

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

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузі знань

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

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Розробка способів модифікації алюмінієвого сплаву АК7 що застосовуються в автомобілебудуванні»**

Шифр MPTAM 24.23618.000 ПЗ

Виконав: *студент 2-го курсу,*  
група *MTBAm-23-1*

  
Підпис

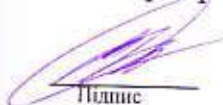
V. O. Підгурняк  
Ініціали, прізвище

Керівник *викладач. каф TAM.*

  
Підпис

A. A. Вичавка  
Ініціали, прізвище

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

  
Підпис

O. V. Духа  
Ініціали, прізвище

16 12 2024 р.

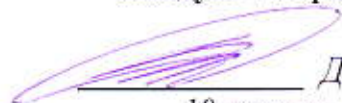
Хмельницький, 2024

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*  
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*  
Освітній рівень *магістр*

Спеціальність 132 «Матеріалознавство».  
Спеціалізація «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
Диха О.В.  
10 жовтня 2024 року

## ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Підгурняку Владиславу Олеговичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Розробка способів модифікації алюмінієвого сплаву АК7 що застосовуються в автомобілебудуванні.

керівник роботи: Вичавка Анатолій Анатолійович, викладач каф. ТАМ.

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

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

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 10.12.2024 р.

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

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

1) Аналіз методів модифікування алюмінієвих сплавів системи Al-Si.

2) Методика досліджень.

3) Результати досліджень впливу швидко охолоджених лігатур на структуру і властивості сплаву АК7.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналіз методів модифікування алюмінієвих сплавів системи Al-Si</i>	30.10.24	вик
2	<i>Методика досліджень</i>	15.11.24	вик
3	<i>Результати досліджень впливу швидко охолоджених лігатур на структуру і властивості сплаву АК7</i>	23.11.24	вик
4	<i>Висновки, рекомендації</i>	4.12.24	вик
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	6.12.24	вик
6	<i>Допуск до захисту</i>	10.12.24	вик
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	20.12.24	

Студент

  
Підпис

Підгурник В.О.  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Вичавка А. А.  
Ініціали, прізвище

МОДИ

## РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-23-1 Підгурняк Владислав Олегович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Розробка способів модифікації алюмінієвого сплаву АК7 що застосовуються в автомобілебудуванні» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 26 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 20 сторінках. Роботу викладено на 76 сторінках, з них 70 сторінок основного тексту, на яких розміщено 41 рисунок і 19 таблиць.

Алюмінієво-кремнієвий сплав АК7 або (AlSi7Mg0,3) - типовий силумін, що використовується у авіабудуванні, будівництві, машинному, тракторному і автотракторному виробництві. Він володіє гарними ливарними властивостями, оброблюваністю, зварюваністю, і стійкістю до корозії. З нього виготовляють виливки складних форм, що мають низьку усадкову пористість і підвищену щільність. Такі деталі застосовують у відповідальних вузлах, що витримують середні навантаження.





Основною операцією, яка позитивно впливає на структуру і властивості литих виробів, є модифікування, тобто, подрібнення основних структурних складових за рахунок різних впливів на розплав. До традиційних модифікаторів для силумінів належать різні флюси на основі солей натрію і калію. Однак вони мають цілий ряд суттєвих недоліків, як з технологічної, так і з екологічної точки зору. В даний час в Україні накопичений великий науковий і практичний досвід з модифікуючої обробки силумінів з урахуванням явища структурної спадкоємності в сплавах. Актуальним завданням ливарного виробництва на сучасному етапі є розробка комплексних технологій по виготовленню якісних ливарних алюмінієвих сплавів з вторинної сировини, які за своїми втратами. певних умов їх отримання можуть навіть перевершувати сплави, отримані з первинних металів.

Метою даної роботи є дослідження застосування лігатур, що відповідають хімічному складу сплаву AlSi7, отриманих швидкою кристалізацією з рідкого стану для модифікування цього ж сплаву, що застосовується в масовому виробництві легко сплавних дисків коліс для автомобілебудування.

Ключові слова: АЛЮМІНІЄВИЙ СПЛАВ; СИЛУМІН; ЛІГАТУРИ; МОДИФІКАТОРИ; МІКРОСТРУКТУРА; ДЕФЕКТИ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДИФІКУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ AL-SI	9
1.1 Модифікування силумінів солями	10
1.2 Модифікування силумінів лігатурами	13
1.3 Модифікування силумінів стронцієм	20
1.4 Модифікування лігатурами, що швидко кристалізуються (ШК)	22
1.5 Модифікування ливарних сплавів методом швидкого охолодження	24
1.6 Практичне застосування сплаву АК7	27
1.7 Теоретичні погляди на існування мікрогетерогенності в металевих розплавах	32
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	37
2.1 Методика отримання зразків для досліджень	37
2.2 Методика приготування робочих сплавів	39
2.2.1 Приготування та заливка сплаву за серійною технологією, плавка №1	41
2.2.2. Приготування лігатури, що модифікує, плавка №2	42
2.2.3 Отримання робочого сплаву за експериментальною технологією, плавка №3	43
2.3 Методика дослідження зразків	47
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ШВИДКО ОХОЛОДЖЕНИХ ЛІГАТУР НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АК7	54

