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 проєкту (роботи)

бакалавра
(ступінь вищої освіти)

на тему Підвищення механічних властивостей поршневих сплавів мікро- та наномодифікуванням

Виконав: студент 4 курсу, групи БАД–212

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

ЛОФЕРДЮК В.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. МІТЯЄВ О.
(прізвище та ініціали)

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

2026

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри КМХТ
Іван АКІМОВ
«20» квітня 20 26 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ЛОФЕРДЮК Віталій Іванович
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Підвищення механічних властивостей поршневих сплавів мікро- та наномодифікуванням»

керівник проєкту (роботи) д.т.н., проф.. МІТЯЄВ Олександр Анатолійович,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» 04 2026 року № 173

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) первинні характеристики вторинних алюмінієвих поршневих сплавів; умови експлуатації поршнів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) обгрунтувати доцільність та актуальність застосування вторинних алюмінієвих сплавів; запропонувати ефективний технологічний варіант покращення структури та підвищення рівня властивостей поршневих алюмінієвих сплавів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) Презентація: 1 слайд – титульний; 2 слайд – об'єкт і предмет дослідження,мета роботи; 3 – 15 слайди - інфомаційні; 16 – слайд висновки; 17 слайд – дякую за увагу.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	**МІТЯЄВ О.А., професор**	20.04.26	27.04.26
2	**МІТЯЄВ О.А., професор**	27.04.26	05.05.26
3	**МІТЯЄВ О.А., професор**	05.05.26	20.05.26
Нормо контроль	**ПЕТРУША Ю.Ю., доцент**	20.05.26	25.05.26

7. Дата видачі завдання «__20__» _____квітня_____2026___року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	**Вступ, розділ 1**	**27.04.2026**	виконано
2	**Розділ 2**	**05.05.2026**	виконано
3	**Розділ 3, презентація**	**20.05.2026**	виконано
4	**Попередній захист**	**26.05.2026**	виконано

Студент(ка) _____ **Віталій ЛОФЕРДЮК**
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ **Олександр МІТЯЄВ**
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: с.37, табл. 3, рис. 4, джерел. 32

АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, МОДИФІКУВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС, МІКРОСТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, МІКРО- ТА НАНОМОДИФІКУВАННЯ.

Об’єкт досліджень – процеси забезпечення заданої мікроструктури та підвищеного рівня комплексу властивостей поршневих алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження – механізми структуроутворення та їхній зв’язок з рівнем механічних властивостей вторинного поршневого сплаву АЛ25(АК12М2МгН) при кімнатній (20°С) та робочій (300°С) температурах.

Мета роботи – пошук і розробка ефективного та низьковитратного методу забезпечення необхідної мікроструктури та високих показників механічних властивостей вторинних поршневих алюмінієвих сплавів за рахунок застосування мікро- та наномодифікаторів.

Практична цінність результатів дипломної роботи полягає в тому, що на підставі проведених досліджень і отриманих даних, можливе прогнозування надійності і довговічності виробів, котре розширює області застосування вторинних силумінів у машинобудуванні при виготовленні відповідальних деталей.

Виконана дипломна робота містить наступні складові: огляд технічної літератури за темою дипломної роботи; загальні відомості про поршневі сплави та особливості їхньої структури; матеріали та методику досліджень; опис впливу мікро- та наномодифікування на механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів; висновки; перелік літературних джерел.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних познак, одиниць і термінів……... 6

Вступ……... 7

1 Загальні відомості про поршневі сплави системи AL – SIта особливості їхньої структури……. 9

1.1 Характеристика доцільності застосування вторинних алюмінієвих сплавів……. 9

1.2 Визначення та застосування алюмінієвих поршневих сплавів …….. 11

1.3 Вплив газовмісту на властивості силумінів…….. 14

1.4Властивості, легування та термічна обробка силумінів…… 16

1.5 Умови роботи поршнів та вимоги до поршневих матеріалів…….. 17

1.6 Модифікування силумінів ……. 19

1.7Мета і задачі дослідження …….. 22

2 Матеріали та методика досліджень ……. 23

2.1 Обгрунтування методів досліджень ……. 23

2.2 Обладнання, матеріали та експериментальні процедури …… 23

2.3 Металографічні дослідження …… 24

2.4 Визначення показників механічних властивостей …….. 25

3 Вплив мікро- та наномодифікування на механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів ……. 26

3.1 Стан проблеми …… 26

3.2 Мікро- та наномодифікування сплаву АЛ25 (АК12М2МгН) …… 29

3.3 Експериментальні дані та їх обговорення ……... 29

Висновки ……... 34

Перелік джерел посилань ……. 37

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АК, АЛ– маркування алюмінієвих сплавів;

Al-Si – силуміни;

УМЕ – марка універсальної розривної машини;

Al_2Cu, Mg_2Si, $TiAl_3$, $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, Al_5SiFe – інтерметалідні фази;

АК12М2МгН – маркування сплаву;

МК-1 – модифікувальний комплекс;

($SiC, K_2TiF_6,\ S, Na_2CO_3, BaCO_3, KBF_4$) – складові модифікувального комплексу;

ε_f – граничний ступінь деформації;

РЕМ-1061 – сканувальний електронний мікроскоп;

$SIGETA\ MM\ 700$ – світловий мікроскоп;

РСМА – ренгеноспектральний мікроаналіз;

$\sigma_в$ – границі міцності;

δ – відносне видовження;

ρ – густина.

ВСТУП

Нано- та мікромодифікування алюмінієвих сплавів є одним із важливих напрямів сучасного матеріалознавства, що спрямований на покращення властивостей конструкційних матеріалів. Алюмінієві сплави широко застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема в авіаційній, автомобільній та машинобудівній, завдяки поєднанню низької густини, достатньої міцності, корозійної стійкості та високої технологічності. Водночас підвищення вимог до надійності та довговічності виробів зумовлює необхідність подальшого вдосконалення їх структури та експлуатаційних характеристик.

Одним із ефективних підходів до вирішення цієї задачі є модифікування структури сплавів на мікро- та нанорівнях. Мікромодифікування полягає у введенні невеликих кількостей спеціальних добавок, які впливають на процеси кристалізації та формування структури металу. У результаті змінюються розміри зерен, форма та розподіл фаз, що дозволяє отримати більш однорідну та дрібнозернисту структуру. Це, у свою чергу, позитивно впливає на механічні властивості, зокрема підвищує міцність і пластичність матеріалу.

Наномодифікування передбачає використання частинок нанорозмірного масштабу, які вводяться у розплав. Завдяки значній питомій поверхні такі частинки є ефективними центрами зародження кристалів, що сприяє формуванню ультрадрібнозернистої структури. Крім того, вони можуть перешкоджати руху дислокацій, забезпечуючи додаткове зміцнення матеріалу за рахунок дисперсійного механізму.

Актуальність застосування методів мікро- та наномодифікування зумовлена можливістю суттєвого покращення властивостей сплавів без значного збільшення їх маси або вартості. Це особливо важливо для галузей, де пред’являються високі вимоги до співвідношення міцності та маси конструкцій. Крім того, модифікування дозволяє підвищити якість литих виробів, зменшити кількість

дефектів, таких як пористість і гарячі тріщини, а також покращити технологічні властивості матеріалу.

Відомо, що ефективність мікромодифікування значною мірою залежить від вибору модифікувальних елементів і умов їх введення. Наприклад, у алюмінієво-кремнієвих сплавах широко застосовуються добавки, які змінюють морфологію кремнієвої фази, переводячи її з пластинчастої у більш компактну форму. Така зміна структури сприяє підвищенню пластичності та ударної в’язкості сплаву.

У випадку наномодифікування важливим є забезпечення рівномірного розподілу наночастинок у об’ємі розплаву. Однією з основних проблем є їх схильність до агломерації, що може знижувати ефективність модифікування. Для вирішення цього застосовують різні технологічні методи, зокрема інтенсивне перемішування, використання ультразвукової обробки або введення частинок у вигляді спеціальних композиційних добавок. Значна увага приділяється також вивченню механізмів взаємодії наночастинок із металевою матрицею. Вони можуть впливати не лише на процес кристалізації, але й на подальші структурні перетворення, обмежувати дифузійні процеси та підвищувати термічну стабільність матеріалу. Це відкриває можливості для створення сплавів із комплексом покращених властивостей.

