

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

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Світлано-кваліфікаційної роботи

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 кремнію та методу формування
антифрикційних композитних сплавів системи Al-Sn на
їх властивості»**

Шифр ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАМ-22-1

Підпис

Я.М. Михайлюк
Ініціали, прізвище

Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.

Підпис

С.Ф. Постольський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедрою ТАМ д.т.н., проф.

Підпис

О.В. Диха
Ініціали, прізвище

16 12 2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, прикладної 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.
16 жовтня 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Михайлюку Ярославу Максимовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

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

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

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце роботи

Затверджено наказом університету від 1.03.2023 р. № 5 (Д. 26)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, переддипломної практики.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналіз антифрикційних матеріалів та методів їх отримання.

2) Обладнання, матеріали та методика досліджень.

3) Аналіз експериментальних досліджень.

4) Висновки.

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 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Срок виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	<i>Аналіз антифрикційних матеріалів та методів їх отримання.</i>	30.10.23	вик
2	<i>Обладнання, матеріали та методика досліджень.</i>	15.11.23	вик
3	<i>Аналіз експериментальних досліджень.</i>	23.11.23	вик
4	<i>Висновки, рекомендації</i>	4.12.23	вик
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	6.12.23	вик
6	<i>Допуск до захисту</i>	12.12.23	вик
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	23.12.23	

Студент


Підпис

Михайлюк Я.М.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посоцький С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-22-1 Михайлюк Ярослав Максимович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Вплив вмісту кремнію та методу формування антифрикційних композитних сплавів системи Al-Sn на їх властивості.» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 23 найменування, розміщених на 3 сторінках, та __ додатків розміщених на __ сторінках. Роботу викладено на 83 сторінках, з них 76 сторінок основного тексту, на яких розміщено 35 рисунків і 9 таблиць.

Сплави на основі системи Al-Sn відповідають усім необхідним вимогам, що пред'являються до антифрикційних матеріалів, оскільки мають високу теплопровідність, втомну міцність, корозійну стійкість. Вони містять включення м'якого олова, яке при дефіциті рідкого мастила здатне видавлюватися на поверхню тертя та утворювати захисну плівку, яка виконує функцію твердого мастила. Зі збільшенням вмісту Sn зносостійкість та тиск схоплювання сплавів Al-Sn зі сталевим контртілом зростає. Однак при отриманні таких сплавів литтям вміст олова в них обмежено 20 % через дезінтеграцію алюмінієвого каркасу олов'яними прошарками при кристалізації розплаву і, як наслідок, значного зниження несучої здатності та пластичності сплавів. Цю проблему можна за допомогою методів порошкової металургії. У цьому випадку гранична концентрація олова в спечених композитах Al-Sn, при якій алюмінієвий каркас залишається пов'язаним, досягає 50 %.





Відомим методом підвищення зносостійкості композиційних матеріалів є введення до складу твердих частинок, міцно закріплених в матриці. Зазначеним умовам задовольняє кремній, який часто вводять для підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів. Оскільки алюміній та олово у твердій фазі взаємно нерозчинні, то для введення в композит частинок Si найкраще використовувати порошки готового сплаву Al-Si, легованого заданою кількістю компонентів.

Мета роботи: дослідження впливу вмісту кремнію та режиму спікання порошкових пресувань, а також подальшої їх деформаційної обробки методом гарячого доущільнення та рівноканального кутового пресування (РККП) на результуючу структуру, механічні та трибологічні властивості композитів (Al-Si-Sn).

Ключові слова: АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, АЛЮМІНІЙ, ОЛОВО, КРЕМНІЙ, КОМПОЗИТ, ФОРМУВАННЯ, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ ОТРИМАННЯ.	8
1.1 Види та типи підшипників ковзання.	8
1.2 Застосування антифрикційних матеріалів в підшипниках ковзання.	17
1.3 Методи порошкової металургії.	28
1.4 Методи деформаційної обробки.	33
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.	43
2.1 Вихідні матеріали, методи виготовлення зразків та вимірювання їх механічних властивостей.	43
2.2 Обладнання для дослідження структури композитів (Al-Si)-Sn.	50
2.3 Методика та обладнання для трибологічних випробувань композитів (Al-Si)-Sn.	52
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.	55
3.1 Вплив складу порошкової суміші та режиму її спікання на структуру, механічні та трибологічні властивості композитів (Al-Si)-40Sn.	55
3.2. Вплив деформаційної обробки на структуру, механічні та трибологічні властивості спечених композитів (Al-Si)-40Sn.	69
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
ДОДАТКИ	83

ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Михайлюк		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Лиса		
Вплив вмісту кремнію та методу формування антифрикційних композитних сплавів системи Al-Sn на їх властивості			Літера	Аркуш
			4	83
ХНУ МТВАм-22-1				

ВСТУП

У сучасних машинах та механізмах до 30 % споживаної ними енергії витрачається на тертя, а витрати на усунення наслідків їхнього зносу в розвинених промислових країнах становлять до 2 % валового національного продукту. Отже, проблема зниження інтенсивності зношування відповідальних деталей у вузлах тертя є актуальною, а для її вирішення потрібно створення нових антифрикційних матеріалів з покращеними механічними та трибологічними властивостями або модернізація існуючих. Успішне вирішення цієї проблеми може дати значний економічний ефект.

Сплави на основі системи Al-Sn відповідають усім необхідним вимогам, що пред'являються до антифрикційних матеріалів, оскільки мають високу теплопровідність, втомну міцність, корозійну стійкість [1]. Вони містять включення м'якого олова, яке при дефіциті рідкого мастила здатне видавлюватися на поверхню тертя та утворювати захисну плівку, яка виконує функцію твердого мастила. Зі збільшенням вмісту Sn зносостійкість та тиск захоплення сплавів Al-Sn зі сталевим контртілом зростає. Однак при отриманні таких сплавів литтям вміст олова в них обмежено 20 ваг.% через дезінтеграцію алюмінієвого каркасу олов'яними прошарками при кристалізації розплаву і, як наслідок, значного зниження несучої здатності та пластичності сплавів. Відносно недавно було встановлено [2], що вирішити цю проблему можна за допомогою методів порошкової металургії. У цьому випадку гранична концентрація олова в спечених композитах Al-Sn, при якій алюмінієвий каркас залишається пов'язаним, досягає 50 ваг.%. Було виявлено, що максимальну зносостійкість при сухому терті по сталевому контртілу має композит, що містить близько 40 ваг. % (20 об. %) Sn. При цьому значний внесок у величину зношування такого матеріалу вносила деформаційна складова через низьку його несучу здатність, викликану наявністю великої кількості м'якого олова.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відомі спроби підвищення зносостійкості сплавів Al-Sn за рахунок їхнього деформаційного зміцнення. Проте випробування отриманих матеріалів показали, що деформаційна обробка далеко не завжди призводить до помітного підвищення їхньої зносостійкості [3,4]. Понад те, коефіцієнт тертя зміцнених матеріалів сталі навіть збільшувався. Справа в тому, що в результаті деформування включення олова сильно подрібнювалися, і обсяг їх як джерел твердого мастила значно знижувався. В результаті, незважаючи на значне зміцнення композитів Al-Sn, не забезпечувалася ефективна подача твердого мастила на поверхню тертя і, відповідно, зносостійкість їх не збільшувалася.

Іншим відомим методом підвищення зносостійкості композиційних матеріалів є введення до складу твердих частинок, міцно закріплених в матриці. Однак у разі хімічно активної алюмінієвої матриці із зазначеною метою можна використовувати небагато твердих речовин, що не утворюють з нею крихких перехідних шарів. Додатки також не повинні розчинятися в олові та знижувати його пластичність, а також підвищувати напругу зсуву. Зазначеним умовам, наприклад, задовольняє кремній, який часто вводять для підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів [5-8]. Оскільки алюміній та олово у твердій фазі взаємно нерозчинні, то для введення в композит частинок Si найкраще використовувати порошки готового сплаву Al-Si, легованого заданою кількістю компонентів. Якщо при цьому позитивний ефект кремнію на зносостійкість алюмінію буде доповнений антизадирним ефектом олова як твердого мастила, можна розраховувати, що отриманий новий матеріал буде зносостійким не тільки в присутності рідкого мастила, але і при її дефіциті на поверхні тертя.

Метою цієї роботи є дослідження впливу режиму спікання порошкових пресувань, а також подальшої їх деформаційної обробки методом гарячого доущільнення та рівноканального кутового пресування (РККП) на

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результуючу структуру, механічні та трибологічні властивості композитів (Al-Si)-40Sn.

Виходячи з мети роботи, було поставлено такі завдання:

1. Визначити склади сумішей порошків Al-Si з різним вмістом кремнію (0,5, 12 і 23 %) та 40. % Sn, а також режими їх спікання, що дозволяють отримувати високощільні композити із стійкою до зовнішніх деформаційних впливів алюмінієвою матрицею.

2. Дослідити вплив подальшої деформаційної обробки методами гарячого доущільнення (ГД) та рівноканального кутового пресування (РККП) на структуру та механічні властивості спечених композитів (Al-Si)-40Sn.

3. Дослідити вплив вмісту кремнію, а також подальшої деформаційної обробки на трибологічні властивості спечених композитів (Al-Si)-40Sn.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ ОТРИМАННЯ.

1.1 Види та типи підшипників ковзання.

В перших механізмах обертання, що створили люди, застосовували саме підшипники ковзання. Їх використовували спочатку для свердлильних пристроїв, прядильних веретен. Вони були головною опорою в механізмах до середини XIX століття, але поступово змінювались шарикопідшипниками. Слід відмітити, що і в даний час опори ковзання мають широке застосування в техніці.

Підшипником ковзання (ПК) називають опору, що використовує тертя ковзання за контактними поверхнями (рис. 1.1).

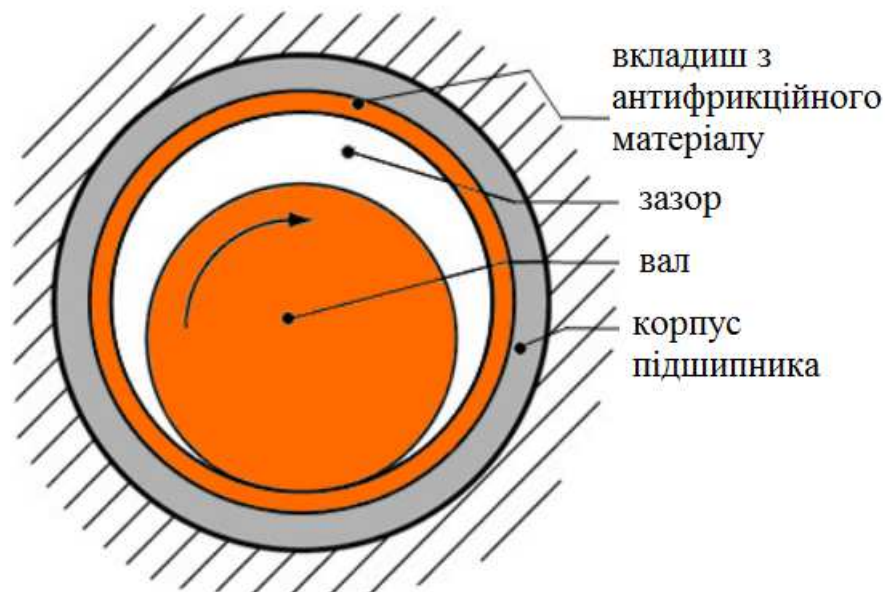


Рисунок 1.1 – Схема підшипника ковзання.

Для ПК застосовують матеріали лише з найменшим коефіцієнтом тертя, що утворюють пару тертя. Для зниження тертя, запобігання схоплюванню та зменшення тепловиділення в зону контакту зазвичай

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

подають змащувальний матеріал. Існують також і пари тертя, що не потребують змащування, наприклад фторопласт-сталь.

Найбільш поширена конструкція підшипника ковзання, що складається з корпусної деталі 3 з антифрикційним вкладишем 2 (рис. 1.2). В отворі вкладиша обертається шийка вала 5 з зазором або переміщається лінійно через шток. Через систему розподільних канавок і отворів 1 в зазор подається мастило 4, котре розділяє контактуючі поверхні між собою.

Зазвичай мастило подається в зону тертя спеціальним шприцом через спеціальний змащувальний отвір (маслянку). У складних конструкціях ПК з великою кількістю змащувальних точок застосовують централізовані системи мащення з примусовим нагнітанням мастила через магістралі із центрального бака, що забезпечується масляним насосом. Також, замість окремого корпусу, можуть використовувати розточування деталей конструкції у які запресовують втулки антифрикційні.

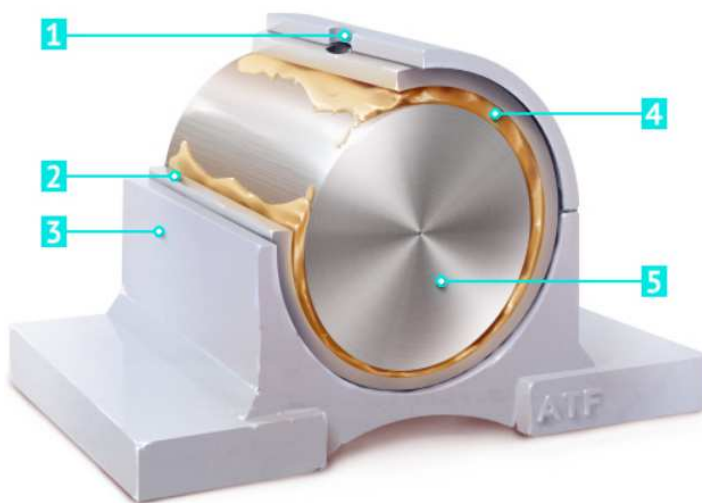


Рисунок 1.2 – Корпусний підшипник ковзання.

Підшипники ковзання володіють як певними перевагами, так і недоліками.

Основні переваги опор ковзання:

- точність встановлення;
- стійкість до ударів, вібрацій;

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- малі радіальні габарити;
 - низька вартість, особливо при великих діаметрах валів;
 - підвищена працездатність при високих швидкостях обертання;
 - можливість сприймати значні навантаження;
 - простота конструкції та виготовлення;
 - можливість використання однакових конструкцій, як для лінійних переміщень, так і обертального руху (різниця в геометрії мастильних канавок втулок);
 - висока точність при встановленні валу;
 - можливість виконання роз'ємних конструкцій;
 - допустимість роботи у агресивних середовищах, харчових та у воді при відповідному підборі матеріалів.
 - для пар тертя типу фторопласт, зеламід, капролон у контакті зі сталлю можлива робота без системи мащення;
- До їх недоліків відносять наступне:
- більший коефіцієнт тертя і, відповідно, менший ккд ніж у шарикопідшипниках;
 - значні лінійні розміри;
 - необхідність у якісному мастилі з особливою консистенцією для різних пар тертя;
 - зазвичай потребують самостійного виготовлення через малу номенклатуру серійних ПК.
 - суттєве нагрівання, тепловиділення та інтенсивне зношування при недостатності або відсутності мастила;
 - нерівномірність зносу цапф і втулок.
 - необхідність застосування дорогих сучасних антифрикційних матеріалів, таких як фторопласти, олов'яні бронзи, тощо.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Види підшипників ковзання. Конструктивна різноманітність опор ковзання дозволяє ефективно конкурувати з підшипниками кочення і є одним з факторів, що дозволяє вирішувати безліч необхідних завдань.

Їх класифікують у наступні види підшипників ковзання:

- 1) за типом сприймаючого навантаження опори: для компенсації осьових, радіальних та комбінованих зусиль;
- 2) нероз'ємні та роз'ємні;
- 3) в залежності від типу руху: для обертання або лінійних переміщень;
- 4) за типом тертя: з рідким, сухим, напіврідким, граничним, напівсухим, газовим тертям;
- 5) ще одна класифікація, заснована на способі тертя, передбачає існування гідростатичних та гідродинамічних, а також газостатичних або газодинамічних різновидів;
- 6) за матеріалами: металеві та з неметалів;
- 7) особливі види: сегментні, самозмащувальні, сферичні само встановлювані.

Антифрикційні втулки, що зафіксовані в окремих корпусах (запресовані в конструкційні елементи) виступають у якості радіальних опор.

Якщо корпус виконано з антифрикційного матеріалу (сірого чавуну) то він сам виступає радіальною опорою.

Комбінованою опорою називають втулку з буртиком (рисунку 1.3, а), що здатна сприймати невеликі осьові навантаження та радіальні сили. Буртик також значно полегшує монтаж і демонтаж втулки. На рисунку 1.3, б втулка (1) компенсує осьове та радіальне навантаження, спрямоване вправо, з боку валу (5). Фіксація втулки в корпусній деталі (4) здійснюється гвинтом-гужоном (3). У зону канавки (2) підводиться мастило.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

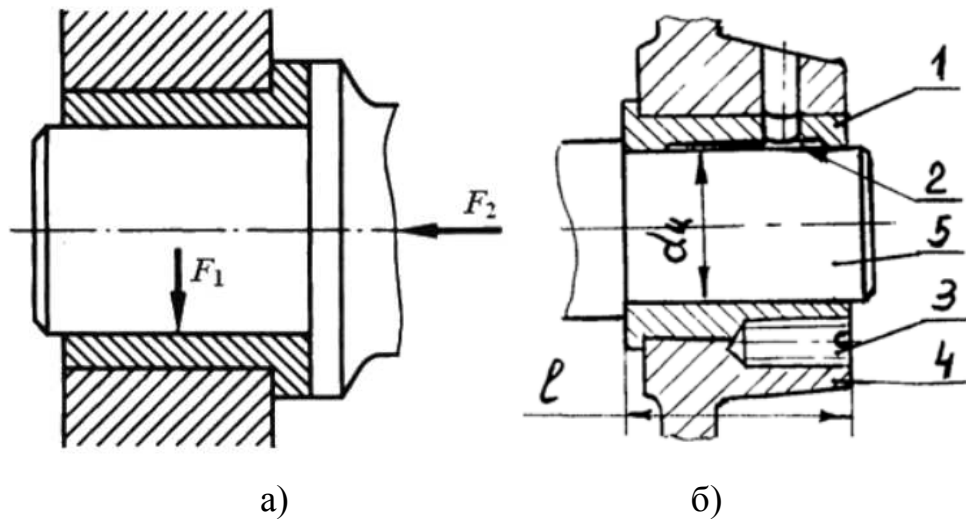


Рисунок 1.3 – Комбінована опора ковзання.

Для компенсації великих осьових навантажень використовуються упорні підшипники ковзання.

Якщо підшипник ковзання сприймає осьове вертикальне навантаження його називають під'ятником. На **рисунку** 1.4 показаний упорно-сферичний під'ятник, що сприймає вертикальне навантаження при перекосі валу.

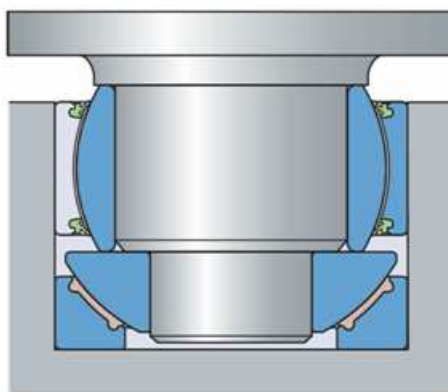


Рисунок 1.4 – Під'ятник.

Підшипники ковзання можуть бути суцільні або роз'ємні. Так, роз'ємні ПК (рис. 1.5) встановлюють, наприклад, на колінчасті вали. Вони дозволяють спростити складання, а навіть можуть бути єдиним варіантом монтажу. Така опора ковзання має розбірний корпус. Кришка та основа корпусу стягнуті на

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

шпильках гайками. Вкладиш також складається із двох половинок. Підведення та рух мастила проводиться через отвір у кришці та канали вкладиша.

