечених та допресованих брикетів були підготовлені спеціальні зразки:

- Розміри зразків: 5x5x10 мм.
- Процес вирізання: зразки вирізалися з брикетів, які пройшли стадії спікання та подальшого допресування.

Випробування на стиск [11]:

- Обладнання: машина для випробувань на стиск «Walter+Bai AG LFM-125», рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Машина для випробувань на стиск, модель «Walter+Bai AG LFM-125»

- Встановлення зразків: зразки були встановлені на випробувальну машину.
- Швидкість осідання: 0,5 мм/хв.
- Проведення тесту: випробування на стиск проводилося до руйнування зразків.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Отримані результати дозволили оцінити міцність композитів Al-Fe-Sn при стисканні та виявити їх механічні характеристики. Використання випробувальної машини «Walter+Bai AG LFM-125» забезпечило точність і надійність даних, отриманих в результаті випробувань.

2.2.3 Методика і обладнання для трибологічних випробувань композитів системи: Al-Fe-Sn.

Для оцінки зносостійкості та трибологічних характеристик досліджуваних композитів були проведені трибологічні випробування за схемою «палець – диск», що включала наступні етапи [13]:

1) Підготовка зразків:

- Розмір зразків: 2x2 мм (торцева поверхня).
- Матеріал зразків: Композити Al-Fe-Sn.

2) Умови випробувань:

- Обладнання: триботестер фірми «Tribotechnic», рисунок 2.6.
- Схема: «Палець – диск».
- Швидкість ковзання: 0,6 м/с.
- Тиск: 1-5 МПа.
- Контртіло:
- Матеріал: Загартована сталь 40Х.
- Твердість: 45-47 HRC.

- Розмір: Діаметр диска 50 мм.

3) Процес випробувань:

- Встановлення зразків: зразки з досліджуваних композитів були закріплені на триботестері.

- Вибір умов: зразки випробовувалися при різних тисках (від 1 до 5 МПа) та постійній швидкості ковзання (0,6 м/с).

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Випробування: трибологічні випробування проводилися з використанням загартованого сталевого диска як контртіла, забезпечуючи постійні умови тиску та швидкості.



Рисунок 2.6 – Триботестер фірми "Tribotechnic".

Трибологічні випробування дозволили визначити зносостійкість композитів Al-Fe-Sn та їхню взаємодію зі сталевим контртілом. Результати випробувань показали, що досліджувані композити можуть мати підвищену зносостійкість та трибологічні характеристики, що робить їх перспективними для використання в умовах високих навантажень та тертя.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ КОМПОЗИТІВ AL-FE-SN, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ СПІКАННЯ ТА ПІДДАНИХ ПОДАЛЬШОМУ ГАРЯЧОМУ ДОУЩІЛЬНЕННЮ

3.1 Аналіз структури композитів Al-Fe-Sn.

Структура сирого брикету Al-7Fe-38Sn (рисунок 3.1) має наступний розподіл частинок у брикеті:

1. Порошинки олова (Sn):

- Колір: темний.
- Розподіл: відносно рівномірний за обсягом пресування.
- Значення: рівномірний розподіл порошинок олова забезпечує рівномірне його поширення при розплавленні в процесі спікання.

2. Частинки заліза (Fe):

- Колір: сірий.
- Кількість: менше, ніж частинок олова.
- Дисперсність: ширша, ніж у частинок олова.
- Розмір: максимальний розмір частинок заліза не перевищує 100 мкм.

Структура сирого брикету Al-7Fe-38Sn свідчить про те, що порошинки олова рівномірно розподілені в об'ємі пресування, що є важливим для рівномірного поширення олова при розплавленні під час спікання. Частинки заліза мають більшу дисперсність, але їх кількість менша, а максимальний розмір не перевищує 100 мкм, що також сприяє рівномірному розподілу фаз у спеченому композиті.

Горизонтальними стрілками на рисунку 3.1 вказані частинки заліза, а вертикальними – олова.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

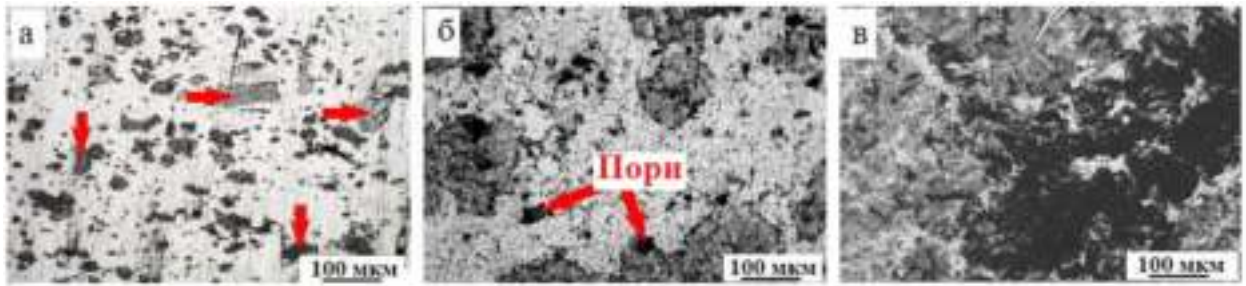


Рисунок 3.1 – Структура порошкового брикету складу Al-7Fe-38Sn:
 а – сирий зразок; б – спечений при 490 °С протягом 60 хвилин
 а, б – ОМ зображення; в – РЕМ зображення.

Аналізуючи діаграму стану (рисунок 3.2) подвійних систем видно, що при нагріванні пресувань до 232 °С олово переходить у рідкий стан, але через погану змочуваність алюмінію та наявність оксидних плівок, його розтікання по поверхні алюмінієвих порошинок є обмеженим [13]. Це може впливати на рівномірність розподілу олова в структурі композиту та його взаємодію з алюмінієвою матрицею [14].

Вплив температури на структуру подвійних систем Al-Sn-Fe:

Теплові властивості компонентів:

- Олово (Sn):
- Температура плавлення: 232 °С.
- Фазовий стан при нагріванні до 232 °С: переходить у рідкий стан.
- Змочуваність алюмінію: погано змочує алюміній при температурах нижче 600 °С.
- Алюміній (Al):
- Температура плавлення: 660 °С.
- Фазовий стан при нагріванні до 660 °С: плавиться.
- Оксидні плівки: завжди присутні на поверхні алюмінієвих порошків і погано змочуються рідким оловом.
- Залізо (Fe):
- Температура плавлення: 1538 °С.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- Фазовий стан при нагріванні до 1538 °С: плавиться.