Важливим фактором є економічна ефективність застосування таких технологій. Незважаючи на складність отримання наноматеріалів, їх використання у невеликих кількостях дозволяє досягти відчутного ефекту. Розвиток сучасних технологій сприяє зниженню вартості наночастинок, що робить їх більш доступними для промислового використання. Отже, нано- та мікромодифікування алюмінієвих сплавів є перспективним напрямом, що дозволяє цілеспрямовано формувати структуру матеріалу та керувати його властивостями. Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на вдосконалення технологій модифікування та розширення можливостей практичного застосування отриманих результатів.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОРШНЬОВІ СПЛАВИ СИСТЕМИ AL-SI ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХНЬОЇ СТРУКТУРИ

1.1 Характеристика доцільності застосування вторинних алюмінієвих сплавів

У сучасній промисловості алюмінієві сплави посідають друге місце за обсягами використання як конструкційні матеріали, поступаючись лише залізовуглецевим сплавам. Їхнє інтенсивне впровадження в різноманітних секторах економіки та виробництва неминуче призводить до накопичення значної кількості брухту, технологічних відходів та відбракованих виробів. Цей масив потребує ефективної утилізації із застосуванням рентабельних і високопродуктивних методів рециклінгу.

Для України дане питання є критично важливим, оскільки в країні відсутнє власне виробництво первинного алюмінію та сплавів на його основі. Відповідно, забезпечення внутрішнього попиту на ці матеріали можливе або шляхом високовартісного імпорту за валютні кошти, або через розвиток технологій вторинної переробки наявного брухту й відходів у якісну продукцію.

Варто зазначити, що виробництво вторинних сплавів є економічно значно вигіднішим порівняно з первинними металами. Проте їхні якісні характеристики зазвичай є нижчими. Це зумовлено тим, що під час переплавки матеріал забруднюється небажаними домішками – зокрема залізом, залишками мастил та неметалевими включеннями. Такі компоненти суттєво погіршують рівень механічних властивостей готового металу, що негативно позначається на якості кінцевих виробів.

З огляду на це, актуальним науково-технічним завданням є створення високоефективних і доступних технологій рециклінгу, які дозволять отримувати із вторинної сировини сплави, що за своїм експлуатаційним потенціалом не поступатимуться первинним матеріалам.

У даному дослідженні основну увагу зосереджено на поршневих сплавах. Поршень є критично важливою й відповідальною деталлю, яка працює в умовах високих навантажень у двигунах внутрішнього згоряння, а також у компресорному обладнанні для нагнітання повітря чи інших газів. Зважаючи на широку сферу застосування та високі вимоги до таких деталей, обґрунтовано доцільність їх виготовлення саме на основі підготовленої вторинної сировини [1].

Сучасні уявлення про формування структури силумінів базуються на складній природі рідкого стану розплаву. Передбачається, що розплав системи Al-Si містить мікрогрупування або кластери з ковалентним зв'язком. Утворення таких кластерів пояснюється виникненням специфічних сил донорно-акцепторної взаємодії. При звичайних швидкостях охолодження переважає пластинчаста (стрічкова) форма росту кристалів кремнію. Однак при високих швидкостях охолодження (понад $35 \dots 40\,°C/$хв) виникають кристали у формі куба, що є результатом приєднання поодиноких атомів або малих кластерів. Контроль кількості цих кластерів дозволяє регулювати хід кристалізації та ліквідувати небажані квазіпервинні кристали [2].

Для виправлення морфології кристалів кремнію використовують процес модифікування. Найбільш ефективним модифікатором для евтектики залишається натрій. Сильне подрібнення та сфероїдизація кристалів кремнію під дією модифікаторів призводить до підвищення границі міцності на 30…40 % та збільшення відносного подовження у 2…3 рази. Окрім натрію, дієвими модифікаторами є стронцій, літій, кальцій та магній. Для заевтектичних сплавів критично важливим є модифікування фосфором, який вводять у розплав у чистому вигляді або у складі лігатур. Фосфор створює додаткові центри кристалізації, подрібнюючи первинний кремній. Також встановлено позитивний вплив сурми (Sb) та кадмію (Cd) при їхньому вмісті до 0,4 %.

Термічна обробка силумінів має свої специфічні особливості, зумовлені природою фаз. Подвійні сплави алюміній-кремній демонструють низьку здатність до зміцнення при гартуванні, оскільки частинки кремнію, що виділяються, не

мають когерентного зв’язку з матрицею і швидко коагулюють. Ефект зміцнення в таких системах рідко перевищує двадцять відсотків. Швидкість дифузії кремнію в алюмінії дуже висока, що спричиняє швидкий розпад пересиченого твердого розчину навіть при помірних температурах. Наприклад, повний розпад розчину при температурі $280\ ^0\text{C}$ відбувається всього за 40 хвилин. Проте властивості можна покращити шляхом правильного поєднання природного та штучного старіння. Встановлено, що попередня витримка при кімнатній температурі створює умови для формування набагато щільнішої мережі зміцнювальних виділень при наступному нагріванні до $200\ ^0\text{C}$ [3].

Важливим аспектом є також вплив легувальних елементів на фізичні властивості, зокрема на коефіцієнт лінійного розширення, що критично для деталей на кшталт поршнів двигунів внутрішнього згоряння. Кремній та нікель є найбільш ефективними елементами для зниження теплового розширення алюмінієвої матриці, тоді як магній та цинк, навпаки, підвищують цей показник. Легування магнієм дозволяє отримати систему алюміній-кремній-магній, де зміцнення відбувається за рахунок виділення фази Mg_2Si, що робить сплави значно міцнішими та придатними для високонавантажених деталей. Використання міді додатково підвищує жароміцність та опір втомі, хоча й дещо погіршує корозійну стійкість. Усі ці фактори у сукупності дозволяють створювати складні багатокомпонентні силуміни, здатні працювати в екстремальних умовах високих температур і механічних напружень, забезпечуючи надійність сучасної техніки [4].

1.2 Визначення та застосування алюмінієвих поршневих сплавів

Алюмінієві поршневі сплави – це спеціальна група ливарних або деформівних алюмінієвих сплавів, призначених для виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згоряння та інших деталей, що працюють в умовах

високих температур, тисків і змінних механічних навантажень. Вони являють собою багатокомпонентні матеріали на основі алюмінію з додаванням легувальних елементів, таких як кремній, мідь, магній, нікель та інші, які забезпечують необхідні експлуатаційні властивості. Загалом алюмінієві сплави визначаються як сплави, у яких основним компонентом є алюміній, а введення легувальних домішок дозволяє значно покращити їх міцність, жаростійкість, зносостійкість та інші характеристики. Поршневі сплави належать переважно до ливарних алюмінієвих сплавів, оскільки вони повинні мати добрі ливарні властивості, зокрема високу текучість розплаву та здатність точно відтворювати форму виробу. Це дозволяє виготовляти складні за геометрією деталі, такі як поршні, головки циліндрів і картери двигунів [5]. Основною особливістю таких сплавів є поєднання малої густини з високою механічною міцністю, що є критично важливим для рухомих деталей машин. Крім того, вони характеризуються високою теплопровідністю, що забезпечує ефективне відведення тепла від робочих поверхонь поршня, а також достатньою жароміцністю, тобто здатністю зберігати свої властивості при підвищених температурах.

Визначальною рисою алюмінієвих поршневих сплавів є також їхня стабільність при циклічних навантаженнях і вібраціях. Поршень у двигуні постійно піддається швидким змінам температури і тиску, тому матеріал повинен мати низький коефіцієнт теплового розширення, щоб уникати деформацій і заклинювання в циліндрі. Завдяки введенню кремнію підвищується зносостійкість і твердість, а додавання міді та магнію сприяє зростанню міцності і теплостійкості. Таким чином, склад сплаву підбирається таким чином, щоб досягти оптимального балансу між легкістю, міцністю та термічною стабільністю.

