

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну  
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»  
(повне найменування кафедри)

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

магістра  
(ступінь вищої освіти)

на тему **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ  
АЛЮМО-СВИНЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ  
МАТЕРІАЛІВ**

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-212м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Композиційні та порошкові матеріали,  
покриття»

МІТЯЄВ О.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц. САВЧЕНКО В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. КАПУСТЯН О.  
(прізвище та ініціали)

2023

14.12.2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну  
 Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»  
 Ступінь вищої освіти магістр  
 Спеціальність 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування)  
 Освітня програма (спеціалізація) «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр МІТЯЄВ

« 17 » 10

2023 року

**З А В Д А Н Н Я**

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

МІТЯЄВА Олександра Олександровича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Розробка технології отримання алюмо-свинцевих композиційних матеріалів»

керівник проєкту (роботи) Віра САВЧЕНКО, к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 17 » 10 20 23 року № 391

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 18 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) висхідні властивості складових композиційного матеріалу; призначення, умови експлуатації та області застосування; обладнання та устаткування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальна характеристика пористих матеріалів. 2. Основні способи отримання пористих матеріалів. 3. Визначення мети та задач роботи. 4. Матеріали та методики, використані у дослідженні. 5. Розробка технології виготовлення Al-Pb композитів. 6. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	приймав виконане завдання
Технічні	САВЧЕНКО В.О., к.т.н., доц.	<i>С.В.Савченко</i>	<i>С.В.Савченко</i>
	АКІМОВ І.В., к.т.н., доц.	<i>І.В.Акімов</i>	<i>І.В.Акімов</i>
Нормоконтроль	САВЧЕНКО В.О., к.т.н., доц.	<i>С.В.Савченко</i>	<i>С.В.Савченко</i>

7. Дата видачі завдання « 17 » 10 2023 року.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	23.10.2023	<i>С.В.Савченко</i>
2	Загальна характеристика порис- тих матеріалів.	17.11.2023	<i>С.В.Савченко</i>
3	Матеріали та методика дослід- ження.	24.11.2023	<i>С.В.Савченко</i>
4	Розробка технології виготовлення Al-Pb композиту	08.12.2023	<i>С.В.Савченко</i>
5	Висновки	12.12.2023	<i>С.В.Савченко</i>
6	Перелік джерел посилань	15.12.2023	<i>С.В.Савченко</i>

Студент(ка)

*Митяев*  
(підпис) Олександр МІТЯЄВ  
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

*С.В.Савченко*  
(підпис) Віра САВЧЕНКО  
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Робота складається з 48 сторінок, 16 рисунків, 4 таблиць, 15 джерел.

Об'єкт досліджень – процеси створення алюмо-свинцевих композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – фізико-механічні властивості алюмо-свинцевих композитів.

Мета роботи – розробка технології виготовлення алюмо-свинцевих композиційних матеріалів, що призначені для використання у важконавантажених підшипниках ковзання, та порівняння їхніх фізико-механічних властивостей з традиційно застосовуваними матеріалами.

Метод дослідження – композиційний з використанням стандартних методик, що викладені у нормативній літературі.

У дипломній роботі розглядається питання створення композитів на основі пінометалів з відкритою пористістю; висвітлюються питання отримання каркасного матеріалу та подальше його просочування антифрикційним матеріалом; порівнюються показники фізико-механічних властивостей дослідних зразків з традиційними матеріалами.

Виконана дипломна робота включає такі складові: літературний огляд технічної інформації за темою дипломної роботи; опис характеристик матеріалів і технологій, що пов'язані зі створенням композиційних матеріалів; методики, що застосовували в процесі дослідження; оброблення експериментальних даних; висновки.

ПІНОМЕТАЛИ; КОМПОЗИТ; АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ;  
ПРОСОЧУВАННЯ; ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ;  
ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

## ABSTRACT

The research work consists of 48 pages, 15 figures, 4 tables, 15 sources.

The object of research work is the processes of creating aluminum-lead composite materials.

The subject of research is physical and mechanical properties of aluminum-lead composites.

The purpose of the work is to develop a technology for the production of aluminum-lead composite materials intended for use in heavy-duty sliding bearings, and to compare their physical and mechanical properties with traditionally used materials.

The research method is composite using standard methods outlined in normative literature.

The research work examines the issue of creating composites based on foam metals with open porosity; issues of obtaining frame material and its subsequent impregnation with antifriction material; the indicators of physical and mechanical properties of prototypes are compared with traditional materials.

The completed research work includes the following components: a literary review of technical information on the topic of the thesis; description of the characteristics of materials and technologies associated with the creation of composite materials; methods used in the research process; processing of experimental data; conclusions.

PO3FOAM METALS; COMPOSITE; ANTI-FRICTION MATERIALS; SEEPAGE; PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES; WEAR RESISTANCE

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначок, одиниць і термінів.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1 Конструкційні пористі матеріали.....	9
1.1 Загальна характеристика пористих матеріалів.....	9
1.2 Основні показники та області застосування найбільш розповсюджених пористих матеріалів.....	11
1.3 Основні способи отримання пористих матеріалів на основі алюмінію.....	14
1.4 Визначення мети та задач роботи.....	21
Розділ 2 Матеріали та методики, використані у дослідженні.....	22
2.1 Вибір матеріалів та їхні характеристики.....	22
2.2 Лабораторні плавки.....	23
2.3 Контроль хімічного складу.....	24
2.4 Визначення фізико-механічних властивостей.....	24
2.5 Визначення зносостійкості.....	25
Розділ 3 Розробка технології виготовлення алюмо-свинцевих підшипників .....	28
3.1 Умови роботи підшипників і вимоги до них.....	28
3.2 Розробка оснащення необхідного для виготовлення Al - Pb композиційного матеріалу.....	30
3.3 Відпрацювання технологічних режимів виготовлення каркасу Al – Pb композиту.....	31
3.4 Розробка технології завершальної стадії отримання Al – Pb композиту.....	37
3.5 Дослідження властивостей Al – Pb композитів.....	43
3.6 Економічні показники виготовлення Al – Pb композиту.....	45
Висновки.....	46
Перелік джерел посилань.....	47

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ**

ПМ – пористі матеріали;

PPI (англ. Pores Per Inch) – середня кількість пор на один дюйм довжини;

$\rho$  – густина матеріалу;

$\rho_s$  – густина матеріалу з якого сформовано стінки пор;

$m$  – величина пористості;

$T_{пл}$  – температура плавлення;

$\sigma_{0,2}$  – умовна границя текучості;

$R_a$  – шорсткість робочої поверхні;

$I$  – інтенсивність зношування;

$T_c$  – температура солідус;

$T_l$  – температура ліквідус;

МК-2 – рафінувально-модифікувальний комплекс;

$T_k$  – температура попереднього нагріву кокілю;

$T_z$  – температура антифрикційного матеріалу при його заливанні;

$r$  – коефіцієнт кореляції;

$\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання.

## ВСТУП

Розвиток способів отримання матеріалів з високою міцністю та малою вагою є вкрай актуальною задачею. Традиційно, з метою досягнення високої міцності сплаву, до основного металу додають легувальні елементи, котрі в структурі матеріалу утворюють зміцнювальні фази. Фази, що утворюються, мають певну визначену густину та не забезпечують зниження маси матеріалу. Одним з дієвих способів зниження щільності матеріалу при збереженні високих питомих показників механічних характеристик є введення до його об'єму дефектів структури, таких як пори. Матеріали, що мають таку структуру, називаються піноматеріалами. Піноматеріали – новий клас конструкційних матеріалів, що поєднують низьку густину з новим рівнем фізичних, механічних, теплових, електричних, акустичних і інших властивостей.

Відомо, що алюмінієві сплави характеризуються доволі добрими опором втомі, корозійною стійкістю в мастилах, непоганими показниками задиростійкості, гарними антифрикційними властивостями та високою теплопровідністю. З появою важконавантажених двигунів в авто- та тракторобудуванні, транспортному машинобудуванні, енергетиці та інших галузях промисловості з'явилася гостра потреба у підшипниках, що мають високу задиростійкість та характеризуються комплексом властивостей, котрі, значною мірою, притаманні алюмінієвим сплавам. У зв'язку з цим, у промисловості з'явилась тенденція до заміни антифрикційних сплавів на свинцевій та олов'яній основах на алюмінієві.

На сьогодні розглядається спосіб виготовлення алюмо-свинцевих підшипників ковзання сутність котрого полягає в попередньому отриманні алюмінієвої заготовки з визначеним рівнем відкритої пористості, що в подальшому, крізь пори, заповнюється розплавом свинцю або сплавів на його основі.

## РОЗДІЛ 1

### КОНСТРУКЦІЙНІ ПОРИСТІ МАТЕРІАЛИ

#### 1.1 Загальна характеристика пористих матеріалів

На сьогодні традиційні конструкційні матеріали вже дуже досконало дослідженні та майже вичерпали всі свої потенційні можливості на шляху підвищення фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей.

Науково-технічні співробітники багатьох розвинених країн світу бачать нові можливості та перспективу у розробці, дослідженні та впровадженні нового класу конструкційних матеріалів – пористих.

Пористі матеріали мають складну макро- та мікроструктуру, від яких на пряму залежить комплекс фізико-механічних і експлуатаційних властивостей. В свою чергу, структура таких матеріалів визначається способом отримання пор. Макроскопічні морфологічні характеристики, такі як розмір і форма пор, кривизна стінок комірок значною мірою визначають і впливають на рівень властивостей.

Основними характеристиками, що визначають фізико-механічні властивості пористих матеріалів (ПМ), є фізико-механічні властивості матеріалу стінок пор, відносна густина пористих матеріалів:  $\rho/\rho_s$ , а також структура пор (відкриті або закриті пори). Також замість відносної густини для характеристики ПМ використовується величина пористості (1):

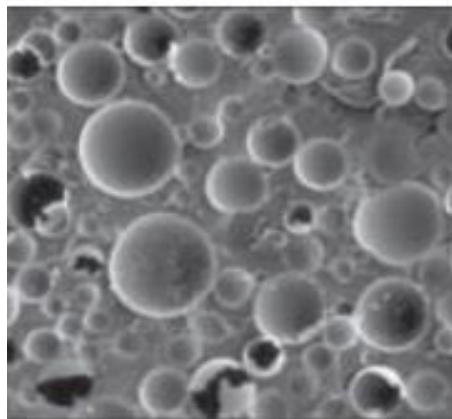
$$m = 1 - \rho/\rho_s, \quad (1)$$

де  $\rho$  - густина ПМ,  $\rho_s$  – густина матеріалу з якого сформовано стінки пор.

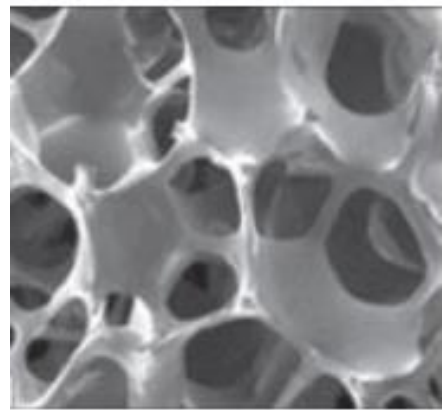
Також, пористість може вимірюватись величиною, що позначається PPI (англ. Pores Per Inch) – середня кількість пор на один дюйм довжини. Пористість може бути від 10 (розмір пори приблизно 2,5 мм, площа вільної

поверхні приблизно  $700 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) до 100 (розмір пори близько 0,25 мм, площа вільної поверхні понад  $5000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ).