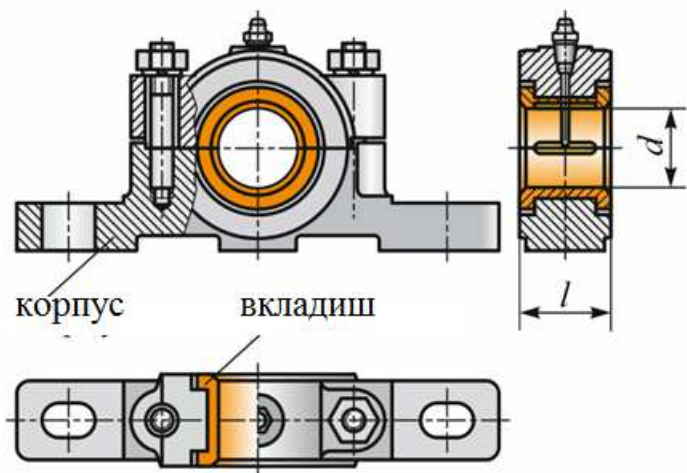


Рисунок 1.5 – Роз’ємний підшипник ковзання

Сферичний підшипник ковзання використовується для компенсації перекосу валу (рис. 1.6). Поворот втулки зі зовнішньою поверхнею у вигляді сфери у відповідному посадковому місці корпусу дозволяє виконувати кульовий підшипник ковзання.

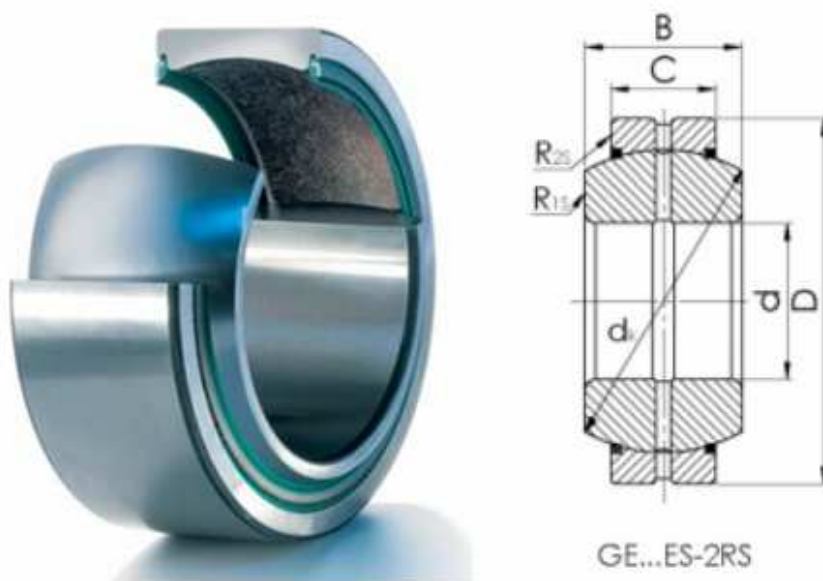


Рисунок 1.6 – Сферичний підшипник ковзання

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

У складних важільних системах або шарнірних паралелограмах досить важко досягти точної паралельності розташування опор. Саме в таких випадках застосовують шарнірний підшипник ковзання. Віє є різновидом сферичного підшипника зі з'єднанням внутрішнього, зовнішнього кілець по сферичній поверхні. Такі ПК витримують значні двосторонні осьові та радіальні зусилля. Зазвичай парою тертя виступає: сталь - сталь з мастилом. Для них застосовуєть високохромисту сталь типу ШХ з фосфатуванням і нанесенням дисульфїду молібдену. Таке поєднання матеріалів зарекомендувало себе при роюоті з великими ударними навантаженнями.

У медицині, харчовій промисловості та інших санітарних умовах (відсутність мастил) застосовують пару тертя: внутрішнє хромоване кільце з зовнішнім кільцем покритим політетрафторетиленом, посиленим арматурною сіткою з мідного сплаву. Такі підшипники застосовують часто у поворотно важельних механізмах. Існують стандартизовані серії таких підшипників GE або ШЛ, ШС, ШН сталь-металофторопласт, ШП сталь-сталь, ШЕ сталь-органоволокніт (рис. 1.7). Окрім матеріалів, вони відрізняються розташуванням та наявністю точок підведення масла і розміщенням канавок.

Наявність мастила у підшипнику ковзання запобігає заклиненню, сприяє відводу тепла, значно знижує коефіцієнт тертя і, відповідно, знос контактних поверхонь. Для підшипників ковзання використовуються тверде, пластичне і рідке мастило.

Рідкі мастила бувають синтетичні, мінеральні, і, навіть чиста вода для пари тертя: сталь-текстоліт. Таке індустріальне масло як I5A використовують при окружних швидкостях контактної поверхні валу в діапазоні 4,5 – 6 м/с; I8A: 3 – 4,5 м/с; I12A: не вище 3 м/с; I20A, I30A, I40A при менших швидкостях. Мінеральне мастило CRUCOLAN22 успішно працює при -20 – +100 градусах по цельсію. Синтетичні вуглеводневі масла мають більший

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

температурний інтервал, наприклад для Kluber-SummitSH32 від -45 до 140 градусів.

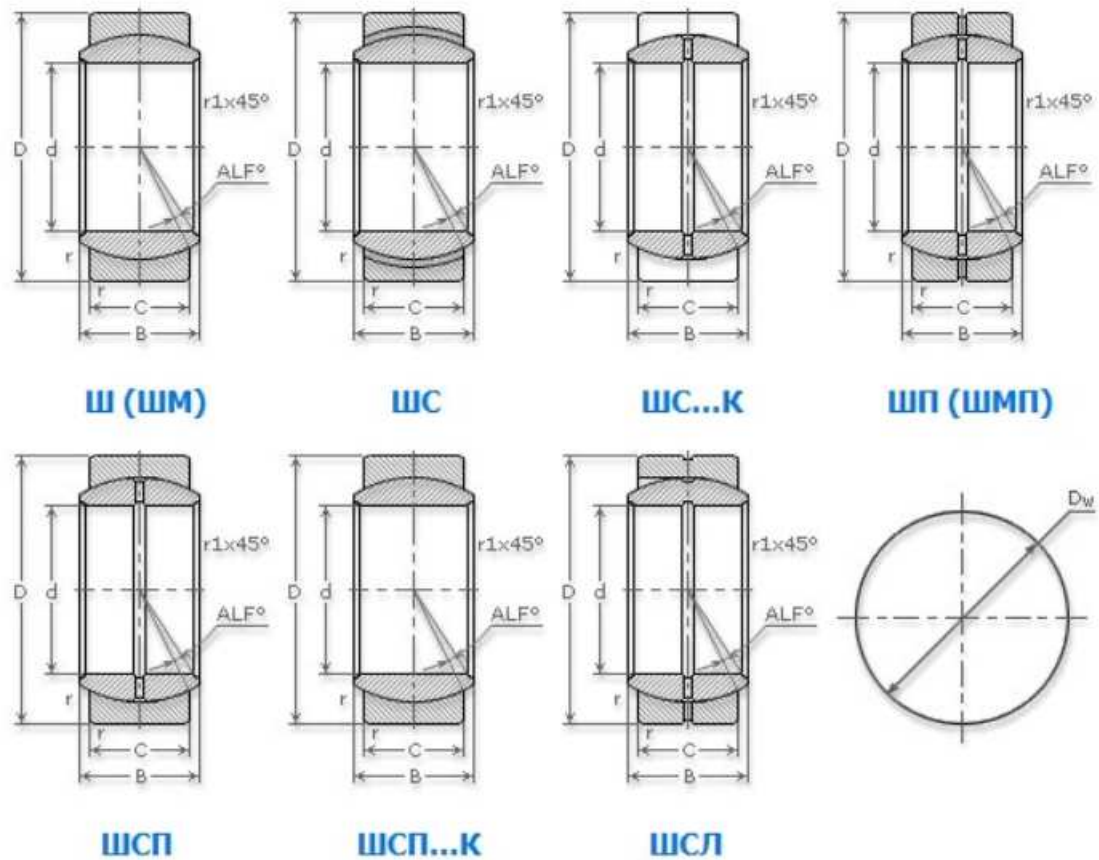


Рисунок 1.7 – Стандартизовані серії сферичних підшипників ковзання.

Спеціальні мастила, що використовують у харчовому та медичному устаткуванні, наприклад, Kluber-SummitHySyn FG-32, мають спеціальний дозвіл на контакт з харчовими середовищами. Подачу мастила часто забезпечують централізовані насосні системи. На виході з підшипника ковзання температура масла не повинна перевищувати 65 градусів за Цельсієм. Якщо значення вищі, то це свідчить про низьку якість мастила, його забруднення, малий зазор у sprzęженні, не коректне встановлення вкладиша.

Широке застосування знайшли пластичні мастила. В основному їх отримують додаванням до рідких масел спеціальних загусників. Пластичні мастила мають певну перевагу, вони не мають складних магістралей і систем

						ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15

подач. Достатньо встановити точки змащування. Вони не вибагливі до частоті заміни, суттєво знижують експлуатаційні витрати на обслуговування але важко видаляються з контактуючих поверхонь.

Найбільш поширені пластичні мастила:

- 1) вуглеводневі з температурою до 50 – 60 °С;
- 2) солідоли або кальцієві гідратовані мастила з діапазоном робочих температур починаючи з -20 до 65 °С;
- 3) натрієві мастила, що працездатні до 110 °С;
- 4) літієві мастила такі як Molikote BR2 plus з діапазоном до 130 °С .

Тверді мастила знайшли застосування як при особливо низьких так і високих температурах, у харчових виробництвах і вакуумній техніці. Найбільшого поширення набули тверді мастила:

- дисульфід молібдену;
- графіт або дисульфід вольфраму;
- нітрид бору.

Оптимальна товщина шару такого мастила від 5 до 25 мкм. Самозмащувальні металокерамічні вкладиші виготовляють на основі дисульфиду молібдену. Металофторопластові і фторопластові втулки також не вимагають змащування.

При невеликих навантаженнях і надвисоких швидкостях як мастило використовується газове середовище, що суттєво ускладнює конструкцію вузла тертя.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.2 Застосування антифрикційних матеріалів в підшипниках ковзання.

Антифрикційні матеріали (від грец. anti - приставка, що позначає протидію, і лат. frictio - тертя) мають такі властивості: висока теплопровідність; хороша змочуваність мастилом і хороша опрацювання, заснована на здатності матеріалу пластично деформуватися при терті і збільшувати площу контакту.

Основним елементом пари тертя ПК є сталевий вал. Цапфа валу для підшипників ковзання має мати точні геометричні розміри, має бути оброблена з шорсткістю Ra 0,8 – 1,6, допуск посадки обирається із зазором, а також, має мати високу твердість. Зазвичай цапфи ПК піддаються гартуванню з наступною операцією шліфування. У менш відповідальних випадках, можлива операція нормалізація. Однак, ряд сталей, наприклад, нержавіюча сталь 12Х18Н10Т не піддаються гартуванню. Для таких сталей достатньо високої розмірної точності та чистоти поверхні.

Підшипники ковзання можуть проектуватися у відповідності до існуючих стандартів або самостійно. Втулка виконується з антифрикційного матеріалу. Одним з дешевих, але ефективних матеріалів втулок, вкладишів є сірий чавун або антифрикційний чавун. Сфера його використання у ПК при окружних швидкостях, що не перевищують п'ять метрів за секунду. Сам по собі чавун міцний, добре обробляється і забезпечує малий коефіцієнт тертя, але є дуже крихким, не стійкий до ударних навантажень, має більший період припрацювання ніж бронза. Антифрикційні чавуни АСЧ4, АСЧ2, АСЧ5, АСЧ1, повинні працювати в парі з загартованими або нормалізованими валами. Такі чавуни як АСЧ6 і АСЧ3 розраховані на роботу із загартованими валами.

Широкого застосування знайшли втулки ковзання виготовлені з бронзи. Вони здатні витримувати питоме навантаження до 15 МПа і мають гарні показники при окружній швидкості валів до 10 м/с. Оптимальними

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

властивостями володіють опори ковзання виготовлені із свинцево-олов'янистих бронз О10Ц2, ОЦС 6-3-3, ОЦС 5-5-5, а для роботи в підвищених навантаженнях: ОС10-10. Матеріал ОС5-25 використовують для ПК як внутрішній шар втулок біметалічних із зовнішнім шаром виготовленим зі сталі 20.

Алюмінієво-залізисту бронзу: АЖ 9-4, застосовують для підшипників ковзання у харчовій промисловості, тобто рекомендовано і допущено до контактів із продуктами харчування.

Поєднання відмінних антифрикційних властивостей та високої міцності демонструють бі- і триметалічні втулки із внутрішніми шарами з мідних, алюмінієвих сплавів та фторопласту із зовнішньою сталеву оболонкою (рис. 1.8)

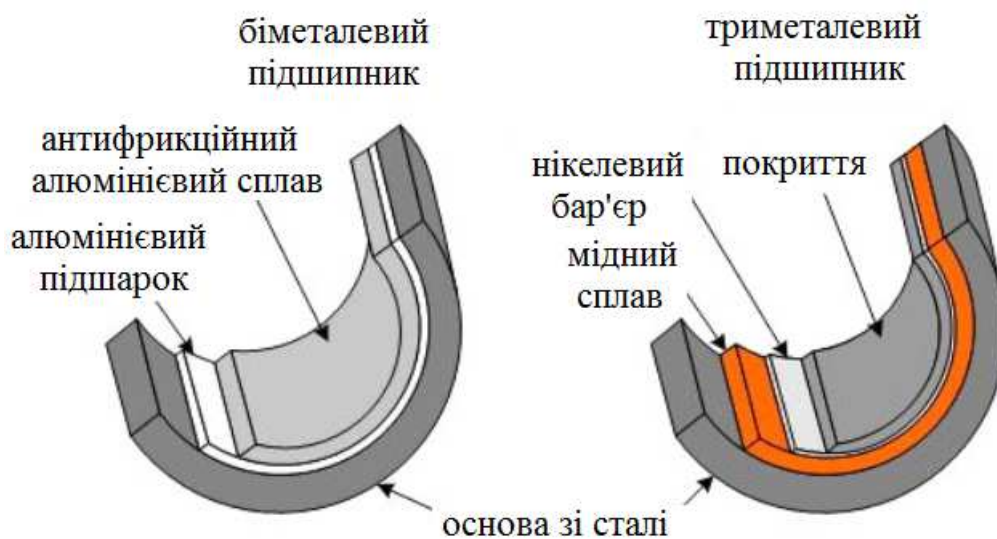


Рисунок 1.8 – Бі - та три металеві підшипники ковзання

Досить низьким коефіцієнтом тертя володіють бабіти Б88 і Б83. Але, мала міцність обмежує їх застосування, тому, зазвичай, їх заливають у вкладиші з чавуну або бронзи.

Металокерамічні вкладиші мають суттєву перевагу, можуть працювати тривалий час без мастила.

При не значних навантаженнях та низьких окружних швидкостях рекомендовано застосування втулок з капролону, нейлону або фторопласту, що не потребують мащення (рис. 1.9). А в таких матеріалах як дерево, текстоліт і гуму, як мастило, можуть застосовувати звичайну воду. При значних навантаженнях можливо застосовувати втулки, що складаються зі сталеві обійми та внутрішнього шару фторопласту.

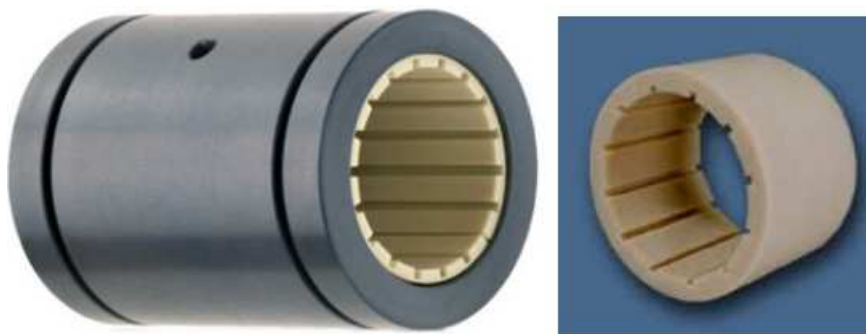


Рисунок 1.9 – Фторопластові підшипники ковзання.

Найбільш оптимальним варіантом для роботи ПК є рідинне тертя, при якому обертовий вал створює масляний клин, котрий повністю розділяє вал з втулкою. Рідинне тертя гарантує низький коефіцієнт тертя (0,001...0,005). Для створення масляного клину необхідне певне співвідношення обертів валу, ексцентриситету валу, зазору в з'єднанні та кількості і в'язкості мастила (рис. 1.10).

Слід відмітити, що на практиці часто реалізується тертя напіврідинне, при якому більша, але не вся, поверхня контакту покрита мастильним шаром (плівкою), тоді коефіцієнт тертя коливається в межах 0,008 – 0,08.

При відсутності мастила або його нестачі виникає граничне чи сухе тертя. В такому випадку коефіцієнт тертя знаходиться в межах 0,1 – 0,5 для пари метал-метал.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

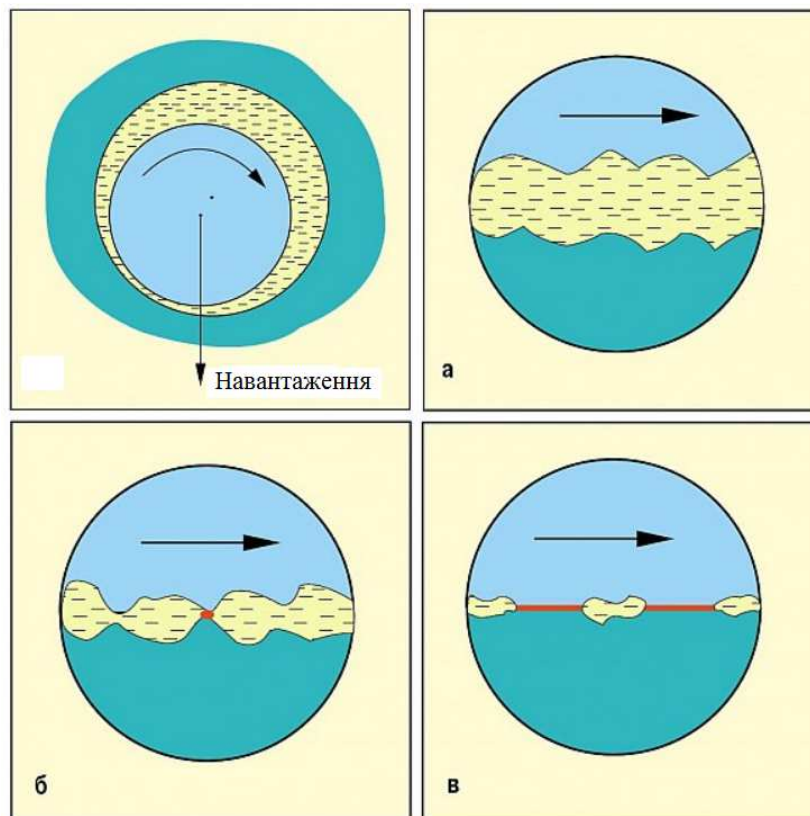


Рисунок 1.10 – Формування режимів тертя:
 а – рідинне, б – напіврідинне, в – граничне.

Для сталевого валу, при недостатчі мастила, коефіцієнт тертя становить:

- у втулці із сірого чавуну чи пластмаси: 0,15 – 0,2;
- чавун антифрикційний або бронзові втулки ковзання: 0,1 – 0,15;
- у вкладиші з бабіта 0,06 – 0,1.

У процесі експлуатації підшипників ковзання з таких матеріалів режим рідинного тертя завжди поєднується з режимом граничного мастила, і практично неминучий періодичний контакт їх зі сталевим валом, наприклад, в моменти пуску та зупинки агрегату. Тому також необхідно, щоб антифрикційний матеріал забезпечував низький коефіцієнт тертя (f) при роботі в умовах поганого мащення [11] і демонстрував високу здатність в широкому інтервалі навантажень і швидкостей ковзання [7, 8].