Область застосування алюмінієвих поршневих сплавів охоплює насамперед машинобудування, зокрема виробництво двигунів внутрішнього згоряння. З них виготовляють поршні, елементи циліндро-поршневої групи, деталі паливної апаратури, а також інші вузли, що працюють при високих температурах і навантаженнях. У сучасному моторобудуванні базовим матеріалом виступають

сплави систем Al-Si (силуміни) та Al-Si-Cu-Mg, зокрема марок типу АЛ (АЛ25) та АК (АК12, АК18), які характеризуються оптимальним поєднанням ливарних властивостей та механічної міцності [3]. Використання алюмінієвих сплавів у поршнях дозволяє значно зменшити масу рухомих частин двигуна, що, у свою чергу, знижує інерційні навантаження, підвищує ефективність роботи двигуна і зменшує витрати палива.

Крім автомобільної галузі, алюмінієві поршневі сплави широко застосовуються в авіаційній техніці, суднобудуванні та енергетичному машинобудуванні. У цих сферах вони є критично важливими для виготовлення деталей двигунів внутрішнього згоряння великої потужності, компресорів та високонапірних насосів. Для забезпечення стабільної роботи в таких вузлах найчастіше використовують наступні групи сплавів:

– висококремениості евтектичні сплави (типу АЛ2, АЛ4, АЛ9): завдяки високому вмісту кремнію (Si 10 ... 13%) вони мають чудову рідкоплинність та мінімальний коефіцієнт лінійного розширення. Це дозволяє створювати деталі з високою точністю розмірів, що важливо для турбокомпресорів та поршнів малої авіації;

– сплави системи $Al - Cu - Mg$ (типу Д16, АК4-1): ці матеріали мають підвищену жароміцність. Сплав АК4-1 є «золотим стандартом» в авіабудуванні для виготовлення кованих поршнів та лопаток компресорів, оскільки він зберігає механічні властивості при температурах до $250 \ldots 300°C$;

– спеціалізовані леговані сплави (типу АЛ25, АЛ30): до їх складу вводять нікель (Ni) та мідь (Cu) для підвищення твердості при високих температурах. Сплав АЛ25 часто використовується в дизельних двигунах суден та тепловозів, де поршні піддаються екстремальним тепловим ударам.

Алюмінієві сплави залишаються одним із найважливіших конструкційних матеріалів завдяки поєднанню малої ваги та високої питомої міцності [4, 5].

1.3 Вплив газовмісту на властивості силумінів

Процес виготовлення алюмінієвих сплавів, і зокрема силумінів, є складним металургійним завданням, де взаємодія розплаву з навколишнім середовищем відіграє вирішальну роль у якості кінцевого продукту. Алюміній за своєю природою має високу хімічну активність, що призводить до інтенсивного поглинання газів безпосередньо під час плавки. Ці гази не просто механічно змішуються з металом, а вступають у складні хімічні реакції, утворюючи або тверді розчини, або специфічні сполуки, де вміст газів може коливатися від 2 до 30 $см^3/100$ г металу [6]. Особливий інтерес викликає динаміка поведінки газів під час кристалізації. На межі розподілу рідкої та твердої фаз виникають так звані газові зародки, які під впливом капілярних сил утримуються всередині структури та поступово збільшуються в об’ємі завдяки дифузії. У ідеальних умовах, коли сила відриву перевищує силу прилипання, бульбашка піднімається на поверхню, проте в реальних циклах швидкість кристалізації часто вища за швидкість спливання. Як наслідок, ці бульбашки консервуються всередині виливка, утворюючи розгалужену газову пористість, що критично знижує герметичність та міцність деталей [7, 8]. Крім того, продукти взаємодії газів із металом формують неметалеві включення, які локалізуються по межах зерен, створюючи зони напруження та руйнуючи зв'язки всередині кристалічної решітки [9].Центральне місце в ієрархії газів посідає водень, частка якого в загальному газовмісті становить від 70% до 90% [8]. Основним джерелом його появи є водяна пара, яка адсорбується на поверхні шихти. При температурах, що перевищують $500°C$, відбувається термічна дисоціація пари, яка супроводжується активним виділенням водню та утворенням оксиду алюмінію. Експериментально підтверджено, що оксид алюмінію та водень у розплаві завжди супроводжують один одного. Розчинність водню в алюмінієвих системах має визначену температурну залежність: у твердому стані при 660°C вона становить лише 0,36 $см^3/100$ г, проте при переході в рідку фазу миттєво зростає до 0,69 $см^3/100$ г [10].

Подальше нагрівання до екстремальних температур понад $2000°C$ продовжує збільшувати сорбційну здатність, і лише після цього спостерігається спад. Це створює труднощі при перегріві розплаву, оскільки кожне підвищення температури фактично «накачує» метал воднем, який потім виділиться під час остигання у вигляді дефектів [7]. Вплив кремнію як основного легувального елемента додає ще один рівень складності. У зоні малих концентрацій, де формується α-твердий розчин, кремній дещо стримує поглинання водню, проте, як тільки його вміст перевищує межу розчинності, абсорбційна здатність сплаву стрімко зростає [11]. Наприклад, у рідкому кремнії при температурі 1530°C розчинність водню може досягати вражаючих 56 см³/100 г. Це пояснюється утворенням двофазних структур та виникненням мікроскопічних порожнин на межах фаз, які стають резервуарами для газів [10].

Металургійна практика використовує модифікатори для контролю цих процесів. Натрій, що подрібнює структуру, суттєво підвищує в'язкість розплаву, що механічно затримує водень усередині. На противагу цьому, магній (до 0,4%) та титан (до 0,1%) діють як стабілізатори, знижуючи коефіцієнт дифузії водню [7-9]. Окремий науковий інтерес представляють рідкоземельні метали (РЗМ). Дослідження на сплавах типу АК7ч (АЛ9) показують, що при оптимальному дозуванні РЗМ у кількості 0,13% кількість газів у металі знижується з вихідних 0,286 до $0{,}179 \ldots 0{,}219$ см^3/100г. Це супроводжується зменшенням пористості з $1{,}79\%$ до рівня $0{,}65 \ldots 0{,}91\%$. Проте при підвищенні вмісту РЗМ до $0{,}34\%$ спостерігається зворотна тенденція − повторне зростання газонасиченості та пористості виливків [11]. Традиційна металургія розглядає водень як шкідливу домішку, проте сучасний аналіз дозволяє припустити, що за певних умов він може позитивно впливати на механізми кристалізації. Це відкриває шлях до створення нових технологічних циклів, де газовміст стає керованим параметром для програмування властивостей сплаву під конкретні інженерні завдання [12].

1.4 Властивості, легування та термічна обробка силумінів

Сучасне матеріалознавство класифікує промислові алюмінієво-кремнієві сплави за п’ятьма основними групами залежно від легування: від подвійних систем $Al - Si$ до складних композицій $Al - Si - Cu - Mg - Mn$. Основним механізмом зміцнення цих систем є термічна обробка, параметри якої жорстко обмежені температурами низькоплавких евтектик. Для сплавів, що не містять міді, нагрів під гартування проводиться при температурах нижче $557°C$, тоді як для мідьвмісних систем цей поріг знижується до $537°C$. Процес штучного старіння, що забезпечує основний приріст міцності, проводиться в інтервалі $147 \ldots 177°C$ протягом 4…12 годин.

Ключову роль у зміцненні відіграє магній, який утворює інтерметалід Mg_2Si. Розпад твердого розчину відбувається за чіткою кінетичною схемою: від зон Гіньє-Престона до метастабільної β' −фази та стабільної фази Mg_2Si. Впровадження термоциклічної обробки в системах $Al - Si - Mg$ дозволяє скоротити технологічний час у 2,5…4,0 рази, одночасно підвищуючи пластичність. Мідь, додана у концентрації до 4%, забезпечує максимальний ефект зміцнення та підвищує жароміцність, проте вимагає прецизійного контролю нагріву в діапазоні $500 \ldots 525°C$ для запобігання оплавленню фаз.

Вплив додаткових легувальних елементів суттєво змінює експлуатаційний профіль сплаву. Марганець та залізо часто присутні в структурі одночасно, причому негативний вплив заліза мінімізується при його концентрації менше 0,25% у присутності міді. Додавання цинку в межах 3% підвищує міцність та покращує оброблюваність різанням, хоча й дещо знижує жароміцність. Спеціальні японські розробки на базі системи $Al - Si - Cu - Zn - Mg$ демонструють границю міцності $\sigma_в$ на рівні 420…460 МПа при відносному подовженні δ в межах 4…6%, що робить їх конкурентними навіть порівняно з деформівними сплавами типу АК4 та АК6. Мікролегування сурмою або кадмієм у

кількості до 0,4% також позитивно впливає на механічні показники [13].