Отримання пористих матеріалів з різною конфігурацією пор, що забезпечується різноманітними технологіями їхнього виготовлення, дозволяють змінювати не тільки густину, а також технологічні та експлуатаційні властивості, іноді до протилежних. Наприклад, пористий матеріал, що має пористість 50...80 % і закриті пори (рис. 1.1, а), забезпечує теплоізоляційні властивості, а той же матеріал з пористістю 35...95 % і відкритими порами (рис. 1.1, б) дозволяє виконувати теплообмін [1]. Цю властивість використовують при виготовленні компактних теплообмінних виробів. Пористі матеріали мають низьку гігроскопічність (1...3 %), що обумовлює високу холодостійкість і відсутність тріщин при значних коливаннях температурного режиму.



а



б

а – закрита пористість; б – відкрита пористість

Рисунок 1.1 – Матеріал з різним видом пористості

Пористі матеріали завдяки комірчастій структурі характеризуються нелінійною поведінкою при деформації. Ця властивість забезпечує високу здатність до демпфування ударних навантажень, а також визначає підвищений рівень жорсткості порожнистих профілів.

Пористі матеріали зберігають основні переваги вихідного матеріалу, однак при цьому мають у багато разів нижчі тепло- і електропровідність, а їхнє

звукопоглинання і демпфувальна здатність вища, ніж у металу стінок комірок. Також до переваг слід віднести те, що вони нетоксичні, термо- та біостійкі, не руйнуються при впливі паливно-мастильних речовин, розчинників, ультрафіолету та радіації. Такі матеріали добре опираються впливу відкритого полум'я.

Окреслені загальні риси, що притаманні порожнистим матеріалам, визначають області їхнього застосування для наступних виробів: фільтрувальні елементи; демпфери механічних, акустичних і електромагнітних імпульсів; сендвіч-панелі різного призначення (шумопоглинання, вогнетривкі та ін.); заповнювачі різних ємностей та порожнин; окремі конструктивні елементи. Порожнисті матеріали можуть бути з'єднаними за допомогою механічних методів, склеювання, паяння, дифузійним або електронно-променевим зварюванням.

Починаючи з 2000 року пористі матеріали інтенсивно виробляють в США, Євросоюзі, Японії. В Україні виробництво пористих матеріалів знаходиться на дослідному рівні та характеризується енергоємністю і високою вартістю.

## **1.2 Основні показники та області застосування найбільш розповсюджених пористих матеріалів**

На сьогодні найбільше розповсюдження та застосування отримали пористі матеріали на основі алюмінію, котрі в технічній літературі мають назву піноалюміній. Пористий алюміній може бути з відкритою або закритою пористістю. Сплави з відкритою пористістю утворюють просторову сітку, що являє собою ряд об'єднаних між собою порожнин. Матеріали з закритою пористістю характеризуються структурою, де пори являють собою замкнуті комірки, що в середині містять визначений газ. Густина зразків піноалюмінію,

що виготовляють у теперішній час, становить  $300 \dots 1900 \text{ кг/м}^3$ , що відповідає пористості  $m$  від 0,89 до 0,31.

Особливістю піноалюмінію, як конструкційного матеріалу, є його ізотропність та можливість добре опиратися ударним навантаженням під різними кутами прикладення навантаження. При поверхневій обробці тиском (прокатка, штампування, кування) міцність виробів з піноалюмінію значно підвищується. Піноалюміній без руйнування витримує значно вищі температури нагріву ( $> 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) у порівнянні з вихідним матеріалом ( $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Встановлено, що багатократні цикли «нагрівання – охолодження» значно не впливають на властивості піноалюмінію [1]. Відомі такі галузі найбільш широкого використання піноалюмінію: аерокосмічна, тракторна, військова, будівельна.

Застосування піноалюмінію у аерокосмічній галузі визначається здатністю матеріалу при мінімізації маси конструктивних елементів забезпечувати високий рівень питомої міцності. У зв'язку з тим, що доля алюмінію у конструкціях літальних апаратів та ракетної техніки може складати до 75 %, заміна суцільних матеріалів на пористі постає як перспективна і актуальна задача.

Сучасні тенденції розвитку транспортної галузі, як у громадському сегменті, так і військового призначення, демонструють постійно зростаючу роль питань безпеки водія, пасажирів, екіпажу, а також зменшення ваги транспортних засобів, що забезпечує покращення економічних і екологічних показників експлуатації. З метою зменшення витрат пального та ваги транспортних засобів багато фірм, що обслуговують автомобільну галузь, використовують багатошарові алюмінієві листи з алюмінієвою піною. Застосування їх у деталях корпусу дозволяє полегшити кузов на 50 % у порівнянні зі сталевим, а також забезпечити жорсткість до 15 разів вищу, ніж у звичайних сталевих листових конструкцій. При цьому навантаження на дорожнє полотно значно зменшиться, що подовжує терміни його надійності та довговічності.

Компанія “KARMANN GmbH” – світовий постачальник систем для автовиробників, активно займається розробкою нової технології виготовлення просторових піноалюмінієвих систем для автомобіля, котра дозволить здійснити революцію в технології виготовлення кузовних панелей (рис. 1.2).

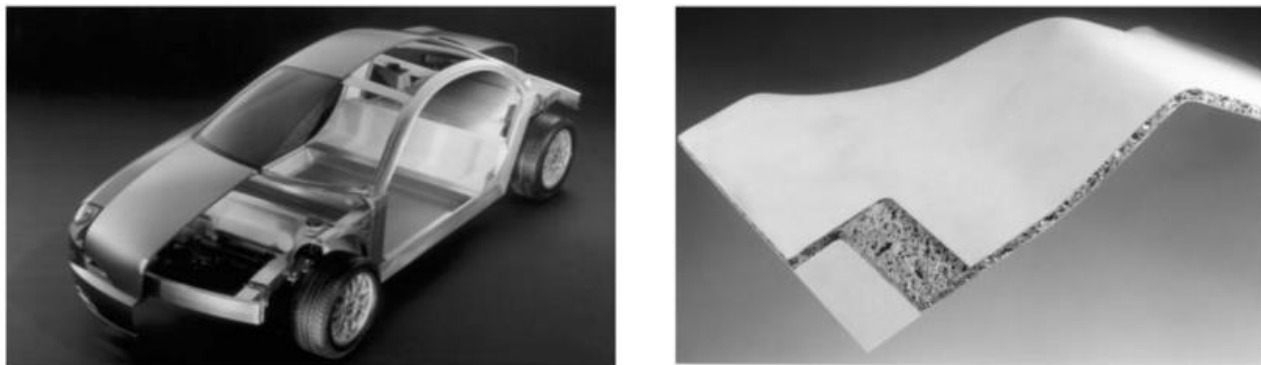


Рисунок 1.2 – Просторова піноалюмінієва конструкція кузова автомобіля компанії “KARMANN GmbH”.

Фірма “СУМАТ” (Канада) із піноалюмінію у вигляді профілів прямокутного перерізу виготовляє амортизатори дверей та аварійні перегородки для легкових автомобілів.

Фірма “NEUMAN ALUFOAM” (Австрія) виготовляє деталі кузова та ходової частини автомобілів, що працюють на згинання та кручення, для підсилення їхньої жорсткості, а також гасники бокових ударів, котрі розміщують у бокових дверях. Фірма констатує, що деталі із закритою зовнішньою оболонкою, котра оточує пористу структуру, забезпечує більшу жорсткість, ніж структури з відкритою пористістю. Піноалюміній, що застосовується фірмою у виробництві, має густину  $0,5...0,6 \text{ г/см}^3$ .

У бронетехніці піноалюміній знаходить застосування у формі багат шарових елементів для захисту днища бронемашин або інших її частин від руйнівної сили вибуху.

Фірма “ALULIGHT INTERNATIONAL GmbH” (Німеччина) використовує піноалюміній густиною  $300...1000 \text{ кг/м}^3$  для виготовлення: корпусних шумопоглинаючих деталей; електромагнітних екранів у вигляді настінних і

стельових плит (захист від опромінення електромагнітними хвилями частотою від 0,1 до 1000 МГц); корпусів електронних приладів; теплових екранів; шумогасників, що працюють у важких умовах (висока температура, вологість, пил, вібрація); гасників ударів для авто- та залізничного транспорту.

За даними багатьох джерел [1 - 7], пористість виробів із алюмінію з відкритими порами, найчастіше коливається в діапазоні від 55 до 67 %. Цей діапазон вважається оптимальним, тому що механічна поведінка такого матеріалу наближена до матеріалів з закритою пористістю, при одночасній наявності в нього високої жорсткості. При цьому міцність на стискання відповідає рівню показників матеріалів із закритою пористістю. Пористий алюміній має високо розвинену внутрішню поверхню, яка при густині матеріалу  $1,1 \text{ г/см}^3$  може становити за показниками від 1,0 до  $2,0 \text{ м}^2/\text{г}$ .

### **1.3 Основні способи отримання пористих матеріалів на основі алюмінію**

На сьогодні існує доволі багато різноманітних способів отримання пористого алюмінію. Розглянемо способи, що знайшли застосування у промислових масштабах.

#### 1. Вспінювання алюмінієвого розплаву.

Сутність даної групи методів полягає в тому, що крізь розплав металу продувають газ і, таким чином, відбувається диспергування алюмінієвого сплаву з утворенням газометалевої суміші. Частину утвореної таким чином газометалевої суміші безперервно відводять і охолоджують до затвердіння (рис. 1.3). З метою підвищення механічних характеристик можуть бути додані зміцнювальні частинки як у розплав у вигляді порошку (керамічні або інтерметалідні суміші), так і разом з газом у вигляді аерозолей.

При достатньо великих обсягах виробництва даний метод не є коштовним за собівартістю продукції та дозволяє отримувати піноалюміній з малою густиною, пористістю до 90 % та діаметром пор 1...20 мм. Відносна густина таких матеріалів складає 0,03...0,1.

На сьогодні цей метод використовують наступні компанії: “NORSK-HYDRO” (Норвегія), “ALCAN” (Канада) і “СУМАТ” (Канада).

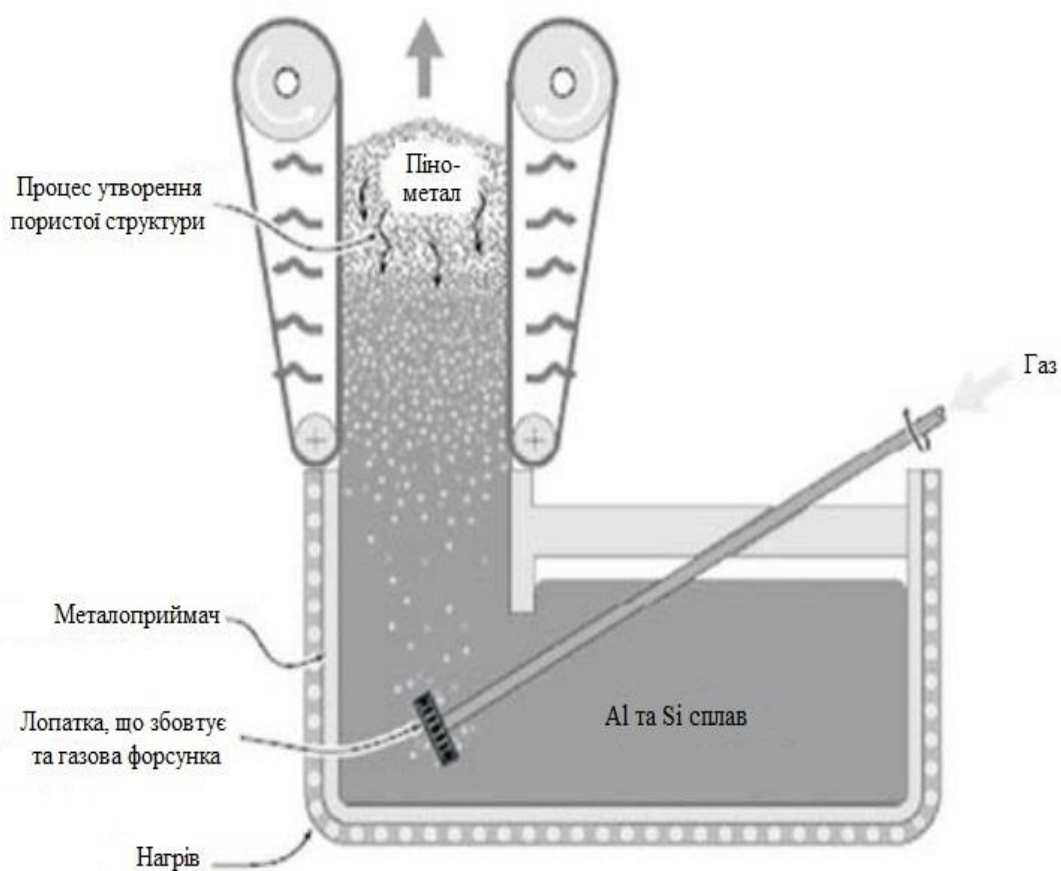


Рисунок 1.3 - Одержання піноалюмінію методом продування рідкого металу газом.