Взаємодія компонентів при нагріванні:

1. При температурі до 232 °С:

- Олово: переходить у рідкий стан.

- Алюміній: залишається у твердому стані.

- Залізо: залишається у твердому стані.

2. При температурі до 600 °С:

- Рідке олово: погано змочує алюміній, що ускладнює його розтікання по поверхні алюмінієвих порошочок.

- Оксидні плівки на алюмінію: перешкоджають змочуванню рідким оловом.

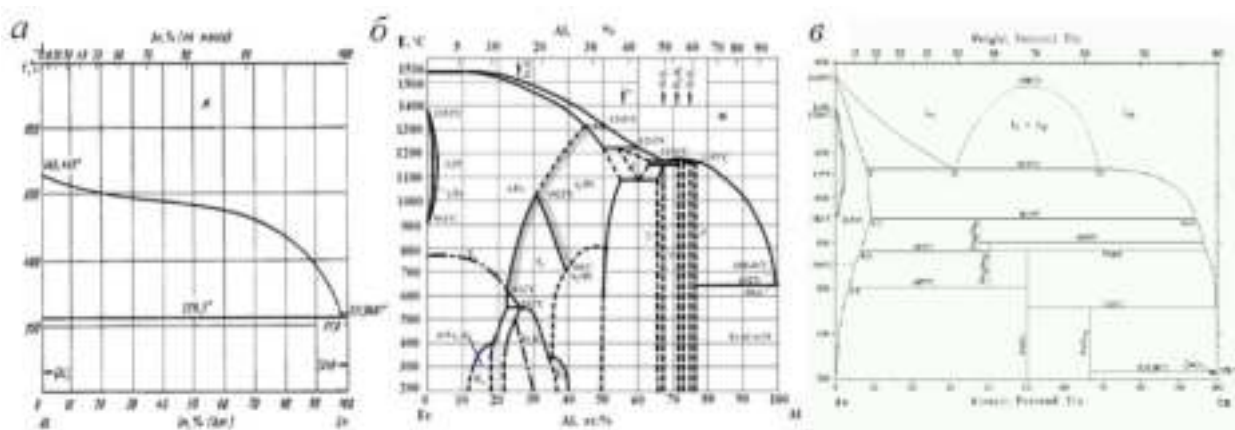


Рисунок 3.2 – Діаграми стану систем:

а – Al-Sn; б – Fe-Al; в – Fe-Sn.

Процес нагрівання та поверхневого легування сприяє рівномірному розподілу рідкого олова по поверхні алюмінієвих частинок у композиті Al-Sn-Fe. Це забезпечує рівномірне поширення олова в межах зерен алюмінієвих порошочок, що сприяє утворенню стабільної та зносостійкої структури композиту.

Процес поверхневого легування в системі Al-Sn-Fe наступний:

Вплив оксидної плівки на алюмінієвих порошочках:

									Арк.
									73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

- Тендітність плівки: оксидна плівка на поверхні алюмінію є тендітною і руйнується при зміні форми порошинок у процесі пресування брикетів.

- Розтріскування плівки: у процесі нагрівання зразка порошок алюмінію розширюються, оксидні плівки додатково розтріскуються, що створює ділянки свіжої поверхні.

Процес проникнення і поширення рідкого олова наступний:

- Проникнення олова: рідке олово проникає на свіжі поверхні алюмінію, утворені внаслідок руйнування оксидних плівок.

- Поширення олова: рідке олово поширюється на межах зерен алюмінієвих частинок, завдяки прагненню системи знизити вільну енергію шляхом розчинення дефектних місць (кордонів зерен) з підвищеною енергією.

Поверхнєве легування:

- Сутність явища: поверхнєве легування — це процес проникнення рідкої фази на свіжу поверхню твердих частинок, що веде до насичення рідкої фази атомами твердого матеріалу.

- Утворення легкоплавкої евтектики: у системах, що утворюють легкоплавку евтектику, як Al-Sn, поверхнєве легування є особливо вираженим.

Перекристалізація:

- Насичення розплаву: після насичення рідкої фази атомами алюмінію стають можливими процеси перекристалізації через рідку фазу.

- Зниження енергії: перекристалізація через рідку фазу дозволяє знизити енергію системи, що сприяє утворенню стабільної структури композиту.

Так, у роботі [10] описаний такий процес поширення олова, щодо особливостей спікання двофазних зразків Al-Sn. Аналіз структури спеченого композиту Al-7Fe-38Sn при 490°C показує:

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- Проникнення олова: при температурі 490 °С олово дійсно проникає на межі багатьох алюмінієвих зерен.

- Прошарки олова: оскільки при даній температурі розчинність алюмінію в олові є низькою, а кут змочування розплавом великий, олово залишається в алюмінієвих порошинках у вигляді прошарків по межах зерен.

- Утворення сітки: прошарки олова формують дрібну сітку в структурі композиту.

- Незначне розтікання: розтікання олова поверхнею порошинок Al є незначним через високу температуру змочування.

Низька розчинність алюмінію в олові при 490 °С та великий кут змочування обмежують здатність олова до розтікання по поверхні алюмінієвих порошинок. Олово залишається у вигляді прошарків на межах зерен алюмінію, утворюючи дрібну січасту структуру, що може впливати на механічні та трибологічні властивості композиту.

Такий розподіл олова може сприяти підвищенню зносостійкості композиту завдяки утворенню стабільних меж зерен, які зменшують знос при терті.

Утворення інтерметалідів Fe-Sn сприяє зміцненню структури композиту, але їх крихкість може призводити до утворення тріщин. Напруження, що виникають через збільшення розмірів залізних частинок та дифузії рідкого олова, можуть впливати на механічні властивості композиту. Рідке олово, що заповнює тріщини, сприяє підвищенню зносостійкості композиту та забезпечує стабільність меж зерен.

Взаємодія частинок олова та заліза у композиті Al-7Fe-38Sn наступна:

1. Змочування та дифузія:

- Змочування заліза: коли частинки заліза розташовані поруч із частинками олова, рідке олово досягає їх поверхні, добре змочує та обволікає залізні частинки.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Дифузія: рідке олово починає дифундувати в обсяг залізних частинок, що призводить до змін у їх структурі.