МРТАМ 24.23618.000 ПЗ								
№	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Розробка способів модифікації алюмінієвого сплаву АК7 що застосовуються в автомобілебудуванні.	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Підгурняк						4
Перевір.		Вичавка						
Контр.		Бабак		16.12.24				
Створ.		Диха						ХНУ МТВАм-23-1

3.1 Результати досліджень сплаву виготовленого за серійною базовою технологією	53
3.2 Лігатура, отримана методом швидкої кристалізації	57
3.3 Сплав, отриманий за експериментальною технологією, модифікований швидко закристалізованою лігатурою складу базового сплаву	59
3.4 Порівняльний аналіз сплавів отриманих по серійній і експериментальній технологіях	65
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
ДОДАТКИ	76

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Розвиток сучасних високотехнологічних галузей промислового виробництва неможливе без розробки нових методів обробки матеріалів, що володіють високими механічними характеристиками.

Зменшення розміру кристалічної структури зерна тягне за собою зміну механічних характеристик.

Уповільнення зростання зерна, можна домогтися введенням в сплав модифікаторів, або створити такі умови при яких зростання зерна буде мінімальним.

Сучасне машино - і автомобілебудування мають наступні основні тенденції: збільшення частки деталей з алюмінієвих сплавів, ускладнення конфігурації литих деталей, підвищення їх надійності і довговічності в експлуатації, тощо. Дані тенденції ставлять перед металургами і ливарниками завдання по створенню нових технологій отримання сплавів, поліпшенню техніко-економічних характеристик конструкційних матеріалів, підвищенню якості і зниження собівартості виливків.

Доевтектичні силуміни мають гарні ливарні властивості, пластичність, корозійну стійкість. Силуміни заевтектичного складу відрізняються високою зносостійкістю, малим коефіцієнтом лінійного розширення, високою теплопровідністю і хорошими антифрикційними властивостями. Однак схильність до утворення в немодифікованому стані грубого голчастого будівництва евтектичного кремнію в до - і евтектичних силумінах і великі виділення кристалів первинного кремнію в заевтектичних силумінах.

Доевтектичні і евтектичні силуміни відомі з кінця XIX ст. XX ст., після того як було встановлено, що металевий натрій надає модифікуючий вплив на евтектичний кремній.

Перший патент на заевтектичний сплав алюмінію з кремнієм був виданий у Німеччині в 1924 р. Початок широкого застосування подібних

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сплавів відноситься до сорокових років ХХ ст., коли була встановлена можливість модифікування первинного кремнію.

Аналіз численних публікацій, присвячених проблемі підвищення якості більшості ливарних сплавів, показав, що домінуючим напрямом в теорії і практиці ливарних процесів залишається модифікування структури.

В даний час в промисловості спостерігається тенденція до розширення споживання виробів з алюмінієвих сплавів. Особливо це стосується ливарних сплавів на основі системи Al-Si-силумінів [1]. Серед широкої номенклатури інших алюмінієвих сплавів силуміни займають перше місце за рахунок цілого комплексу позитивних характеристик: високих ливарних властивостей, підвищених механічних властивостей, корозійної та зносостійкості, жароміцності, невеликої. Однак у зв'язку зі структурними особливостями литих силумінів їх міцнісні і пластичні характеристики характеризуються невисокими значеннями. При цьому гостро постає питання забезпечення якості литої продукції.

Основною операцією, яка позитивно впливає на структуру і властивості литих виробів, є модифікування, тобто, подрібнення основних структурних складових за рахунок різних впливів на розплав. До традиційних модифікаторів для силумінів належать різні флюси на основі солей натрію і калію. Однак вони мають цілий ряд суттєвих недоліків, як з технологічної, так і з екологічної точки зору. В даний час в Україні накопичений великий науковий і практичний досвід з модифікуючої обробки силумінів з урахуванням явища структурної спадкоємності в сплавах. Актуальним завданням ливарного виробництва на сучасному етапі є розробка комплексних технологій по виготовленню якісних ливарних алюмінієвих сплавів з вторинної сировини, які за своїми втратами. певних умов їх отримання можуть навіть перевершувати сплави, отримані з первинних металів [1].

Вибір модифікаторів для силумінів є не простим завданням, тому як

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

потрібно подрібнити і  $\alpha$  - твердий розчин і евтектику. За модифікаторами кремнієвої евтектики, що рекомендувалися, є натрій і станцій.

Хочеться відзначити і той факт, що в науковому світі обговорюється теорія і технологія наноструктурування алюмінієвих композиційних матеріалів, що виготовляються реакційним литтям [2].

Вивчення науково-дослідних робіт показує недостатність інформації для встановлення взаємозв'язку складу, температурно-часових умов плавки, швидкості загартування з рідкого стану, модифікування і кількістю введеного, загартованого з рідкого стану сплаву. Крім цього застосування дорогих лігатур для модифікування погіршує екологію навколишнього середовища, ливарні властивості, збільшує забруднення сплавів, домішками, і підвищує собівартість виливків. Тому вирішення наукових та технологічних проблем отримання сплавів із застосуванням як модифікаторів лігатур, ідентичних складу сплаву є актуальним науково-технічним завданням.