2. Додавання пороутворювальної речовини до розплаву алюмінієвого сплаву.

Сутність методу полягає в тому, що розплав алюмінієвого сплаву заливають у кристалізатор ковзання при одночасному додаванні пороутворювальної речовини (наприклад,  $TiH_2$ ). Швидкість формування зливку та його кінцеві характеристики регулюються температурою кристалізації розплаву та активністю пороутворювальної дії речовини, котра визначається її характеристиками та кількістю (рис. 1.4).

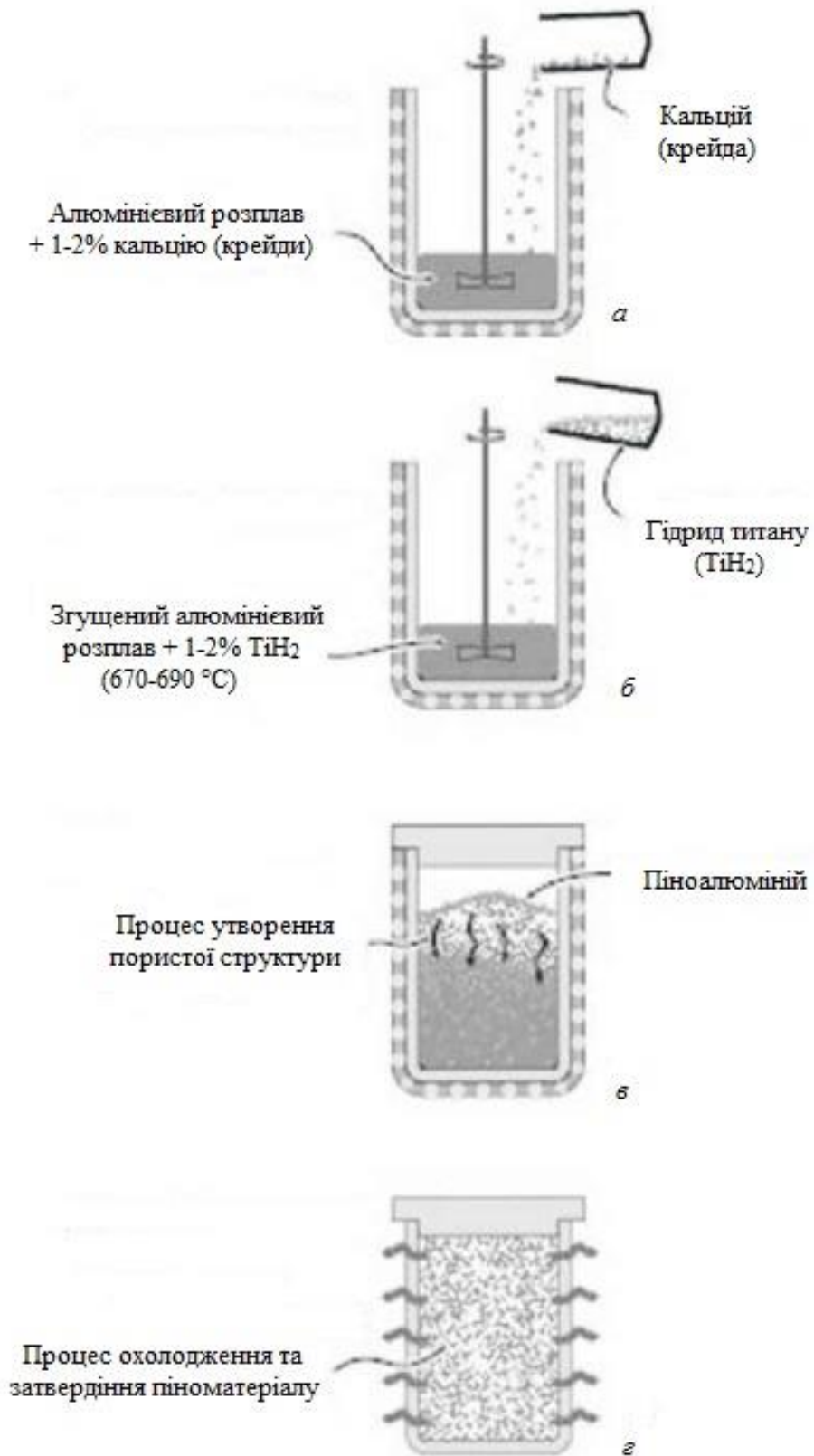
З метою інтенсифікації процесу, його стабільного протікання та отримання однорідного за густиною зливку, розплав піддають динамічному перемішуванню. До розплаву окрім пороутворювальних речовин можуть додавати армувальні частинки тугоплавких з'єднань дисперсністю до 20 мкм, з вмістом в об'ємі розплаву 5...15 %. Розмір пор при цьому методі виготовлення становить 0,5...5,0 мм.

Дану технологію виготовлення піноалюмінію у промислових масштабах впровадила компанія "SHINKO WIRE COMPANY" (Японія). Матеріал отримав назву "Alporas", його відносна густина становить 0,07...0,20.

### 3. Змішування порошків алюмінієвого сплаву та пороутворювальних речовин.

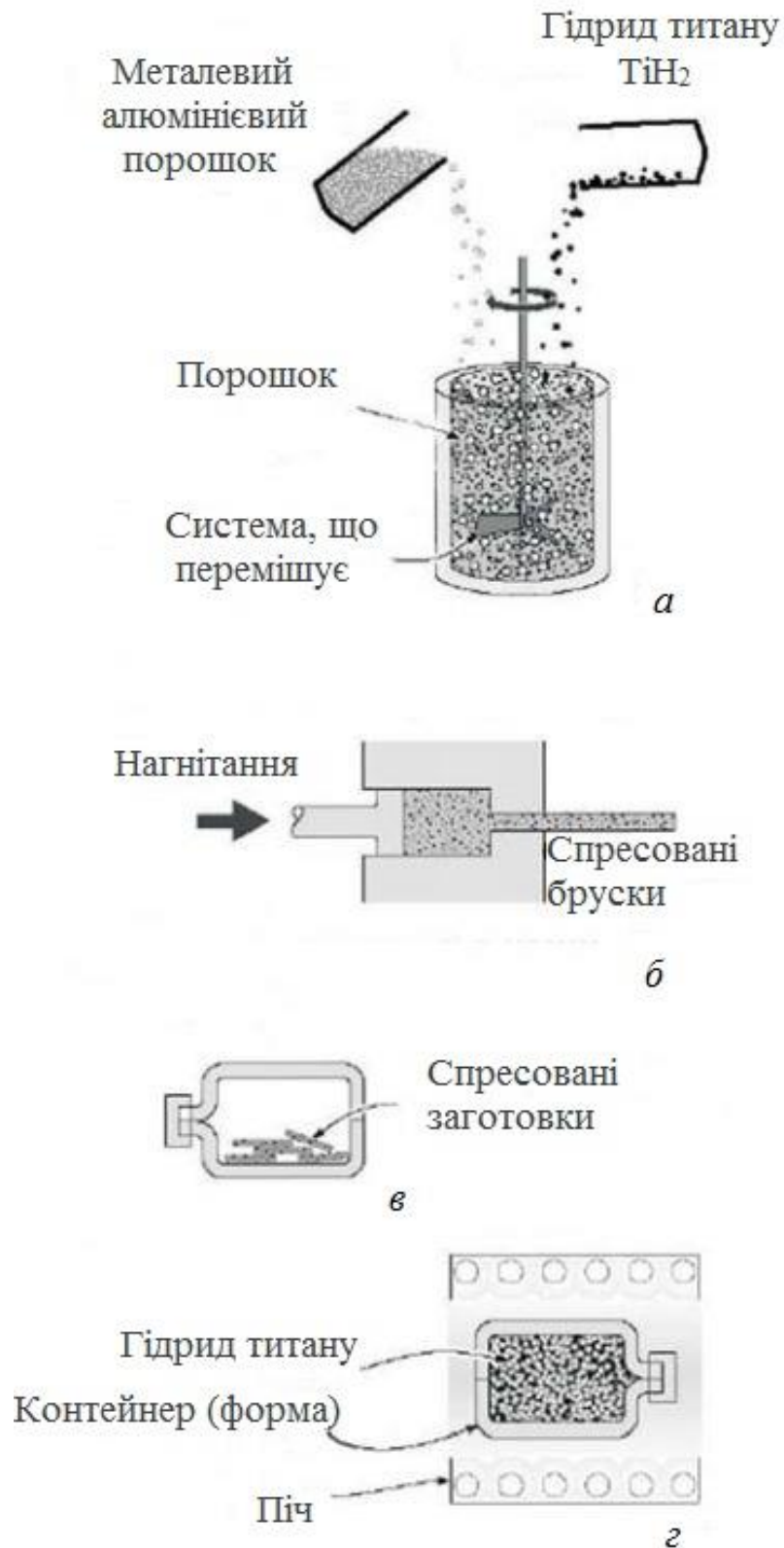
Сутність методу полягає в тому, що в холодному стані в певних концентраціях проводять змішування порошків алюмінієвого сплаву з порофорними речовинами. Після цього проводять пресування отриманої суміші у щільну заготовку. Виготовлену таким чином щільну заготовку розміщують у формі з діелектричного матеріалу, що зберігає свою геометрію і розміри при термічному обробленні (рис. 1.5).

Нагрівання заготовки при вспінюванні проводять індукційним способом з корисною питомою потужністю електричного нагрівання 20...40 кВт на 1 кг ваги заготовки. Після вспінювання охолодження виробу до температури солідуса проводять зі швидкістю 100...250 °C за хвилину. Отриманий матеріал має закриті пори з розмірами від 200 мкм та пористістю порядку 70...80 %. Основною продукцією даної групи є піноалюміній у вигляді плит, полуфабрикатів, рідше – виробів кінцевої форми.



а – підвищення в'язкості; б – введення гідриду титану; в – спінювання матеріалу; г – охолодження одержаного матеріалу.