2. Утворення інтерметалідів:

- Інтерметаліди Fe-Sn: згідно з діаграмою стану, взаємодія заліза та олова при відповідних температурах призводить до утворення інтерметалідів, таких як станніди (FeSn) та дистанніди (FeSn₂).

- Збільшення розмірів частинок: внаслідок дифузії рідкого олова розміри залізних частинок значно збільшуються.

3. Механічні напруження:

- Напруження розтягу: на поверхні залізних частинок виникають напруження розтягу через збільшення їх розмірів та утворення інтерметалідів.

- Крихкість інтерметалідів: інтерметаліди, що утворюються, є крихкими і можуть утворювати тріщини під дією механічних напружень.

4. Заповнення тріщин: роль рідкої фази: рідке олово заповнює тріщини, що утворюються в інтерметалідах, утворюючи більш стабільну структуру та підвищуючи зносостійкість композиту [15].

Процес утворення інтерметалідів Sn-Fe є екзотермічним, і виділене тепло може сприяти розплавленню навколишнього алюмінію. Атоми алюмінію можуть заміщувати атоми олова, що йдуть у реакцію, і оточувати залізні частинки. Велика кількість олова перешкоджає контакту залізних частинок з рідким алюмінієм, запобігаючи утворенню інтерметалідів алюмінію. Такі процеси можуть сприяти утворенню міцної структури з хорошими механічними та трибологічними властивостями.

Процеси, що відбуваються при утворенні інтерметалідів у системі Sn-Fe-Al наступні:

1. Виділення тепла при утворенні інтерметалідів:

- Утворення інтерметалідів у системі Sn-Fe супроводжується виділенням значної кількості тепла.

										МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
											73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

- Це тепло може бути достатнім для розплавлення навколишнього алюмінію.

2. Розплавлення алюмінію:

- Якщо виділеного тепла достатньо, алюміній навколо частинок заліза може розплавитися.

- Рідкий алюміній може заповнити простір навколо залізних частинок.

3. Переміщення атомів:

- Атоми олова, що йдуть у реакцію утворення інтерметалідів, можуть бути заміщені атомами алюмінію.

- Алюміній може оточувати залізні частинки, утворюючи зовнішню оболонку.

4. Роль великої кількості олова:

- Якщо в системі міститься велика кількість олова, воно оточуватиме залізні частинки.

- Олово перешкоджає контакту заліза з рідким алюмінієм, що запобігає подальшому утворенню інтерметалідів алюмінію з залізом (наприклад, $FeAl_3$).

Ці механізми пояснюють складні процеси, що відбуваються в системі Al-Fe-Sn при спіканні, і підкреслюють важливість контролю концентрацій та умов обробки для досягнення бажаних властивостей композитних матеріалів.

На рисунку 3.1 (в) чітко видно, що при спіканні за температури 490 °C замість вихідних часток заліза утворюються агломерати, котрі складаються з часток станідів, та прошарків з алюмінію і олова розташованих між ними.

За результатами даних таблиці 3.1 видно, що щільність після спікання не зменшується порівняно з теоретичною щільністю сирих порошкових пресувань, що свідчить про успішне спікання з мінімальними втратами матеріалу. Підвищена кількість пір у спечених зразках впливає на загальну щільність матеріалу. Важливо контролювати пористість для покращення

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

механічних властивостей. Утворення інтерметалідів, таких як станніди заліза, може сприяти зміцненню структури, але також впливає на розподіл щільності в зразку.

Щільність після спікання: після спікання при 490°C щільність зразків не є меншою від теоретичної щільності сирих порошкових пресувань. Це включає врахування пористості, яка була присутня в сирих зразках.

Щільність станнідів заліза: щільність станнідів заліза (FeSn , FeSn_2) перевищує 8 г/см^3 , що більше за щільність окремих елементів Fe і Sn. Тобто, утворення станнідів призводить до локального збільшення щільності.

Пористість: спечені зразки містять підвищену кількість пор, які впливають на вимірювану щільність. Пори утворюються в результаті процесів спікання, включаючи виділення газів та усадку матеріалу.

Ці аспекти підкреслюють важливість контролю процесу спікання та складу для досягнення бажаних властивостей матеріалу, таких як міцність, зносостійкість та рівномірність щільності.

Допресування при 250 °C ефективно збільшує щільність спечених брикетів, що підтверджується табличними даними. Рідке спікання та допресування дозволяють ефективно контролювати пористість та щільність спечених зразків, забезпечуючи кращі механічні властивості матеріалу.

Пояснення підвищеної пористості:

- Міцний каркас: порошки алюмінію утворюють міцний каркас у пресуванні, який включає частинки Fe і Sn, а також пори.

- Рідке спікання: для зменшення пористості використовується рідке спікання. Розплавлений матеріал проникає в контакти частинок твердої фази, послаблюючи каркас і дозволяючи часткам рухатися під дією капілярних сил.

- Ущільнення: рух часток під дією капілярних сил сприяє укладенню в більш щільну конфігурацію, що заповнює поровий простір.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Ці результати підтверджують, що комбіноване використання рідкого спікання та допресування є ефективним методом покращення характеристик спечених алюмінієвих композитів з додаванням заліза та олова.

Початкова щільність: Al-7Fe-38Sn в межах 3,56...3,60 г/см³; для Al-8Fe-21Sn в межах 3,12...3,15 г/см³ (значення пористості – 5...6 %)

Таблиця 3.1 – Щільність композитів системи: Al-Fe-Sn при спіканні та подальшому гарячому до ущільненні.

Композит (з теоретичною щільністю при сирому пресуванні)	Режим отримання	Густина, г/см ³
Al-7Fe-38Sn (3,79)	(620 °C; 60 хв.) + ГД 250 °C	3,93
	(620 °C; 60 хв.)	3,66
	(595 °C; 60 хв.) + ГД 250 °C	3,90
	(595 °C; 60 хв.)	3,60
	(570 °C; 60 хв.) + ГД 250 °C	3,87
	(570 °C; 60 хв.)	3,52
Al-8Fe-21Sn (3,32)	(620 °C; 60 хв.)	3,03
	(570 °C; 60 хв.)	2,96
	(620 °C; 60 хв.) + ГД 250 °C	3,43
	(490 °C; 60 хв.)	2,87

Однак, якщо рідини замало, щоб з'явилась можливість руйнування каркасу з твердих частинок, її проникнення у контакти може призвести до зворотного ефекту. Вона працює як гідравлічний клин, що намагається розсунути такі контакти, без можливості подальшого переукладання частинок. В результаті, пористість пресування при спіканні тільки

збільшується. Таке саме явище було наявне при спіканні брикетів систем: (Al-12Si)-Sn та Al-Sn [10, 16], та у результаті розплавлення олова пористість яких зростала.