									Арк.
									20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ				

Дуже поширені підшипники ковзання з антифрикційних композиційних матеріалів (КМ) на металевій основі, що характеризуються високою теплопровідністю, корозійною стійкістю та міцністю [9, 10]. Їх поділяють на два типи:

- 1) композиційні матеріали з м'якою матрицею та твердими включеннями;
- 2) композиційні матеріали з твердою матрицею та м'якими включеннями [10].

У таблиці 1.1 подано допустимі режими експлуатації різних антифрикційних композитів. За даними таблиці видно, що у випадку допустимий тиск і швидкість роботи вище композиційних матеріалів з великою кількістю м'якої фази.

У композиційних матеріалах першого типу м'яка матриця забезпечує хорошу оброблюваність та постачання рідким мастилом ділянок тертя, що покращує тепловідведення від них. Тверді включення сприймають навантаження від валу та забезпечують збереження несучої здатності матеріалу у процесі тертя. Найбільш поширеними в промисловості матеріалами цього типу є бабіти, а також сплави на основі міді – бронзи та латуні. [12]

Бабіти є м'якими антифрикційними сплавами на олов'яній або свинцевій основі з твердими включеннями армуючої фази. Вони добре приробляються і мають найкращі антифрикційні властивості серед усіх підшипникових матеріалів. Однак через великий вміст у них дорогого олова, бабіти використовуються в основному для підшипників відповідального призначення (дизелів, парових турбін та ін.).

Бабіти мають низьку твердість (13-32 НВ) і порівняно малу міцність втоми. Також вони мають погану теплопровідність, внаслідок чого розм'якшуються при нагріванні (9–24 НВ при 100 °С), в результаті їх

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання обмежено зоною невисоких температур і обов'язковою наявністю мастила у вузлі тертя.

Таблиця 1.1 – Характеристика антифрикційних композиційних матеріалів.

Матеріал	НВ	Коефіцієнт тертя сталі		Допустимий режим роботи		
		без мастильного матеріалу	зі змащувальним матеріалом	p, МПа	v, м/с	pv, МПа·м/с
Бабіти						
Б83	30	0,07 - 0,12	0,004 - 0,006	15	50	75
Б16	30			10	30	3
БК2	32			15	15	6
Бронзи						
БрО10Ф1	100	0,1 - 0,2	0,004 – 0,009	15	10	15
БрО5Ц5С5	60			8	3	12
БрС30	25			25	12	30
Латуні						
ЛЦ16К4	100	0,15 - 0,24	0,009 - 0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	80			10,6	1	10
Алюмінієвий сплав						
АО9-2	31	0,1-0,15	0,008	25	20	100
Антифрикційні сірі чавуни						
АЧС-1	220	0,12-0,23	0,008	2,5	5	10
АЧС-3	160		0,016	6	0,75	5

						ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			22

Втомна міцність бабітів недостатня для сучасних двигунів, що працюють в умовах підвищених тисків, швидкостей і температур, тому їх поступово витісняють інші матеріали [8].

Олов'янисті і олов'янисто-цинково-свинцеві бронзи порівняно з бабітами мають нижчі антифрикційні властивості і функціонують при меншій інтенсивності зовнішнього впливу. Також їх недоліками є низька корозійна стійкість та висока вартість. У деяких випадках як замітники бронз у вузлах тертя застосовують латуні. Однак порівняно з бронзами їх антифрикційні властивості ще нижчі і вони не можуть працювати за високої питомої потужності тертя (PV) (таблиця 1.1).

Серед антифрикційних матеріалів другого типу найбільшого поширення набули свинцеві бронзи БрС30, яка містить 30% свинцю (ГОСТ 493-79), і алюмінієві сплави з м'якою структурною складовою зі свинцю або олова. Антифрикційні властивості цих сплавів, особливо алюмінієвих, досить високі, оскільки при граничному терті м'які метали утворюють антизадиру плівку, яка перешкоджає прямому контакту між матрицею та сталевим контртілом [12]. Завдяки хорошій теплопровідності шар мастильного матеріалу зберігається при роботі на підвищених швидкостях та з високим тиском.

Свинцовисті бронзи відрізняються високою теплопровідністю, хорошою міцністю втоми, здатністю витримувати високі питомі навантаження, а також широко застосовуються як антифрикційний шар для сильно навантажених підшипників з великими питомими тисками. Головна перевага свинцевистої бронзи БрС30 перед бабітом Б83 у тому, що вона зберігає свою міцність при підвищенні температури до 200 °С, має велику теплопровідність і опір втоми. Однак при цьому вона поступається бабіту Б83 по пластичності, прироблюваності та антифрикційним властивостям. Крім того, свинцева бронза має низьку корозійну стійкість при дії органічних

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

кислот (з масел). Вартість такої бронзи порівняно з антифрикційними алюмінієвими сплавами вища.

До сплавів другого типу також відносяться антифрикційні чавуни з включеннями графіту, що утворюють антизадирну плівку в процесі тертя. Дані сплави відносно дешеві, але мають суттєві недоліки, такі як висока чутливість до дефіциту мастильного матеріалу та низька стійкість до впливу ударного навантаження. Тому, чавуни використовуються при менших швидкостях та навантаженнях у порівнянні з алюмінієвими антифрикційними сплавами.

У сучасному автомобілебудуванні поширені антифрикційні сплави на алюмінієвій основі. Дані матеріали мають високу міцність, теплопровідність, корозійну стійкість, мають низьку щільність і невисоку ціну. У машинобудуванні найбільшого поширення набули алюмінієво-олов'яні сплави із вмістом олова до 22,5 %. При вмісті олова більше 9% можливе застосування вкладиша без м'якого металу. В інших випадках на поверхню тертя завдають захисний шар олова. Найбільш застосовуваний метал - А020-1 (1%-Са, 20% - Sn, 0,02 - 0,1 Ті, інше - Al). Олово розташовується у ньому у вигляді ізольованих включень. При терті деяка частина розташованих поблизу поверхні тертя включень вичавлюється і розмазується тонкою плівкою. Плівка міцно утримується, лежить на поверхні вкладиша і виконує функції мастила – виключає прямий контакт із контртілом і не дає розвиватися схоплюванню [12].

Як впливає з таблиці 1.1 антифрикційні метали системи Al-Sn здатні працювати при максимальній питомій потужності тертя. Ці сплави за своїми властивостями близькі до бабітів. Високі антифрикційні властивості обумовлені наявністю м'якої структурної складової як олова.

Однак Sn є дорогим і дефіцитним металом, тому як альтернативні матеріали були досліджені алюмінієві сплави, що містять як м'яку структурну складову метали: Bi, Cd, Ga, Pb і Zn [1]. І оскільки перші три

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

метали є ще більш дефіцитними, ніж олово, то наголос робився на вивченні антифрикційних властивостей сплавів зі свинцем та цинком [13-14]. Було встановлено, що антифрикційні властивості деяких матеріалів близькі до властивостей промислового сплаву АО20-1 [15]. Наприклад, сплав Al-20Pb-1,1Cu має нижчий коефіцієнт тертя (за наявності мастила) по всьому діапазоні навантажень проти сплавом Al-20Sn-1,1Cu [16]. І хоча через те, що свинець у порівнянні з оловом є більш м'яким металом, сплави Al-Pb менш міцні, але вони мають більш високу задиростійкість і пластичність. Однак широкому застосуванню сплавів Al-Pb, особливо з високим вмістом Pb, перешкоджає невирішена проблема рівномірного розподілу фаз, що сильно відрізняються за щільністю [17]. Крім того, свинець є токсичним металом і його використання повсюдно намагаються обмежити.

Цинк не токсичний і пластичний, його температура плавлення набагато нижче температури плавлення алюмінію, і ряд сплавів на основі системи Al-Zn навіть знайшов застосування як антифрикційних матеріалів, що самозмазуються в підшипниках ковзання [18]. Такі сплави мають більш високу зносостійкість порівняно з багатьма відомими підшипниковими матеріалами. Однак у порівнянні з бабітами і сплавами систем Al-Sn і Al-Pb сплави Al-Zn менш пластичні та значно твердіші, що неминуче призводить до підвищеного зносу сталевого валу у вузлах тертя та прискореного зносу самих антифрикційних матеріалів внаслідок їх низької міцності втоми.

В даний час є кілька напрямків у створенні антифрикційних сплавів на алюмінієвій основі без істотної зміни технології виробництва. Перевага надається способу підвищення міцності сплавів шляхом введення в алюміній легуючих добавок.

Є три цілі введення легуючих добавок до антифрикційних алюмінієвих сплавів:

1. Створення твердих фаз, що знижують знос матеріалу (CuAl, FeAl, MgSi, Si, AlN та ін.). Фізичні та хімічні властивості алюмінію та інших

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

інтерметалевих з'єднань, а також їх форма, кількість та розподіл в алюмінієвій основі впливають як на процес тертя, так і на міцність підшипника;

2. Зміна властивостей алюмінієвої матриці. Як такі включення використовуються (Cu, Zn Mg, Ag), служать для підвищення міцності сплаву та підвищення несучої здатності. Іноді додаткове зміцнення досягається в результаті дисперсійного твердіння;

3. Легування м'яких складових сплавів більш активного перенесення плівок м'якої фази при посиленні режимів тертя.

Ефективною добавкою, що зміцнює алюмінієвий сплав, є кремній, який утворює евтектику з Al. При евтектичній температурі (577 °C) розчинність кремнію в алюмінії становить 1,65 %, а при кімнатній температурі - 0,05 %. При вмісті кремнію вище 0,05 %, у структурі алюмінію виділяється крихкий твердий розчин кремнію з алюмінієм (98 % Si) у вигляді голкоподібних кристалів, що розташовуються по межах зерен алюмінію і різко зменшують пластичність сплаву та його тріщиностійкість. Хоча у дослідному сплаві твердий розчин перенасичений і містить 0,2 – 0,6 % кремнію, виділення кремнію по межах зерен немає різко вираженого голчастого будови. Це можна пояснити впливом на їхнє утворення міді та цинку. Включення кремнію призводять до зрізу вогнищ схоплювання, що утворилися, що передують виникненню задира [18].

Так сплави системи Al-Si мають підвищену зносостійкість за рахунок зміцнення кремнієм. Підвищений вміст Si у заевтектичних сплавах, отриманих традиційним для металургії литтям з низькою швидкістю охолодження, сприяє зниженню механічних властивостей матеріалу, внаслідок огрублення первинного Si. Технології отримання порошкового матеріалу системи Al-Si спіканням та гарячим пресуванням на основі розпилення з високою швидкістю охолодження розплавів забезпечують підвищення дисперсності кристалів Si, що визначають фізичні та механічні

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивості матеріалу [5]. Порошкові матеріали системи Al-Si є затребуваними для високонавантажених елементів конструкцій за рахунок високих механічних властивостей, зносостійкості та низького коефіцієнта теплового розширення. Визначальне значення механічні властивості порошкового матеріалу системи Al-Si надають об'ємна частка і розміри частинок Si. Межа міцності при розтягуванні збільшується із зменшенням розмірів частинок Si [13].

Відповідно до роботи [8] у процесі тертя в сплавах Al-Si евтектичного складу навантаження сприймають частинки кремнію, що виступають над поверхнею алюмінієвого зразка. Додавання олова та збільшення вмісту кремнію призводить до значного підвищення зносостійкості таких сплавів, особливо при підвищених швидкостях ковзання. При цьому у КМ, отриманих методом порошкової металургії зниження швидкості зносу більш значне, ніж сплавів, отриманих литтям [7]. Також варто відзначити, що при збільшенні навантаження швидкість зношування в сплавах системи Al-Si-Sn підвищувалася набагато менше, ніж у двофазних сплавах Al-Si і Al-Sn [5].

З представленого огляду випливає, що на практиці застосовуються антифрикційні матеріали як з великою кількістю часток твердої фази, так і композити з пластичною другою фазою. Вибір на користь того чи іншого типу підшипникового матеріалу диктується не лише безліччю технічних умов, за яких відбувається його фрикційний контакт, а й економічними міркуваннями, що враховують співвідношення «ціна-якість». Тому стає важливим як склад антифрикційних матеріалів, а й спосіб їх отримання, визначальний виробничі витрати.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

1.3 Методи порошкової металургії.

Ефективними при отриманні антифрикційних композиційних матеріалів є методи порошкової металургії (ПМ), що включають, зокрема, елементи адитивної технології [18]. Технологія ПМ дозволяє створювати матеріали з особливими, часто унікальними складами, структурою та властивостями, іноді взагалі недосяжними при застосуванні інших відомих у промисловості методів виробництва. Для підвищення фізико-механічних властивостей спечених виробів до них може бути застосована додаткова обробка, метою якої також може бути надання виробам остаточних розмірів та форми.

Суть технології ПМ як промислового методу виготовлення різних матеріалів полягає у використанні порошків як вихідна сировина, які потім формують у вироби заданої форми і піддають термічній обробці (спіканню) при температурах нижче температури плавлення основного компонента шихти [18]. Методи ПМ можуть бути успішно використані для отримання антифрикційних композиційних матеріалів з елементів, щільність яких значно відрізняється. За допомогою ПМ набагато легше досягти рівномірного розподілу структурних складових за обсягом матричного матеріалу порівняно з литьовими методами. Це досягається за рахунок створення структури з необхідними розподілом та дисперсністю включень на стадії формування пресування. При цьому подальше спікання дає змогу зміцнити зв'язок між частинками матриці.

Основними елементами технології ПМ є такі:

- а) отримання порошків вихідних матеріалів, що являють собою чисті метали або їх сплави, з'єднання металів з неметалами та ін;
- б) попередня обробка, що полягає в більшості випадків у відпалі, розсіві, ваги і змішуванні. Варто відзначити, що змішування є однією з

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

найвідповідальніших операцій, оскільки властивості спечених виробів багато в чому залежать від того, наскільки рівномірно в результаті змішування розподілені компоненти шихти;

в) пресування із шихти виробів, заданих розмірів спеціальних прес-формах, тобто. формування майбутнього виробу;

г) термічна обробка або спікання пресованих виробів, що надають їм остаточних фізико-механічних та інших спеціальних властивостей;

д) додаткова обробка спечених виробів, метою якої можуть бути подальше підвищення фізико-механічних властивостей, захист поверхні виробів від корозії, нанесення декоративних покриттів, надання виробам остаточних розмірів та форми.

У виробничій та дослідній практиці іноді зустрічаються відхилення від наведених стадій технології ПМ. Як приклади можна навести поєднання операцій пресування та спікання, просочення пористого брикету розплавленими металами.

Останнім часом активно розвивається методика, що дозволяє створювати об'ємні об'єкти за допомогою 3D-принтерів. Технології селективного лазерного спікання та сплавлення, що застосовують як вихідну сировину порошки, дозволяють виготовляти моделі та вироби складної внутрішньої конфігурації, які дуже важко створити за допомогою інших методів. Однак, використовуване обладнання, що дозволяє виготовляти деталі потрібної форми, дуже дороге.

Оскільки спікання є найбільш складним та важливим технологічним процесом ПМ [18], то зупинимося на ньому докладніше. Відповідно до визначення за ДСТУ ISO 3252:2014 спікання є нагрівання та витримка порошкового формування при температурі нижче точки плавлення основного компонента з метою забезпечення заданих механічних та фізико-хімічних властивостей. Можливі два основні різновиди процесу спікання:

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

твердофазне, тобто. без утворення рідкої фази, та рідкофазне, при якому легкоплавкі компоненти суміші порошоків розплавляються.

Основні закономірності твердофазного спікання порошкових тіл були виявлені на однокомпонентних порошках. Основною особливістю поведінки порошкового тіла при спіканні є ущільнення внаслідок зменшення пор (усадка). Існують такі механізми транспорту речовини під час спікання: поверхнева дифузія; об'ємна дифузія; перенесення через газову фазу; в'язкий перебіг та перебіг, що викликається зовнішніми навантаженнями (для спікання під тиском, гарячого пресування та ін).

Вважається, що наявність рідкої фази при спіканні позитивно позначається на усадці порошкових тіл. Проте серед металів існують бінарні системи, у яких поява рідкої фази при спіканні супроводжується зростанням порошкових тіл [10]. Причина зростання частинок при дифузії в них атомів з рідкої фази - це збільшення маси частинок в умовах, коли перехід атомів у зворотному напрямку, з твердої фази рідку, практично відсутня.

Спікання відбувається у кілька стадій. Прийнято виділяти три стадії [18]:

1. Припікання порошинок один до одного. Утворення металевих контактів (перемичок або містків) відбувається насамперед внаслідок відновлення окисних плівок на поверхні частинок, оскільки при цьому атоми порошинок мають підвищену дифузійну активність. При цьому зберігається структурний кордон між частинками;

2. Зникнення кордонів між частинками;

3. Поява замкнутих ізольованих пор. Вони можуть зменшуватись, що призводить до ущільнення порошкового тіла.

Як відомо, найбільший практичний інтерес мають матеріали (зокрема антифрикційні), отримані спіканням багатоконпонентних порошкових тіл. Тут потрібно розглядати два випадки: спікання у твердій фазі та спікання у присутність рідкої фази. Утворюються під час спікання сумішей різнорідних

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порошків фази визначаються діаграмою рівноваги фаз. Прийнято розрізняти два види твердофазного спікання багатоконпонентних систем:

1) спікання компонентів із повною (необмеженою) взаємною розчинністю;

2) спікання компонентів з обмеженою взаємною розчинністю.

Для отримання композиційних матеріалів з низькою пористістю спікання проводять в умовах, коли легкоплавкий компонент утворює рідку фазу і має хорошу змочування твердого компонента [19].

Необхідно відзначити, що припікання різнорідних тіл є складним процесом, оскільки одночасно з самодифузією, яка зумовлює перенесення маси в область приконтактного перешийка, відбувається гетеродифузія, яка забезпечує вирівнювання концентрацій різноіменних атомів за обсягом тіла. На відміну від спікання однокомпонентних систем, де дифузійні процеси зазвичай сприяють ущільненню, гетеродифузія в багатоконпонентних системах може призводити також до гальмування процесу усадки і об'ємного зростання порошкового тіла [19]. Так, для спікання сумішей, компоненти яких повністю розчиняються один в одному, характерна наявність ефектів, пов'язаних з дифузійним зростанням, що виникає при взаємній дифузії в результаті нерівності парціальних коефіцієнтів дифузії, і що призводить до появи надлишкових вакансій та розвитку дифузійної пористості – ефекту Френке.

Основні причини порушення монотонного ходу кривих, які характеризують усадку, як функцію часу або температури спікання, є: наявність плівок оксидів, що не відновлюються; зняття пружних напруг, що виникають під час пресування; наявність фазових перетворень та виділення газів.

Варто згадати, що великий вплив на хід усадки надають плівки оксидів на поверхні частинок. Якщо процеси поверхневої дифузії гальмуються плівкою оксидів, що не відновлюються, то усадка не тільки повністю

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

відсутня, але при досить високих температурах може спостерігатися зростання брикетів, що спікаються. У зв'язку з цим, при пресуванні вихідних брикетів, наприклад з алюмінієвих порошків, одним із завдань є руйнування оксидної плівки, що покриває їх за рахунок тертя між сусідніми частинками. Чим менший розмір таких порошинок, тим більша їх площа буде вільна від оксидів, а, отже, спечені брикети володітимуть меншою пористістю.

Серед основних переваг технології порошкової металургії також варто відзначити такі:

1. простота виготовлення одержуваних матеріалів;
2. Значна економія металу у зв'язку з можливістю пресування виробів із остаточними розмірами; відходи при цьому становлять всього 1-5%, втрати ж металу при звичайних методах виготовлення можуть доходити до 80%.

3. Можливість отримання матеріалів високої чистоти, бо технологія порошкової металургії не привносить, на відміну від лиття, жодних забруднень у матеріал, що виготовляється.