Рисунок 1.4 – Метод отримання піноалюмінію з використанням гідриду титану

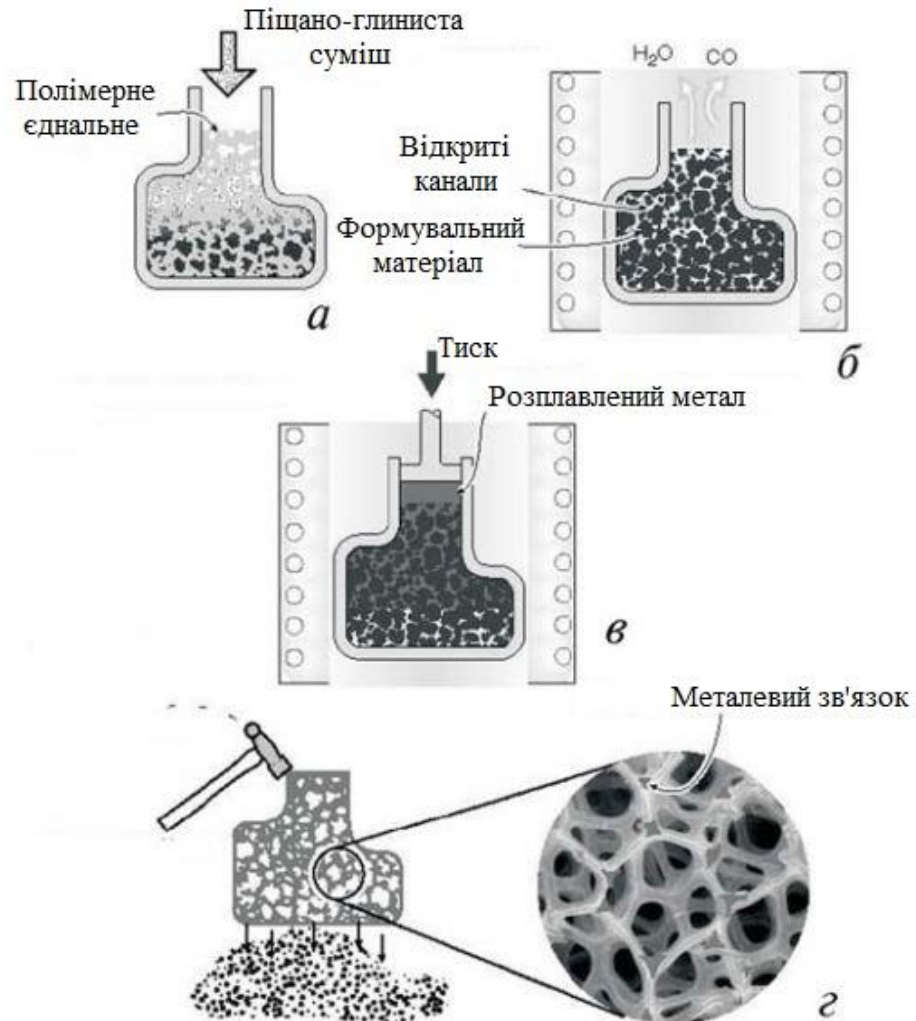


а – змішування порошоків; б – отримання заготовок пресуванням;  
в – завантаження заготовок до контейнеру; г – процес перетворення.

Рисунок 1.5 – Отримання піноалюмінію методом змішування алюмінієвого порошку та гідридом титану

#### 4. Отримання піноалюмінію методом лиття за витоплюваними моделями.

Сутність методу полягає у змішуванні в ливарній формі піщано-глинистої суміші та полімерного порошку з наступним вижиганням частинок полімеру та наповненням під тиском ливарної форми розплавленим металом (рис. 1.6).



а – підготовче формування; б – випалювання; в – просочування металом;  
г – видалення формувального матеріалу

Рисунок 1.6 – Отримання піноалюмінію методом лиття за моделями, що виплавляються

Даний метод нагадує традиційний метод лиття за витоплюваними моделями і дає можливість отримати матеріал, що має структуру з відкритими порами, розміри яких в діаметрі 1...5 мм та відносною густиною до 0,05.

### 5. Лиття алюмінієвого сплаву у форму з водорозчинними речовинами.

Дана група способів застосовується для виготовлення матеріалів з відкритою пористістю. Формування пор відбувається за допомогою гранул з водорозчинних солей, які залежно від конфігурації виробу збираються у спеціальній приспособі, що виконує роль стрижневого ящика. У якості матеріалу гранул застосовують наступні водорозчинні солі: хлорид натрію, хлориди кальцію та барію, фторид калію. З метою покращення поруватої структури виробів, в якості пороутворювальних речовин можуть бути використані бромід або йодид кальцію, а також барію. Також у якості пороутворювальних речовин можливе використання водорозчинних гранул із суміші соди і желатину в співвідношенні: сода 95,0...99,5 %; желатин 0,5...5,0 %.

Після складання певної заданої конфігурації пороутворювального блоку у приспособі, складений блок завантажують до ливарної форми. Далі виконують заливання ливарної форми розплавом алюмінієвого сплаву за умов градієнту надлишкового тиску величиною від 0,02 МПа. Рідкий метал заповнює порожнини ливарної форми, повторює зовнішню конфігурацію пороутворювального блоку і формує при цьому суцільнометалевий каркас майбутнього виробу. Після кристалізації і охолодження вилівка за допомогою води, шляхом розчинення та вимивання, видаляють пороутворювальний блок, а металеву частину за необхідністю механічно обробляють.

Інші методи отримання алюмінієвих піноматеріалів не знайшли промислового застосування та у зв'язку з їхньою обмеженою можливістю використання та складністю реалізації нами не розглядалися.

## 1.4 Визначення мети та задач роботи

У зв'язку з тим, що за останні десятиліття різко підвищилися швидкості та швидкості на підшипниках двигунів та різних парах тертя, гостро постала задача забезпечення механічної міцності підшипникових сплавів. Деталі виготовлені з цих матеріалів, повинні мати: низький коефіцієнт тертя, добру припрацьовуваність, високу теплопровідність і теплоємність, здатність утримувати на своїй поверхні мастильний шар, малу здатність до «схоплювання» з деталлю, що працює у парі, а також високу задиростійкість і корозійну стійкість.

Таким чином, звичайний підшипниковий матеріал повинен бути одночасно і твердим для зменшення коефіцієнту тертя, і пластичним та м'яким, щоб забезпечити припрацьовуваність у разі невідповідності форм вкладишу та валу. Таке поєднання протилежних властивостей можливо забезпечити шляхом застосування композиційних матеріалів.

Метою роботи є розробка технології виготовлення композиційних алюмо-свинцевих підшипників ковзання, які за рахунок поєднання та раціонального врахування всіх вимог, забезпечать підвищений рівень експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- на підставі аналізу методів отримання піноматеріалів, визначити раціональний метод попереднього отримання алюмінієвої каркасної заготовки з визначеним рівнем відкритої пористості;
- дослідити можливість заповнення відкритих пор алюмінієвої каркасної заготовки підшипниковим сплавом;
- визначити оптимальні технологічні режими отримання композиційного алюмо-свинцевого підшипника ковзання;
- здійснити дослідницько-промислові випробування результатів роботи.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ, ВИКОРИСТАНІ У ДОСЛІДЖЕННІ

#### 2.1 Вибір матеріалів та їхні характеристики

В ході виконання даної роботи та проведення досліджень було обрано та використано наступні конструкційні та антифрикційні матеріали: алюміній марки А7, алюмінієвий сплав АМ5 (АЛ19), бабіт марки Б16 та ливарний сплав на основі свинцю PbSb10Sn6.

Алюміній марки А7 (ГОСТ 11069 - 2001) мав наступний хімічний склад, мас. %: 99,7 % Al; до 0,16 % Fe; до 0,15 % Si; до 0,03 % Mn; до 0,04 % Zn; до 0,03 % Ca; до 0,02 % Mg; до 0,01 % Cu; до 0,01 % Ti; до 0,02 % інших домішок. Механічні властивості алюмінію А7 у відпаленому стані становлять:  $\sigma_b = 60$  МПа,  $\delta = 20...30$  %; у нагартованому стані -  $\sigma_b = 130...145$  МПа,  $\delta = 3...5$  %. Твердість литого сплаву становить НВ 20 МПа.

Відповідно ДСТУ 2839 – 94 [8] алюмінієвий сплав АМ5 (АЛ19) відноситься до ливарних сплавів системи Al – Cu. Хімічний склад сплаву за основними елементами, мас. %: 4,5...5,3 % Cu; 0,6...1,0 % Mn; 0,15...0,35 % Ti; Al – решта. Густина сплаву становить  $\rho = 2,78$  т/м<sup>3</sup>.

Бабіти є одним з найбільш застосовуваних підшипникових матеріалів. В цілому вони характеризуються низькою твердістю (НВ 130...320 МПа), невисокою температурою плавлення ( $T_{пл} = 240...320^\circ\text{C}$ ), підвищеною здатністю до розм'якшення (НВ = 90...240 МПа при 100°C), доволі легко припрацьовуються та мають високі антифрикційні властивості. В роботі було використано широко застосовуваний бабіт Б-16, хімічний склад якого за ГОСТ 1320 – 74 наступний, мас. %: 15...17 % Sn; 15...17 % Sb; 1,5...2,0 % Cu; Pb – основа.

Також проводили дослідження композиційного матеріалу до складу якого входив ливарний сплав на основі свинцю PbSb10Sn6, хімічний склад котрого відповідав міжнародному стандарту ISO 4381, мас. %: 80...86 % Pb;

9...11 % Sb; 5...7 % Sn; 0,7 % Cu; 0,25 % As; 0,05 % Cd; 0,1 % Bi; 0,1 % Fe; 0,005 % Al; 0,2 – інші елементи. Твердість даного матеріалу при 20°C становить HB 160 МПа, а при 150°C відповідає HB 80 МПа. Умовна границя текучості при 20°C становить  $\sigma_{0,2} = 39$  МПа, а при 100°C відповідає  $\sigma_{0,2} = 27$  МПа. Температурний інтервал плавлення матеріалу знаходиться у діапазоні 240...260°C, густина матеріалу  $\rho = 10,3$  г/см<sup>3</sup>.

## 2.2 Лабораторні плавки

Лабораторні плавки проводили в лабораторії дослідження процесів обробки металів кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка». У якості шихтових матеріалів використовували матеріали, що описані у п. 2.1.

При проведенні плавок використовували електричну піч опору. Плавлення металів проводили у чавунному тиглі, котрий був футерований графітом. Плавлення алюмінію А7 та алюмінієвого сплаву АМ5 (АЛ19) проводили з використанням захисного покривного флюсу наступного складу: 33 мас. % KCl і 67 мас. % NaCl. Кількість захисного покривного флюсу становила 2 мас. %.

Компоненти шихти та захисного покривного флюсу було розважено за допомогою лабораторних електронних ваг PS 510.R2. Дані ваги відповідають вимогам ДСТУ EN45501:2017 «Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів», Технічного регламенту щодо неавтоматичних зважувальних приладів, затвердженого Постановою КМУ від 16.12.2015р. №1062.