При спіканні систем порошкових з взаємодіючими компонентами також може з'являтися додаткова пористість у разі односторонньої або переважної розчинності атомів рідкої фази в твердій. В цьому випадку розмір часток з твердою фазою збільшується, і, якщо вони утворюють каркас, то він розсувається. При цьому кількість вже існуючих пір також зростає і до них додаються порожнечі, що з'являються на місці атомів рідкої фази, що пішли. Якщо після завершення утворення сплаву під час пресування залишається ще достатня кількість рідкої фази, то вона сприяє можливості переукладання частинок твердої фази у більш щільну конфігурацію, і зниженню пористості залишкової брикету.

У розглянутому випадку при спіканні певна кількість рідкого олова розчиняється в частинках заліза і поширюється на межі алюмінієвих зерен. Це супроводжується збільшенням пористості брикету, а залишкової рідкої фази недостатньо, щоб почалися процеси переукладання часток твердої фази під дією сил капілярних. Тоді, спікання при температурі 490 °C призводить до зростання пористості зразка, і ці пори можна побачити на рисунку 3.1, б. Вони утворилися замість олов'яних частинок і поблизу часток заліза через розчинення фази рідкої в твердій. При такому режимі спікання отримані композити мали низькі трибо-механічні властивості, а щоб їх підвищити необхідно, в першу чергу, усунути пори. Це можна зробити або шляхом спікання при більш високих температурах, або за рахунок ущільнення зразків тиском.

За дослідженнями [9, 10, 18], у випадку двофазних композитів системи Al-Sn наявна усадка зразків з формуванням міцного зв'язаного каркасу алюмінієвого виконується при температурі спікання, що перевищує 570 °C. Однак, при збільшенні температури понад 620 °C, за рахунок розчинення

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

алюмінію в розплавленому олові утворювалось багато рідкої фази, що призводило до втрати форми зразків. Тому в цій роботі спікання композитів Al-Fe-Sn проводили в діапазоні температур 570...620 °С, що забезпечувало зниження кута змочування алюмінію розплавом олова, і кількість фази рідкої суттєво збільшувалась, але ще не досягала критичного значення. У відповідності до діаграмами рівноваги, рисунок 3.2, з однієї сторони, такий ефект повинен сприяти усадці зразків за рахунок дії капілярних сил, але, при цьому, забезпечити присутність каркаса зв'язаного з часток твердої фази, що не дозволяє втратити форму зразкам під дією власної ваги.

Також відомо, що для якісного розтікання розплавленого олова по алюмінієвому пресуванню вздовж кордонів зерен необхідно багато часу (близько 60 хвилин). Слід відмітити, якщо таке пресування швидко нагріти до вказаних температур, витримати його вказаний час, щоб дочекатись рівномірного розподілу олова, нічого не виходить. З врахуванням великої кількості рідкої фази, її частина не встигає розтектися по кордонах частинок алюмінієвих і неминуче видавлюється прямо на поверхню пресувань та втрачається, тому вміст олова в спечених зразках виходить нижчим за розрахований. Щоб уникнути такого явища необхідно, перед нагріванням зразків до зазначених температур спікання, піддати зразки попередній витримці за нижчої температури, орієнтовно 530 °С протягом 60 хвилин, що дає можливість олову поширитися по пресуванню і при цьому уникнути випотівання.

На рисунку 3.3, г, в, наведена структура спеченого при температурі: 570 °С композиту системи Al-7Fe-38Sn після його попередньої витримки при температурі 530 °С. Бачимо, що вона помітно відрізняється від структури композиту, спеченого при нижчій температурі, а саме: 490 °С (рис. 3.1, б). При зростанні температури спікання значення розчинності алюмінію в олові збільшується, а кут змочування зменшується. При цьому дрібні зерна алюмінію зникають за рахунок розчинення, а більші, збільшуються в

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

розмірах за рахунок осадження на них розчинених атомів. Олов'яні тонкі прошарки стають товстішими. Під дією сил капілярних відбувається перекладка часток алюмінію у більш щільну конфігурацію, і пір на місці частинок олова майже не залишається. Щільність зразків помітно підвищується (таблиця 3.1). При цьому в композиті системи Al-7Fe-38Sn прошарки олова товщі, а зерна алюмінієвої матриці більші внаслідок більшого вмісту олов'яної фази.