Метою даної роботи є дослідження застосування лігатур, що відповідають хімічному складу сплаву  $AlSi7$ , отриманих швидкою кристалізацією з рідкого стану для модифікування цього ж сплаву, що застосовується в масовому виробництві легко сплавних дисків коліс для автомобілебудування.

Для цього необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз методик отримання лігатур сплаву  $AlSi7$ .
2. Виконати дослідні плавки зразків за серійною та експериментальною технологією.
3. Дослідити тривалість ефекту модифікування протягом 3 годин після готовності сплаву.
4. Провести порівняльний аналіз властивостей отриманих сплавів за серійною та дослідною технологією.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

# 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДИФІКУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ AL-SI

Важливе значення, в процесі модифікування, має передача спадкової структури при формуванні готового сплаву введеними модифікаторами. Розглянемо деякі роботи по цій темі.

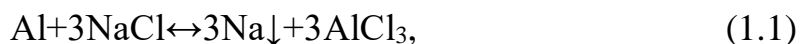
У роботі [3] представлені результати дослідження впливу структурної спадкоємності при модифікуванні сплаву АК12М2 дрібнокристалічною лігатурою  $AlTi_3$ , виготовленої за допомогою суміщення СВЧ і пічкового синтезу.

Підвищення суми легуючих елементів у промислових силумінів обумовлює формування в їх структурі надлишкових інтерметалідних фаз. При введенні в такі сплави модифікаторів вище деякого певного кількості відбувається огрублювання структурних складових, викликане переодифікуванням, що може обумовлювати зниження механічних властивостей литих сплавів. Зі збільшенням суми легуючих елементів в сплавах від 7,35 % (АК7ч) до 14,3 % (АК10М2Н) оптимальна витрата модифікуючого мікрокристалічного переплаву (ММКП) знижується з 0,6 до 0,3 % по вазі. Знижується оптимальна кількість титану, що вводиться, з 0,05 до 0,01 % при використанні лігатури  $AlTi_5$  і з 0,02 до 0,01 % при використанні лігатури  $AlTi_5B_1$ . Зі збільшенням вмісту кремнію посилюється модифікуюча дія лігатури  $AlSr_{10}$ , причому, при менших кількостях вводиться в сплави стронцію. Показано, що витрата металевого модифікатора залежить від його модифікуючої здатності, а також суми легуючих елементів в модифікованому силуміні [3].

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.1 Модифікування силумінів солями.

Найбільш поширеним способом подрібнення кремнієвої евтектики є модифікування силумінів добавками хлор-і фторовмісних флюсів. При обробці розплавів солями (флюсами) в основному протікає наступна реакція [4]:



У результаті цієї реакції виділяється натрій, що вступає у взаємодію з розплавом, а газоподібні хлориди виділяються на поверхню розплаву, видаляючи в шлак розчинні і нерозчинні неметалеві включення. Зазначена реакція найбільш інтенсивно відбувається при 800...900 °С, для чого потрібно значний перегрів розплавів вище температури лиття. У промислових умовах для модифікування силумінів застосовують складні за складом флюси, що складаються в основному з суміші хлоридів і фторидів натрію і калію, що зазначені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Склад модифікуючих флюсів

№	Склад, %				
	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	KCl	Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	NaF	NaCl
1	23	47	-	-	30
2	10	10	-	30	50
3	-	32	12	-	54

Такі багатокомпонентні стани обумовлені прагненням отримати більш низькоплавкі модифікатори і знизити температуру модифікування до 720...750 °С.

Операція обробки розплавів флюсами полягає в наступному. Підсушений при температурі 100...150 °С флюс в кількості 0,5...3 % (в залежності від його складу і вимог, що пред'являються до литого виробу) наносять на поверхню розплаву або плівку, здійснюють замішування і дають технологічну витримку протягом 3...10 хвилин. На рисунку 1.1 представлені мікроструктури доевтектичного силуміну після модифікування потрійним флюсом.