Функціональний поділ силумінів за вмістом кремнію визначає їхнє застосування: конструкційні сплави містять близько 11% Si, а припої поділяються на чотири групи з концентраціями $6\%, 7{,}5\%, 10\%$ (з 4% Cu) та 12% Si. Останній вирізняється найвищою корозійною стійкістю. Фізичні властивості також демонструють чітку залежність: легування кремнієм знижує коефіцієнт лінійного розширення алюмінію та зменшує його теплопровідність на 20…30%. Корозійна стійкість залишається високою завдяки оксидній плівці, проте вона може погіршуватися при модифікуванні металевим натрієм, який підвищує пористість та рідкоплинність розплаву. Таким чином, баланс легувальних елементів та суворе дотримання температурних режимів є визначальними для отримання високотехнологічних виливків [14].

1.5 Умови роботи поршнів та вимоги до поршневих матеріалів

Ефективність та довговічність двигунів внутрішнього згоряння значною мірою лімітуються роботоздатністю поршневої групи, яка функціонує в екстремальних термомеханічних умовах [13]. Поршень є ключовим елементом, що трансформує енергію розширення газів у механічну роботу, одночасно сприймаючи циклічні ударні навантаження та інтенсивні теплові потоки. Аналіз умов роботи показує, що на днище поршня діє тиск газів, який у сучасних форсованих двигунах становить від 8 МПа до 15 МПа, а в окремих випадках і вище [15, 16]. Ці механічні зусилля сумуються з інерційними силами, що виникають внаслідок високої частоти зворотно-поступального руху, створюючи складний стан напруженості в тілі деталі [17].

Особливу увагу в наукових дослідженнях приділяють тепловому стану поршня. Температурне поле деталі характеризується значною нерівномірністю:

якщо вогнева поверхня днища може нагріватися до $300 \dots 400°C$, то нижня частина юбки залишається відносно холодною у межах $100 \dots 140°C$ [13, 17]. Такий температурний градієнт стає причиною виникнення термічних напружень, які в поєднанні із залишковими ливарними напруженнями (що становлять $18 \dots 25$ МПа) можуть призводити до мікротріщин у зонах концентрації напружень, таких як краї камери згоряння або отвори під поршневий палець. Саме тому критично важливою вимогою до матеріалу є не лише статична міцність, а й висока втомна витривалість в умовах циклічних температурних змін [18].

Виходячи з аналізу умов експлуатації, до поршневих матеріалів висувається комплекс суперечливих вимог. З одного боку, матеріал повинен мати низьку питому вагу для мінімізації інерційних навантажень на шатунно-кривошипний механізм. З іншого боку, необхідна висока жароміцність та стабільність механічних властивостей при температурах понад 300°C. Алюмінієві сплави є найбільш поширеним рішенням завдяки їхній малій густині та високій теплопровідності, яка в 3…4 рази перевищує показники чавуну. Це дозволяє ефективно відводити тепло від днища до стінок циліндра, знижуючи ризик детонації в бензинових двигунах та прогару поршня в дизелях [19]. Проте алюміній має суттєвий недолік – високий коефіцієнт лінійного розширення ($17{,}5 \dots 22{,}3 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$), що змушує конструкторів використовувати складні геометричні профілі та терморегулювальні інварові вставки для стабілізації зазорів. Вимога до зносостійкості та антифрикційних властивостей обумовлена складністю забезпечення рідинного змащування в парі поршень-циліндр. В умовах високих швидкостей та тисків матеріал повинен чинити опір задирам та абразивному зносу, особливо в зоні верхньої поршневої канавки, де температурний вплив найбільш інтенсивний. Чавун у цьому аспекті демонструє кращі показники твердості та зносостійкості при нагріванні, але його велика маса обмежує використання у високообертових двигунах [16, 17].

Сучасним компромісом є використання заевтектичних силумінів із підвищеним вмістом кремнію, які поєднують легкість алюмінію зі зниженим коефіцієнтом розширення та покращеною втомною міцністю, що досягає 70…80

МПа при температурах близько $300°C$ [18]. Додатковим фактором вибору матеріалу є його технологічність. Матеріал повинен забезпечувати можливість отримання якісних заготовок без внутрішніх дефектів при мінімальних витратах. Корозійна стійкість також є обов'язковою, оскільки поршень постійно контактує з агресивними продуктами згоряння палива. Узагальнюючи, можна стверджувати, що ідеального поршневого матеріалу не існує, а кожен вибір є результатом інженерного компромісу між термічною стабільністю, механічною надійністю та економічною доцільністю. Подальший розвиток галузі пов'язаний із впровадженням композитних матеріалів та керамічних нанопокриттів, що дозволяють ще більше змістити межі термічної стійкості поршневих груп [14-17].

1.6 Модифікування силумінів

Сучасний розвиток машинобудування висуває високі вимоги до матеріалів, що працюють в умовах значних термічних та механічних навантажень. Алюмінієво-кремнієві сплави, відомі як силуміни, займають провідне місце завдяки унікальному поєднанню низької питомої ваги, високої корозійної стійкості та жароміцності. Особливий інтерес становлять заевтектичні сплави з вмістом кремнію понад 15%, які характеризуються мінімальним коефіцієнтом лінійного розширення та високою зносостійкістю, що робить їх ідеальними для виготовлення поршневої групи двигунів. Проте практичне застосування таких сплавів обмежене через їхню природну крихкість, зумовлену формуванням великих первинних кристалів кремнію голчастої або пластинчастої форми [19].

Процес виробництва високоякісних силумінів базується на рідкому первинному алюмінії та кристалічному кремнії. Технологічний цикл передбачає ретельну підготовку шихти, плавку в індукційних тигельних печах типу ІАТ, рафінування та обов'язкове модифікування. У ході досліджень [20] було встановлено, що традиційне використання фосфористої міді (CuP) у кількості

0,1% від маси шихти при температурах $700 \dots 800°C$ не завжди забезпечує необхідний рівень подрібнення структурних складників. Для досягнення стабільно високих результатів доцільно використовувати комплексні модифікатори на основі бориду ніобію (NbB_2) та оксиду кремнію (SiO_2).

Експериментальні дані підтверджують, що застосування суміші, яка містить $20 \dots 70\%$ бориду ніобію та $10 \dots 60\%$ оксиду кремнію з додаванням червоного фосфору, дозволяє радикально змінити морфологію кремнієвої фази. При обробці розплаву такими реагентами за температур $960 \dots 1000°C$ розмір первинних кристалів кремнію зменшується до $30 \dots 60$ мкм [21]. Це безпосередньо впливає на показники пластичності: граничний ступінь деформації (ε_f) для сплаву з 20% кремнію зростає з $65 \dots 70\%$ до $80 \dots 85\%$, а для сплаву з 30% кремнію – з 25% до майже 47%. Таке зростання показників дозволяє перевести виробництво деталей із литого стану в категорію деформованих напівфабрикатів, використовуючи методи багаторазового кування. Результати випробувань, що демонструють перевагу запропонованих сумішей над відомими порошковими аналогами, наведено в таблиці 1.1.

Окремим перспективним напрямом є модифікування розплаву парами водного розчину ортофосфорної кислоти (H_3PO_4). Наукова новизна цього методу полягає у синергетичному ефекті одночасного впливу фосфору та водню на процеси кристалізації. Технологія передбачає барботування розплаву парами кислоти через кварцові трубки діаметром 4…10 мм. Результати випробувань сплаву $Al - 30\%\, Si$ продемонстрували, що такий метод забезпечує зростання тимчасового опору ($\sigma_в$) до 155 МПа порівняно з 95 МПа при традиційній обробці. Відносне подовження (δ) при цьому збільшується майже вдвічі, що пояснюється повною глобуляризацією кремнієвих виділень.