Варто зазначити, що економічна вигода застосування методів ПМ проявляється лише за великих масштабах виробництва. Однак унікальні властивості виробів, що одержуються, часто виправдовують доцільність їх виготовлення і значно меншими партіями [19].

1.4 Методи деформаційної обробки.

Пластична обробка композиційних матеріалів може проводитися різними методами, у тому числі шляхом їх інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Через таку обробку композити зміцнюються як за рахунок зміцнення матриці внаслідок збільшення у ній щільності дислокацій, так і за рахунок зміни форми і характеру розподілу фазових включень. Серед найбільш поширених методів ІПД обробки можна виділити монотонні типу прокатки, кування або екструзії та немонотонні, наприклад, рівноканальне

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

кутове пресування. В результаті отримані «in situ» композиційні матеріали можуть мати виняткові механічні та функціональні властивості, наприклад, їх міцність виявляється значно вищою, ніж передбачає правило ідеальної суміші [19].

Якщо в процесі деформаційної обробки композитів забезпечується однорідність перебігу матеріалу, тобто, відсутня локалізація деформації в одній із фаз, то окремі частини зразка будуть відчувати таку саму деформацію, як і сам зразок. Отже, характер зміни форми структурних елементів композиційних матеріалів при ПД визначатиметься лише схемою деформування, що діє.

З монотонних методів ПД частіше застосовують прокатку та екструзію. Так, при прокатці випробувана матеріалом справжня деформація визначатиметься як:

$$\eta = \ln\left(\frac{H_0}{H}\right), \quad (1.1)$$

де H_0 і H - початкова і кінцева товщина смуги, що прокочується [19]. У разі обробки екструзією справжня деформація визначається як:

$$\eta = 2 \ln\left(\frac{F_0}{F}\right), \quad (1.2)$$

де F_0 і F - вихідний і поточний діаметр заготовки, що деформується [19]. Видно, що у будь-якому разі, зі збільшенням ступеня деформації площа поперечного перерізу оброблюваних заготовок зменшується.

Для оцінки ефективності того чи іншого виду обробки часто виникає необхідність порівняти між собою перевірені матеріалом справжні деформації. Як еталонну використовують деформацію одновісним розтягуванням, а прирівняну до неї справжню деформацію називають

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наведеною деформацією η_e . Так, при екструзії справжня деформація відповідає наведеній деформації ($\eta_e = \eta$). У разі прокатки наведену (ефективну) деформацію можна визначити за допомогою співвідношення Мізесу: $\eta_e = (2/\sqrt{3})\eta$ [38]. Тобто, при рівному потонанні зразків випробувана матеріалом деформація у разі екструзії буде в 3 разів більше, ніж при прокатці.

Навпаки, задаючи величину η_e та спосіб обробки, можна визначити кінцеві розміри зразків. Так, товщина смуги при прокатці зі збільшенням η змінюватиметься, згідно з виразом 1.1, за таким законом:

$$H = H_0 e^{-\frac{\sqrt{3}\eta_e}{2}}, \quad (1.3)$$

а діаметр прутка після екструзії визначатиметься як:

$$F = F_0 e^{-\frac{\eta}{2}}. \quad (1.4)$$

При однорідному розподілі деформації за обсягом композиту розміри окремих структурних складових змінюватимуться за тим самим законом, як і зразок загалом. Отже, значна зміна розмірів включень прокаткою та екструзією супроводжуватиметься сильним потоненням оброблюваних заготовок. Як наслідок вони стають малопридатними для практичного застосування, що є істотним недоліком монотонних методів ПД, хоча ефект їх на структуру і механічні властивості матеріалів може бути значним.

Так, у роботі [19] було показано, що в ході обробки екструзією та кутанням сплаву Al-20 (об.%) Sn осесиметрична деформація призводить до формування матричної структури з витягнутими олов'яними включеннями. Зі збільшенням ступеня деформації товщина олов'яних включень та відстань між ними безперервно зменшуються. Результатом цієї обробки було також

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

значне зміцнення досліджуваного металу. Отримані значення межі його міцності σ_B були значно вищими в порівнянні з зміцненим в тих же умовах чистим алюмінієм, і їхня залежність від справжньої деформації носила експоненційний характер.

Як і у випадку [19], при деформуванні холодною прокаткою сплавів Al-Sn, що містять до 20 об.% олова [20], товщина олов'яних прошарків та відстань між ними також зменшувалися зі збільшенням ступеня деформації, а міцність досліджуваних матеріалів при $\eta > 5$ різко зростала і графік залежності $B(\eta)$ носив експоненційний характер.

Всебічна ковка. Схема цього методу представлена рисунку 1.11. Метод заснований на багаторазовому повторенні операції вільного кування: осадка-протяжка зі зміною осі деформуючого зусилля, що додається. Однорідність деформації за цією схемою порівняно з РКУ-пресуванням або крученням нижче. Однак цей метод дозволяє отримати наноструктурний стан у досить крихких матеріалах, оскільки обробка починається з підвищених температур та застосовуються невеликі питомі навантаження на інструмент [20].

Так як заготівля практично не змінює свою форму і розміри при куванні, великі деформації накопичуються в процесі обробки. Використання схеми всебічного кування важливе не тільки для досягнення великих ступенів деформації, але і для отримання специфічного деформаційного шляху, сприятливого для подрібнення зерен.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

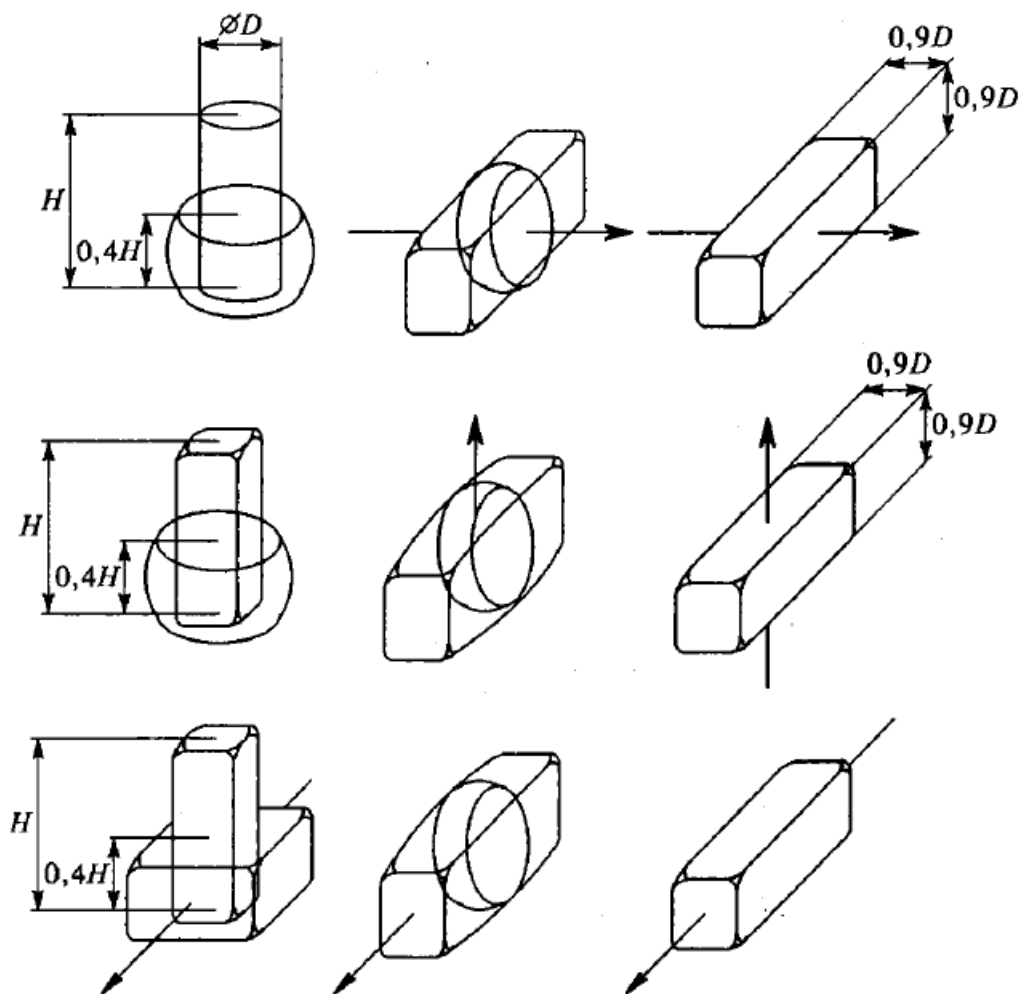


Рисунок 1.11 – Технологічна схема об'ємного кування

Гвинтова екструзія (twist extrusion). Суть методу полягає в інтенсивних зсувних деформаціях, отриманих шляхом пресування призматичних заготовок через матрицю з гвинтовим каналом, переріз якого, ортогонально до осі пресування, постійно вздовж цієї осі. Оскільки форма заготівлі після проходження каналу не змінюється, пресування можна повторювати багаторазово до отримання необхідного ступеня деформації. Величина деформації зсуву за один прохід становить ~ 2 [20]. З недоліків відзначається формування анізотропної структури, що призводить до сильного розкиду механічних властивостей.

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ				

Для того щоб уникнути значної зміни розмірів заготовок, що деформуються, останнім часом замість традиційних монотонних методів обробки широко використовують так звані немонотонні методи ПД [21], наприклад, деформація крученням під високим тиском.

Кручення під високим тиском. Конструкція установки для деформації крученням є розвитком ідеї ковадла Бріджмена (рис. 1.12). У цьому методі зразок поміщається між бойками і стискається під великим тиском P кілька ГПа. При цьому нижній боек обертається, змушуючи зразок деформуватися зрушенням за рахунок поверхневого тертя. Отримані зразки мають форму диска.



Рисунок 1.12 – Схема методу крутіння під високим тиском

Для розрахунку ступеня деформації використовується наступне співвідношення:

$$\varepsilon = \ln(\vartheta r/l), \quad (1.5)$$

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

де ϑ – кут обертання в радіанах, а r та l – радіус та товщина диска відповідно.

Великі ступеня деформації досягаються шляхом деформації зрушення в результаті зміни кута повороту нижнього бойка. Тому в даному методі при розрахунку ступеня деформації у даному методі часто використовують формулу:

$$\gamma = 2\pi RN/l, \quad (1.6)$$

Де R - відстань від осі зразка у формі диска, N - число обертів, l – товщина диска.

Відповідно до виразів (1.5) і (1.6) у центрі зразків, підданих деформації крученням не повинно відбуватися істотного подрібнення мікроструктури, проте насправді відбувається формування однорідної структури за діаметром зразків. З цього виходить що розраховані за допомогою даних рівнянь величини деформації лише приблизно дорівнюють реальним ступеням деформації. Понад те, структура формується під впливом як зовнішніх, а й внутрішніх напруг. У зв'язку з цим у ході деформації крученням правильніше розглядати кількість обертів, а чи не величину деформації, розраховану аналітично.

Щоправда, розміри оброблюваних при крученні зразків невеликі, і у зв'язку з цим, метод рівноканального кутового пресування (РККП), запропонований у 70-х роках В.М. Сегалом [19] і надалі розвинений Р.З. Валієвим, звертає на себе особливу увагу. При його використанні, як і при крученні, матеріал відчуває деформацію за схемою простого зсуву [21], проте розміри зразків, що обробляються визначаються параметрами каналів прес-форми і можуть змінюватись в широкому діапазоні. Крім підвищення міцності композиційних матеріалів, метод дозволяє керувати формою їх фазових включень за рахунок вибору різних маршрутів пресування.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прес-форми для РККП характеризуються значеннями зовнішнього і внутрішнього 2φ кутів перетину каналів (рисунок 1.13). Коли кут $\psi = 0^\circ$, а 2φ довільний усі частини пресованого зразка (у разі, якщо перебіг деформованого матеріалу протікає однорідно) у момент проходження ними площини перетину каналів OO' відчувають деформацію за схемою простого зсуву з інтенсивністю γ :

$$\gamma = 2ctg\varphi. \quad (1.7)$$

Якщо внутрішній кут перетину каналів становить 90° ($\varphi = \pi/4$), при кожному проході матеріал відчуває деформацію $\gamma = 2$ [22].

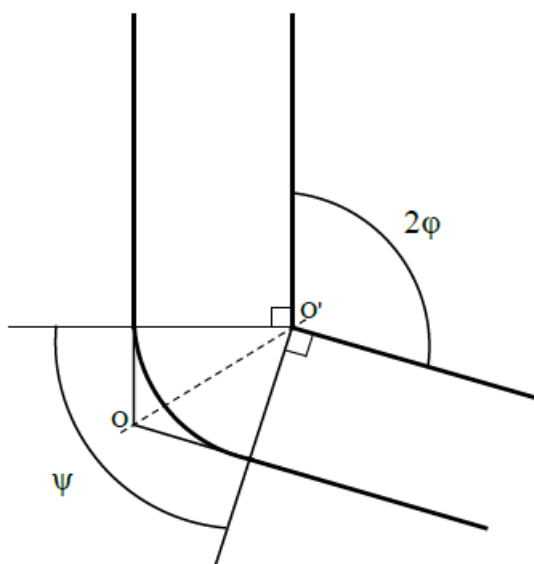


Рисунок 1.13 – Геометрична схема РККП

Взявши як оцінку наведену деформацію η_e , за допомогою співвідношень Мізеса отримаємо, що за одне пресування:

$$\eta_e = \frac{2}{\sqrt{3}} ctg(\varphi). \quad (1.8)$$

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Оскільки у нашому випадку $\varphi = \pi/4$, то $\eta_e \approx 1,15$. При багаторазовому пресуванні загальний ступінь деформації визначатиметься як:

$$\varepsilon_N = N\eta_e, \quad (1.9)$$

де N - число проходів.

Найбільш ефективними параметрами, що впливають на ступінь однорідності пластичного перебігу матеріалів, що деформуються при РККП, є протитиск і температура пресування [22]. Протитиск сприяє збільшенню тріщиностійкості зразків, і його оптимальне значення становить приблизно 1,6, де σ_c – критична напруга зсуву деформованого матеріалу. Підвищена температура РККП сприяє релаксації внутрішньої напруги до значень нижче критичних, що викликають розтріскування матеріалу.

З (1.9) слід, що величина накопиченої матеріалом деформації залежить від маршруту пресування, а форма включень, тобто макроструктура композиційних матеріалів, залежить. Відмінності маршрутів РККП показані на рисунку 1.14. При першому РККП довільна сферична ділянка зразка, що деформується, в результаті простого зсуву в місці перетину каналів набуває форми еліпсоїда. При наступних РККП за маршрутом А орієнтація заготівлі залишається незмінною, але напрямок зсуву кожного пресування змінюється на кут 2φ (рисунок 1.14а). В результаті, еліпсоїд у площині течії матеріалу буде утонюватися і витягуватися зі збільшенням числа проходів [19].

При реалізації РККП за маршрутом заготівля після кожного проходу повертається навколо своєї поздовжньої осі на кут 90° . Таке пресування поділяють на два самостійні маршрути: ВА, коли обертання зразка здійснюється в змінному ($\pm 90^\circ$) напрямку та ВС, коли обертання відбувається у постійному напрямку ($+90^\circ$).

В ході реалізації деформування за маршрутом після кожного проходу заготівля повертається навколо своєї поздовжньої осі на кут 180° . У цьому

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випадку зсув при повторному проході реалізується в тій самій площині, але в протилежному напрямку. Отже, при ідеальному перебігу матеріалу форма вихідної сферичної ділянки повинна відновлюватись кожне парне пресування [19].

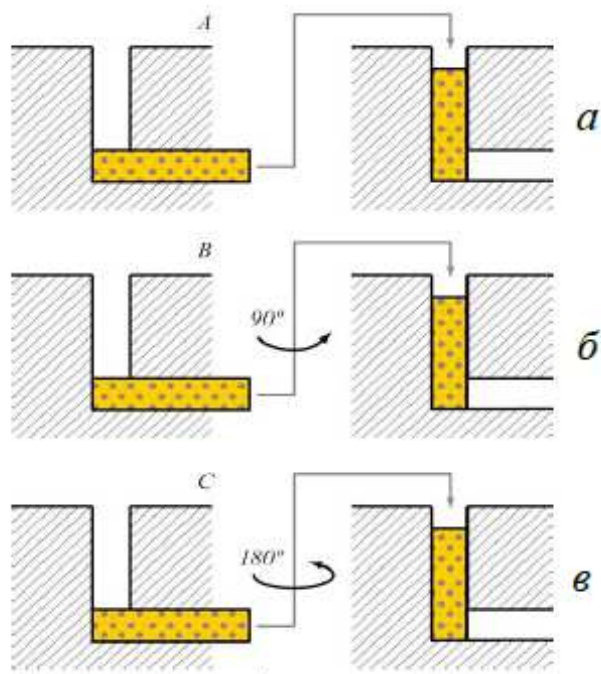


Рисунок 1.14 – Схематичне зображення методів РККП:

а – маршрут А; б – маршрут; в - маршрут С [37].

Серед недоліків методу РККП варто відзначити неоднорідність розподілу деформації по довжині зразка, що обробляється, через те, що по торцях його в ході продавлювання через прес-форму утворюються призматичні області, які не перетинають площину сполучення каналів і не деформуються (кінцевий ефект) [22]. Так як величина випробуваної цими областями деформації менше порівняно з основним матеріалом, їх присутність робить структуру по довжині зразка неоднорідною, особливо у випадку відносно коротких зразків. Згідно зі схемами деформування (рисунок 1.14), кінцевий ефект найбільше буде позначатися при РККП маршрутами А і ВА.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

РККП широко застосовується для ефективного зміцнення пластичних полікристалічних матеріалів рахунок подрібнення їх зеренної структури. Однак для обробки композиційних матеріалів його практично не застосовують, оскільки метод піддає їх деформаціям великої інтенсивності (1.9), що призводить до виникнення на межах фаз додаткових напруг, що викликають розтріскування зразків недостатньо пластичними фазами.

У разі композиційних матеріалів системи Al-Sn ситуація інша, оскільки вони ставляться скоріше до композитів з дисперсною другою фазою [19], у яких пластична не тільки матриця, але і включення, що містяться в ній. Більше того, олово є легкоплавким металом, тому навіть при кімнатній температурі виникнення критичної напруги всередині та на поверхні олов'яних частинок навряд чи можливе. В той же час, олово несжимаємо, на відміну від пір, і при інтенсивній деформації його включення виконуватимуть функцію підпору, підтримуючи в деформованому матеріалі високий гідростатичний тиск, що перешкоджає зародженню в ньому несплошностей і тріщин.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вихідні матеріали, методи виготовлення зразків та вимірювання їх механічних властивостей.

Зразки для досліджень були отримані спіканням пресувань сумішей порошків олова та алюмінію з різним вмістом кремнію. Для складання сумішей використовували такі порошки:

- Порошок алюмінієвий високодисперсний марки АСД-4 (ТУ 48-5-226-87). Гранулометричний склад: від 20 до 30 мкм – трохи більше 12 %, від 30 до 50 мкм – трохи більше 3 %, менше 50 мкм – 99,6 %.

- Порошок олова марки ПО2 (ДСТУ 9723-73). Гранулометричний склад: < 45 мкм - не менше 80%; > 71 мкм – трохи більше 2,2 %. Вміст домішок у порошок – (Fe, Pb, Cu, S, O₂, Sb, Bi, As) – трохи більше 1 %.

- Порошки розпиленого Al-сплаву з різним вмістом кремнію з розмірами частинок < 80 мкм.

З вихідних порошків готувалися механічні суміші, ваговий вміст олова в яких становив 40 %, а вміст кремнію 0,5 %, 12 % та 23 %. Структура даних порошків наведена на рисунку 2.1. Змішування проводилося в змішувачі типу «кульовий млин» протягом 5-6 годин, потім порошки просіювалися через сито з розміром комірки 80 мкм.