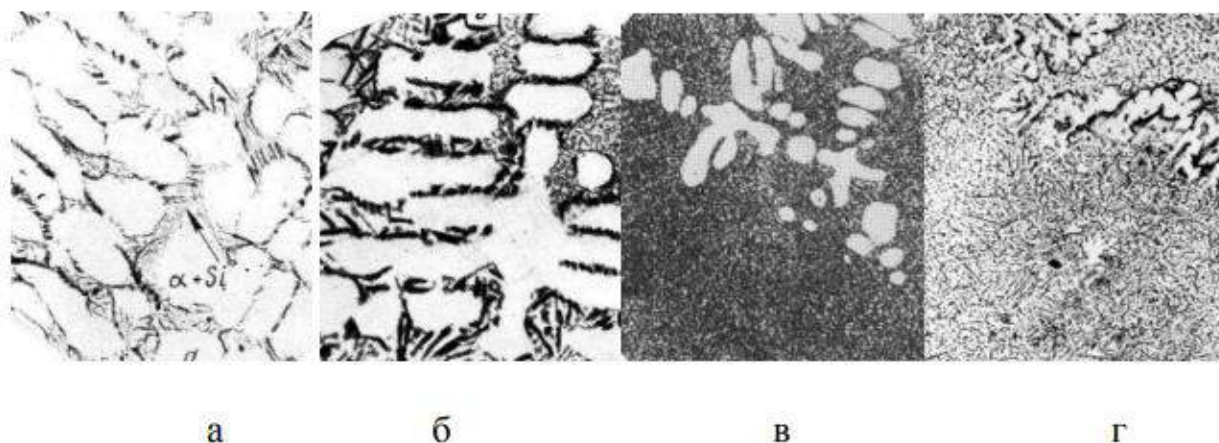


Рисунок 1.1 – Мікроструктура доевтектичного силуміну:

а - немодифікований стан,  $\times 200$ ; б, в, г - модифікування потрійним флюсом; б - «непромодифікована» структура,  $\times 250$ ; в - добре модифікована структура,  $\times 150$ ; г - перемодифікована структура,  $\times 500$ .

Основним недоліком флюсових модифікаторів є недовготривалий ефект модифікування, 30...40 хвилин. При більш тривалій розливці необхідне повторне модифікування. У разі застосування флюсового модифікатора складно керувати процесом модифікування. Єдиним варіантом, що варіюється, при постійному хімічному складі модифікатора є його кількість. При недостатній кількості модифікатора відзначається так звана «непромодифікована» структура.

Крім того, всі флюси досить гігроскопічні і мають обмежені терміни зберігання. Відтак, необхідно дотримуватися певних умов зберігання і перед

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

модифікуванню проводити спеціальну підготовку флюсів (наприклад, підсушування в спеціальних печах). На «АВТОЗА3» для обробки таких сплавів, як АК9Т, АК6М2, АК10М2Н, АК12М2, використовували розплавлений (рідкий) флюс №3 (див. таблицю 1.1). Для цього використовуються спеціальні флюсоплавильні печі.

Крім технологічних недоліків флюсів слід відзначити їх низьку екологічність. Поширення флюсів у вітчизняному ливарному виробництві обумовлено, перш за все, їх доступністю і невисокою вартістю за порівнянню, наприклад, з металевими модифікаторами. У цілому нині застосування хлор - і фторвмісних флюсов, з точки зору сучасних наукових підходів, виправдано у тих випадках, коли від литих виробів не вимагається високого рівня механічних і експлуатаційних характеристик [4].

Альтернатива дослідним технологіям модифікування пропонується і обговорюється в науковому суспільстві.

У роботі [5] запропонований спосіб модифікації властивостей поверхні оксиду алюмінію без зміни його хімічного складу. Досліджений процес співробітництва комплексів алюмінію з органічними кислотами на поверхні  $\gamma$  -  $Al_2O_3$ . Показано, що термічне розкладання адсорбованих оксалатних комплексів призводить до формування нанесених оксидних з'єднань алюмінію на поверхні вихідного носія. У результаті відбувається модифікування функціонального покриття поверхні  $\gamma$  -  $Al_2O_3$ , яке полягає в зміні співвідношення поверхневих гідроксильних груп різного типу при зменшенні сумарної кількості слотів, а так льюїсівських кислотних центрів.

Авторами роботи [6] досліджена можливість модифікування алюмінієвих сплавів флюсом, що містить діоксид титану і гексафторилікат калію. Показано, що при відновленні діоксиду титану і переході титану в розплав на структури силуміну виявляється модифікуючий вплив. Досліджено вплив дослідного флюсу на механічні властивості сплаву АК12.

Автори [7] досліджували вплив модифікуючих поверхнево-активних

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

добавок - солей на основі карбонатів, на механічні властивості і структуру евтектичного силуміну. Результати перевіряли термодинамічні розрахунками і мікроструктурним аналізом.

## 1.2 Модифікування силумінів лігатурами.

На прикладі наукових статей можна розглянути різні пропозиції по механізму модифікування.

Авторами роботи [8] досліджено вплив структури лігатури на макро - і мікроструктуру алюмінію при модифікуванні. Встановлено, що мікроструктура лігатури, отриманої при різних швидкостях охолодження, відрізняється. У залежності від швидкості охолодження змінюється розмір і морфологія включень  $TiAl_3$ . Показано, що найбільший ефект при модифікуванні досягається у випадку, коли в структурі лігатури включення  $TiAl_3$  мають рівнооснову форму. Середня площа частинок  $TiB_2$  у структурі лігатури змінюється незначно в межах 0,26 – 0,41  $\mu m^2$ , а середня площа частинок  $TiAl_3$  змінюється в значно більших межах від 40 до 250  $\mu m^2$ . Показана доцільність використання пруткової лігатури для модифікування алюмінію при суміщеному способі лиття і прокатки.