Таблиця 1.1 – Порівняльні показники пластичності сплавів системи Al–Si [20, 21]

№	Сплав	Склад	Температура обробки, ^{0}C	Кількість відвісу шихти, %	ε_f, %
1	$A7 + 20\%Si$	відомий $30\%P + 30\%Fe_2O_3 + 40\%Al$ порошок	880±20	0,1	65…70
		Запропонований: $35\%NbB_2 + 35\%SiO_2 + 30\%P$	880±20	0,1	80…85
2	$A7 + 25\%Si$	відомий $30\%P + 30\%Fe_2O_3 + 40\%Al$ порошок	900±20	0,1	55…60
		Запропонований: $40\%NbB2 + 10\%SiO_2 + 50\%P$	900±20	0,1	70...75
3	$A7 + 30\%Si$	відомий $30\%P + 30\%Fe_2O_3 + 40\%Al$ порошок	920±20	0,1	25…30
		Запропонований: а)20%NbB_2+60%SiO_2+20%P б)70%NbB_2+25%SiO_2+5%P	920±20	0,1	40…45
			920±20	0,1	43…47

Таким чином, оптимізація хімічного складу модифікаторів та впровадження інноваційних методів газової обробки розплаву дозволяють керувати структурою заевтектичних силумінів на мікрорівні. Це не лише підвищує механічні характеристики готових виробів, але й розширює технологічні можливості алюмінієвих сплавів у високотехнологічних галузях промисловості. Отримані результати підтверджують ефективність переходу до складних багатокомпонентних систем модифікування для забезпечення стабільної експлуатаційної надійності матеріалів [20].

1.7 Мета і задачі дослідження

Метою роботи було дослідження впливу процесу модифікування поршневих алюмінієво-кремнієвих сплавів експериментальними, високоефективними та економічно доцільними комплексами, що містять мікро-та наночастки, на структуру та показники властивостей

Задачею дослідження було виявлення та розкриття потенціальних можливостей підвищення комплексу властивостей вторинних алюмінієвих сплавів за допомогою розроблених складу модіфікатора та технологічного процесу його застосування.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування методів досліджень

Основна мета даної роботи полягла в дослідженні та розробці методів підвищення якості та конструкційної міцності поршневих алюмінієвих сплавів, що отримані на основі використання вторинних шихтових матеріалів.

Конструкційною міцністю матеріала прийнято вважати комплекс властивостей, котрі в найбільш повному обсязі характеризують придатність матеріалу до різноманітних умов експлуатації та знаходяться в найбільшій кореляції з масою, надійністю і довговічністю конкретного виробу.

Для конкретних умов роботи виробів встановлюються лише ті види випробувань, які відповідають умовам його експлуатації, або регламентуються вимогами стандартів. У зв’язку з цим у даній роботі, окрім стандартних методів аналізу мікроструктури на оптичних і електронних мікроскопах, проводили випробування та визначали той комплекс властивостей. Котрий регламентується ДСТУ 2839-94 [22] для поршневого сплаву АК12М2МгН(АЛ25).

2.2 Обладнання, матеріали та експериментальні процедури

Досліджуваний сплав АК12М2МгН готували в електричній печі опору, використовуючи як шихту 100% зворотних матеріалів власного виробництва. Плавку здійснювали в чавунному тиглі із захисною графітовою футеровкою. Одержаний метал за своїм хімічним складом задовольняв критеріям ДСТУ 2839-94 (вміст основних компонентів: $12{,}4\%\ Si;\ 2{,}6\%\ Cu;\ 1{,}1\%\ Ni;\ 0{,}65\%\ Fe;\ 0{,}06\%\ Ti;\ 0{,}48\%\ Mn;\ 0{,}03\%\ Cr;\ 0{,}015\%\ Zn;$ на рівні вимог стандарту). Загалом було проведено чотири серії плавок. На першому етапі тверду шихту розплавляли та доводили рідку ванну металу до

температури $720…730\,°C$ під захисним шаром покривного флюсу (KCl – 33 мас. %, NaCl – 67 мас. %) у кількості 2 % від ваги завалки. Підготований таким чином дослідний сплав у подальшому проходив різне за технологічними схемами оброблення, котрі більш детально описані у розділі 3.

Задля гомогенізації розподілу модифікувальних компонентів у рідкій фазі, метал піддавали примусовому механічному перемішуванню впродовж 5…7 хвилин. Відливання зразків для подальших тестів виконували згідно з регламентом та вимогам ДСТУ 2839-94.

Термічне зміцнення лабораторних зразків, призначених для механічних тестів та структуроутворення, здійснювали за стандартним режимом Т1, який передбачав штучне старіння за температури $210\,°C$ із витримкою протягом 6 годин.

2.3 Металографічні дослідження

Металографічні дослідження мікроструктури реалізували за допомогою світлового мікроскопа «$Sigeta\ MM\ 700$» при збільшеннях 100…500 разів. Для ідентифікації фаз високої твердості, зокрема ймовірних карбідних виділень Al_4C_3, застосовували метод рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Ці визначення виконували на сканувальному електронному мікроскопі РЕМ-1061 у режимі вторинних електронів при величині прискорювальної напруги 30 кВ та діаметрі електронного зонда, котрий не перевищував $1 \cdot 10^{-9}$ м.

Мікроструктуру сплавів вивчали на шліфах без травлення, а також після травлення реактивом наступного складу: 12,5 мл HF, 25 мл HNO_3, 50 мл HCl, 12,5 мл H_2O.

2.4 Визначення показників механічних властивостей

Дослідження механічних властивостей алюмінієвих сплавів проводилось з метою визначення їхньої міцності, твердості та пластичності. Для цього використовували стандартні методи механічних випробувань, які дозволяють оцінити поведінку матеріалу під дією зовнішніх навантажень.

Дослідження механічних властивостей алюмінієвих сплавів проводилось з метою визначення їхньої міцності, твердості та пластичності. Для цього використовували стандартні методи механічних випробувань, які дозволяють оцінити поведінку матеріалу під дією зовнішніх навантажень.

Під час досліджень визначали межу міцності при розтягу, відносне подовження та твердість зразків. Отримані результати дають можливість оцінити якість сплаву, вплив хімічного складу та режимів термічної обробки на властивості матеріалу. Особлива увага приділялась силумінам, які широко застосовуються у ливарному виробництві завдяки поєднанню невеликої густини, достатньої міцності та добрих технологічних характеристик.

Визначення механічних характеристик міцності та пластичності здійснювали відповідно до вимог ДСТУ $ISO\ 6892-1{:}\ 2019$ [22]. Для проведення випробувань використовували циліндричні зразки з діаметром робочого перерізу 5 мм та розрахунковою довжиною 25 мм. Дослідження проводили на універсальній розривній машині $\text{УМЕ}-10\text{Тн}$, яка забезпечує прикладання навантаження при швидкості переміщення захватів 15 мм/хв. Усі випробування виконувались за кімнатної температури, що становила 20 °С.

При визначенні твердості дослідних сплавів використовували твердомір Роквела. В ході вимірювань у якості індентора застосовували сталеву загартовану кульку діаметром 1,588 мм, а показники знімали за червоною шкалою В.

3 ВПЛИВ МІКРО- ТА НАНОМОДИФІКУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

3.1 Стан проблеми

Дослідження, проведені представниками наукової школи «Матеріалознавство в машинобудуванні» під керівництвом д.т.н., проф. Волчка І.П., підтверджують, що найбільш економічно вигідними та технологічно доступними способами покращення властивостей вторинних сплавів на основі алюмінію є їх модифікування та рафінування. Експериментальні й виробничі тести показали, що застосування комплексних модифікаторів [23, 24], які містять SiC, K_2TiF_6, S, Na_2CO_3, $BaCO_3$ та KBF_4 у кількості 0,05…0,15 % від загальної маси розплаву (коригується відповідно до концентрації заліза в шихті), забезпечує такі ефекти [25]:

– інтенсифікацію рідиннопливності металу;

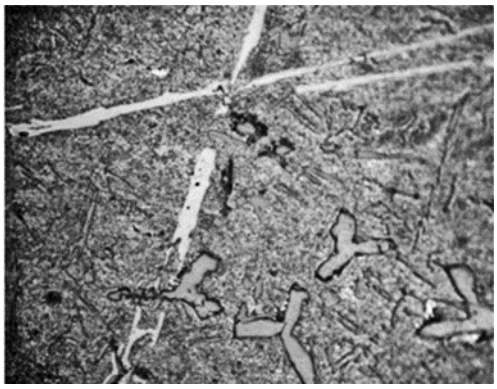
– мінімізацію пористості готових виливків (зменшення з 3…4 до 1 балу);

– морфологічну зміну інтерметалідних виділень – від пластинчастих структур до компактних (рис. 3.1);

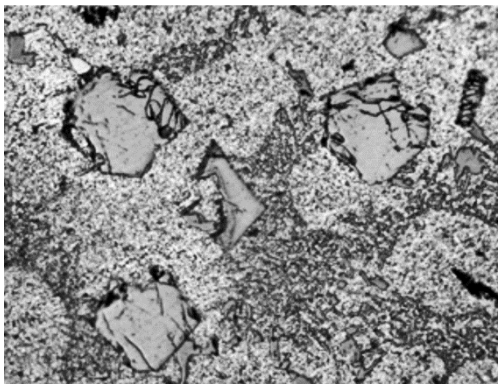
– вагоме зростання комплексу механічних характеристик (міцності, твердості, пластичності та втомної міцності).