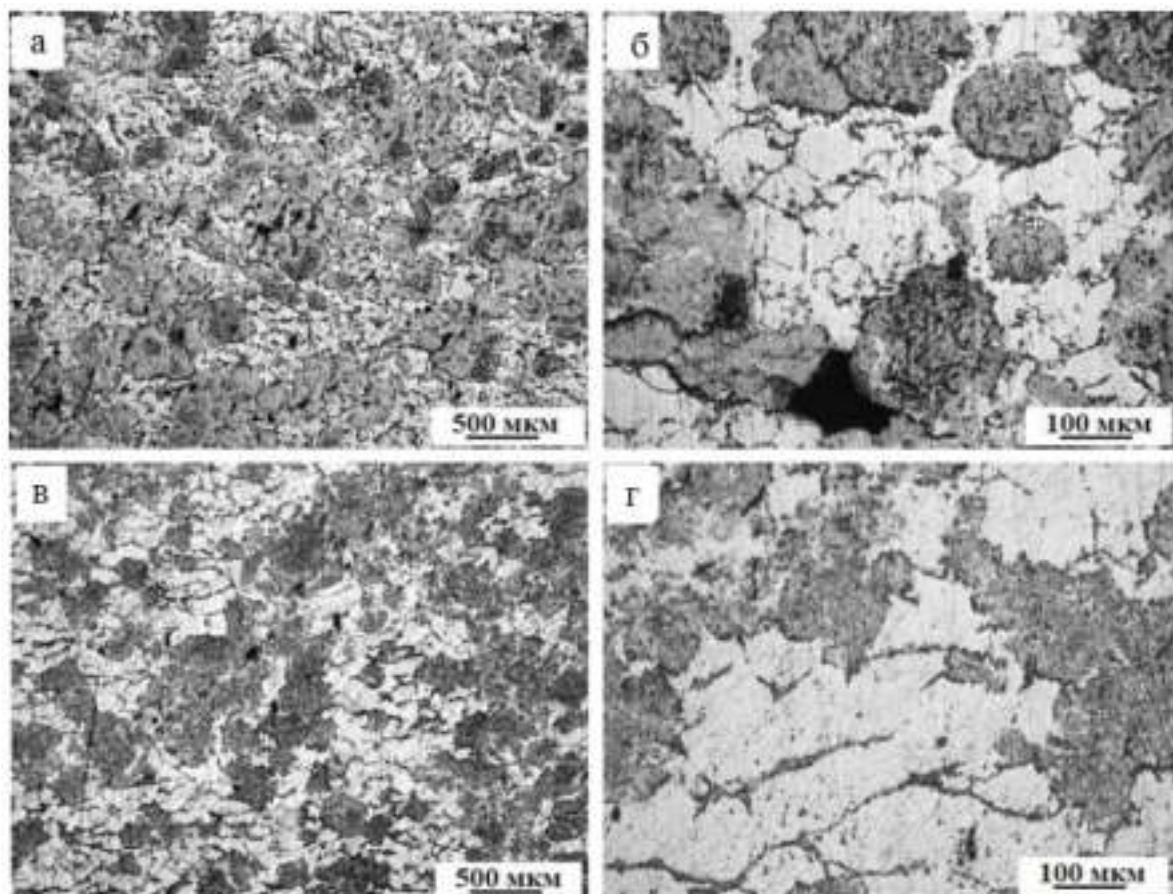


Рисунок 3.3 – Структура композитів при різних збільшеннях систем: Al-8Fe-21Sn (а, б) і Al-7Fe-38Sn (в, г) після спікання при температурі 570 °С протягом 60 хвилин.

Наявність олов'яних прошарків вказує на те, що не вся рідка фаза розчинилася у залізі, а лише певна її частина. Причому частина невелика, тому що обсяг нової утвореної інтерметалідної фази у разі композитів з

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

вмістом 21 і 38 % олова орієнтовно однаковий. Це свіжчить про те, що кількість олова, що розчинився в залізі, визначається швидкістю його дифузії в решітці заліза, а, отже, тривалістю і температурою спікання.

Слід зазначити, що щільність зразків отриманих після спікання при температурі 570 °С зросла у порівнянні з попереднім випадком, тобто при температурі 490 °С. Це могло статись як внаслідок переукладання частинок фази твердої у більш щільну конфігурацію, так і внаслідок подальшого сплавоутворення, при якому з'являються важкі станніди заліза. Гаряче ущільнення спечених зразків показує (див. таблицю 3.1), що реакція між оловом та залізом при високій температурі спікання продовжується, та щільність доущільненого зразка (практично без наявності пір) через наявність у ньому важких інтерметалевих часток стає вище розрахункової за правилом механічної суміші.

Більш детально розподіл елементів у спечених композитах системи Al-Fe-Sn можна вивчити на зображеннях структури, отриманих в характеристичних променях даних елементів, що наведені на рисунку 3.4. Видно, що олово не тільки охоплює залізні частинки, але й розчиняється в них. Слід зазначити, що в центрі частинок заліза його помітно менше, ніж їх периферії. Тоді як алюміній, що присутній у вигляді окремої фази, практично не поєднується ні з залізом ні з оловом. Відсутність алюмінію в залізних частинках свідчить про те, що рідке олово обволікає їх та ізолює взаємодії з атомами алюмінію. Для більш детального вивчення процесів утворення сплавів та формування структури у системі: Al-Fe-Sn необхідно використовувати додаткові методи досліджень, наприклад, дилатометричний, калориметричний та, або рентгенофазовий аналіз.

З наведених на рисунку 3.5 зображень видно, що із підвищенням температури спікання до 620 °С розмір олов'яних прошарків і часток матриці алюмінієвої помітно підвищується. Це є результатом того, що швидкість процесів перекристалізації атомів алюмінію через рідку фазу підвищується. В

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

результаті кількість дрібних частинок алюмінію знижується, а зеренна структура матриці алюмінієвої огрублюється. При розчиненні дрібних часток алюмінієвий каркас послаблюється, і частинки, що залишилися, можуть переукладатись в більш щільну конфігурацію під дією сил капілярних.