У роботі [9] розглянуті питання, що стосуються модифікації розплаву алюмінію цирконієм, титаном і бором. Досліджено вплив модифікаторів на макроструктуру і механічні властивості алюмінію. Встановлено, що в інтервалі досліджених концентрацій найбільшою модифікуючою здатністю володіє титан і його вплив спостерігається до концентрації 0,2 % по вазі. Цирконій і бор володіють меншою модифікуючою здатністю. Результати випробувань механічних властивостей показали, що суттєво підвищується значення тимчасового опору руйнуванню при розтягуванні при введенні в розплав алюмінію титану, а в меншій мірі - введення бору і цирконію. Вивчено вплив комплексних модифікуючих добавок на структуру і механічні

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивості алюмінію. Встановлено, що найбільший вплив на структуру і властивості алюмінію надає комплексна добавка титану з бором.

Подрібнення литої структури спостерігається при значно менших концентраціях добавок, ніж у випадку використання одного елемента.

На першому етапі дослідження в роботі [10] ідентифіковані структурні складові скандієвої лігатури (2 % Sc, по вазі), що складається з 26,34 ат. % Sc та 73,64 ат. % Al, тобто  $Al_{73,64}Sc_{26,34} = Al_{2,8}Sc \approx Al_3Sc$ ) та металевої основи з Al + евтектики Al +  $Al_3Sc$ ; ат. %: 99,67 Al та 0,33 Sc. Частинки алюмінію скандія мають компакту форму у вигляді чотирикутника і рівномірно розподілені в матриці. Досліджено вплив добавок скандієвої лігатури на структуроутворення, ліквідаційні процеси і властивості сплаву АМ4,5Кд. Мікроструктурний аналіз скандієвих сплавів у відбитих електронах на растровому мікроскопі і під оптичним мікроскопом показав, що збільшення добавки скандія сприяє подрібненню структурних створювачів -  $\alpha$ -. Встановлені та науково обгрунтовані закономірності зміни складу  $\alpha$ -твердого розчину та евтектики різного складу та різного походження та їх мікротвердості від величини добавки скандію. Модифікована евтектика кристалізується при додатку 0,1%, по вазі, Sc. Зі збільшенням добавки скандія до 0,5 % вміст міді і скандія в  $\alpha$ -твердому розчині повертається (відповідно до 1,5 ат. % і 0,74 ат. % у порівнянні з немодифікованим - 1,0 ат. У відповідності з цим мікротвердість  $\alpha$ -твердого розчину збільшується в 1,85 раз.

У роботі [11] виконано порівняльне дослідження по впливу модифікуючих лігатур  $AlZr_4$ ,  $AlZr_{10}$  і  $AlSc_2$ , а також магнітно-імпульсної обробки (МІО) на щільність (в рідкому і твердому станах), електропровідність (електровідповідність) макроструктуру сплавів АМг5 і АМг6. Лігатурні розплави заливалися в спеціальні пристрої, що забезпечують швидкості охолодження при кристалізації  $\sim 10^2$ ,  $\sim 10^3$ ,  $\sim 10^6$  °C/с. Лігатури вводилися в розплави з розрахунку 0,01 % за елементом-

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

модифікатором. Показано, що модифікуюча обробка розплавів добавками зародків лігатур сприяє підвищенню щільності сплавів в рідкому і твердому станах. Електропровідність сплавів з добавками лігатур  $AlZr_4$  і  $AlZr_{10}$  знижується. Введення лігатури  $AlSc_2$  викликає підвищення електропровідності сплавів  $AMg_5$  і  $AMg_6$ . Даний ефект встановлений вперше і вимагає додаткових досліджень. Встановлено, що в порівнянні з лігатурами  $AlZr_4$  і  $AlZr_{10}$  найбільший вплив на фізичні властивості сплавів надає лігатура  $AlSc_2$ , отримана кристалізацією у водоохолоджуваному валковому кристалізаторі. Також вона забезпечує максимальне подрібнення макрозерна. Магнітно-імпульсна обробка розплавів за осьовою схемою впливу, як і введення модифікуючих лігатур, сприяє збільшенню щільності сплавів в рідкому і твердому станах. Електропровідність після МІО підвищується, як і після добавки в розплав лігатури  $AlSc_2$ . Подрібнення макрозерна сплавів при МІО порівнянно з модифікуванням лігатурою  $AlZr_4$ . На підставі порівняльних досліджень зроблено висновок про те, що МІО можна віднести до фізичних способів модифікування. Методики визначення щільності та електропровідності пропонується використовувати для експресної оцінки модифікуючої ефективності досліджуваних впливів.

Дослідження [12] отримання литих заготовок методом лиття гартовим затвердінням. Метод дозволяє отримувати виливки з силуміну діаметром від 50 до 150 мм і висотою до 300 мм. Спосіб екологічно безпечний і дозволяє отримувати високоякісні виливки без застосування модифікуючих флюсів і лігатур.

Дослідження отримання литих заготовок методом лиття гартовим затвердінням. Метод дозволяє отримувати виливки з силуміну діаметром від 50 до 150 мм і висотою до 300 мм. Спосіб екологічно безпечний і дозволяє отримувати високоякісні виливки без застосування модифікуючих флюсів і лігатур.