Далі, з отриманих сумішей за допомогою холодного пресування машиною МС 500 (рис. 2.2) формувалися зразки діаметром 20 мм і висотою 9 мм і з розмірами 60x10x10 мм для РККП. Пористість сирих зразків становила 10 %. Поперечні розміри зразків РККП відповідали перерізу каналів прес-форми РККП. Пресування здійснювалося в сталевий прес-формі, бічні стінки якої, для запобігання задирів, перед засипанням порошку покривалися

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

тонким шаром суміші мазуту з графітом. Пресування проводилося за обмежувачами з розрахованою висотою.

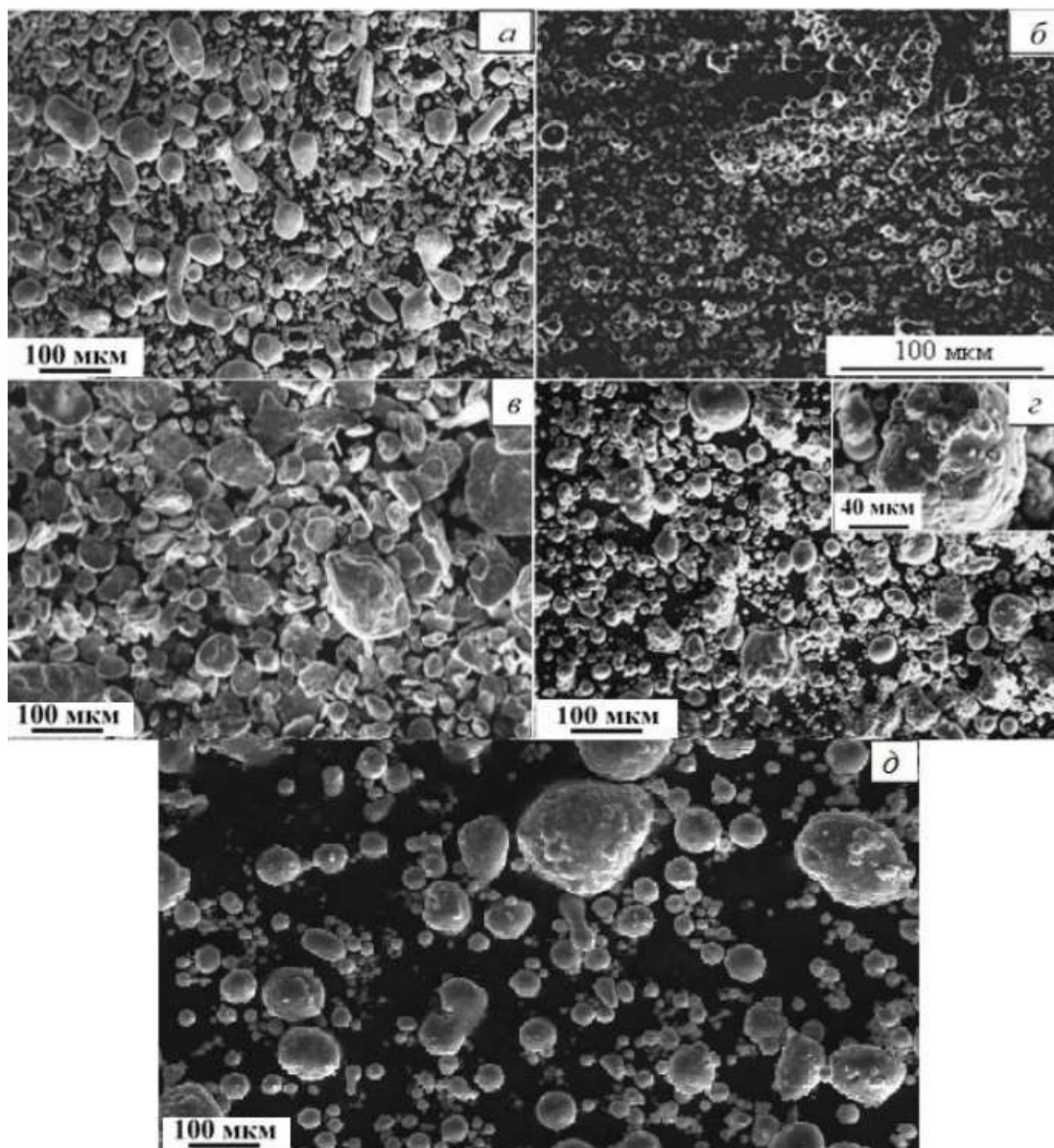


Рисунок 2.1 – Вихідні порошки:

а) – Sn (ПО₂), б) – Al АСД-4, в) – aAl-0,5 вага.% Si, г) – Al-12 вага. % Si, д) – Al-23 вага.% Si.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



Рисунок 2.1 – Прес машина MS-500.

Спiкання холоднопресованих зразкiв проводилося у вакуумi нижче 10^{-2} Па в електропечi СНВЕ-1.3.1/16 (рис. 2.3) Температура спiкання для зразкiв Al-40Sn та (Al-0,5Si)-40Sn становила 600 °С, а оптимальний час витримки – 1 година У разi композиту (Al-12Si)-40Sn та (Al-23Si)-40Sn спiкання проводилося при 570 °С, щоб уникнути оплавлення зразкiв, з попередньою витримкою протягом однієї години при 550 °С.



Рисунок 2.3 – Електропiч СНВЕ-1.3.1/16.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пiдпис	Дата		45

Об'єм (V) досліджуваних зразків визначався до та після спікання за результатами вимірювання їх лінійних розмірів. Маса зразків (m) визначалася за допомогою аналітичних терезів з точністю до 0,001 г, а їх щільність розраховували за формулою:

$$\rho_{\text{обр}} = \frac{m}{V}. \quad (2.1)$$

Пористість (П) сирих та спечених зразків визначалася згідно з наступним виразом:

$$П = \left(1 - \frac{\rho_{\text{обр}}}{\rho_{\text{теор}}} \right) 100\%, \quad (2.2)$$

де $\rho_{\text{обр}}$ – щільність зразка; $\rho_{\text{теор}}$ – теоретична щільність, розрахована для матеріалу досліджуваного складу, що не містить пір.

Значення $\rho_{\text{теор}}$ для сумішей порошку алюмінієвого сплаву та олова розраховувалося за правилом адитивності:

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1}, \quad (2.3)$$

де α – вагова концентрація відповідного порошкового компонента (вага.%); ρ_i – довідкова густина (г/см^3) чистого олова або сплаву Al-Si.

У разі зразків, які за рахунок олова, що випаровувалось, втрачали масу при спіканні, їхня теоретична щільність перераховувалася з урахуванням втрати маси. Результати розрахунків наведено у таблиці 2.1.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Таблиця 2.1 – Теоретична щільність (г/см³), використана для розрахунку пористості сирих та спечених композитів (Al-Si)-Sn

Склад алюмінієвої матриці	Концентрація Sn, вага.%	
	0	40
Al	2,71	3,61
(Al-0,5Si)	2,7	3,61
(Al-12Si)	2,65	3,54
(Al-23Si)	2,6	3,1

Міцність композиційних антифрикційних матеріалів (Al-Si)-Sn визначалася випробуванням їх на стиск (ГОСТ 25.503-97) за допомогою універсальної випробувальної машини Walter+Bai AG LFM-125 (рис. 2.4) Швидкість навантаження зразків становила 0,5 мм. Зразки призматичної форми вирізалися із середньої частини спечених заготовок та мали розміри 5x5x10 мм. Для запобігання впливу тертя на торцеві частини зразків наносився порошок графіту. Для кожної точки проводилося щонайменше три випробування.

Зміна площі зразків у процесі осаджування враховувалася відповідно до наступного співвідношення:

$$S = \frac{S_0}{(1-\delta)}, \quad (2.4)$$

де S_0 – вихідна площа зразка; δ – лінійна деформація.

Міцність матеріалів після РККП визначали стиском зразків вздовж осі, напрямком якої збігався з поздовжньою віссю пресованої заготовки.



Рисунок 2.4 – Універсальна випробувальна машина Walter+Bai AG LFM-125

Гаряче доуцільнення (ГД) проводилося у вихідній прес-формі за температури 200 °С. Зусилля допресування складало 10 тонн.

Для інтенсивної пластичної деформації спечених композитів (Al-Si)-Sn було обрано метод рівноканального кутового пресування (РККП), оскільки він дозволяє піддавати зразки значним деформаціям без зміни їх поперечних розмірів, а також керувати формою структурних складових композиту за рахунок вибору маршруту пресування [21, 22].

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Для пресування використовувалася прес-форма із сталі 40Х твердістю ~ 50 HRC, зі спеціально розробленою конструкцією, що дозволяє, не виймаючи зразків, проводити їх багаторазове пресування (рис. 2.5) [22].

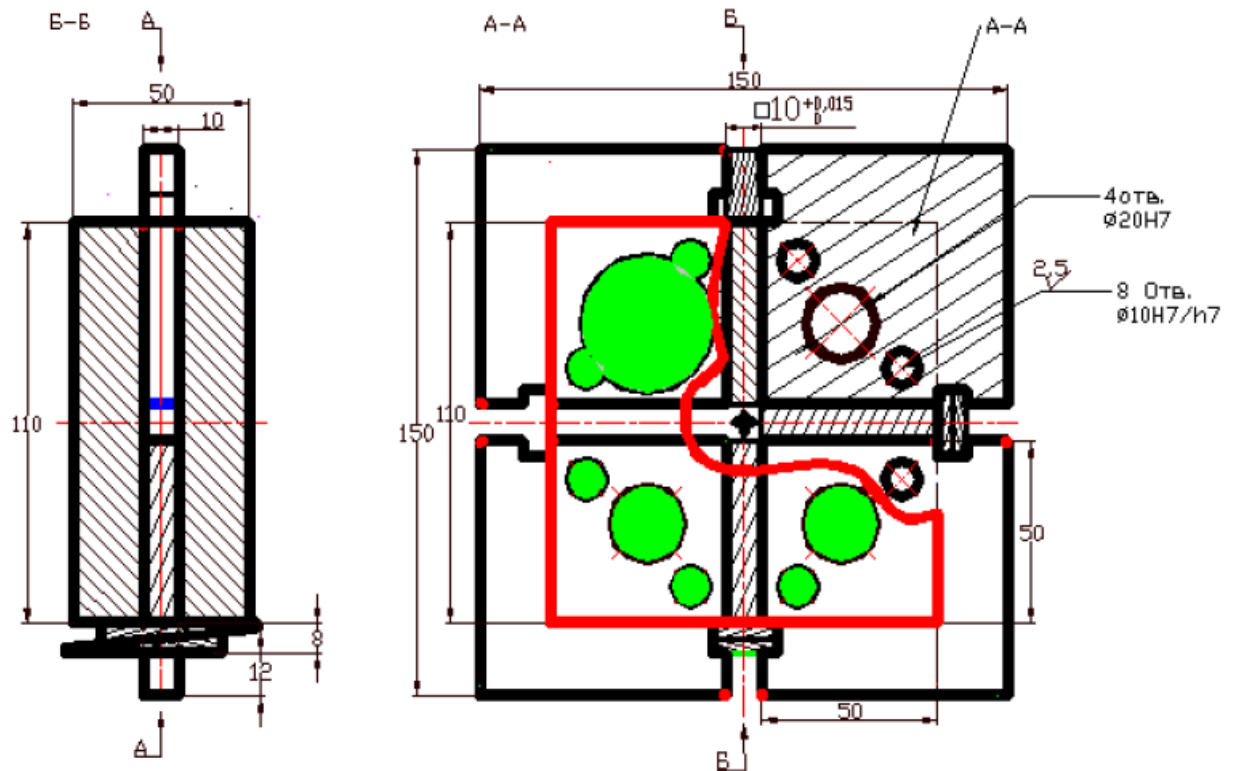


Рисунок 2.5 – Схема прес-форми для РККП

Для зменшення тертя стінки каналів прес-форми покривалися тонким шаром мастила мазуту, що складається з суміші з графітом. Прес-форма з поміщеними до неї зразками нагрівалася перед пресуванням в електричній печі СНОЛ (рис. 2.6). Витримка становила 15 хвилин при температурі нагрівання 200 °С.

										Арк.
										49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ					



Рисунок 2.6 – Електрична піч СНОЛ

2.2 Обладнання для дослідження структури композитів (Al-Si)-Sn.

Металографічні дослідження структури спечених та деформованих матеріалів проводились на оптичному мікроскопі AXIOVERT-200MAT (Zeiss, Німеччина). Рисунок 2.7.

Оскільки роздільна здатність оптичних мікроскопів (ОМ) вбирається у 0,2 мкм, то більш детального дослідження структури спечених і деформованих композитів (Al-Si)-Sn також застосовувалася растрова електронна мікроскопія (РЕМ) [17]. Для РЕМ дослідження використовувався на мікроскоп LEO EVO 50 (Карл Цейс, Німеччина), роздільна здатність якого становить 30 нм (рис. 2.8). Мікроскоп додатково оснащений вбудованим мікроаналізатором, за допомогою якого визначався елементний склад зразків.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50



Рисунок 2.7 – Оптичний мікроскоп AXIOVERT-200 MAT



Рисунок 2.8 – Мікроскоп LEO EVO 50

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Шліфи для металографічних досліджень зразків готувалися шляхом шліфування поверхні на наждачному папері зі спадаючою зернистістю абразиву, а потім на сукні з нанесеною на неї алмазної пастою. Шліфування проводилося на полірувальному верстаті МЕСАРОЛ Р 230 (рис. 2.9). Шліфовану поверхню піддавали хімічному травленню у 4 % розчині азотної кислоти HNO_3 у спирті.



Рисунок 2.9 – Полірувальний верстат МЕСАРОЛ Р 230.

2.3 Методика та обладнання для трибологічних випробувань композитів (Al-Si)-Sn.

Найбільш повно антифрикційні властивості матеріалів проявляються у відсутності рідкого мастила на контакті, тому випробування спечених і деформованих композитів (Al-Si)-Sn проводилися в умовах сухого тертя сталі за схемою «палець – диск» на триботестері фірми «Tribotechnic» (France) (рис. 2.10).

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52



Малюнок 2.10 – Тріботестер фірми «Tribotechnic»

Зразки для випробувань являли собою прямокутні паралелепіеди з площею робочої поверхні 9 мм². Як контртіло використовувалися диски діаметром 80 мм, виготовлені із загартованої сталі Ст. 45 із твердістю 45-47 HRC. Робоча поверхня зразків шліфувалася за схемою, використаною під час підготовки шліфів для металографічних досліджень. Робоча поверхня диска полірувалася на сукні з використанням алмазної пасти розмірами частинок 1-3 мкм. Для усунення забруднень, робочі поверхні зразка та диска перед випробуванням протиралися ватним тампоном, змоченим ацетоном.

Навантаження на поверхню тертя зразків складало 1, 3 і 5 МПа, а швидкість ковзання 0,6 м/с. Розмір сили тертя реєструвалася автоматично кожну секунду вбудованим мікропроцесором. Для деформованих методом РККП зразків поверхнею тертя служила площина течії матеріалу, а напрямок тертя вибирався впоперек витягнутих олов'яних включень. Довжина шляху притирання всіх зразків становила 1000 м. Інтенсивність зношування досліджуваних матеріалів визначалася співвідношенням:

$$I_h = \frac{\Delta l}{L}, \quad (2.5)$$

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

де Δl - відносне укорочення зразка в мкм; L – шлях тертя, який всім випробувань становив 500 м.

Дослідження структури та складу поверхні тертя зразків та сталевого контртіла здійснювалися за допомогою методів ОМ та РЕМ.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

3.1 Вплив складу порошкової суміші та режиму її спікання на структуру, механічні та трибологічні властивості композитів (Al-Si)-40Sn.

В якості прототипу досліджуваного матеріалу було обрано отриманий раніше спечений сплав Al-40Sn [2], за рахунок високого вмісту олова демонструє при сухому терті більш опір стирання в порівнянні з промисловими сплавами цієї ж системи. З'єднання складових новий композит фаз здійснювалося шляхом рідкофазного спікання суміші з 40 вага. % порошоків олова з порошками сплавів Al-Si з різним вмістом кремнію. Оскільки, як і алюміній, кремній малорозчинний у твердому олові, то передбачалося, що таким чином можливе отримання щільного матеріалу, без помітного погіршення змащувальних здібностей олов'яної фази.

Створення високощільних композитів «алюмінієвий сплав»-Sn спіканням ускладнюється тим, що вихідні порошки алюмінієвих сплавів і олова покриті міцними оксидними плівками, які перешкоджають не тільки розтіканню рідкої фази пресування і змочування алюмінієвих порошинок оловом, але також. Тому для підвищення реакційної здатності алюмінієві порошки були піддані попередньому механічному розмелу в кульовому млині.

Як показали експерименти зі спікання порошоків сплавів (без олова), навіть після помелу вони починають активно зварюватися між собою тільки при температурах спікання вище 600 °С. Раніше [9] було встановлено, що у разі спікання порошоків чистого алюмінію (АСД-4) при температурі 640 °С вдається одержати композит із пористістю менше 1 %. У разі спікання порошоків доевтектичного сплаву Al-0,5Si після годинної витримки при 615 °С пористість брикету знизилася до 8 % (початкова – близько 10 %). При

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

цьому пори в основному розташовувалися в місцях потрійних та четверних стиків частинок. При підвищенні температури спікання до 640 °С більшість пор зникає, і залишкова пористість зразка Al-0,5Si склала 0,8 % (таблиця 3.1).

У разі спікання брикетів із порошку евтектичного складу проводити нагрівання до температур вище 577 °С не можна, зважаючи на їхнє повне розплавлення (рисунок 3.1). Спікання ж за нижчих температур усадки композитів не викликало. У разі зразків з великою кількістю кремнію (Al-23Si) їх можна нагрівати до більш високих температур. Однак отримати високощільні композити в цьому випадку також не вдалося через велику крихкість сирих брикетів з твердих порошоків.

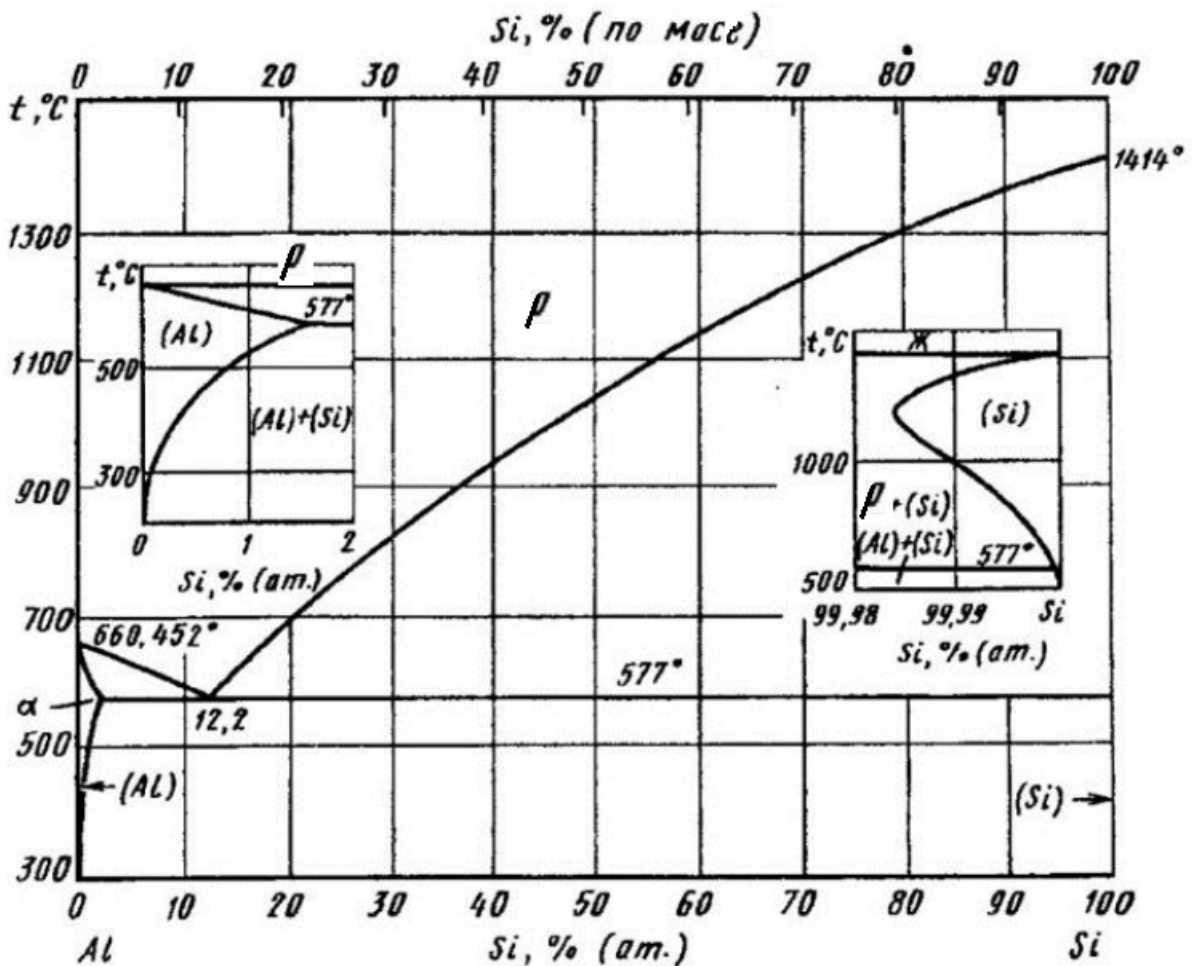


Рисунок 3.1 – Діаграма стану Al-Si [23]

Якщо до порошоків алюмінієвого сплаву додати олово, спікання їх проходитиме в присутності рідкої фази. Відомо, що неодмінною умовою отримання безпористих матеріалів при рідкофазному спіканні є хороше змочування та розчинення твердих частинок рідкої фази. Олово в рідкому стані здатне розчиняти алюміній і тим більше, що вища температура спікання. В результаті буде мати місце перекристалізація частинок алюмінію через рідку фазу, яка істотно впливає на тип структури спечених композитів, що формується.