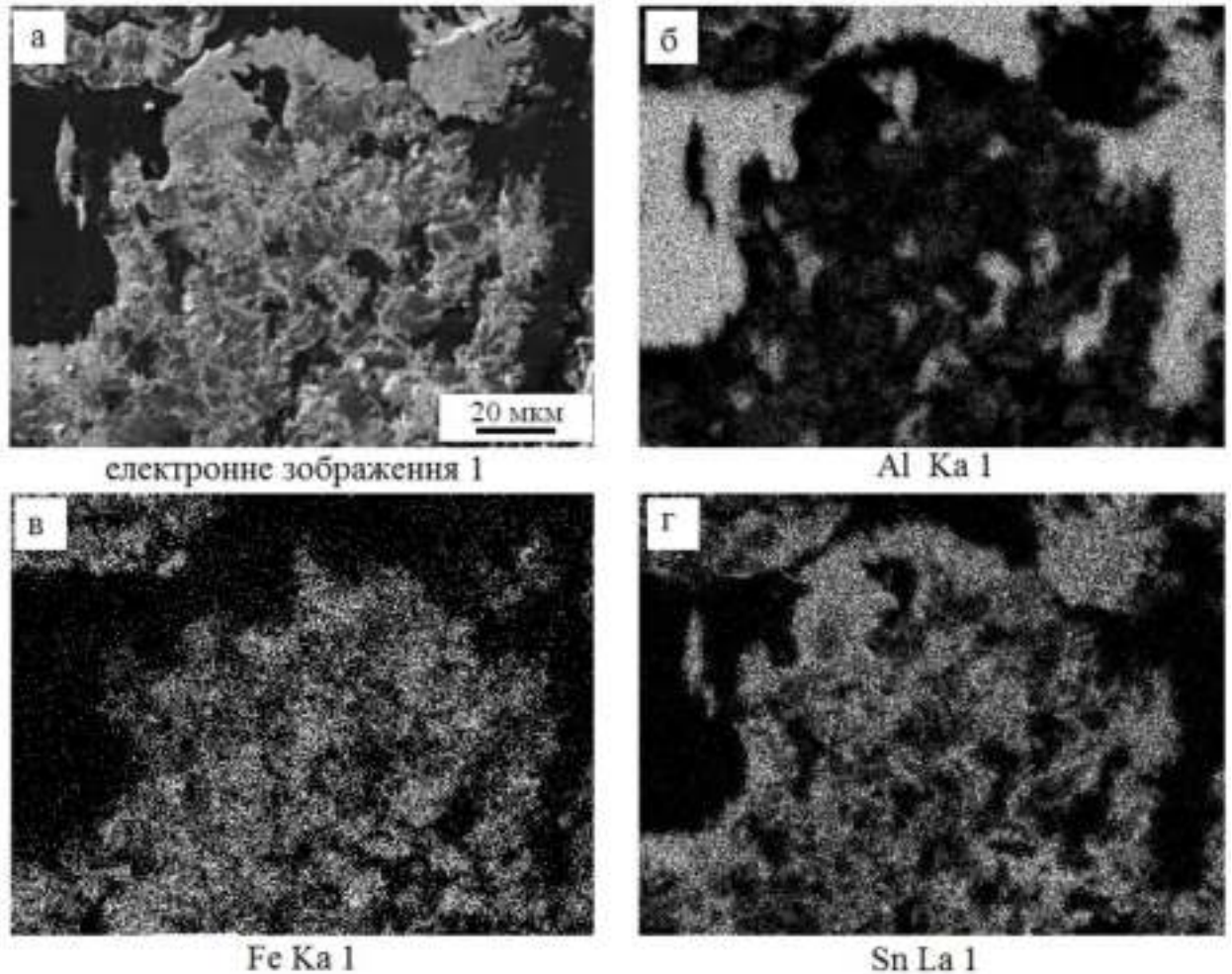


Рисунок 3.4 – Структура спеченого композиту системи Al-7Fe-38Sn
($T=570\text{ }^{\circ}\text{C}$; 60 хв.):

а) – зображення (РЕМ); б) – розподіл алюмінію (EDX); в) – розподіл заліза (EDX); г) – розподіл олова (EDX).

Станідів заліза візуально не стає більше за даної температури, але видно, що присутня фрагментація агломератів з таких частинок, а прошарки олова в них коагулюють в округлі частки. Агломерати, розмиті за формою

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтерметалічних частинок, набувають більш чітких обрисів, а пористість усередині них мінімізується. Щільність зразків внаслідок таких структурних змін зростає до $3,66 \text{ г/см}^3$, хоча все ще залишається нижче ніж розрахована за правилом суміші (таблиця 3.1).

Після усунення пір гарячим доущільненням щільність зразків наближається до теоретичної для даного складу. Порівняння отриманої його величини ($3,93 \text{ г/см}^3$) з аналогічною щільністю зразків, спечених при менших температурах показує, що кожного разу з підвищенням температури спікання активується утворення сплаву між залізом і оловом, а важких станнідів з високою щільністю стає більше. Відповідно щільність безпористих композитів підвищується. Тобто, щільність спечених при вищій температурі ($620 \text{ }^\circ\text{C}$) пресувань зростає не тільки за рахунок переукладання частинок твердої фази, але і за рахунок утворення деякої додаткової кількості станнідів заліза.

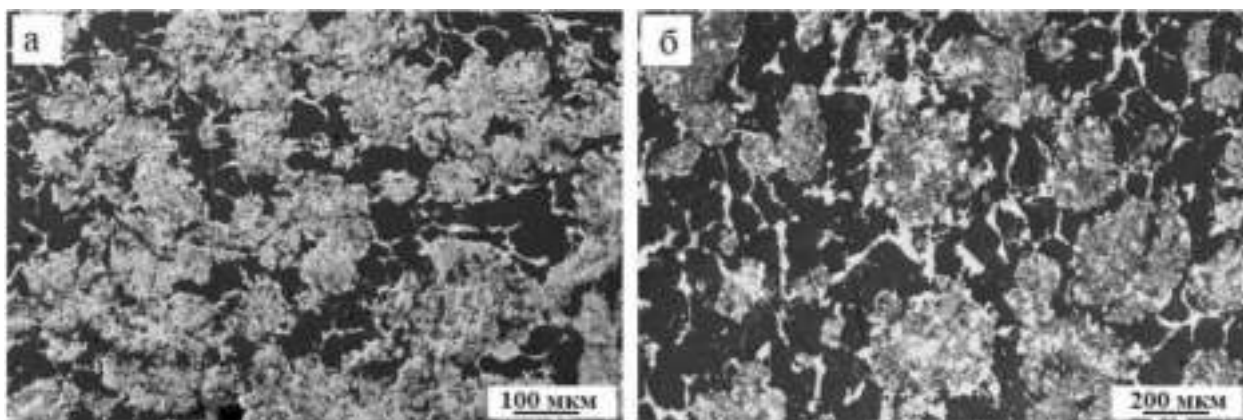


Рисунок 3.5 – Зображення РЕМ структури спеченого композиту системи Al-7Fe-38Sn , час витримки – 60 хвилин:

а) – температура спікання $570 \text{ }^\circ\text{C}$; б) – температура спікання $620 \text{ }^\circ\text{C}$.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

3.2 Аналіз властивостей композитів Al-Fe-Sn.

У таблиці 3.2 наведені механічні властивості композитів системи Al-Fe-Sn після спікання з подальшим доущільненням. Після спікання за температури 490 °С структура матеріалу була найбільш неоднорідною і включала багато пір (таблиця 3.1). Такі зразки швидко руйнувалися при випробуваннях на стиск. Однак зі збільшенням температури спікання механічні властивості композитів значно покращилися. Так, спечені за температури 620 °С композити були здатні до деформування без руйнування при стисканні їх більш ніж на 30 %, тоді як після спікання за температури 570 °С їх допустима осадка не перевищувала 10 %. Такою ж хорошою пластичністю володіли і спечені зразки сплавів системи Al-Sn, що не містять заліза. Проте міцність їх була у 1,5 разу нижче (таблиця 3.2).