Наведені дані [13] по розробці економного способу виготовлення

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модифікуючої лігатури  $AlTi_3$  з поліпшеним комплексом властивостей, отриманим в результаті поєднання саморозповсюджуючого високотемпературного і пічного видів. Визначений оптимальний склад шихти, описується технологія виконання способу. Показано наявність модифікуючого ефекту розробленої лігатури з прикладу сплаву АК12М2.

У роботі [14] наведений аналіз зміни хімічного складу і механічних властивостей сплаву АК9ч за останні роки. Показано, що при незмінному хімічному стані механічні властивості сплаву можуть бути суспільство розплаву. В рамках технологічного аудиту проведено дослідження, що дозволяє виявити ефективні прийоми технології генної інженерії.

Авторами [15] досліджено вплив мікрокристалічних модифікаторів ( $AlTi_5$ ,  $AlZr_4$ ,  $AlSc_2$ ) на макроструктуру алюмінію А95 і сплаву АМг4,5. Проведено великий обсяг експериментів із застосування мікрокристалічних алюмінієвих лігатур з перехідними металами. Виявлено найбільш ефективні модифікатори для алюмінію і сплавів системи Al-Mg на основі електронної теорії та закономірностей структурної спадкоємності. Ключові слова: титан, скандій, цирконій, макрозерно, мікрокристалічна лігатура, кристалізація, перехідні метали, структурна спадковість, алюміній, наноструктура, маггалій.

Авторами [16] виконано огляд сучасних фізичних способів обробки алюмінієвих розплавів стосовно технологій отримання алюмоматричних композиційних сплавів «АМКС» і лігатур «АМКЛ». Обґрунтована перспективність застосування фізичних способів обробки розплавів у технологіях армування та модифікування алюмінієвих сплавів нанорозмірними неметалевими частинками.

У роботі [17] наведені розроблені нові стани та технології отримання лігатур для легування алюмінієвих ливарних сплавів нікелем, міддю та фосфором, для виробництва виливків з перлітною структурою металевої основи чавуну. Освоєно нові технології виробництва лігатур зі стронцієм і

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

барієм. Отримано нову інформацію про тиск пари магнію в чотирьох компонентних металевих розплавах, що містять нікель і мідь та представляють інтерес для розробки нових складів сфероїдируючих модифікаторів.

Найбільш керованим процесом є модифікування з застосуванням металевих модифікаторів «лігатур» [4]. При цьому змінними параметрами можуть бути кількість лігатури, її структура, час витримки розплаву після модифікування і температура модифікування. Таким чином, в залежності від якості вихідної шихти і вимог, що пред'являються до литого виробу, можна підібрати оптимальні параметри модифікування.

У процесі розвитку теорії і практики модифікування змінювалися і розвивалися підходи до операції модифікування лігатурами. Раніше вважалось достатнім забезпечити в сплаві тільки потрібну кількість модифікуючого елемента. Однак з укладанням хімічних складів сплавів і підвищенням вимог до литих виробів велику увагу стали приділяти структурі модифікуючих лігатур.

Ефективність модифікуючих лігатур істотно залежить від параметрів її структури. У таблиці 1.2 наведено основні критерії якості модифікованих лігатур.

Для забезпечення більш істотних змін структури та властивостей для доєвтектичних силумінів доцільно перед введенням модифікатора для евтектики здійснювати добавки модифікуючих елементів для  $\alpha$ -Al: титану, цирконію, бору та ін. (ведучою фазою) зерен - колоній евтектики.

Ефективність модифікування силумінів зародковоутворюючими лігатурами Al-Ti визначається не тільки кількістю титану, що вводиться, але і параметрами інтерметалідів  $TiAl_3$  в лігатурі: кількістю, розмірами, морфологією. В залежності від способу отримання лігатур параметри інтерметалідів можуть суттєво змінюватися (таблиця 1.3). З наведених даних видно, що інтерметаліди в лігатурі 3, отриманої традиційними технологіями,

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17





евтектичної складової, яка при кристалізації формується в останню чергу.