### **2.3 Контроль хімічного складу**

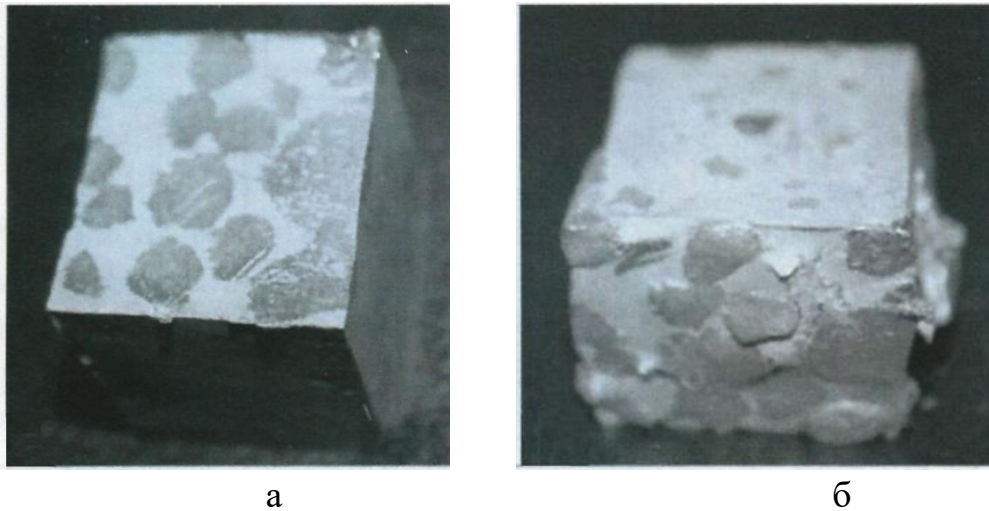
При виконанні дослідних робіт було використано стандартні конструкційні матеріали, що мали сертифікати відповідності. За необхідності хімічний склад за основними елементами контролювали спектральним аналізом на іскровому спектрометрі “Spectro – Max”.

### **2.4 Визначення фізико-механічних властивостей**

Виходячи з умов експлуатації матеріалу підшипника, та порівняння властивостей експериментального та еталонного матеріалів в умовах тертя ковзання, необхідно було визначити коефіцієнт тертя ковзання. Даний коефіцієнт визначили за стандартною методикою сутність якої доволі повно викладено у наступних джерелах [9, 10].

З метою визначення густини матеріалів зразки зважували на аналітичних вагах АДВ-200 з точністю до 0,0002 г. Перед зважуванням зразки промивали у розчиннику. Промивочні рідини – ацетон, бензин. Густина матеріалів розраховували за стандартними методиками [9, 10] через визначення ваги та об'єму зразків.

Характеристики міцності дослідних матеріалів порівнювали після визначення границі міцності при стисканні. Дослідні зразки для випробувань мали розміри 25×25×25 мм (рис. 2.1). Визначення границі міцності при стисканні проводили за допомогою розривної машини Н50КТ. В процесі випробувань за діаграмою стиску визначили границі текучості та границі міцності при стисканні як дослідних, так і еталонного матеріалів [11].



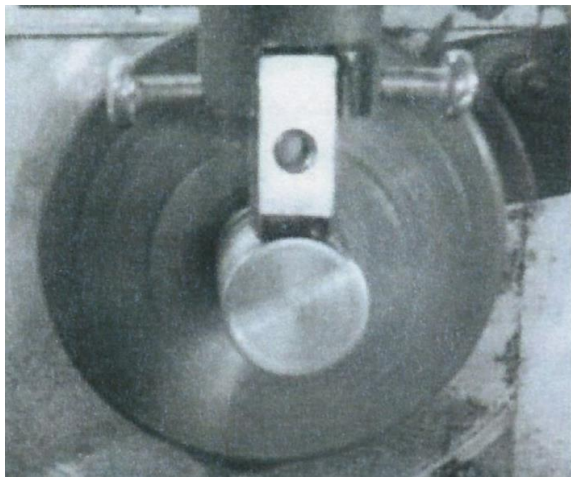
а – до випробувань; б – після випробувань

Рисунок 2.1 – Зразки для визначення границі міцності при стисканні

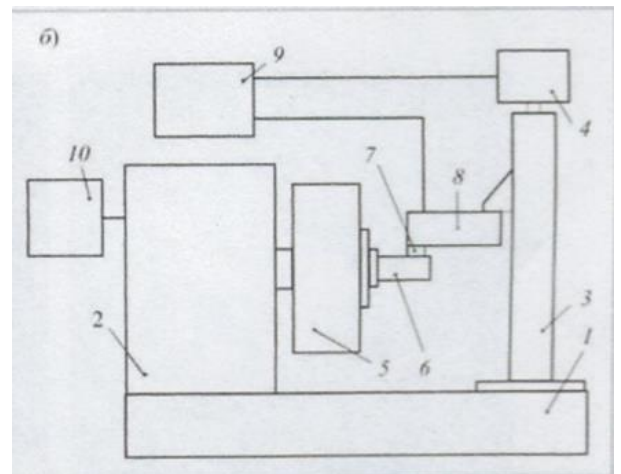
## 2.5 Визначення зносостійкості

Дослідження зносостійкості композиційних матеріалів проводили у відповідності вимогам ГОСТ 23.208-79. Зразки композиційних матеріалів, що досліджували, а також з еталонного матеріалу виготовляли у вигляді брусків розмірами 30x10x10 мм з шорсткістю робочої поверхні Ra від 1,0 до 0,8 мкм відповідно ДСТУ 2409 – 94 [12].

Еталонні зразки виготовляли з бабіту Б16. Зносостійкість оцінювали за зміною лінійного розміру зразків з композиційного матеріалу та еталону у процесі роботи. Випробування проводили на дослідній установці МІ-1 (рис. 2.2).



а



б

а – зовнішній вигляд; б – схема установки

1 – станина; 2 – мотор-редуктор; 3 – гвинтова пара; 4 – двигун;  
5 – патрон; 6 – контртіло; 7 – зразок; 8 – тензодатчик; 9 – блок керування;  
10 - частотний перетворювач.

Рисунок 2.2 – Дослідна установка для визначення зносостійкості

У якості контртіла виступав ролик діаметром 25 мм зі сталі 45 за ГОСТ 1050 – 88. Частота обертання ролика була постійною та дорівнювала 200 об/хв.; зусилля прижиму зразка до ролика становило 50 Н. Контроль зусилля прижиму зразка до ролика та підтримку його на постійному рівні в процесі випробувань забезпечували за допомогою тензорезисторного датчику зусилля БП – 5, контролеру ПЛК – 73 та крокового приводу SMSD 4.2 з двигуном AD 200.

З метою отримання більш достовірних результатів вимірювань всі зразки проходили попереднє припрацьовування впродовж 15 хвилин. Час випробування кожного зразку становив 180 хвилин.

Інтенсивність зношування зразків розраховували за формулою (2.1):

$$I = h/L, \quad (2.1)$$

де  $h$  – величина шару, що зносився, мм;

$L$  – загальний шлях тертя, мм.

Загальний шлях тертя розраховували виходячи з діаметру ролика, кількості його обертів і часу випробувань. Розміри шару, що зносився, контролювали за допомогою мікрометру.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ АЛЮМО-СВИНЦЕВИХ ПІДШИПНИКІВ

#### 3.1 Умови роботи підшипників і вимоги до них

Антифрикційні матеріали призначені для застосування у різних підшипниках ковзання. Найбільш значущі вимоги, що до них висуваються, наступні:

- низькі значення коефіцієнту тертя;
- висока зносостійкість;
- здатність швидко та доволі легко припрацьовуватись до умов роботи трибосистеми;
- підвищений опір до задирання;
- достатня міцність
- та належний опір пошкодженням втомного, кавітаційного, корозійного та абразивного характеру.

Розглянемо умови роботи підшипника. Зношування валу та вкладишу підшипника не відбувалося би зовсім за умов, якщо б вони мали ідеальні геометричні форми і за рахунок належного змащування не торкалися один одного. В той же час, у реальних умовах, такої експлуатації не вдається забезпечити. У зв'язку з цим, у парі тертя, окрім бажаного рідинного тертя, зустрічається полусухе і навіть сухе тертя металу валу о метал підшипника. В цих умовах дуже важливо забезпечити повну відсутність задирання металу, інакше будуть провокуватися інтенсивні процеси подальшого руйнування та деградації у вузлі тертя.

В цих умовах визначальне значення відіграє вірний вибір матеріалів пари тертя. З урахуванням того, що в парі «вал – підшипник» вал є більш відповідальною та кошовною складовою, то при невід'ємному процесі змащування доцільно, щоб у першу чергу, відбувалося змащування вкладишу

підшипника. Виходячи з цього, вкладиші виготовляють з більш м'яких і пластичних металів, які мають здатність «припрацьовуватися» до матеріалу валу. Серед металів необхідні, з цієї точки зору, властивості мають: олово, свинець, кадмій, алюміній, срібло. Однак матеріали, що мають низьку температуру плавлення (наприклад, свинець (327 °C), олово (232 °C)) можуть розігріватися до оплавлення і не допускають високих робочих тисків на підшипник. Для вирішення цієї задачі потрібно зниження коефіцієнту тертя, що відобразиться на умовах розігріву підшипника.

Забезпечення більш низького коефіцієнту тертя можна досягнути застосуванням твердих металів або їхніх з'єднань. В той же час тверді метали та сплави не забезпечують належної припрацьованості вкладишу підшипника до пари тертя. У зв'язку з цим, підшипниковий матеріал повинен поєднувати майже протилежні вимоги – бути одночасно твердим, з метою зниження коефіцієнту тертя, та м'яким і пластичним, для забезпечення необхідного ступеню припрацювання у парі тертя.

На наш погляд, для виготовлення підшипників важконавантажених вузлів в автомобілебудуванні та тракторобудуванні, енергетиці, військовій галузі, доволі успішно можуть застосовуватись алюмо-свинцеві матеріали. Однак система Al – Pb відноситься до монотектичних, що забезпечує при охолодженні розплавів ефект незмішування (ліквідацію) алюмінію і свинцю. Це явище не дозволяє традиційними технологічними методами лиття виготовляти підшипники ковзання з цих сплавів.

Розглядалось питання попереднього отримання зі сплаву системи Al – Pb швидкоохолоджених гранул (швидкості охолодження  $\sim 10^2 \dots 10^4$  °C/c) та наступне надання їм заданої форми методами обробки тиском. Однак, у зв'язку з високою трудомісткістю та низькою продуктивністю процесу, у даній роботі цей спосіб не розглядали.

Одночасне поєднання доволі протилежних властивостей можливо отримати за рахунок використання композиційних матеріалів. Планується для цих потреб створення алюмо-свинцевого композиційного матеріалу, який би

мав доволі твердий розгалужений каркас з алюмінію або його сплавів, котрий заповнений м'якою та пластичною складовою – свинцем, оловом або бабітом. Більш жорсткий каркас композиційного матеріалу, за рахунок своїх фізико-механічних характеристик, призначений для збереження підшипником необхідної форми, забезпечення відведення надлишкової теплоти та підтримання заданого коефіцієнту тертя.

М'яка складова призначена забезпечувати добру припрацьовуваність та підтримання на належному рівні показників працездатності, надійності та довговічності підшипникового вузлу в цілому.

Дана робота присвячена розгляду способу виготовлення алюмо-свинцевих підшипників ковзання, при якому попередньо отримують заготовку з пористого алюмінію з відкритою пористістю шляхом фільтрації алюмінієвого розплаву через водорозчинні гранули, а потім пори заповнюють розплавом антифрикційного матеріалу.

### **3.2 Розробка оснащення необхідного для виготовлення Al – Pb композиційного матеріалу**

При отриманні нового Al – Pb композиційного матеріалу однією із задач, що потребували вирішення, було створення об'ємної каркасної конструкції з відкритою пористістю. У якості матеріалу конструкції було обрано алюміній марки А7 та його сплав АМ5. Після виготовлення пористого каркасу планувалося його просочування антифрикційними матеріалами – бабітом марки Б16 та сплавом на основі свинцю марки PbSb10Sn6.

На підставі аналізу розглянутих методів отримання пористих матеріалів, що доволі детально представлено у пункті 1.3, нами було обрано за метод виготовлення каркасної пористої конструкції – лиття алюмінієвого сплаву у форму з водорозчинними речовинами. Водорозчинний каркас, що призначений

для формування відкритої пористості у виливку з алюмо-сплавів, оформлювали певною кількістю водорозчинних гранул, що попередньо виготовляли в приспособі, котра виконувала роль стрижневого ящика. Приспособу виготовляли методами оброблення різанням зі сталі 20. За конструкцією приспособа складалася з двох частин, мала форму паралелепіпеду та була рознімною (рис. 3.1).