При допресуванні зразків у закритому штампі при тиску понад 300 МПа пори усуваються. Інших особливих змін у структурі спеченого матеріалу при цьому не відбувається, хоча в деяких випадках зерна матриці алюмінієвої тріхи деформувались, як можна бачити на рисунку 3.6. Щільність зразків усіх складів також значно зросла, і перевищила їх теоретичну щільність, розраховану за правилом механічної суміші чистих порошоків Fe, Al, і Sn. Як було зазначено вище, це обумовлено формуванням у процесі спікання сполук заліза з оловом, щільність яких ($\rho_{\text{Sn}_2\text{Fe}} = 8,5 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{FeSn}} = 8 \text{ г/см}^3$) помітно вища, ніж щільність складових їх чистих елементів ($\rho_{\text{Sn}} = 7,3 \text{ г/см}^3$ і $\rho_{\text{Fe}} = 7,8 \text{ г/см}^3$).

З випробувань зразків на стиск слідує, що структурні зміни, що викликані легуванням сплавів системи Al-Sn залізом (вмістом 5 %), покращили механічні властивості спечених композитів, і в результаті легування їх міцність зросла орієнтовно 1,5 рази (табл. 3.2). При цьому міцність композитів систем Al-7Fe-38Sn та Al-7Fe-21Sn складала різницю

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

досліджуваного зразка. Також зазначимо, що у разі спечених двофазних композитів Al-Sn також спостерігалось зниження величини (f) та збільшення (Ih) зі зростанням навантаження на поверхню тертя [17].

Температура спікання теж впливає інтенсивність зношування гібридних композитів. Чим вона вища, тим краще опір зношуванню композитів без мастила. Очевидно, це пояснюється збільшенням зв'язаності алюмінієвого каркасу з підвищенням температури спікання, і навіть зниженням залишкової пористості матеріалу. Наприклад, якщо у зразків складу: Al-7Fe-38Sn порівняти величину їх (Ih) після спікання при 570 і 620 °С, можна помітити, що зазначена величина тим нижче, чим вище температура спікання композитів. Особливо помітна вказана різниця при підвищених навантаженнях.

Якщо спечені зразки допресувати при 250 °С, то їх зносостійкість при сухому терті сталі значно покращується у всьому дослідженому діапазоні навантажень. Причому істотної різниці впливу температури спікання на величину зносостійкості композитів не виявлено, хоча спечений при 620 °С композит показує кращі результати.

Зносостійкість спечених при 570 °С зразків з меншим вмістом олова була гірша, ніж у композиту з 38 % олова, спеченого при цій же температурі. Однак після спікання при 620 °С їхня міцність суттєво зросла (таблиця 3.2). Після допресування такі зразки демонстрували добру зносостійкість, але при тиску, що не перевищував 3 МПа. При більших значеннях тиску їхня зносостійкість помітно поступалася зносостійкості гарячепресованих зразків з великим вмістом олова. Таким чином композити з високим вихідним вмістом олова більш переважні в умовах сухого тертя сталі. Зазначимо, що зносостійкість двофазних сплавів також зростала в міру підвищення вмісту олова в них аж до 40 % Sn [17].

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Таблиця 3.3 – Трибологічні властивості спечених композитів Al-Fe-Sn при сухому терті сталі, підданих подальшому гарячому доущільненню.

Композит	Режим отримання	Інтенсивність зношування (мкм/м); швидкість ковзання V = 0,6 м/с				Коефіцієнт тертя; швидкість ковзання V = 0,6 м/с			
		Тиск, МПа							
		1	3	4	5	1	3	4	5
Композит	(620 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,13	0,19	0,23	0,25	–	–	–	–
	(620 °С; 1 год)	0,15	0,26	0,28	0,33	–	–	–	–
	(595 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,13	0,19	0,25	0,28	–	–	–	–
	(570 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,13	0,22	0,25	0,28	0,43	0,37	0,38	0,30
	(570 °С; 1 год)	0,14	0,33	0,42	0,55	0,49	0,39	0,38	0,29
Al-8Fe-21 Sn	(620 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,13	0,22	0,33	0,36	–	–	–	–
	(570 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,16	0,28	0,40	0,46	–	–	–	–
	(570 °С; 1 год)	0,16	0,35	0,52	0,59	0,47	0,40	0,39	0,32
Al-20Sn	(600 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,13	0,24	–	0,36	–	–	–	–
Al-40Sn	(600 °С; 1 год) +ГД 250 °С	0,13	0,20	0,23	0,25	–	–	–	0,31

На рисунку 3.8 наведено зображення поверхонь тертя, зразка композиту Al-7Fe-38Sn спеченого при 570 °С, а також підданого подальшому

доуцільненню. Можемо відзначити, що спечений дослідний зразок володів меншою зносостійкістю при високих значеннях тиску (до 5 МПа), це пояснюється тим, що його краї піддавались сильному руйнуванню під час тертя. При цьому площа тертя самітно скорочувалася, що призводило до зростання фактичного тиску на її поверхні. В той час як доуцільнений матеріал мав меншу крихкість та показував вищу зносостійкість.

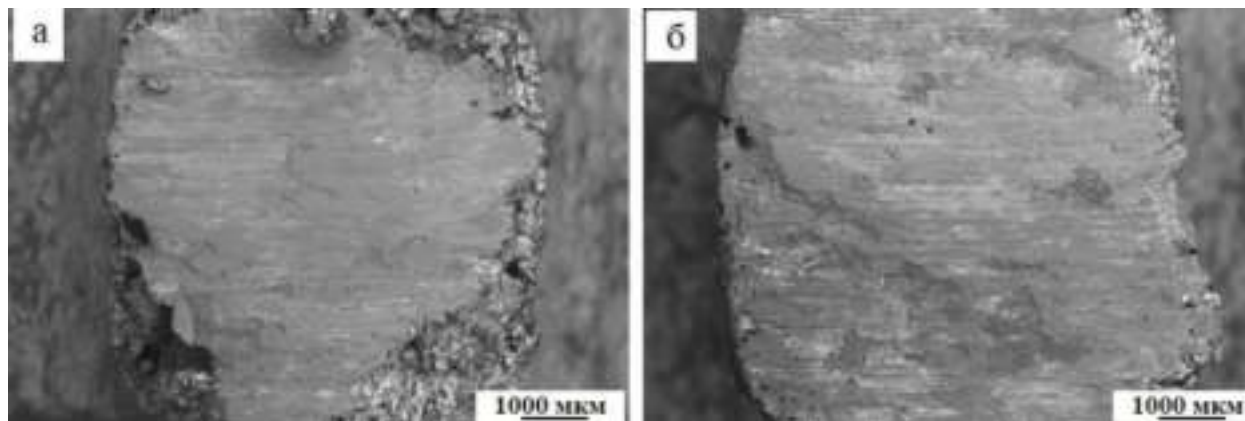


Рисунок 3.8 – РЕМ зображення поверхні тертя, спеченого композиту Al-7Fe-38Sn:

а) – 570 °С; 1 год і підданого наступного гарячого до уцільненню; б) – після сухого тертя сталі, швидкість ковзання – 0,6 м/с; тиск на поверхню тертя – 5 МПа.