Так, спекання композитів (Al-0,5Si)-40Sn здійснювали в інтервалі температур 550-630 °С. Виявилось, що максимально допустима величина температури спікання, при якій зразки не втрачають форму під власною вагою через велику кількість рідкої фази, становить близько 615 °С, що узгоджується з рівноважною діаграмою Al-Sn стану.

Виявлено, що параметри структури композиту (Al-0,5Si)-40Sn змінюються із температурою спікання немонотонно (таблиця 3.1). Металографічні дослідження показали, що число контактів, що характеризує пов'язаність матриці, на одну алюмінієву частинку зростає з підвищенням температури спікання до 600 °С, а потім швидко починає знижуватися. Так само від температури залежить і пористість досліджуваного матеріалу. Так, її значення для спеченого при температурі 600 С протягом 1 години композиту (Al-0,5Si)-40Sn становило 4,5%. Однак при вищій температурі спікання їхня кінцева пористість збільшувалася.

Зазначені структурні зміни пояснюються тим, що на їх перебіг впливає не тільки кількість рідкої фази у зразку під час спікання, а й кут змочування нею частинок твердої фази, а також розчинність та швидкість перекристалізації атомів твердої фази через розплав. При низьких температурах спікання рідкої фази мало, а кут змочування Al частинок рідким оловом великий, тому Sn погано проникає на контакти між алюмінієвими частинками.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Таблиця 3.1 – Вплив режиму спікання на характеристики структури та міцність композитів (Al-0,5Si)-40Sn та Al-0,5Si

Склад	Режим спікання	Пористість, %	Напруження течії (σ_4), МПа
Al-40Sn	600 ° C; 1год	0,8	62
(Al-0,5Si)-40Sn	570 ° C; 1год	11,6	38
-	585 ° C; 3год	7,0	46
-	585 ° C; 1год	9,3	43
-	600 ° C; 1год	4,5	56
-	615 ° C; 1год	10,4	37
Al-0,5Si	615 ° C; 1год	8,0	-
-	640 ° C; 1год	0,8	-

Там, де його не було, частина алюмінієвих порошочок зросталася у великі агломерати, на периферії яких розташовувалися дрібні частинки алюмінію, оточені олов'яною сіткою (рис. 3.2). При цьому пов'язаність каркасу з алюмінієвих частинок була слабкою, а пористість композитів – великою, оскільки такі дрібні частинки перешкоджали перегрупуванню та ущільненню великих агломератів. Пори таких композитах розташовувалися переважно у місцях стиків частинок твердої фази. Було встановлено, що збільшення тривалості спікання до трьох годин при температурі 585 °C призвело до незначного (до 7%) зниження пористості композиту (Al-0,5Si)-40Sn, але до сильного огрублення його структури за рахунок розчинення дрібних частинок та осадження їх на поверхню великих агломератів.

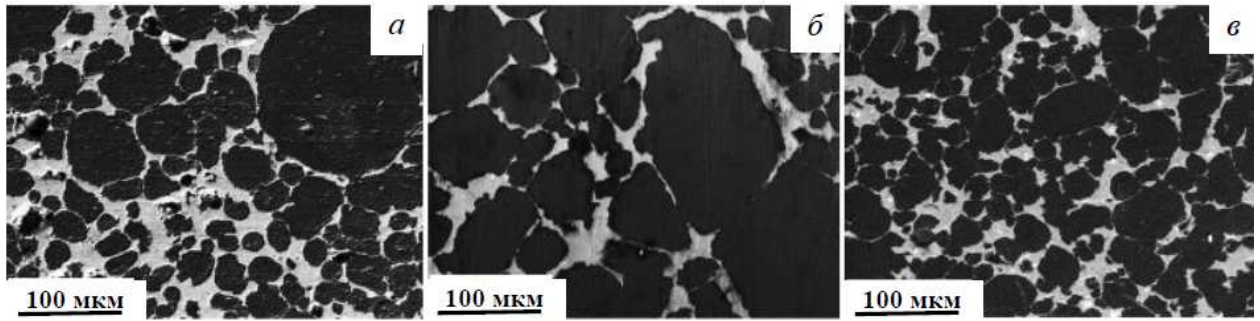


Рисунок 3.2 – Структура спеченого сплаву (Al-0,5Si)-40Sn (пршарки олова – світлі). Температура спікання:

а) – 585 °С, б) – 600 °С, в) – 615 °С. Час витримки – 1 година

Збільшення температури спікання до 600 °С призводить до зменшення кута змочування алюмінію рідким оловом та проникнення останнього на більшість стиків твердих частинок. Одночасно зростає розчинність Al частинок у рідкій фазі, а процеси перекристалізації розчинених атомів через рідку фазу прискорюються. В результаті кількість дрібних частинок різко зменшується. Ті, що залишилися, виходять із зачеплення, а під дією капілярних сил відбувається їх перегрупування в щільнішу упаковку, і пористість композитів знижується. При цьому кут змочування між фазами залишається більше нуля, що дозволяє частинкам, що зіткнулися, зростатися. Через війну пов'язаність алюмінієвого каркаса зростає. Так, для композиту (Al-0,5Si)-40Sn число контактів на Al частинку (N_k) становило 3,4 (таблиця 3.1) і було вище його критичного значення (≤ 2), при якому зерна твердої фази ще можна вважати пов'язаними в безперервні ланцюжки.

При збільшенні температури спікання до 615 °С кут змочування Al частинок рідким оловом зменшується практично до нуля, а кількість рідкої фази зростає. В результаті великий об'єм рідини перешкоджає встановленню контактів між твердими частинками, тим самим знижуючи зв'язаність алюмінієвого каркасу. При цьому пористість спечених при 615 °С зразків виявилася вищою, ніж у композитів, отриманих при 600 °С.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Виявлено, що на початковій стадії спікання брикетів (Al-0,5Si)-40Sn відбувається проникнення олова під оксидну плівку та розтікання по поверхні алюмінієвих порошоків. При цьому Sn проникає по межах алюмінієвих зерен та фрагментує порошокинки на окремі дрібні частинки. Подібні результати були отримані при спіканні зразків порошоків чистого алюмінію [23]. Ця стадія тривала більше 20 хвилин у разі спікання композитів (Al-0,5Si)-40Sn, тоді як при спіканні брикетів Al-40Sn її тривалість була більшою (рисунок 3.3). Потім настає стадія розчинення найбільш дрібних частинок сплаву Al. Їх розчинення виводить частинки, що залишилися, з зачеплення і реалізується стадія перегрупування частинок твердої фази під дією капілярних сил в більш щільну конфігурацію, з одночасним зниженням пористості пресувань.

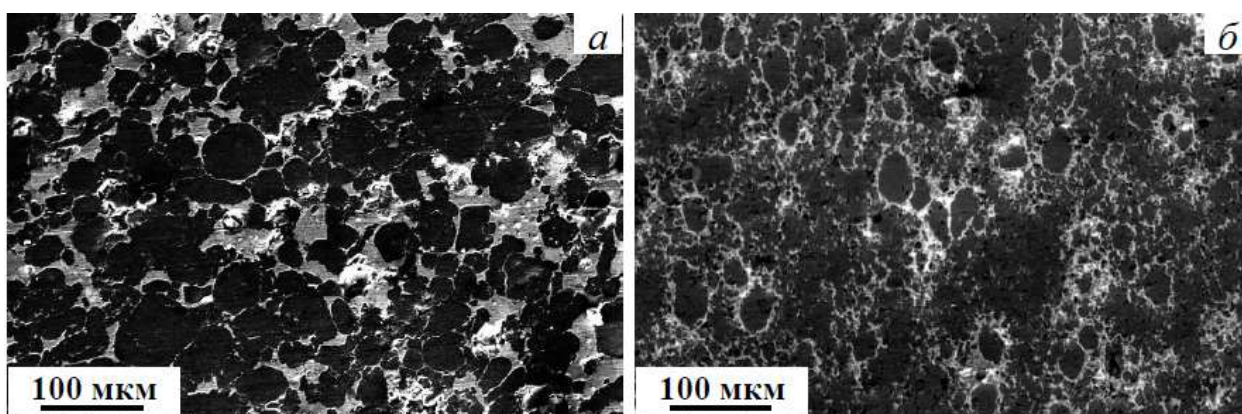


Рисунок 3.3 – Структура спечених (600 ° C; 20 хвилин) композитів (Al-0,5Si)-40Sn (а) та Al-40Sn (б).

Механічні властивості спечених композитів оцінювали шляхом випробування їх на стиск. Виявлено, що зразки з малою пористістю та з зв'язаним алюмінієвим каркасом мають найбільшу міцність і пластичність. При навантаженні композитів зі слабозв'язаною матрицею, зерна якої розділені прошарками м'якої фази, пластичний перебіг має тенденцію до локалізації у таких прошарках. Ресурс їхньої пластичності швидко

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

вичерпується, і при осадженні зразків більш ніж на 4% напруження течії таких матеріалів починає знижуватися (рисунок 3.4).

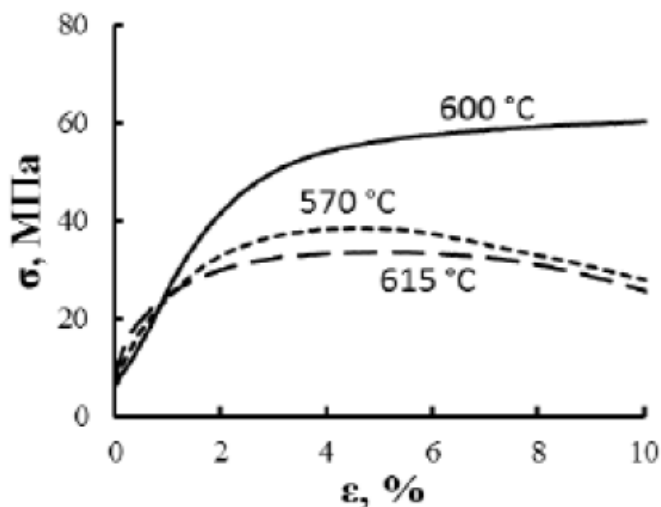


Рисунок 3.4 – Криві стискування спечених (1 год) композитів (Al-0,5Si)-40Sn

Триботехнічні випробування спечених композитів на сухе тертя проводили за схемою "палець-диск". З аналізу наведених у таблиці 3.2 даних слід, що підвищення зв'язаності зерен матриці та зниження пористості композитів (Al-0,5Si)-40Sn значно покращують їх опір зношування за відсутності рідкого мастила. Тому інтенсивність зношування спечених композитів падає зі збільшенням температури їх спікання до 600 °C, а потім знову зростає у зразків, спечених при 615 °C, через їх підвищену залишкову пористість і низьку зв'язаність алюмінієвого каркаса. Тобто, пори як концентратори критичних напруг знижують пластичність приповерхневих шарів зразків і, отже, сприяють збільшенню їхнього зносу при терті. Особливо сильно цей ефект проявляється при високих навантаженнях, коли деформаційна складова зношування зразків зростає.

Таблиця 3.2 – Результати триботехнічних випробувань при сухому терті сталі спечених зразків (Al-0,5Si)-40Sn. Швидкість ковзання – 0,6 м/с, контурна площа тертя зразка – 9 мм²

Склад композитів	Режим спікання	Пористість, %	Інтенсивність зношування, мкм/м		
			1 МПа	3 МПа	5 МПа
(Al-0,5Si)-40Sn	570 ° C;	11,6	0,31	0,75	тріснув
	600 ° C;	4,5	0,18	0,22	0,33
	615 ° C;	10,4	0,21	0,43	тріснув
Al-40Sn	600 ° C;	0,8	0,10	0,18	0,24

У разі спікання композитів на основі порошку силуміну евтектичного складу (Al-12Si)-40Sn нагрівання їх до температур, при яких забезпечується хороше змочування твердих частинок рідким оловом, призводить до утворення великої кількості евтектичної рідини на додаток до розплавленого олову. В результаті спечені зразки втрачають форму під дією власної ваги і відбувається випотівання великої кількості рідини. Тому в роботі спікання пресування проводили при температурах нижче евтектичної (577 ° C), коли кут змочування алюмінієвих частинок рідким оловом досить великий.

Зважаючи на товсту оксидну плівку на порошках сплаву Al-12Si, спіканню їх у суміші з оловом також повинна передувати попередня витримка, що забезпечує встановлення контактів рідкого олова безпосередньо з чистою поверхнею Al частинок. Було встановлено, що для руйнування оксидної плівки на порошках та ініціації їхньої активної взаємодії з розплавом необхідна попередня витримка пресувань у присутності рідкого олова при температурі 550 °C не менше 1 години [23].

За цей час відбувається руйнування оксидної плівки на олові, проникнення рідини під оксидні плівки та її розтікання поверхнею Al

									Арк.
									62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ				

частинок. Однак при цьому кут змочування алюмінію оловом досить великий, тому великі ділянки поверхні алюмінієвих порошин залишаються не змоченими. В результаті алюмінієвий каркас був слабким, а пористість пресування близька до вихідної (Таблиця 3.3). Отримані зразки швидко руйнувалися при механічному випробуванні на стиск, а також у процесі тертя сталі, навіть при малих навантаженнях [23].

З метою зменшення кута змочування та покращення зв'язаності матричного каркасу, температура спікання брикетів була підвищена до 570 °С. З наведених у таблиці 3.3 даних видно, що в результаті зростання температури спечених композитів знизилася на 2-3 % і далі мало змінювалася зі збільшенням тривалості спікання. Разом з тим, зі збільшенням температури та часу спікання зростає кількість випотілого зі зразка олова.

Механічні випробування на стиск показали, що вид кривих перебігу зразків (Al-12Si)-40Sn з різним часом спікання істотно відрізняється (рисунок 3.5). Цифри у кривих вказують час (хв) витримки пресування при 570 °С. Видно, що збільшення часу витримки сприяє помітному поліпшенню їхньої пластичності, а при значному його збільшенні ще й зростанню міцності спеченого матеріалу. Пояснення такому впливу тривалості витримки при 570 °С на механічні властивості зразків з однаковим складом і рівною пористістю слід шукати в особливостях структури, що формується.

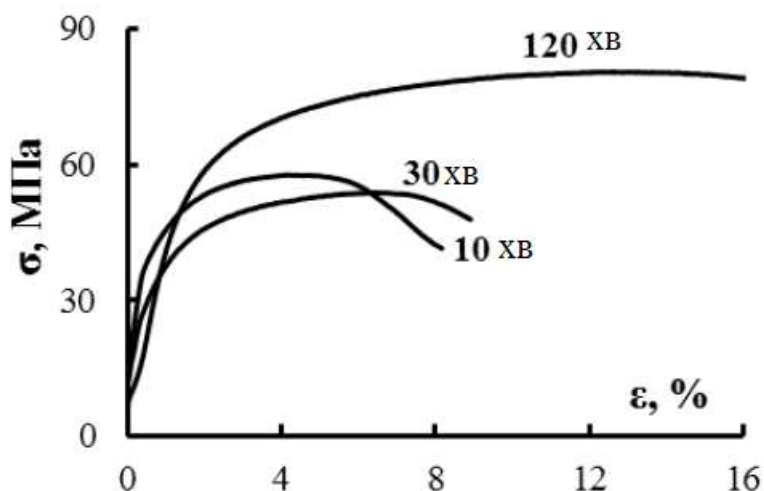


Рисунок 3.5 – Криві стиснення зразків спеченого композиту (Al-12Si)-40Sn.

						ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			63

Таблиця 3.3 – Характеристики структури та механічні властивості спечених композитів (Al-12Si)-40Sn

Режим спікання	Пористість, %	Відносна втрата ваги, %	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %
550 °C; 1 година	9,7	3,4	тріснув	тріснув
550 °C; 1 година + 570 °C; 10 хв.	6,5	6,8	60	3,8
550 °C; 1 година + 570 °C; 30 хв.	6,7	7,9	57	6
550 °C; 1 година + 570 °C; 120 хв.	6,2	9,9	80	11

Металографічні дослідження структури композитів (Al-12Si)-40Sn показали, що після короткочасної витримки їх при зазначеній температурі розмір шийок спікання між твердими частинками, що контактують, малий, а самі шийки нечисленні (рисунок 3.6, а). Після 2-годинної витримки пресування при 570 °C шийки стали більш численними, а їх розмір значно зріс (рисунок 3.6, б). Безперечно, таке зміцнення контактів між частинками алюмінієвого сплаву призводить до підвищення опору матричного каркаса локалізації, що утворюється ними, пластичного перебігу. Однак абсолютні значення максимальної міцності σ_B композиту (Al-12Si)-40Sn після 2-годинної витримки при 570 °C виявилися лише на 1 МПа вищою, ніж міцність стисненого до тієї ж величини ε і зразка, що не містить кремній, Al-

40Sn, також спеченого при 600 °С та витримці 1 год. Очевидно, що така незначна різниця у міцності двох спечених композитів з нелегованою та легованою матрицею обумовлена більш високою (6 %) пористістю останнього та великою дефектністю міжфазних кордонів [23].