У якості стрижневого матеріалу водорозчинного каркасу використовували суміш до складу якої входили наступні компоненти: хлорид натрію, желатин, вода. При виготовленні водорозчинних гранул дотримувались співвідношення компонентів у суміші виходячи з наступної кількості: 95:3:2.

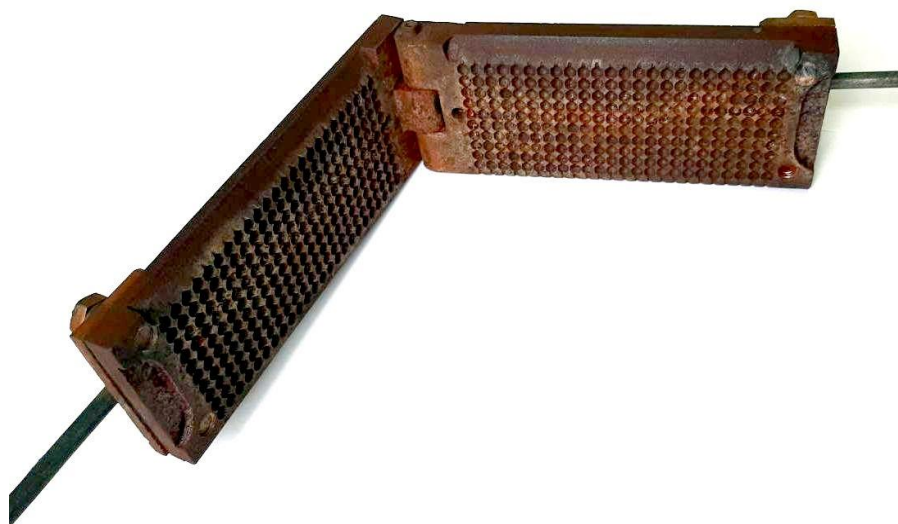


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд приспособи для виготовлення водорозчинного каркасу

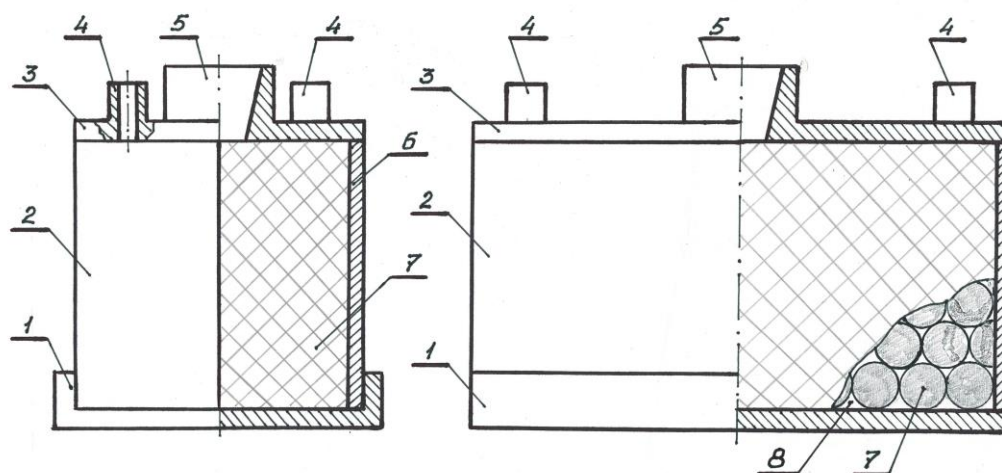
### **3.3 Відпрацювання технологічних режимів виготовлення каркасу Al – Pb композиту**

Для виготовлення каркасу майбутнього Al – Pb композиту було обрано алюміній марки А7 та алюмінієвий сплав АМ5 (АЛ19) з наступних міркувань.

Алюміній марки А7 характеризується високою пластичністю та доброю теплопровідністю, що забезпечує гарну припрацьовуваність і задиростійкість. Температура плавлення А7 становить  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ . З метою оформлення необхідного каркасу для отримання Al – Pb композиту, потрібно щоб обрані матеріали мали достатню рідинноплинність. Рідинноплинність алюмінію марки А7 за прутковою пробою становила 320 мм.

Сплав АМ5 (АЛ19) призначений для виготовлення відповідальних деталей, що працюють в умовах підвищених статичних і динамічних навантажень, як при низьких температурах, так і при підвищених до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура солідус цього сплаву становить  $T_c = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура ліквідус –  $T_l = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Рідинноплинність за прутковою пробою дорівнює 205 мм.

Для виготовлення Al – Pb композиційного матеріалу було спроектовано спеціальний кокіль, схему конструкції котрого зображено на рисунку 3.2. При виготовленні більшості елементів конструкції було використано стандартний сортовий прокат у вигляді швелерів. Отримання Al – Pb композиту в кокілі проходило у два етапи.



1 – нижня частина кокілю (основа); 2, 6 – бокові частини; 3 – верхня частина кокілю (кришка); 4 – випори; 5 – ливникова чаша; 7 – водорозчинний наповнювач; 8 – порожнини, що заповнюються алюмінієвим сплавом.

Рисунок 3.2 - Схема кокілю для виготовлення Al – Pb композиту

На першому етапі до кокілю завантажували попередньо виготовлені водорозчинні гранули, або цілі блоки, що заповнювали вільний простір, контактували між собою і, в той же час, мали доволі розгалужену систему порожнин, котрі були пов'язані між собою. При заливанні зібраного таким чином кокілю алюмінієвим сплавом отримували композит «алюміній – водорозчинні гранули». Якість цього матеріалу напряду була пов'язана з рідинноплинністю алюмінієвого сплаву та можливістю повністю заповнити порожнини між водорозчинними гранулами. Для виконання цих умов було вирішено перед заливанням зібраний кокіль нагрівати, а сплав, для надання йому більшої рідинноплинності, додатково обробити рафінувально-модифікувальним комплексом МК-2 [13]. З урахуванням температури плавлення NaCl (800,8 °C) температуру попереднього нагріву кокілю було підібрано та обрано експериментально. В ході проведення попереднього відпрацювання технологічного процесу було встановлено, що позитивні результати отримували за температур нагріву кокілю починаючи з діапазону 300...350 °C.

Аналіз даних роботи [14] показав, що оброблення розплаву рафінувально-модифікувальним комплексом МК-2 у кількості 0,05 мас.%, дозволяє підвищити рідинноплинність сплаву при температурі заливання форми 700 °C на 59 % у порівнянні зі сплавом без оброблення рафінувально-модифікувальним комплексом. При подальшому підвищенні температури заливання форми з 700 °C до 740 °C додатковий приріст рідинноплинності становив 45 %. Подальше збільшення кількості рафінувально-модифікувального комплексу при обробленні розплавів, не забезпечувало високих і стабільних показників, вочевидь за рахунок ефекту перемодифікування.

Таким чином, спираючись на отримані раніше дані, при проведенні роботи алюмінієві сплави обробляли рафінувально-модифікувальним комплексом МК-2 у кількості 0,05 мас.%, а температура оброблення розплавів та заливання форми становила 730...750 °C.

Оброблення алюмінієвих сплавів виконували таблетованим рафінувально-модифікувальним комплексом МК-2 (рис. 3.3) за допомогою пристрою «дзвоник».

Застосування МК-2 забезпечило рафінування розплавів за адсорбційним і флотаційним механізмами, а також модифікування інтерметалідних фаз та інших структурних складових, що супроводжувалося їхнім подрібненням, набуттям компактної форми і рівномірним розподілом за об'ємом. Показники зміни рідинноплинності залежно від режимів технологічного оброблення сплавів наведено в таблиці 3.1.



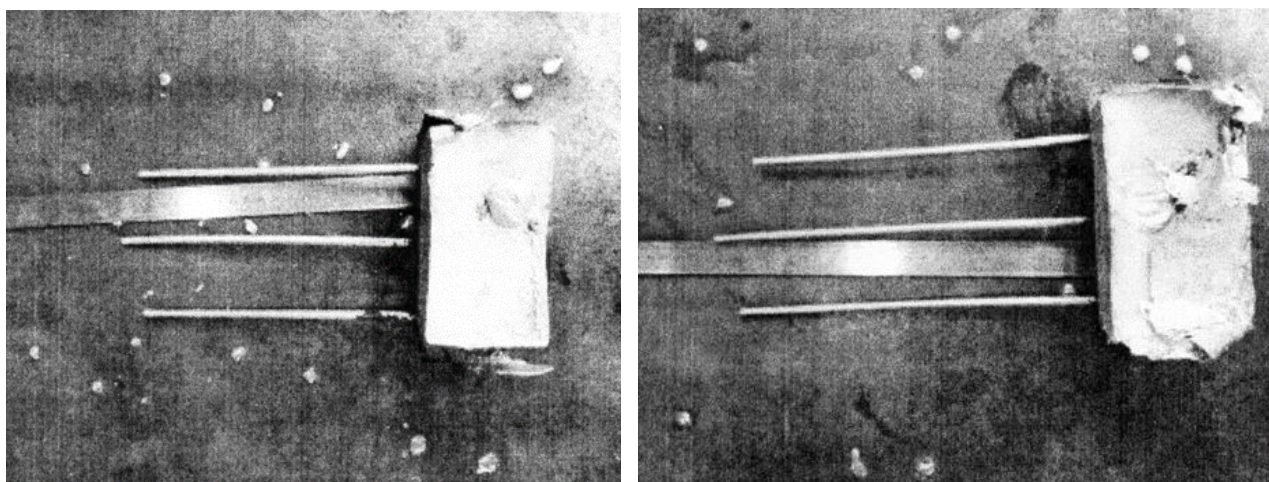
Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд таблетованого рафінувально-модифікувального комплексу

Таблиця 3.1 - Технологічні показники дослідних сплавів

Система	Марка сплаву	Температура, °С			Рідинноплинність*, мм	
		T <sub>солідус</sub>	T <sub>ліквідус</sub>	T <sub>обробки розплаву МК-2</sub>	до оброблення МК-2	після оброблення МК-2
Алюміній	A7	660	660	730...750	320	369
Al - Cu	AM5 (AL19)	540	650		205	328

Примітка: \* - вимірювання за прутковою пробою.

Аналіз результатів, що наведено у таблиці 3.1, засвідчив більш ефективну дію рафінувально-модифікувального комплексу МК-2 по відношенню до сплаву AM5 (AL19) ніж до алюмінію марки A7. Це можна пояснити тим, що алюміній A7 у якості первинної сировини, вже на початку більш чистіший за домішками та містить значно меншу кількість різноманітних фаз. У зв'язку з цим, ефект дії МК-2 на сплав системи Al – Cu з більшою кількістю домішок і наявністю інтерметалідних фаз, не завжди компактної форми та рівномірного розподілу, значно суттєвіший (див. табл. 3.1). Наглядні результати з відбору проб з визначення рідинноплинності наведено на рисунку 3.4.



а

б

а – сплав AM5 (AL19); б – алюміній марки A7.

Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд проб з визначення рідинноплинності

Після заливання та охолодження кокілью, його розбирали та вилучали композит «алюмінієвий сплав – водорозчинні гранули». Далі отриманий композит переміщували до ємності з водою, де його повністю занурювали та витримували певний час, впродовж якого гранули розчинялись. Час витримки в ємності з водою залежав від температури води. З підвищенням температури, час необхідний для повного розчинення гранул скорочувався. Для полегшення видалення продуктів розчинення гранул, отриманий пористий каркас з алюмінієвого сплаву промивали під проточною водою, а потім висушували за допомогою продування теплим стисненим повітрям. З цією метою використовували промисловий фен. Кінцевий вигляд пористого каркасу зображено на рисунку 3.5.