На рисунку 3.1 продемонстровано характер зміни морфологічних особливостей залізовмісних інтерметалідних виділень у структурі силуміну марки АК9М2 за умови введення модифікувального комплексу МК-1 у кількості 0,02 мас. %. В структурі фіксується наявність фази Al_5SiFe (див. рис. 3.1 а), тоді як збільшення концентрації присадки до 0,10...0,15 мас. % сприяє формуванню фази $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ (див. рис. 3.1 б). У науковій літературі [26-28] підтверджено, що найвищу ефективність у процесах подрібнення зернової структури алюмінієвих матриць виявляють перехідні метали ($Ti, Zr, W, Mo, Ta, Nb, Sc, Hf, V, Re$). Їхній модифікувальний вплив зумовлений здатністю утворювати з алюмінієм

перитектичні системи, у яких температури нонваріантних реакцій є близькими до температур плавлення алюмінію.



а



б

а – фаза Al_5SiFe при кількості МК-1 0,02 мас. %, × 400;

б – фаза $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ при кількості МК-1 0,10...0,15 мас. %, × 400;

Рисунок 3.1 – Вплив модифікувального комплексу МК-1 на мікроструктуру вторинних алюмінієвих сплавів

В основі процесу подрібнення структури перехідними металами лежить зародкоутворення, що передбачає формування гетерогенних центрів кристалізації у вигляді інтерметаліднихсполук типу Al_3Ti.

Стрімкий прогрес у сфері нанотехнологій протягом останніх десятиліть зумовив підвищений інтерес дослідників до застосування ультрадисперсних та нанорозмірних добавок для покращення фізико-механічного комплексу властивостей алюмінієвого литва. Добре відомо, що диспергування частинок модифікувальної фази за умови її стабільної масової частки забезпечує експоненційне зростання кількості зародків, формуючи високодисперсну зернову структуру та підвищуючи міцнісні характеристики сплавів.

У монографії [29] висвітлено вплив дисперсності карбіду кремнію (SiC) на тимчасовий опір руйнуванню силуміну марки АК9ч. Досліджували фракції SiC із розмірами часток: 0,075…0,100; 10…20; 30…40; 50…60 та 90…100 мкм, де лише

мінімальний розмірний діапазон відповідав нанорівню. Попри незмінну концентрацію добавки (0,1 % від маси розплаву), зменшення геометричних параметрів частинок карбіду кремнію до 100 нм зумовило інтенсивне зміцнення сплаву АК9ч – показники границі міцності зросли з 115 МПа до 260 МПа (рис. 3.2).

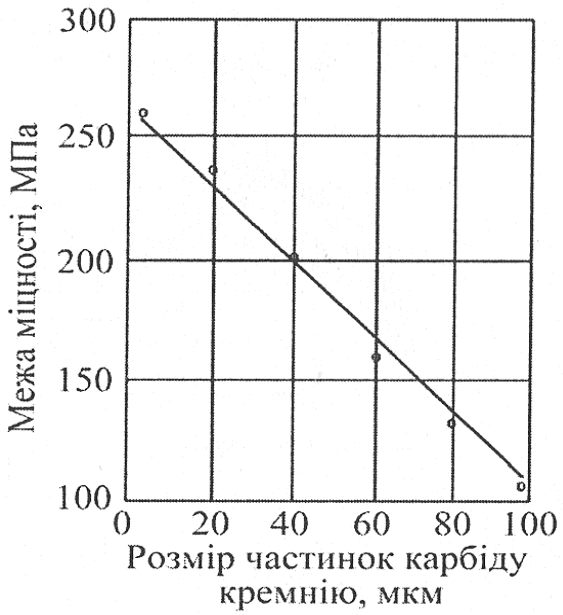


Рисунок 3.2 – Вплив фракції частинок SiC на міцність сплаву АК9ч

Варто зазначити, що в оригінальній праці дослідники не подають теоретичного обґрунтування причин такого вагомого зміцнення матричного металу. Ми припускаємо, що диспергування включень модифікатора орієнтовно у 100 разів (за фіксованого масового вмісту добавки) спровокувало пропорційне збільшення їхньої чисельності. Це, як наслідок, зумовило суттєве зростання густини гетерогенних зародків кристалізації, подрібнення структурних складових та, відповідно, підвищення міцнісних характеристик алюмінієвої матриці.

Проаналізовані експериментальні дані вказують на високу перспективність та доцільність подальшого дослідження процесів сумісного (комплексного) мікро- та наномодифікування вторинних силумінів задля спрямованого керування їхнім фізико-механічним потенціалом.

3.2 Мікро- та наномодифікування сплаву АЛ25 (АК12М2МгН)

Дослідження орієнтоване на встановлення закономірностей комбінованого впливу на мікроструктурні особливості та фізико-механічні параметри силуміну АЛ25 (АК12М2МгН) модифікувальної композиції МК-1 [23] та ультрадисперсної фулеренової черні, яка повністю складалася з аморфного вуглецю із середнім розміром елементів 40…50 нм.

Схема позапічної обробки розплаву відрізнялася за номерами плавок:

– метал першої плавки піддавали лише рафінуванню флюсом;

– у плавці № 2 рідкий метал додатково обробляли сумішшю МК-1;

– для плавки № 3 застосовували комбінацію МК-1 та дисперсної фулеренової черні;

– під час четвертої плавки в розплав вводили флюс, комплекс МК-1 та брикетовану під тиском 850 МПа суміш порошкового алюмінію марки А85 із фулереновою черню (співвідношення компонентів 5 : 1).

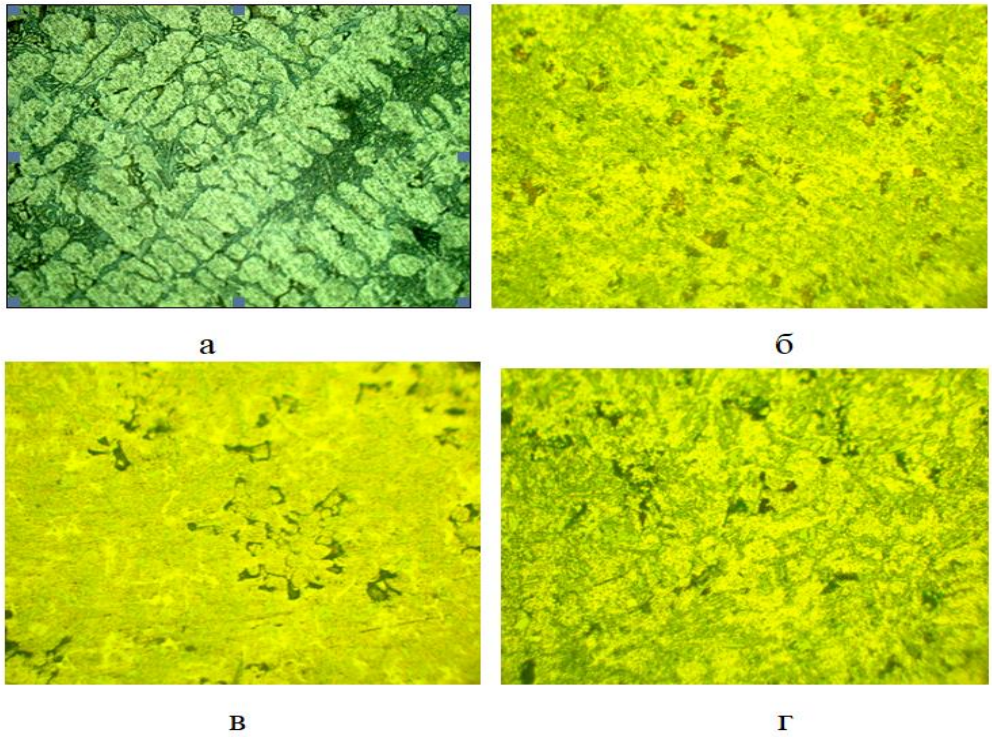
3.3 Експериментальні дані та їх обговорення

Параметри механічних характеристик досліджуваного силуміну, зафіксовані для різних умов металургійної обробки, узагальнено в таблиці 3.1.