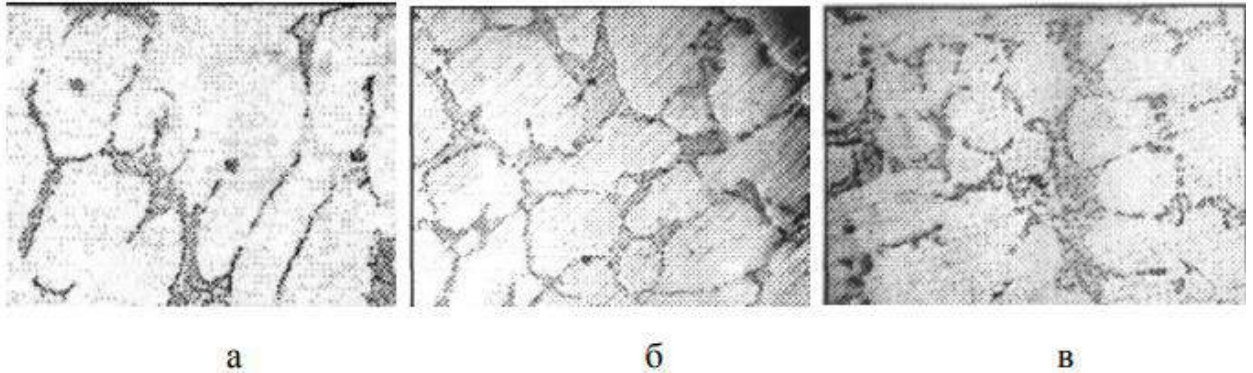


Рисунок 1.2 – Мікроструктура модифікованого литого сплаву АК6М2, ( $\times 200$ ): а, б, в – лігатури Al-Ti з великогольчастими, дрібногольчастими та блочними інтерметалідами.

Такі зміни структури сприяють поліпшенню механічних властивостей доевтектичних силумінів [4].

### 1.3 Модифікування силумінів стронцієм.

Забезпечення дрібнодисперсної рівномірної структури в модифікуючих лігатурах можливе за рахунок застосування спеціальних способів їх отримання [4].

Поряд з натрієм ефективним модифікатором кремнієвої евтектики є стронцій. Стронцій відноситься до поверхнево-активних елементів і впливає на кремній в основному за лімітаційним механізмом модифікування. В якості модифікатора стронцій застосовують у вигляді лігатури Al-Sr.

Такі лігатури характеризуються підвищеним вмістом водню і великими тугоплавкими інтерметалідами  $SrAl_4$ . Для усунення вище перелічених недоліків доцільно проводити попередню рідкофазну обробку: в рідкому алюмінії під шаром криоліту розчиняють концентровану лігатуру для отримання 10% Sr, (близько 0,05 % по вазі). Далі лігатурний розплав

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

доцільно піддати кристалізаційній обробці. Кристалізація з підвищеними швидкостями охолодження сприяє суттєвому подрібненню інтерметалідів SrAl<sub>4</sub> (див. таблицю 1.4) [4]. У лігатурі, отриманої кристалізацією у валках, стронцій може зберігатися переважно у вигляді пересиченого твердого розчину в алюмінії та тонкодисперсних включень SrAl і SrAl<sub>4</sub> розмірами близько 5 мкм.

Таблиця 1.4 – Вплив спеціальної обробки на розміри інтерметаліду в лігатурах Al-Sr.

Вид лігатури	Спосіб кристалізації	Склад лігатури	Розміри SrAl <sub>4</sub> , мкм	Швидкість охолодження, °C/с
1	Промислова чушка	Al+30% Sr	480	До 1
2	РФО + кристалізація у виливниці	Al+10% Sr	180	2...3
3	РФО + кристалізація в кокілі (товщина пластини 5 мм)	Al+10% Sr	20	10
4	РФО + кристалізація у валках (товщина стрічки 3...4 мм)	Al+10% Sr	5	100

#### 1.4 Модифікування лігатурами, що швидко кристалізуються (ШК).

В даний час для підвищення механічних властивостей виливків з доєвтектичних силумінів застосовуються різні технологічні методи, в тому числі: збільшення швидкості охолодження виливків при кристалізації, застосування дрібних мілко зернистих шихтових матеріалів, одержуваних при швидкостях охолодження  $10-10^3$  К/с [4], фізичні і механічні методи впливу на кристал, що кристалізується, у виливках.

Найбільш ефективно і доцільно, застосовувати модифікування розплаву дрібнодисперсними модифікаторами, отриманими загартуванням з рідкого стану.

Таким чином, розробка швидко охолоджених модифікаторів з дрібнозернистою структурою для доєвтектичних силумінів і дослідження їх модифікуючого впливу при лиття алюмінієвих виливків відповідного призначення завданням.

За проведеними раніше дослідженнями можна судити про перспективність цього напрямку вивчення питання розвитку швидкозакристалізованих лігатур за такими виведеними результатами наукової діяльності:

Показано, що загартований з рідкого стану (ЗРС) алюмінієвий сплав, АК7М2 має модифікуючий вплив на базовий розплав з такого ж сплаву, при цьому ефект модифікування зростає в міру підвищення дисперсності внутрішньої будови загартованого сплаву і найбільший рівень механічних властивостей (границя міцності на розтяг 200 МПа; відносне видовження 4,5 %) досягається при використанні пластинок завтовшки до 0,5 мм, отриманих загартуванням з рідкого стану при швидкостях охолодження  $10^5 \dots 10^6$  К/с.

Встановлено високий модифікуючий ефект обробки доєвтектичного силуміну загартованим з рідкого стану аморфним сплавом 50Zr-50Cu, який обумовлений на підставі діаграм стану Al-Zr і Cu-Zr формуванням в розплаві

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

тугоплавких цирконійних кристалічних фаз, що служать центрами кристалізації фаз [4].