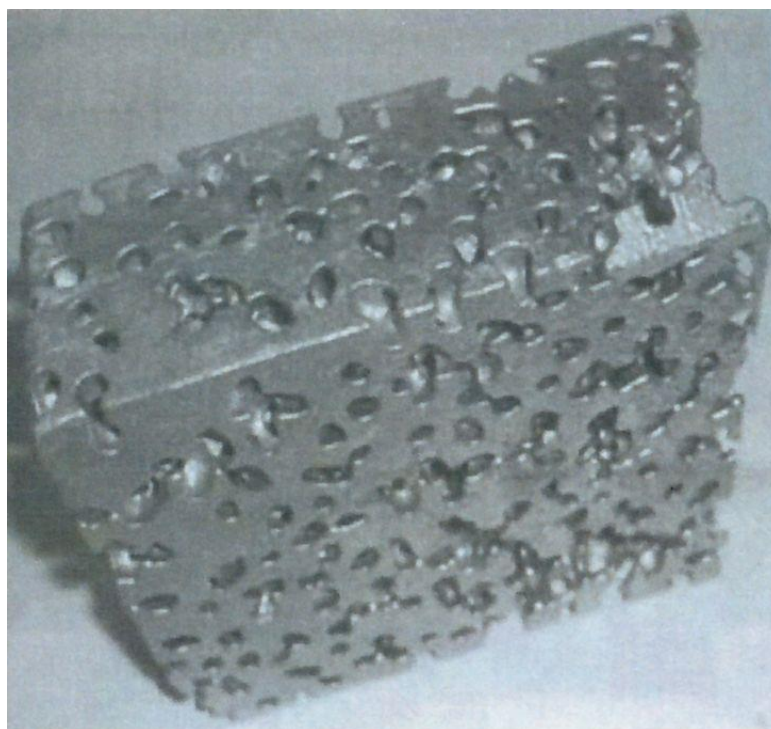


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд заготовки пористого каркасу з піноалюмінію

### 3.4 Розробка технології завершальної стадії отримання Al - Pb композиту

Після отримання алюмінієвого каркасу майбутнього композиту, наступним етапом його виготовлення, було вирішення задачі якісного заповнення пористого каркасу антифрикційними матеріалами. Просочування алюмінієвого каркасу проводили в тому ж кокілю, що і його виготовлення. Для цього виготовлений та просушений пористий каркас знову поміщали до зібраного кокілю. З метою визначення оптимальних режимів отримання якісного Al – Pb композиту, проводили експеримент з практичного підбору температур попереднього нагріву кокілю з алюмінієвим каркасом та розплаву антифрикційного компоненту, що призначений для його просочення.

Експеримент проводили з використанням математичного планування другого порядку  $2^2$  для двох незалежних змінних на двох рівнях варіювання. В якості незалежних змінних були прийняті: температура попереднього нагріву кокілю з пористим каркасом ( $T_k$ , °C) і температура розплаву антифрикційного матеріалу при його заливанні ( $T_z$ , °C) (табл. 3.2.). Обрання рівнів та інтервалів варіювання незалежних змінних проводили опираючись на результати попередніх досліджень та аналіз літературних даних.

Нижній рівень температури попереднього нагріву кокілю (фактор  $X_1$ ) встановили на 220 °C. Подальше зниження значень цього фактору недоцільно у зв'язку зі швидким «заморожуванням» розплаву антифрикційного матеріалу через високу теплопровідність каркасу з алюмінієвих сплавів. Це призводить до швидкого охолодження та втрати рідинноплинності антифрикційного матеріалу, що просочує каркас, та викликає неякісне оформлення Al - Pb композиту за рахунок неповного заповнення пористого каркасу з алюмінієвих сплавів.

Таблиця 3.2 – Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Інтервали варіювання та рівні факторів		Фактори	
		Температура нагріву кокілю $T_k$ , °C	Температура розплаву при заливанні $T_z$ , °C
Нульовий рівень: $X_0 = 0$		300	450
Інтервал варіювання	1,0	80	50
	1,682	135	84
Нижній рівень: $X = -1,0$		220	400
Верхній рівень: $X = +1,0$		380	500
Зіркові точки	$X = -1,682$	165	366
	$X = +1,682$	435	534
Код фактору		$X_1$	$X_2$

Верхній рівень фактору  $X_1$  встановили на значенні 380 °C. Подальше підвищення температури попереднього нагріву кокілю ( $X_1$ ) недоцільне з наступних міркувань. Алюмінієвий пористий каркас, що міститься у кокілі, за рахунок дуже розвиненої поверхні активного контакту та доволі тонких стінок між комірками, за цієї температури здатен до інтенсивного окиснення поверхні з утворенням на ній шару з'єднання  $Al_2O_3$ . Як відомо, це з'єднання має дуже високу твердість (HRA 90...92) та високу різальну здатність, що за таких умов не може бути використано у підшипниках ковзання.

При призначенні температури розплаву антифрикційного матеріалу, при заливанні кокілю (фактор  $X_2$ ), керувались даними довідникової технічної літератури [15]. Нижня границя фактору  $X_2$  ( $T_z = 400$  °C) обумовлена аналізом апріорної інформації та обмежена з міркувань забезпечення необхідної рідинноплинності антифрикційного матеріалу для якісного заповнення пористого каркасу майбутнього Al - Pb композиту.

Перевищення верхньої границі фактору  $X_2$  ( $T_z > 500$  °C) призведе до розширення потоком рідкого перегрітого металу алюмінієвого пористого

каркасу, що призведе до його конструкційного руйнування та отримання певних ділянок сплаву зі значним ступенем ліквідації.

При проведенні запланованого експерименту за параметр оптимізації було обрано якість просочення алюмінієвого каркасу антифрикційним матеріалом та формування Al - Pb композиту в цілому. В даному випадку параметр оптимізації був якісним показником, що вимірювався значенням від 1 до 100 балів.

Матриця планування експерименту (табл. 3.3) передбачала проведення N дослідів на головних рівнях та досліди на нульовому рівні варіювання факторів та зіркових точках:

$$N = 2^k, \quad (3.1)$$

де 2 - кількість рівнів варіювання факторів;

k - кількість факторів (k = 2), отже N=4, не враховуючи досліди на нульовому рівні та зіркових точках.

Відповідно до матриці планування експерименту було проведено дослідні плавки згідно технологічних режимів, що наведені у таблиці 3.3. Отримані таким чином заготовки Al - Pb композиту пройшли візуальне оцінювання за якістю формування. Показники оцінювання якості за 100-бальною системою наведені у таблиці 3.3.

Після регресійного оброблення наявних результатів досліджень отримували рівняння залежності функцій відклику Y від змінних факторів X<sub>1</sub> та X<sub>2</sub> у кодовому масштабі наступного виду:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2, \quad (3.2)$$

де Y – комплексний показник, що оцінює та характеризує загальну якість формування Al-Pb композиту Б, бали; B<sub>0</sub> – вільний член, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>12</sub>, B<sub>11</sub>, B<sub>22</sub> – відповідні коефіцієнти регресії. В результаті отримали наступні рівняння:

Таблиця 3.3 – Матриця центрального композиційного плану для повного факторного експерименту  $2^2$

№ дослідю	Кодовий масштаб		Натуральний масштаб		Якість просочення алюмінієвого каркасу Б, бали (0...100)
	$X_1$	$X_2$	$X_1, (Тк, °C)$	$X_2, (Тз, °C)$	
1	+	+	380	500	26
2	–	+	220	500	60
3	+	–	380	400	50
4	–	–	220	400	70
5	+ 1,682	0	435	450	10
6	– 1,682	0	165	450	80
7	0	+ 1,682	300	534	12
8	0	– 1,682	300	366	55
9	0	0	300	450	95

$$Y=95.11746-16.5296 \cdot X_1-10.2752 \cdot X_2-3.5 \cdot X_1 \cdot X_2-18.5336 \cdot X_1^2-22.6005 \cdot X_2^2 \quad (3.3)$$

Перевірка адекватності моделей показує, що їх можна використовувати для прогнозування значень функцій відгуку при будь-яких значеннях факторів, що знаходяться між верхнім і нижнім рівнями. Для цього доцільно перейти до натуральних змінних, використовуючи формули перекладу.

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\delta_{0i}}, \quad (3.4)$$

де  $x_i$  – показник функції відклику у натуральному масштабі,  $X_i$  – показник функції відклику у кодовому масштабі,  $X_{i0}$  – значення фактору на нульовому рівні,  $\delta_{0i}$  – інтервал варіювання фактору  $X_i$ .

Таким чином отримуємо:

$$X_1 = \frac{T_k - 300}{80}, \quad (3.5)$$

$$X_2 = \frac{T_z - 450}{50}. \quad (3.6)$$

Після цього рівняння (3.3) прийняло такий вид:

$$B = 1.924655 \cdot T_k - 0.000875 \cdot T_k \cdot T_z - 0.002895875 \cdot T_k^2 - 0.0090402 \cdot T_z^2 + 8.193176 \cdot T_z - 1959.81399 \quad (3.7)$$

Кореляційний аналіз отриманої математичної моделі проводилися за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2 (y_i - y_{cp})^2}}, \quad (3.8)$$

де  $x_i$  та  $x_{cp}$  – відповідно експериментальне значення відповідного  $i$ -го дослідження та середнє значення усіх результатів дослідів (див. табл. 3.3),  $y_i$  та  $y_{cp}$  – відповідно розрахункове значення відповідного  $i$ -го дослідження за формулою (3.7) та середнє значення усіх розрахункових значень за формулою (3.7).

Проведений кореляційний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції  $r = 0,98$ . Такий показник  $r$  про високу адекватність та надійність отриманої моделі, яка дозволяє прогнозувати якість просочення алюмінієвого каркасу  $B$  в залежності від  $T_k$  та  $T_z$ .

Графічний вигляд отриманої моделі (3.7) показано на рисунку 3.6. Із нього видно, що досліджувані фактори мають криволінійну залежність із наявним максимумом. Тому доречним буде провести дослідження отриманої функції (3.7) на екстремуми. Результати цього дослідження показали, що

функція Б (3.7) має екстремуми в координатах  $T_k = 267 \text{ }^\circ\text{C}$ , а  $T_z = 440 \text{ }^\circ\text{C}$  і сягає величини  $B = 99,6$  балів.

Тож, можемо сказати, що для отримання найкращої якості просочення пористого алюмінієвого каркасу Б, яка може сягати рівня 99,6 балів, необхідно дотримуватися наступних технологічних вимог:

- температура попереднього нагрівання кокілю  $T_k$  повинна складати 260...270  $^\circ\text{C}$ ;

- температура розплаву антифрикційного матеріалу при заливанні  $T_z$  повинна складати 435...445  $^\circ\text{C}$ .