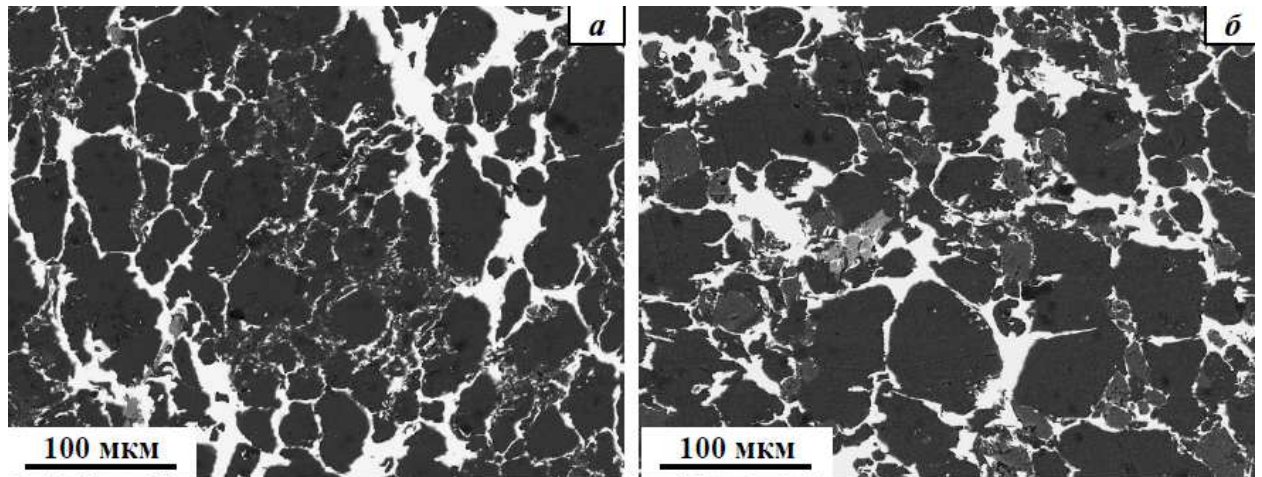


Рисунок 3.6 – Структура композита (Al-12Si)-40Sn. Температура спекання 570 °С, час витримки 10 (а) и 120 (б) хвилин.

Триботехнічні випробування отриманих композитів (Al-12Si)-40Sn показали, що підвищення міцності матричного каркаса призводить до зростання їхньої зносостійкості при сухому терті сталі. З наведених у таблиці 3.4 даних видно, що зі збільшенням тривалості спікання інтенсивність зношування досліджуваного композиту знижується, особливо при високих тисках. При цьому зносостійкість отриманого композиту (Al-12Si)-40Sn з великою кількістю твердих частинок була гіршою, ніж двофазний матеріал Al-40Sn. Причиною цієї відмінності є наявність у легованого кремнієм зразка великої кількості пір, які є джерелами виникнення тріщин при впливі нерівностей контртіла на поверхню матеріалу в процесі тертя.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Таблиця 3.4 – Результати триботехнічних випробувань при сухому терті сталі спечених зразків (Al-12Si)-40Sn. Швидкість ковзання – 0,6 м/с, площа поверхні зразка – 9 мм²

Режим спікання	Інтенсивність зношування I _h , мкм/м			
	1 МПа	3 МПа	4 МПа	5 МПа
550 °С; 1 година +570 °С; 10 хв.	0,26	0,43	0,64	руйнація
550 °С; 1 година +570 °С; 120 хв.	0,10	0,20	0,24	0,26
600 °С; 1 година	0,10	0,18	-	0,24

У разі спікання брикетів з алюмінієвого сплаву заевтектичного складу (Al-23Si)-40Sn також застосовувалася попередня витримка при 550 °С протягом однієї години для того, щоб дати можливість олову розтікатися по пресування без його випотівання зі зразка. Незважаючи на той факт, що, згідно з діаграмою стану, брикети цього складу можна нагрівати до температури 600 °С і вище, спікання при температурах вище евтектичної призводить до значного випотівання олова і втрати форми зразків. Сильне випотівання, ймовірно, пов'язане з поганим змочуванням рідким Sn порошків алюмінієвого сплаву, поверхня яких була сильно окислена, не дивлячись на попередню активацію в кульовому млині.

З наведених у таблиці 3.5 даних видно, що в процесі спікання при температурі 550 °С кінцева пористість пресування стала 12,4 % при вихідній близько 10 %. Тобто спостерігалось об'ємне зростання порошкових брикетів (Al-23Si)-40Sn. Подальше збільшення температури спікання до 570 °С призвело до помітного ущільнення зразків через зменшення кута змочування частинок алюмінієвого сплаву та їх перегрупування під дією збільшених капілярних сил.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Таблиця 3.5 – Вплив режиму спікання на характеристики структури та міцність композитів (Al-23Si)-40Sn

Режим спікання	Пористість, %	Напруження течії (σ_4), МПа	Деформація до руйнування $\delta\%$
550°C 1 год	12,4	тріснув	тріснув
550°C; 1год+570°C;10 хв	8,4	36	1,7
550°C; 1год+570°C; 60 хв	7,8	61	3,5

З наведених на рис. 3.7 фотографій макроструктури видно, що зі збільшенням тривалості спікання структура композиту огрублюється, розмір олов'яних включень збільшується, а алюмінієвий каркас стає більш пов'язаним. В результаті, незважаючи на те, що пористість матеріалу при цьому змінюється незначно (Таблиця 3.5), міцність та пластичність його при механічному випробуванні на стиск збільшуються практично в 2 рази (рисунок 3.8). Однак механічні властивості цього композиту помітно поступаються аналогічним характеристикам описаних вище спечених матеріалів (Al-Si)-40Sn, зі значно меншим вмістом кремнію.

Кремній в олові не розчиняється, тому він присутній у спечених зразках одразу у вигляді дрібних частинок. Як показали результати проведеного за допомогою РЕМ мікроаналізу, частинки кремнію у всіх спечених композитах (Al-Si)-40Sn в основному розташовувалися на межі олова з алюмінієм. При цьому адгезійний зв'язок їх з олов'яними та алюмінієвими фазами був слабкий через наявність на поверхні частинок кремнію оксидних плівок. При навантаженні матеріалу такі місця є джерелами тріщин. Тому такі композити мають низьку пластичність і, як показали триботехнічні випробування, в процесі сухого тертя руйнуються при тиску більше 3 МПа.

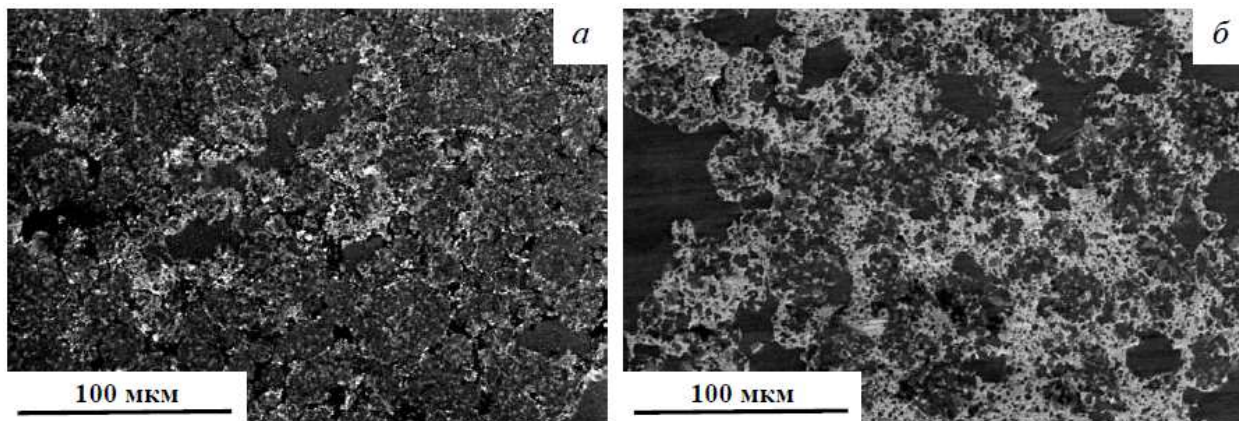


Рисунок 3.7 – Структура композиту (Al-23Si)-40Sn. Температура спікання 570 °С, час витримки 10 (а) та 60 (б) хвилин

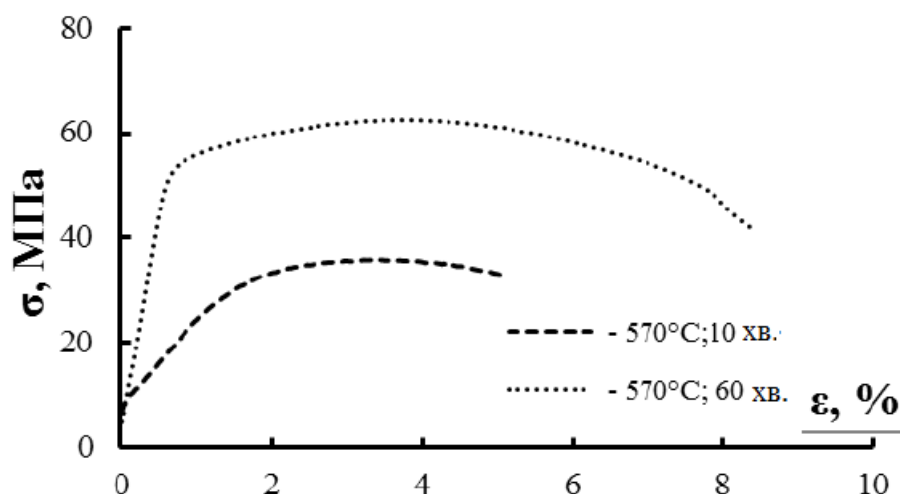


Рисунок 3.8 – Криві стиснення зразків спеченого композиту (Al-23Si)-40Sn

Таким чином, метод рідкофазного спікання дозволяє отримувати композити (Al-Si)-40Sn з різним вмістом кремнію, що мають досить міцний алюмінієвий каркас. Однак їх механічні характеристики та зносостійкість при сухому терті сталі не перевищували аналогічні значення, отримані в результаті спікання двофазного матеріалу Al-40Sn. Причиною цього є наявність у досліджуваних зразках (Al-Si)-40Sn залишкової пористості та дефектів на міжфазних межах.

Тому наступною метою цієї роботи було отримання високощільних композитів (Al-Si)-40Sn з рівномірним розподілом структурних елементів.

3.2 Вплив деформаційної обробки на структуру, механічні та трибологічні властивості спечених композитів (Al-Si)-40Sn.

У попередньому розділі було показано, що позбутися досить високої залишкової пористості в композитах «алюмінієвий сплав – 40 % олова» спіканням за розумний час витримки неможливо. В результаті їх зносостійкість при сухому терті поступалася зносостійкості щільного (менше 1 % пор) спеченого прототипу Al-40Sn, незважаючи на його менш міцну і тверду матрицю.

Зменшити пористість спечених зразків за рахунок їх високої щільності в сирому стані виявилось дуже складно, тому що через високу твердість порошків алюмінієвого сплаву для цього необхідно прикласти значний тиск пресування, при якому м'яка фаза починає видавлюватися в зазори між пуансоном і матрицею прес-форми призводити до заїдання пресового інструменту.

Одним із способів отримання високощільних композитів є подальша деформаційна обробка спечених зразків. У разі двофазних композитів Al-Sn високу ефективність показала обробка методом рівноканального кутового пресування (РККП), що дозволило значно збільшити механічні властивості та зносостійкість спечених матеріалів як за рахунок їх зміцнення, так і форми структурних елементів [22]. РККП здійснювали в прес-формі з перпендикулярними каналами рівного перерізу, де зразок відчував велику деформацію за одне пресування ($\varepsilon \approx 1,15$). У разі нелегованої алюмінієвої матриці матеріал має високу пластичність і був здатний витримувати значні деформації (до 4-х проходів) без руйнування зразка.

У нашому випадку, зразки з легованою кремнієм матрицею містили велику кількість твердих частинок Si, а також багато дефектних місць на міжфазних межах. Тобто композити (Al-Si)-40Sn, особливо з високим

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

вмістом кремнію, мали значно меншу пластичність в порівнянні з двофазним матеріалом. У результаті лише зразок (Al-0,5Si)-40Sn зміг витримати одноразове пресування методом РККП, тоді як композити (Al-12Si)-40Sn та (Al-23Si)-40Sn руйнувалися.

Виявилось, що проблему одержання високощільних композитів «алюмінієвий сплав – 40 % олова» можна вирішити шляхом гарячого доущільнення (ГД) спечених зразків у закритій прес-формі. У цьому випадку при пресуванні можна використовувати рідкі мастила, за допомогою яких ущільнити зпечені зразки виявилось набагато легше, ніж сирі суміші без мастила. До того ж, олово в процесі спікання розтеклося по пресуванні, і його прошарки між твердими алюмінієвими частинками виступали в ролі мастильних плівок. Також не маловажно, що стало можливим нагрівати зразки до високих температур без значного окислення матеріалу через закупорку багатьох порових каналів оловом. При цьому деформація, яку зазнають зразки при ГД, значно менша, порівняно з РККП. Гаряче доущільнення спечених композитів здійснювали за температури 200 °С, яка, як показали попередні дослідження [2], є оптимальною для деформаційної обробки сплавів Al-Sn. Для порівняння, спечені двофазні композити Al-40Sn також були піддані гарячому доущільненню при даній температурі.

У ході проведених досліджень було встановлено (таблиця 3.6), що така обробка призводить практично до повного зникнення пір і щілин міжфазних межах Al-Sn. Через війну пористість всіх досліджуваних зразків вбирається у 0,1 %. На рисунку 3.9 видно, що після ГД макроструктура спечених композитів стала одноріднішою, олов'яні прошарки обжаліся і стали помітно тоншими. І якщо у випадку обробки крупнозернистого композиту Al-40Sn вони помітно сплющились, то в більш дрібнозернистих зразках (Al-Si)-40Sn крім цього спостерігається ще й подрібнення олов'яних включень за рахунок зсуву дрібних алюмінієвих частинок відносно один одного в напрямку пресування.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Таблиця 3.6 – Значення пористості та механічні властивості спечених та підданих деформаційній обробці композитів (Al-Si)-40Sn

Композит	Режим отримання	Пористість, %	Напруження течії σ_4 , МПа
Al-40Sn	(600 °C; 60 хв)	0,8	62
	(600 °C; 60 хв) + ГД 200 °C	$\leq 0,1$	80
	(600 °C; 60 хв) +1 РККП (200 °C)	$\leq 0,1$	108
(Al-0,5Si)-40Sn	(600 °C; 60 хв)	4,5	56
	(600 °C; 60 хв) + ГД 200 °C	$\leq 0,1$	107
	(600 °C; 60 хв) +1 РККП (200 °C)	$\leq 0,1$	129
(Al-12Si)-40Sn	(570 °C; 10 хв)*	6,5	62
	(570 °C; 120 хв)*	6,2	80
	(570 °C; 10 хв) * + ГД 200 °C	$\leq 0,1$	126
(Al-23Si)-40Sn	(570 °C; 60 хв)*	7,8	61
	(570 °C; 60 хв) * + ГД 200 °C	0,1	158

*Попередня витримка 1 годину при 550 °C

З таблиці 3.6 і наведених на рисунку 3.10 кривих стискування видно, що в результаті зазначених змін міцність спечених композитів після ГД значно підвищилася і тим помітніше, що більше у вихідному зразку було пор і кремнію. При цьому пластичність композитів, за винятком зразка складу (Al-23Si)-40Sn, залишилася на тому ж високому рівні (понад 16 %).

Таким чином, всі досліджувані композити (Al-Si)-40Sn після обробки мали більш високу міцність порівняно з двофазним матеріалом Al-40Sn, також підданим гарячому доущільненню і, отже, практично не містить пір. Наприклад, напруження течії гарячеущільненого композиту Al-40Sn при

стисненні його на 4% (σ_4) становили 80 МПа, а зразка (Al-0,5Si)-40Sn після ГД – 107 МПа. Міцність композитів (Al-12Si)-40Sn та (Al-23Si)-40Sn була ще вищою – 126 і 158 МПа, відповідно.

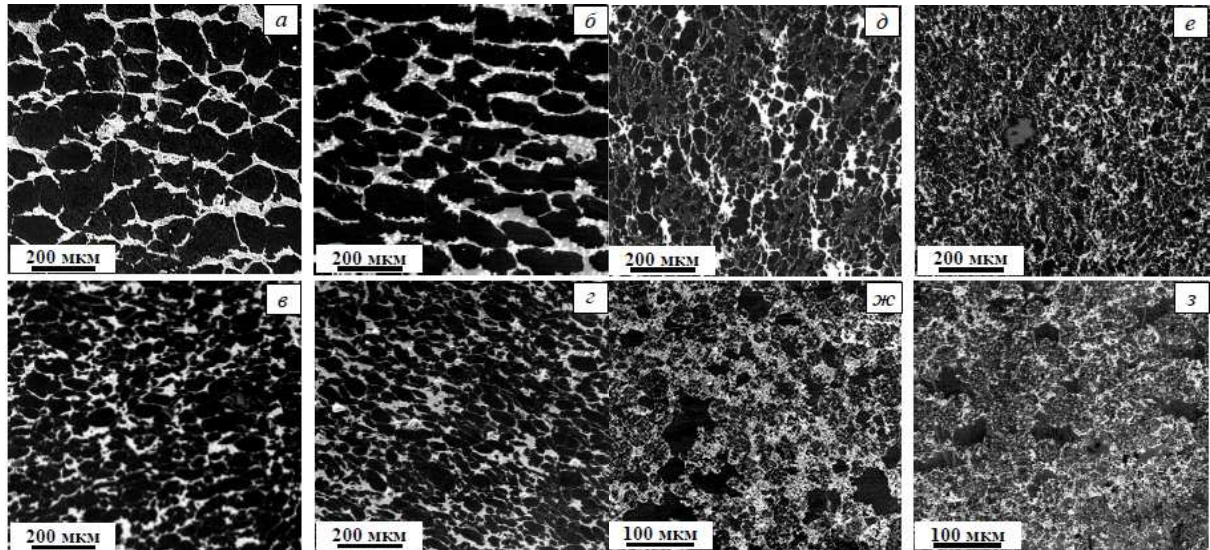


Рисунок 3.9 – Структура композитів Al-40Sn:

(а, б), (Al-0,5Si)-40Sn (в, г), (Al-12Si)-40Sn (д,е) та (Al-23Si)-40Sn (ж, з) після спікання (ліворуч) та доущільнення при 200 °С (праворуч), відповідно.
 Режим спікання: а-г - (600 °С; 1 год); д, е - (550 °С; 1 год + 570 °С; 10 хв); ж, з - (550 °С; 1 год + 570 °С; 60 хв)

Зазначимо, що міцність відлитого в кокіль сплаву Al₂ [23], що містить до 12 % кремнію, становить близько 150 МПа, а відносне подовження ≈ 4 %. Таким чином, досліджуваний спечений композит (Al-12Si)-40Sn показав хороший результат (126 МПа), якщо врахувати ще, що він містить 40 % м'якого олова, що не зміцнюється при кімнатній температурі.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

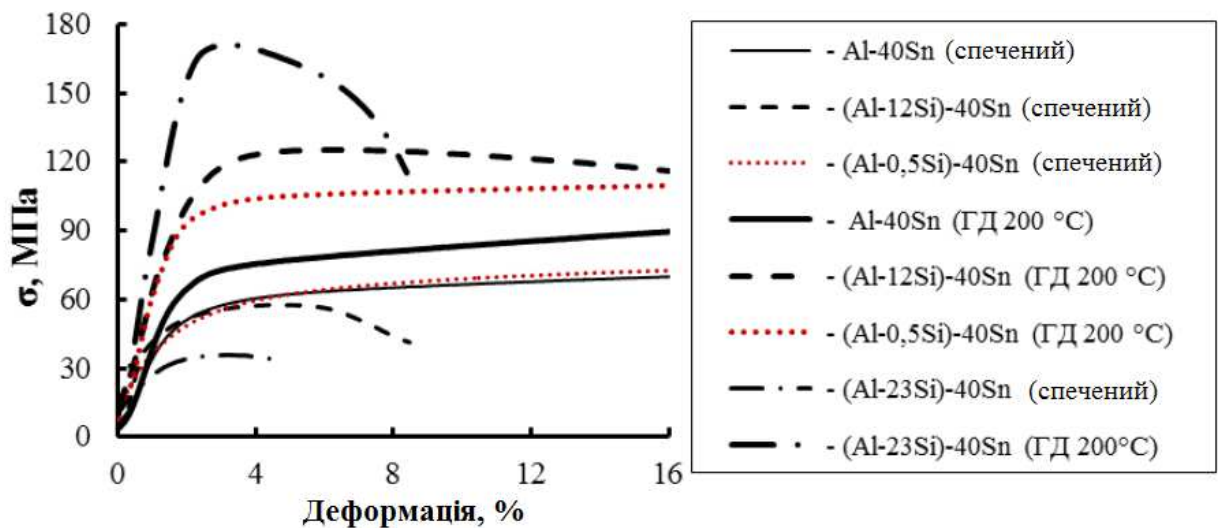


Рисунок 3.10 – Криві стиснення композитів (Al-Si)-40Sn після спікання та подальшого їх гарячого доущільнення при 200 °С

Усунення пір і слабких міжчастинних контактів за рахунок переміщення утворюють каркас твердих порошинок алюмінієвого сплаву призвело до того, що при випробуванні матеріалів на стиснення зерна матриці упираються один в одного і починають плющуватися. Випробувана ними деформація призводить до зміцнення зерен за рахунок накопичення в них ґратових дислокацій та підвищення напруги перебігу матриці композитів. У пористих композитах таке підвищення напруги течії обмежувалося через те, що пори і слабкі міжфазні кордони починали працювати як дислокаційні стоки вже при низьких навантаженнях на зразок. Пластичний перебіг зосереджувався в смугах зсуву, що містять велику концентрацію таких дефектів, викликало розтріскування матеріалу та руйнування зразків.