Металографічне вивчення структури сплаву першої плавки показало наявність евтектичної складової (α-твердий розчин на основі Al + Si) та світло-сірих інтерметалідних фаз Al_5SiFeіз несприятливою морфологією (рис. 3.2 а). Такі виділення характеризуються видовженою голчастою (пластинчастою) формою і діють як інтенсивні концентратори внутрішніх напружень, що провокує стрімке погіршення механічного комплексу властивостей.

Таблиця 3.1 – Зміна комплексу механічних властивостей сплаву АК12М2МгН залежно від умов рафінування та модифікування (за температур випробувань 20 та 300 °C)

Варіанти	Рафінувально-захисний флюс, %	Модифікувальний комплекс МК-1, мас.%	Фуллеренова суміш, мас.%	20°С			300°С	
				$\sigma_в$, МПа	δ, %	HRB	$\sigma_в$, МПа	δ, %
1	2,0	-	-	154,3	0,4	950	97,0	1,5
2	2,0	0,1	-	192,2	0,8	1070	117,0	2,6
3	2,0	0,1	1,0	212,2	0,6	1120	123,2	2,4
4	2,0	0,1	1,0	224,0	0,5	1280	128,1	2,3
Примітка: для четвертого варіанту додатково використовували пресовану суміш порошку А85+фуллеренова чернь у співвідношенні 5:1.								



а, б, в, г – варіанти № 1-4 за таблицею 3.1

Рисунок 3.2 – Мікроструктура сплаву АК12М2МгН, ×400

У результаті позапічного оброблення розплаву за допомогою комплексу МК-1 (варіант 2 за табл. 3.1) зафіксовано морфологічну перебудову фази Al_5SiFe у компактні інтерметаліди $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ (рис. 3.2 б). Дана структурна трансформація забезпечила приріст тимчасового опору руйнуванню орієнтовно на 25 %, збільшення пластичності удвічі, а також підвищення твердості на 12,6 %. Аналогічний тренд щодо покращення міцнісних та пластичних характеристик зафіксовано і під час високотемпературних випробувань за $300\ °C$ (див. табл. 3.1).

Результати металографічних досліджень силуміну, виплавленого за технологічною схемою № 3, вказують на гетерогенний (неоднорідний) розподіл частинок фулеренової черні по об’єму матриці (рис. 3.2 в). Дана аномалія зумовлена низькою змочуваністю графітових матеріалів рідким алюмінієм. Через це значний об'єм вуглецевої сажі під час примусового замішування спливав у верхні шари ванни розплаву, що суттєво знижувало коефіцієнт корисного засвоєння цієї модифікувальної добавки. Проте навіть за таких умов механічні тести зафіксували помірне зростання міцності та твердості матеріалу як за $20\ °C$, так і за підвищеної температури ($300\ °C$), що супроводжувалося незначним падінням пластичних характеристик (див. табл. 3.1).

Зіставлення параметрів зміцнення сплаву АК12М2МгН (АЛ25) свідчить, що максимальний приріст властивостей досягається за умови реалізації 4-го технологічного варіанта (див. табл. 3.1, рис. 3.2 г). Застосування цього методу порівняно з вихідним станом (варіант № 1) дозволило підвищити тимчасовий опір руйнуванню на 45 % та 32 % за температур випробувань 20 і $300\ °C$ відповідно. Показники твердості при кімнатній температурі зросли орієнтовно на 35 % (вимірювання твердості за $300\ °C$ не належали до задач експерименту). Здобуті закономірності повністю корелюють із висновками праць [29, 30], де автори вказують на можливість синтезу карбіду алюмінію Al_4C_3 внаслідок хімічної взаємодії SiC та C із матричним розплавом силумінів. Для верифікації проходження зазначених металургійних реакцій структуру зразків четвертої плавки (див. рис. 3.2 г) піддали аналізу на сканувальному електронному

мікроскопі РЕМ-1061. Безпосередніми об’єктами мікроструктурного вивчення на підготовлених шліфах слугували компактні світло-сірі включення, що характеризувалися підвищеною мікротвердістю (рис. 3.3).

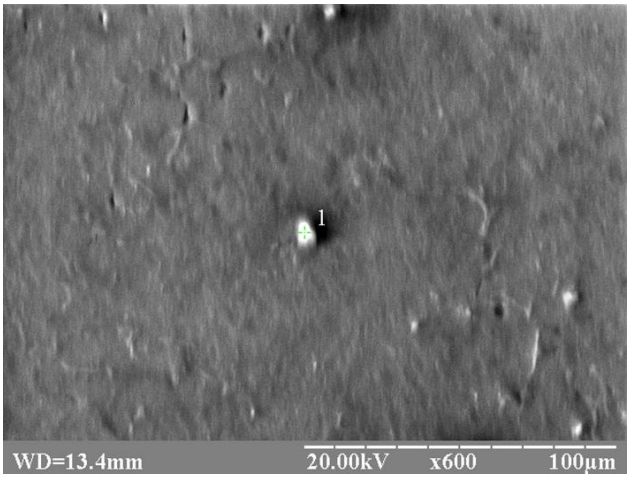


Рисунок 3.3 – Типова точка проведення РСМА

Проведені аналізи підтвердили синтез часток карбідної фази Al_4C_3у структурі досліджуваного матеріалу. Відповідно до результатів, наведених у таблиці 3.2, стехіометричне співвідношення компонентів C:Al наближається до пропорції 3:4. На основі цього можна стверджувати, що інтенсифікація механічних характеристик силуміну АК12М2МгН (технологічна схема № 4) певною мірою обумовлена виділенням дисперсних карбідівAl_4C_3. Процес їхнього утворення став наслідком хімічної взаємодії матричного алюмінію з ультрадисперсними (нанорозмірними) елементами фулеренової добавки.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад (ат.%) точки 1 в сплаві АЛ25 (див. рис. 3.3).

C	Al	Si	Mn	Cu	Fe	Ni	Сума
38,59	51,32	9,79	0,1	0,1	0,0	0,0	99,99

ВИСНОВКИ

1. Досліджено та встановлено позитивний вплив модифікувального комплексу МК-1 на механічні властивості поршневого сплаву АК12М2МгН при температурах 20 і 300°С.

Перший етап досліджень підтвердив високу металургійну ефективність застосування комплексу МК-1. У вихідному стані (без додаткової обробки) вторинний сплав характеризується наявністю грубих, видовжених залізистих інтерметалідів пластинчастої (голчастої) морфології виду Al_5SiFe. Через свої геометричні особливості ці включення виступають гострими внутрішніми концентраторами напружень, що критично знижує пластичність матеріалу та ініціює передчасне крихке руйнування під дією експлуатаційних навантажень.

Введення оптимальної кількості модифікатора МК-1 (0,05…0,15 мас. % від ваги рідкої ванни) кардинально змінює характер фазоутворення. Завдяки високій хімічній активності компонентів присадки ($SiC, K_2TiF_6,\ S, Na_2CO_3, BaCO_3, KBF_4$) відбувається зв'язування залізистих домішок і трансформація небезпечної фази Al_5SiFe у сприятливі інтерметаліди компактної (глобулярної) форми типу $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$. Ця структурна перебудова дозволила:

– мінімізувати внутрішнє напруження в алюмінієвій матриці;

– знизити бал пористості виливків з початкових 3…4 балів до мінімального 1 балу;

– оптимізувати рідиннопливність розплаву, що покращило заповнюваність ливарних форм;

– забезпечити приріст короткочасної міцності на $\sim 25\%$, подвоїти показники пластичності та підвищити твердість на 12,6% за кімнатної температури ($20\ °C$).