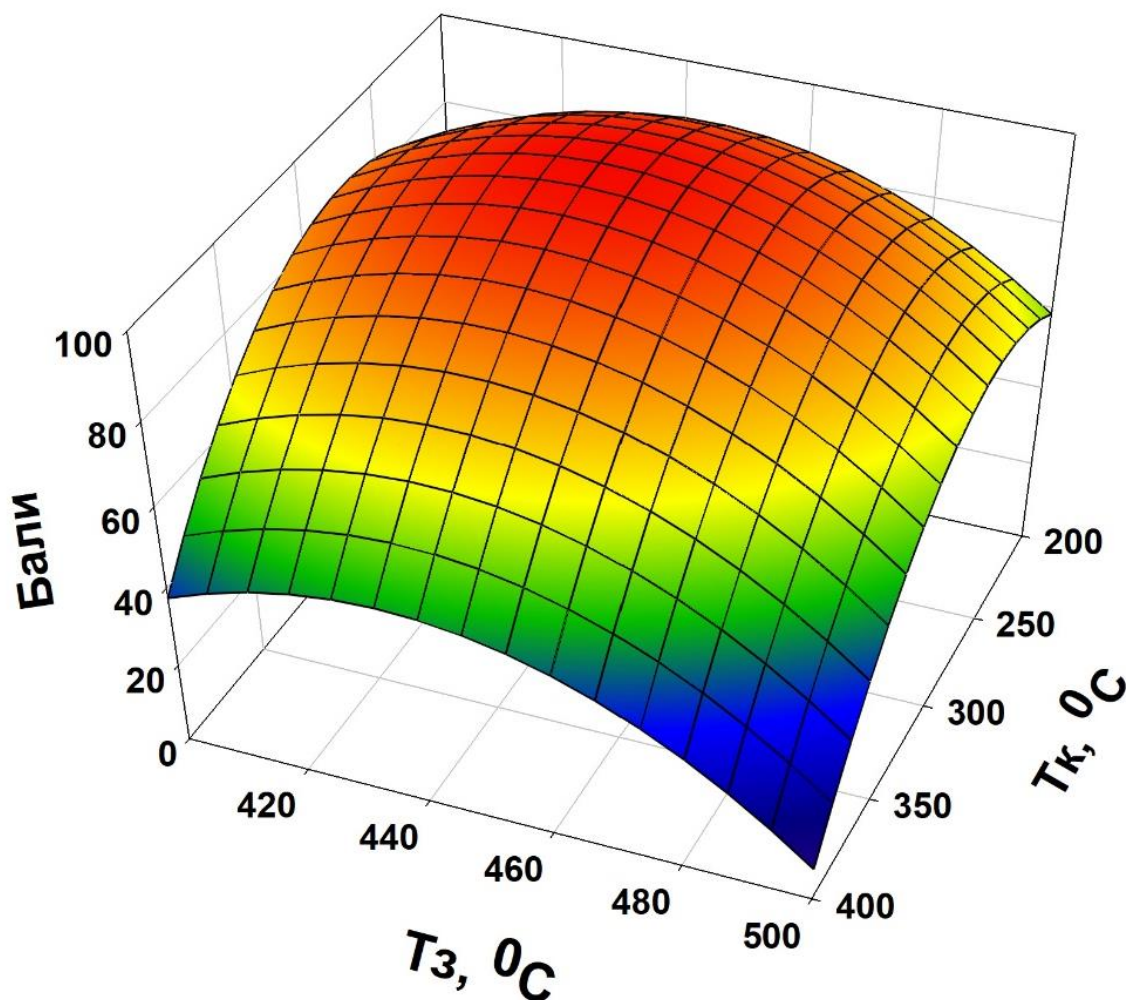


Рисунок 3.6 – Графічне відображення математичної моделі залежності якості просочення алюмінієвого каркасу Б від температури нагрівання кокілю  $T_k$ , та температури розплаву при заливанні  $T_z$ .

### 3.5 Дослідження властивостей Al - Pb композитів

З отриманих за оптимальними технологічними варіантами композитів (A7 + PbSb10Sn6) та (AM5 + B16), було виготовлено зразки для визначення фізико-механічних характеристик дослідних матеріалів. Характеристики зразків, умови їхнього виготовлення та визначення показників властивостей, а також обладнання, що при цьому було задіяно, описано в розділі 2 даної роботи. За матеріалом еталону було обрано бабіт B16. Деякі результати, що отримано в процесі досліджень, наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. – Фізико-механічні властивості дослідних Al - Pb композитів

№ п/п	Матеріал	Густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Показники міцності при стисканні, МПа	
			$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\epsilon}$
1	Бабіт B16	9,3	86	147
2	Композит: A7 + PbSb10Sn6	8,12...8,25	22...41	53...61
3	Композит: AM5 + B16	6,15...6,40	112...121	172...180

Аналіз густини отриманих композитів у порівнянні з бабітом B16 показав наступне. Густина композиту (A7 + PbSb10Sn6) на 11...13 % нижча ніж бабіту B16, а композиту (AM5 + B16) на 31...34 %. Якщо порівнювати густину композитів зі свинцем, густина якого становить 11,34 г/см<sup>3</sup>, то композит (A7 + PbSb10Sn6) має на 28...29 %, а композит (AM5 + B16) на 44...46 % більш низьку густину.

За показниками міцності композит (AM5 + B16) у 2,8...3,4 рази перевищує композит (A7 + PbSb10Sn6). У порівнянні з бабітом B16 міцніші

показники композиційного матеріалу (AM5 + B16) вищі у 1,17...1,22 рази, в той час, як у (A7 + PbSb10Sn6) вони нижчі у 2,4...2,8 рази. Виходячи з отриманих результатів (див. табл. 3.4.), було вирішено дослідити композит (AM5 + B16) додатково на зносостійкість та визначити коефіцієнт тертя ковзання даного матеріалу.

Випробування на зносостійкість продемонстрували, що значення інтенсивності зношування бабіту B16 (еталон) становило  $1,96 \cdot 10^{-7}$  мм/мм, а композиту (AM5 + B16) -  $1,29 \cdot 10^{-7}$  мм/мм, що було у 1,52 рази нижче ніж еталон.

З метою визначення антифрикційних властивостей розробленого матеріалу, виконали порівняльні дослідження зразків з бабіту B16 (еталон) та композиційного матеріалу (AM5 + B16) (рис 3.7).



а

б

а – бабіт B16; б – композиційний матеріал (AM5 + B16).

Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд зразків з визначення коефіцієнту тертя ковзання  $\mu$

Значення коефіцієнту тертя ковзання без змащення для еталонного матеріалу B16 становило  $\mu = 0,27$ , що відповідало довідниковим даним [16]. Для дослідного композиційного матеріалу (AM5 + B16) значення коефіцієнту тертя без змащення знаходилось на рівні B16, але змінювалось у межах  $\mu = 0,16...0,28$ . Розбіжність значень  $\mu$  для композиційного матеріалу можна пояснити наступними факторами: загальною якістю виготовленого композиту,

співвідношенням складових поверхневого шару композиту у площині контакту, умов експлуатації, а також від поєднання та співвідношення всіх цих факторів одночасно. Слід відмітити, що за умов наявності змащення коефіцієнт  $\mu$  вирівнюється для обох досліджуваних матеріалів та становить  $\mu = 0,006$ .

### **3.6 Економічні показники виготовлення Al - Pь композиту**

Виходячи з густини композиту (AM5 + B16) доля алюмінієвого сплаву в ньому становить 31...34 %. Вартість бабіту B16 на ринку України на грудень 2023 року становить 288...325 грн/кг. Вартість первинного сплаву AM5 становить 176...180 грн/кг. З урахуванням масової долі участі матеріалів у складі композиту можна з певністю стверджувати, що вартість композиту за матеріалами складає 250...280 грн/кг.

Якщо сплав AM5 буде виготовлено з лому та відходів виробництва, вартість котрих у Запорізькій області на грудень 2023 року становить 40,3...81,2 грн/кг, то собівартість композиту, в цьому випадку, складе ще більш низькі значення. Із застосуванням технології рециклінгу, що розроблена на кафедрі КМХТ НУ «Запорізька політехніка», вирішення цієї задачі не становить виробничої проблеми.

## ВИСНОВКИ

В роботі об'єктом досліджень були процеси розробки та виготовлення нових алюмо-свинцевих композиційних матеріалів, що призначені для застосування у важконавантажених підшипниках ковзання сучасної техніки. За результатами проведення даної дослідницької роботи можна зробити наступні висновки:

1. У дипломній роботі запропоновано та розроблено технологію виготовлення алюмо-свинцевого композиційного матеріалу на основі створення каркасу з відкритою пористістю з алюмінієвого сплаву та подальшого його просочення розплавом антифрикційного матеріалу.

2. Визначення інтенсивності зношування розробленого Al - Pb композиту та еталонного антифрикційного матеріалу - бабіту Б16 довело, що композиційний матеріал за зносостійкістю перевищував матеріал еталону у 1,52 рази.

3. За фізико-механічними властивостями розроблений Al - Pb композиційний матеріал перевищував еталонний з бабіту Б16 (див. табл. 3.4).

4. Порівняння вартостей еталонного матеріалу з розробленим засвідчило, що вартість нового композиційного матеріалу нижча ніж у еталонного, як при застосуванні первинних матеріалів (~ у 1,12...1,16 разів) так і при використанні матеріалів після рециклінгу (більше ніж у 2 рази).

5. В роботі показана можливість застосування при виготовленні Al - Pb композиційних матеріалів, вторинних алюмінієвих сплавів, що отримані шляхом рециклінгу лому та відходів виробництва.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Хохлов М.А. Конструкційні надлегкі пористі метали / М.А. Хохлов, Д.А. Іщенко / Автоматичне зварювання. – 2015. - № 3-4 / - С. 60 – 65.
2. Rvan S., Christiansen E.L. Honeycomb vs. foam: evaluating potential upgrades to ISS module shielding [Електронний ресурс: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090016347.pdf>].
3. Rvan S., Hedman T., Christiansen E.L. Honeycomb vs. foam: evaluating a potential upgrade to international space station module shielding for micrometeoroids and orbital debris [Електронний ресурс: [http://ston.jsc.nasa.gov/collections/trs/\\_techrep/TM-2009-214793.pdf](http://ston.jsc.nasa.gov/collections/trs/_techrep/TM-2009-214793.pdf)].
4. Автоматичне зварювання [Електронний ресурс], режим доступу: <http://www.aviationspectator.com/image/latest-aviation-images?page=223>
5. Металева піна [Електронний ресурс], режим доступу: <http://msd.com.ua/pena/metallicheskaya-pena>].
6. Why is Duocel aluminum foam so special [Електронний ресурс: <http://www.ergaerospace.com/Aluminum-properties.htm>].
7. Khokhlova J. Inter-granular phase formation during reactive diffusion of gallium with Al alloy // Materials science forum. Trans tech publication, Max Planck Institute for intelligent systems. – 2014. – Vol. 768–769. – P. 321–326.
8. ДСТУ 2839 – 94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. - [Введ. 1996-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 109 с.
9. Кучерчук І.М. та ін. Загальний курс фізики. Навч. Посібник. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Техніка., 1999 – 536 с.
10. В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.Т. Горбачук та ін. Загальна фізика: Лабораторний практикум.: Навч. Посібник. За заг. ред. І.Т. Горбачука. – К. Вища школа., 1992 – 509 с.
11. ДСТУ 2444 – 94. Розрахунки та випробування на міцність. – К.:

Держстандарт України, 1994. – 71 с.

12. ДСТУ 2409 – 94. Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення. – Термін дії з 01.01.1995. – К.: Держстандарт України.

13. Пат. 110214, МПК С22С 1/06 (2006.1). Рафінувально-модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / О.А. Мітяєв, І.П. Волчок, К.П. Лоза, В.В. Клочихін, В.В. Лукінов; заявник і патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. - №и201604356 ; заявл. 20.04.2016 ; опубл. 26.09.2016, Бюл. №18. – 4 с.

14. Мітяєв О.А. Підвищення технологічних і механічних властивостей сплаву АК5М (АЛ5) / О.А. Мітяєв, І.П. Волчок, К.М. Лоза та ін. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. - №1. – С.75-77.

15. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство (словник-довідник) : Довідник / В.В. Попович.: Світ. – 2010 – 304 с.