З наведених даних у таблиці 3.3 інтенсивності зношування видно, що доуцільнений зразок Al-7Fe-38Sn володів практично однаковою зносостійкістю в порівнянні з двофазним Al-40Sn матеріалом. Аналогічна ситуація спостерігалася при порівнянні інтенсивності зношування композиту Al-8Fe-21Sn з його двофазним аналогом Al-20Sn. Тобто, незважаючи на введення великої кількості твердих інтерметалідів та значного підвищення міцності, зносостійкість досліджуваних композитів майже не змінилася порівняно з двофазними зразками. Даний факт, ймовірно, пов'язаний з тим, що значна частина олова при спіканні зразків системи Al-Fe-Sn пішла в

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

з'єднання із залізом, внаслідок чого його вміст як твердого мастила у зразках помітно скоротився, що негативно позначилося на зносостійкості зразків. Імовірним способом вирішення даної проблеми може бути введення більшої кількості олова у вихідну суміш, щоб в результаті його, як м'якої фази, залишалось в зразку після спікання близько 40% по вазі.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

ВИСНОВКИ

1. Рідкофазне спікання суміші порошків Al, Fe та Sn дозволяє отримувати пластичні композити, здатні витримувати великі деформації при випробуванні на стиск. Зі збільшенням температури спікання до 620 °С пористість композитів знижується, а матричний каркас стає міцнішим, у результаті їх механічні властивості і зносостійкість при сухому терті сталі покращуються.

2. Наступне гаряче доущільнення спечених композитів при 250 °С призводить до значного зниження їх пористості та значного підвищення міцності та зносостійкості в умовах сухого тертя.

3. Встановлено, що при сухому терті сталі інтенсивність зношування досліджуваних зразків системи Al-Fe-Sn зростає зі збільшенням тиску на поверхню тертя, а коефіцієнт тертя при цьому знижується. При цьому зразки, що містять 38 % Sn володіли більш високою зносостійкістю в порівнянні з зразками, що містять 21 % Sn і отриманими за тих же умов, за рахунок більшого вмісту в них олова, як джерела твердого мастила.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.
2. Матеріалознавство: підручник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян., Е.І. Плешаков; за ред. проф. С.С. Дяченко. – Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с.
3. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
4. Froyen L., Verlinden B. Aluminium Matrix Composites Materials / European Aluminium Association: TALAT Lecture 1402. – 2016 – 28 p.
5. Abed, E.J. Study of solidification and mechanical properties of Al-Sn casting alloys / E.J. Abed // Asian Transaction on Engineering. – 2012. – № 2(3). С. 89-98.
6. Полянський, С. К. Експлуатаційні матеріали для автомобілів і будівельно-дорожніх машин: підручник / С. К. Полянський, В. М. Коваленко. - К. : Либідь, 2005. - 504 с.
7. Goudar, D.M. Effect of tin on the wear properties of spray formed Al-17Si alloy / D.M. Goudar, V.C. Srivastava, G.B. Rudrakshi // Trans Indian Inst Met. – 2015.
8. Podrabinnik, P. Mechanisms Involved in the Formation of Secondary Structures on the Friction Surface of Experimental Aluminum Alloys for Monometallic Journal Bearings / P. Podrabinnik, I. Gershman, A. Mironov // Lubricants. – 2018. – №6 (104).

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

9. Mironov, A. E. Relationship between the Tribological Properties of Experimental Aluminum Alloys and Their Chemical Composition / A. E. Mironov, I. S. Gershman, E. I. Gershman // Journal of friction and wear. – 2017. – №2. – С. 87-91.

10. Straumal B., Risser S., Sursaeva V., Chenal B., Gust W. Grain grows and grain boundary wetting phase transitions in the Al-Ga and Al-Sn-Ga alloys of high purity. Journal de physique IV. 1995. Vol. 5. P. 233–241.

11. Будник А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 212 с.

12. Корж В. М. Нанесення покриття : навчальний посібник / В. М.Корж. — К. : Арістей, 2005. — 204 с.

13. К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж Інженерія поверхні. Підручник. – К.: НВП «Наукова думка» НАН України, 2007. – 558 с.

14. Hartaj Singh, Sarabjit, Nrip Jit, Anand K Tyagi. An overview of metal matrix composite: processing and SiC based mechanical properties/ Journal of Engineering Research and Studies. – 2011. – Vol. II/ Issue IV/October- December. – pp.72-78;

15. Xiangfa, Liu. The relationship between microstructure and refining performance of Al-Ti-C master alloys Text / Liu Xiangfa, Wang Zhenqing, Zhang Zuogui, Bian Xiufang// Materials Science and Engineering.- 2002.- Vol.332A.- p.70-74.

16. Rusin N. M., Skorentsev A. L. Impact of the structure on mechanical and tribological properties of sintered (Al–12Si)–40Sn alloy // Inorganic materials: Applied research. – 2018. – V. 9. – № 5. – P.916–923.

17. Rusin N.M., Skorentsev A.L., Kolubaev E.A. Structure and Tribotechnical Properties of Al-Sn Alloys Prepared by the Method of Liquid-Phase Sintering // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 166-170.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

18. Структура і зношення заевтектичного сплаву Al-Fe , що закристалізований у постійному магнітному полі / В. І. Дубодєлов, В. О. Середенко, С. С. Затуловський, А. В. Косинська // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 2. – с. 21-26.

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

ДОДАТКИ

					МРТАМ 24.23623.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73