У разі зразків (Al-23Si)-40Sn пластичність їх після ГД практично не змінюється і становить приблизно 4 %. Справа в тому, що частинки кремнію при великих деформаціях починають руйнуватися через те, що мають нерівноважну форму, і на поверхні виникають концентратори напруги. Виникають при розтріскуванні частинок Si тріщини поширюються в зерна

матриці і викликають їхнє ослаблення. В результаті напруга течії композитів з великим вмістом кремнію в матриці починає знижуватися, і в міру розростання тріщин у матеріалі позитивний нахил кривої течії КМ змінюється на негативний.

Оскільки алюмінієві сплави схильні також і до деформаційного зміцнення, то для підвищення властивостей міцності можна піддати їх обробці методами інтенсивної пластичної деформації. Як було зазначено вище, як такий спосіб було обрано метод РККП. В результаті такої обробки композити з вмістом кремнію 12% і вище руйнувалися через недостатню пластичність. У разі зразка (Al-0,5Si)-40Sn вдалося здійснити одноразове деформування. На рисунку 3.11 показана отримана його структура у площині течії матеріалу. Видно, що в результаті РКУ обробки частинки алюмінієвої матриці, а також олов'яні включення витягнулися та витончелись.

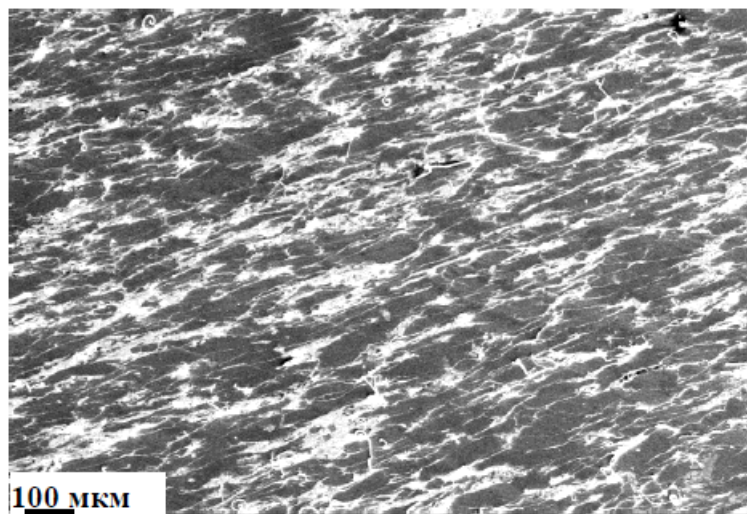


Рисунок 3.11 – Структура спеченого (600 °C; 1 год) композиту (Al-0,5Si) після одного РККП (200 °C). Площина малюнка – площина течії матеріалу

З кривих стискування рисунку 3.12 видно, що в результаті зазначених структурних змін обробка методом РККП призводить до ще більшому зміцненню композиту (Al-0,5Si)-40Sn, проти деформуванням методом гарячого доущільнення. Зауважимо, однак, що зміцнення композиту 100 мкм

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

після РККП супроводжується суттєвим зниженням пластичності до 6-8 %, внаслідок чого його не можна було піддавати повторним пресуванням з метою додаткового зміцнення.

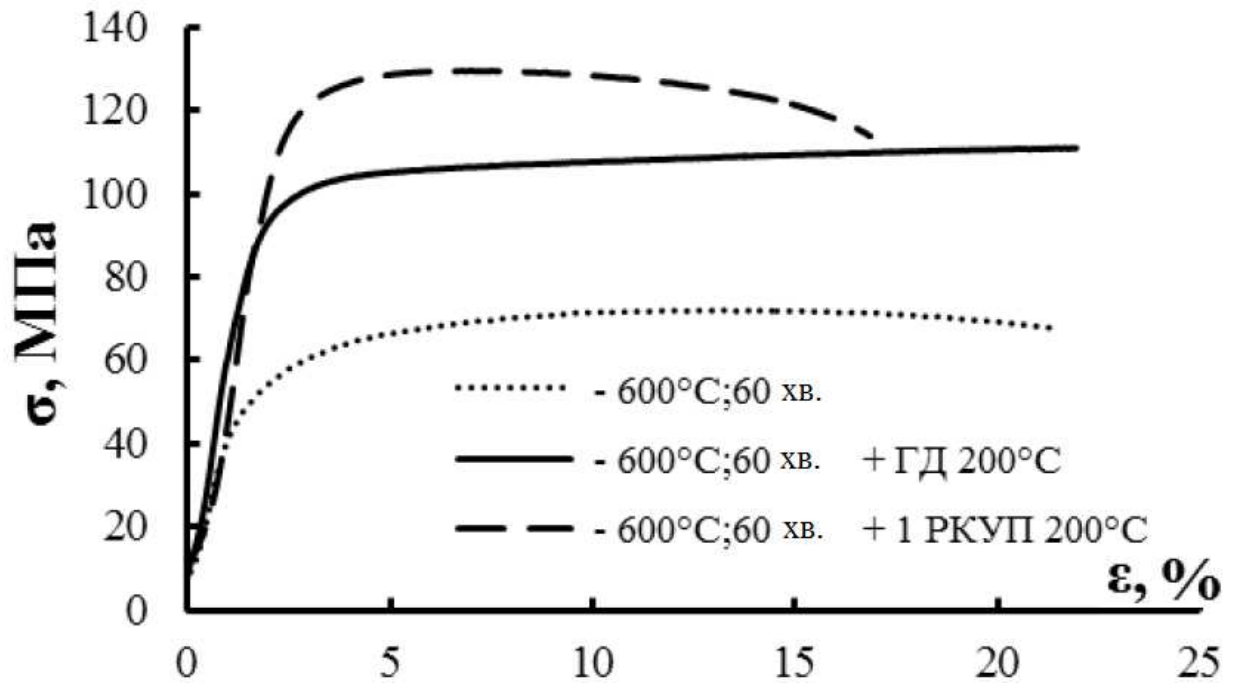


Рисунок 3.12 – Криві стиснення зразків композиту (Al-0,5Si)-40Sn після спікання та подальшої деформаційної обробки

У ході проведених випробувань було встановлено, що усунення зі спечених композитів концентраторів напружень типу пор і не суцільностей на межах зерен матриці призвело не тільки до підвищення їх міцності та пластичності, але і до поліпшення зносостійкості КМ в умовах сухого тертя сталі. Особливо помітний ефект деформаційної обробки при великому вмісті в композитах кремнію та високому тиску на поверхню тертя. Так, ущільнення зразка Al-40Sn з чистою алюмінієвою матрицею призвело лише до 10% поліпшення його зносостійкості, і лише при високому тиску 5 МПа (таблиця 3.7). Тоді як зносостійкість композиту (Al-12Si)-40Sn після тієї ж

обробки з усуненням пір зростає в 3 рази і майже на 20 % перевищує зносостійкість доущільненого композиту з чистою Al матрицею.

З даних у таблиці 3.7 даних також видно, що інтенсивність зношування (Ih) композиту (Al-0,5Si)-40Sn після його гарячого доущільнення знизилася при тиску 5 МПа приблизно на 30%. Після РККП обробки зносостійкість такого композиту стає вищою порівняно з доущільненим зразком, але тільки при тиску 5 МПа. Мабуть, цей факт пов'язаний з тим, що зі зростанням тиску зростає деформаційна складова зношування зразків, а зростання міцності композитів сприяє її зниженню.

Таблиця 3.7 – Результати триботехнічних випробувань при сухому терті сталі спечених і підданих деформаційній обробці композитів (Al-Si)-40Sn. Швидкість ковзання – 0,6 м/с, площа поверхні зразка – 4 мм²

Композит	Режим отримання	Інтенсивність зношування		
		Ih, мкм/м		
		1 МПа	3 МПа	5 МПа
Al-40Sn	(600 °C; 1 год)	0,13	0,20	0,29
	(600 °C; 1 год) + ДД 200 °C	0,13	0,20	0,26
(Al-0,5Si)- 40Sn	(600 °C; 1 год)	0,18	0,23	0,35
	(600 °C; 1 год) + ДД 200 °C	0,13	0,18	0,25
	(600 °C; 60 хв) + 1 РККП (200 °C)	0,13	0,18	0,23
(Al-12Si)- 40Sn	(570 °C; 10 хв)*	0,27	0,50	0,77
	(570 °C; 10 хв)* + ДД 200 °C	0,12	0,18	0,21
(Al-23Si)- 40Sn	(570 °C; 60 хв)*	0,14	0,41	тріснув
	(570 °C; 60 хв)* + ДД 200 °C	0,14	0,25	0,39

*Попередня витримка 1 годину при 550 °C

Таким чином, ущільнення композитів з легованою кремнієм матрицею та подрібнення їх структури зробило опір даних матеріалів стирання при сухому терті ефективнішим, ніж у вихідного прототипу Al-40Sn. При цьому видно, що вклад кремнієвих частинок у зносостійкість композитів великий. Так, напруження течії при деформації на 4 % КМ з матрицею (Al-12Si) після гарячого доущільнення була вищою, ніж у випадку зразка з матрицею (Al-0,5Si), як, відповідно, і зносостійкість при сухому терті. Тобто, усунення пір та інших слабких місць підвищує механічні властивості композиту та міцність закріплення твердих частинок кремнію у матриці. У свою чергу, тверді частинки не дозволяють поверхневим нерівностям контртіла проникати глибоко в алюмінієву матрицю і товщина шару, що деформується, знижується. Чим більша концентрація таких частинок, тим тонше шар, що деформується. Це добре видно з порівняння фотографій на рисунку 3.13. зразка з 12% кремнію гладка навіть за високого тиску, тоді як поверхня малолегованого зразка містить безліч канавок відтісненого матеріалу.

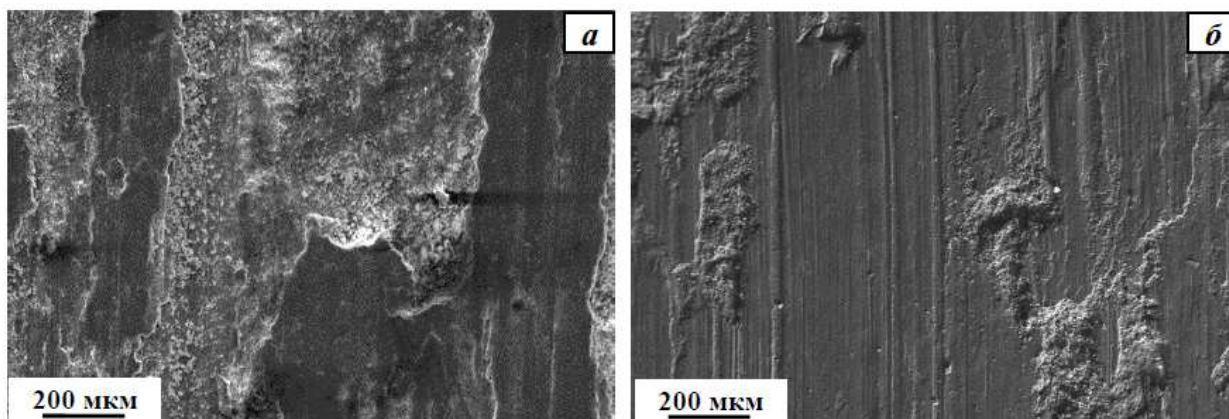


Рисунок 3.13 – Поверхня тертя спечених і гарячих допресування композитів:

(Al-12Si)-40Sn (а) і (Al-0,5Si)-40Sn (б). Тиск – 5 МПа.

Швидкість ковзання – 0,6 м/с

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

У свою чергу, композит (Al-23Si)-40Sn, не дивлячись на значну кількість твердих частинок, мав низьку пластичність. В результаті при низькому тиску 1 МПа він показував хороший опір зношування при сухому терті, тоді як при високих тисках під впливом нерівностей контртіла пластичність поверхневого шару композиту швидко вичерпувалося, і зношування зразка значно збільшувався. Гаряче доуцільнення спеченого зразка (Al-23Si)-40Sn сприяло значному збільшенню його зносостійкості, проте значення І_h було помітно більшим у порівнянні з композитами (Al-Si)-40Sn, що містять значно меншу кількість частинок кремнію.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

ВИСНОВКИ

1. Рідкофазне спікання пресувань із суміші порошків сплавів (Al-Si) та 40 мас. % олова призводить до суттєвого підвищення пластичності зразків, але не дозволяє значно знизити їх пористість. У результаті, механічні властивості та зносостійкість при сухому терті композитів (Al-Si)-40Sn поступалися значенням щільного (менше 1 % пор) спеченого прототипу Al-40Sn, незважаючи на його менш міцну та тверду матрицю.

2. Доущільнення при підвищеній температурі спечених композитів (Al-Si)-40Sn у закритій прес-формі призводить до значного зниження їх пористості та підвищення міцності при випробуванні на стиск.

3. Зі збільшенням вмісту кремнію міцність підданих гарячому доущільнення композитів (Al-Si)-40Sn збільшується, а пластичність знижується.

4. Інтенсивність зношування спечених композитів (Al-Si)-40Sn при сухому терті сталі значно знижується, якщо їх попередньо піддати гарячому доущільненню. Зі збільшенням вмісту в зразках кремнію до 12 % їх зносостійкість зростає та перевищує її значення, одержані у разі двофазного композиту Al-40Sn.

5. Спечені композити (Al-12Si)-40Sn та (Al-23Si)-40Sn руйнуються при їх інтенсивної пластичної деформації методом рівно канального пресування через низьку пластичність. У той час як у результаті такої обробки міцність і зносостійкість при сухому терті сталі зразка (Al-0,5Si)-40Sn значно зростають і перевищують значення, отримані у разі матеріалу, підданого гарячому доущільненню.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Trusov P.V., Volegov P.S. Crystal plasticity theories and their applications to the description of inelastic deformations of materials. Part 1: rigid-plastic and elastoplastic theories // PNRPU Mechanics Bulletin. 2011. № 1. P. 5–45.
2. Kelly A., Davies G.J. The principles of the fiber reinforcement of metals // Metallurgical Reviews. 1965. V. 10. № 1. P. 1–77.
3. Liu X., Zeng M.Q., Ma Y., Zhu M. Wear behavior of Al-Sn alloys with different distribution of Sn dispersoids manipulated by mechanical alloying, Wear, 2008, 265, 1857-1863.
4. Noskova N.I., Korshunov A.G., Korznikov A.V. Microstructure and tribological properties of Al-Sn, Al-Sn-Pb, and Sn-Sb-Cu alloys subjected to severe plastic deformation, Metal science and heat treatment, 2008, 50(11-12), 593-599.
5. YuanG.-C., ZhangX.-M., LouY.-X., LiZ.-J. Tribological characteristics of new series of Al-Sn-Si alloys // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2003. – Vol. 13. –№ 4. – P. 774–780.
6. Dayanand M. Goudar K. Raju S. N. Ojha. Investigation on the Wear Behavior of Spray Formed Al–35Si–4Fe Alloy// Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2015. – 68(6). – P. 1001–1005.
7. Dayanand M. Goudar, V. C. Srivastava, G. B. Rudrakshi, K. Raju, S. N. Ojha. Effect of Tin on the Wear Properties of Spray Formed Al–17Si Alloy// Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2015. – 68(Suppl 1):S3–S7
8. M. Chena, T. Perry, A.T. Alpas. Ultra-mild wear in eutectic Al–Si alloys // ScienceDirect. – Wear 263 (2007) 552–561

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк. 80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Kryachek V.M. Sintered metals and alloys friction Composites: Traditions and New Solutions (review). II. Composite materials // Powder metallurgy and Metal Ceramics. – 2005. – Vol. 44. – Nos. 1-2. – P. 5-15.

10. Marrocco T., Driver L.C., Harris S.J., and McCartney D.G. Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Al-Sn-Based Alloys for Plain Bearing Applications // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – Vol. 15(4). – P. 634-639.

11. Nuruzzaman D.M., Chowdhury M.A. Friction coefficient and wear rate of copper and aluminum sliding against mild steel // International Transaction 158 Journal of Engineering, Management, and Applied Sciences and Technologies. – 2013. – V. 4. – P. 29-40.

12. Finkin E.F. Adhesive wear: a general review of the state of experimental knowledge and theory // Materials Engineering and Applications. – 1979. – № 1. – P. 154–161

13. Osorio W.R, Spinelli J.E., Cheung N., Garcia A. Secondary dendrite arm spacing and solute redistribution effects on the corrosion resistance of Al– 10 wt% Sn and Al–20 wt% Zn alloys // Mater. Sci. Eng. A. – 2006. – Vol. 420. – P. 179-186.

14. Savaskan T., Bican O. Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al–25Zn–3Cu–(0-5)Si alloys in the As-Cast and Heat-Treated Conditions // Tribol. Lett. – 2010. – Vol. 40. – № 3. – P. 327-336.

15. Kurbatkin I.I., Belov N.A., Ozerskiy O.N., Muravyeva T.I., Stolyarova O.O., and Alabin A.N. Tribological and Structural Study of New Aluminum-Based Antifriction Materials // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35. – № 2. – P. 93-97.

16. Pathak J.P. and Mohan S. Tribological behavior of conventional Al-Sn and equivalent Al-Pb alloys under lubrication // Bull. Mater. Sci. – 2003. – Vol. 26. – № 3. – P. 315-320

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

17. Rashmi Mittal, Aruna Tomar, and Devendra Singh. Wear Behavior of Disk Shape Spray Formed Al-Si-Pb Alloys // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 23. – Issue 3. – P. 975-981

18. Avraamov Yu.S., Kravchenkova I.A., Kravchenkov A.N., Korolev S.Yu., Novoselov R.A., Shlyapin A.D. Method of Obtaining Antifriction Al-Zn-Sn Alloy // Mechanical Industry and Engineering Education. – 2012. – № 1. – P. 7-10.

19. Xu K., Wongpreedee K., Russell A.M. Microstructure and strength of a deformation processed Al-20%Sn in situ composite // Journal of materials science. – 2002. – Vol. 37. – P. 5209-5214.

20. Hernandez O., Gonzalez G. Microstructural and mechanical behavior of highly deformed Al-Sn alloys // Materials characterization. – 2008. – Vol. 59. – P. 534-541.

21. Segal. V.M. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation // Mater. Sci. Eng. – 1999. – Vol. 271A. – P. 322-333.

22. Rusin N.M., Skorentsev A.L. Improving the Tribological Properties of Self-lubricating Al-Sn Alloys by their Severe Plastic Processing. Applied Mechanics and Materials, 2013, Vol. 379, pp. 110

23. Є.Г. Афтандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. Матеріалознавство: Підручник. К.: Вища освіта, 2012.- с 548.

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

ДОДАТКИ

					ДРМТВАТАМ 23.18099.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83