Важливо, що сформований термічно стабільний каркас інтерметалідів зберігає свою зміцнювальну дію і при температурах інтенсивного нагріву ($300\ °C$), запобігаючи повзучості матеріалу.

2. Встановлено позитивний вплив фулеренової черні в якості наномодифікатора на механічні властивості сплаву АК12М2МгН

Другий напрямок аналізу присвячено інтеграції нанотехнологій через використання фулеренової черні (100% аморфний сажистий вуглець, фракція 40…50 нм) як об'ємного наномодифікатора. Фізичний зміст зменшення лінійних розмірів часток твердої фази за умови збереження її постійної масової частки полягає в експоненційному збільшенні кількості штучних зародків кристалізації та розширенні площі міжфазних поверхонь. Проте пряме введення дисперсної вуглецевої черні у розплав (технологічний варіант №3) супроводжувалося значними труднощами. Через незадовільний міжфазний натяг та погане змочування графітових матеріалів рідким алюмінієм, значна маса наночастинок виносилася на поверхню дзеркала металу, згорала або шлакувалася. Це зумовило низький коефіцієнт корисного засвоєння лігатури та призвело до нерівномірності (ліквації) розподілу часток у твердому розчині, давши лише незначний приріст міцності.

Для подолання цього бар’єра було успішно апробовано технологію компактування брикетів (варіант №4). Попереднє пресування порошкового алюмінію А85 та фулеренової черні у пропорції 5 : 1 під екстремальним тиском 850 МПа дозволило «законсервувати» наночастинки всередині металевої оболонки. При зануренні такого брикету в розплав відбувається плавне розчинення алюмінієвої основи, що гарантує високий ступінь засвоєння та гомогенний розподіл вуглецевих центрів у рідкій ванні.

3. Результати виконаних досліджень розширили можливості підвищення якості вторинних силумінів в результаті комплексної обробки – мікро- та наномодифікування.

Найбільш суттєве покращення експлуатаційних характеристик поршневого силуміну зафіксовано при суміщенні модифікувального комплексу МК-1 та

пресованої алюмо-вуглецевої суміші (варіант №4). Зазначена комплексна технологія демонструє виражений синергетичний ефект. Присадка ініціює inside-розплавну хімічну взаємодію введеного нановуглецю (C) та карбіду кремнію (SiC) з алюмінієвою матрицею. Рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) на сканувальному електронному мікроскопі РЕМ-1061 чітко зафіксував утворення в структурі високотвердих світло-сірих включень, де стехіометричне відношення елементів $C:Al$ наближається до пропорції 3:4, що незаперечно свідчить про синтез субмікронного карбіду алюмінію Al_4C_3.

Синтезовані нанорозмірні частинки Al_4C_3, володіючи високою термічною стабільністю та когерентним зв'язком із матрицею, виконують подвійну функцію:

– виступають додатковими ефективними підкладками для гетерогенного зародкоутворення, забезпечуючи формування ультрадрібнозернистої структури α-твердого розчину;

– діють як дисперсні бар'єри на шляху руху дислокацій (механізм дисперсного зміцнення), що блокує пластичну деформацію тіла зерна.

У результаті реалізації цієї схеми, порівняно з немодифікованим сплавом, досягнуто рекордних показників: границя міцності зросла на 45% при температурі $20\,°C$ та на 32% при $300°C$. Рівень твердості при кімнатній температурі збільшився майже на 35%.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бялік О. Й., Чернега Д. Ф. Структуроутворення та властивості ливарних сплавів. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2005. 232 с.

2. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник. Львів: Світ, 2006. 624 с.

3. Погрелюк І. М. Термічна обробка кольорових металів та сплавів: навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 180 с.

4. Гулаков А. В. Матеріалознавство та термічна обробка металів. Краматорськ: ДДМА, 2018. 148 с.

5. Stefanescu D. M. Science and Engineering of Casting Solidification. 3rd ed. Columbus: SpringerNature, 2015. 558 p.

6. Polmear I., StJohn D., Nie J. F., Qian M. Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 560 p.

7. Ahmad R. Aluminium Alloys – Recent Trendsin Processing. London: IntechOpen, 2017. 182 p.

8. Aluminum alloys: properties and applications // Tomorrow Aluminum. URL: https://www.tomorrowal.com/uk/news/classification-of-aluminum-alloys

9. Алюмінієві сплави: особливості, властивості та застосування // Ukrindustrial. URL: https://ukrindustrial.com/2025/07/21/aliuminiievi-splavy-osoblyvosti-vlastyvosti-ta-zastosuvannia/

10. Характеристики та область застосування алюмінієвих сплавів // Фірма Тера. URL: https://firma-tera.com.ua/ua/a253906-harakteristiki-oblast-primeneniya.html

11. Hirsch J., Al-Samman T. Aluminum Alloys: Structure and Properties. Wiley-VCH, 2013.

12. Callister W. D. Jr., Rethwisch D. Materials Science and Engineering: An Introduction. USA: Wiley, 2014. 990 p.

13. Пономаренко В. В. Теорія і практика ливарного виробництва алюмінієвих сплавів. Київ: Наукова думка, 2018. 320 с.

14. Федоров В. Г., Мазур В. І. Матеріалознавство алюмінієвих сплавів та силумінів. Дніпро: Ліра, 2021. 284 с.

15. Dobatkin V. I., Eskin G. I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts. CRC Press, 2002. 264 p.

16. Ravi C., Wollgarten M. Hydrogenin Aluminum Alloys: Understanding the Impact on Microstructure and Properties. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. P. 1120–1145.

17. Smith J. A., et al. Aluminum Casting Technology. 3rd Edition, American Foundry Society, 2017. 450 p.

18. Троценко О. М. Вплив модифікування на газову пористість силумінів. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2020. № 4. С. 112–118.

19. Asghar Z., Requena G. Microstructure Evolution and Thermal Expansion of Hypereutectic Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering.* 2010. Vol. 527. P. 5691–5700.

20. Селівьорстов В. Ю., Доценко Ю. В., Куцова В. З. Модифікування алюмінієвих сплавів: монографія. Дніпро: ПДАБА, 2017. 240 с.

21. Rana H. G., Badheka V. J. Fabrication of Al-Si Hypereutectic Alloys: A Review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 34. P. 45–60.

22. Гуцуляк В. Д., Коваль О. Г. Металознавство та термічна обробка кольорових металів і сплавів : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 210 с.

23. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).

24. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів: пат. 46094 Україна, МПК С22С1/00. № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. 4 с.

25. Лютова О. В. Підвищення технологічних та механічних властивостей до евтектичних вторинних силумінів: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.01. Запоріжжя, 2012. 17 с.

26. Модифікатор для алюмінієвих сплавів: патент 42653 Україна: МПК С22С 1/00. № u200902454; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13/2009. 4 с.

27. Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. А. та ін. Основи металургійного виробництва металів та сплавів: підручник. Київ: Вища школа, 2006. 503 с.

28. Мітяєв О. А. Науково технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.01. Запоріжжя, 2008. 285 с.

29. Калиніна Н. Е., Ковац О. А. Мікролигування Скандієм як спосіб підвищення міцності алюмінієвих сплавів. *Вісник Дніпровського університету*. Дніпропетровськ, 2004. № 12. С. 26-29.

30. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів / Н.Є. Калініна та ін. Львів: Простір, 2017. 304 с.

31. Kuis D., Volchko A., Shegidevich A., Svidunovich N. Research on obtaining of composite materials based on aluminum matrix. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. №51 (4). P. 427-436.

32. Lezhnev S., Kuis D., Volochko A., Shegidevich A., Svidunovich N., Naizabekov A. Cast Aluminium Composite Obtained by Ultrafine Carbon Raw Materials. *J. Material Sci Eng*. 2015. № 4. P. 166.