Виявлено закономірності зміни кількості та розмірів інтерметалідних фаз у лігатурах Al-20Ti, Al-5Ti-V та Al-5Ti зі збільшенням швидкості їх охолодження при загартуванні з рідкого стану, а також залежності механічних властивостей сплаву АК7М2 від витрати зазначених модифікаторів. Показано, що вищий модифікуючий ефект досягається при модифікуванні лігатурами, загартованими з рідкого стану при швидкостях охолодження  $10^5 \dots 10^6$  К/с, забезпечуючи підвищення межі міцності на розрив на 30...35 % і відносного подовження в 2...2,5 рази.

У статті [18] наведено результати досліджень з модифікації доевтектичних алюмінієвих сплавів лігатурами, що містять цирконій, загартованими з рідкого стану.

У роботі [19] наведено результати порівняльних досліджень структури та властивостей алюмінієвого сплаву АК7М2, модифікованого лігатурою Al<sub>5</sub>TiV у вигляді прутків діаметром 9,5 мм, що випускаються промисловістю, та у вигляді пластин товщиною 0,5 мм, отриманих загартуванням з рідкого стану.

Також, авторами роботи [19] отримано результати дослідження впливу термошвидкісної обробки на структуру та механічні властивості алюмінієвих сплавів. Наведено залежність від температури таких характеристик розплаву алюмінієвого сплаву, як в'язкість, електроопір та щільність. З аналізу отриманих результатів встановлено оптимальні термочасові параметри обробки алюмінієвих сплавів, що дозволяє підвищити їх механічні властивості.

У роботі [20] досліджено вплив структури шихтових заготовок та видів флюсів на структуру, щільність та газоміст сплаву АК6М2 (система Al-Si-Cu). Показано, що сплави, отримані з дрібнокристалічної шихтової заготовки, характеризуються меншими розмірами фазових складових,

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

меншим вмістом газу і підвищеною щільністю в твердому стані. Доведено, що при використанні велико кристалічних шихтових заготовок для приготування сплаву потрібно збільшувати витрату флюсових препаратів на етапі підготовки розплавів до лиття.

У роботі [21] Досліджено вплив модифікуючих лігатур AlSr10, AlTi5B1 та AlTi5 отриманих спеціальними способами обробки (рідкофазна, кристалізаційна, деформаційна) на властивості сплаву АК9ч. Наведено результати щодо впливу структури дрібнокристалічних лігатур та їх застосування. Показано, що модифікуючий ефект спеціально оброблених лігатур набагато вищий порівняно з чушковими лігатурами такого складу.

У статті [22] розглянуто перспективні технології обробки розплавів ливарних сплавів. Показано, що реалізація даних технологій (термінова оборотна при плавці, магнітне поле при заливці, електричний струм при кристалізації) при отриманні ливарних алюмінієвих сплавів AM5, АК7ч та АК5М2, з використанням матеріалів, сприяють підвищенню механічних властивостей в литому стані, при цьому змінюються характер і параметри кристалізації сплавів.

### 1.5 Модифікування ливарних сплавів методом швидкого охолодження.

Отримали свій початок і розвиток при дослідженні процесів виготовлення аморфних і мікрокристалічних матеріалів ще в 30-х роках. минулого століття факти описані в роботах А.А. Бочвара, а пізніше в 70-х і 80-х рр. у роботах І.В. Саллі та І.С. Мірошніченка, що вивчали процеси кристалізації при різних швидкостях охолодження та їх вплив на мікроструктуру і будівництво сплавів. Було показано [4], що швидке охолодження сплаву призводить до перенасичення твердих розчинів евтектичних і пере евтектичних сплавів. У ці роки систематично вивчалось формування мікроструктури різних евтектичних і перетектичних сплавів на

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

клиноподібних зразках, що заливаються в кокіль. Подальші дослідження, були спрямовані на отримання аморфних, сплавів, що утворюються при швидкому охолодженні з рідкого стану. Ці роботи поклали основу отримання мікрокристалічних і аморфних сплавів. На практиці були отримані заготовки типу пластин, листів, смужок, волокон, фольги, а також окремих фасонних виробів.

Цими процесами були отримані оригінальні заготовки товщиною від 20 до 100 мкм при швидкостях охолодження  $10^2 - 10^3$  К/с. Було встановлено, що швидко загартовані кристалічні сплави відрізняються дрібним зерном (0,1 – 10 мкм), більш однорідним розподілом легуючих елементів за обсягом, значним пересиченням твердих розчинів, утворенням метастабільних проміжних фаз. Зі збільшенням швидкості охолодження зменшуються відстані між гілками дендритів, зменшується внутрішньо дендритна ліквіація, підвищуються механічні властивості сплавів.

В останні роки ливарників зацікавили питання модифікації алюмінієвих сплавів металевими модифікаторами з дрібно - та мікрокристалічними структурами, отриманими різними методами швидкого охолодження (загартуванням) з рідкого стану. Стали широко застосовуватися лігатури як прутка діаметром 9,5 мм. Розвивається напрями отримання лігатур гартуванням з рідкого стану.

Основним завданням є використання особливостей швидкого охолодження для отримання лігатури з більш високими ефектами, що модифікують.

Мікрокристалічні сплави з розміром зерен або дендритних гілок менше 1 – 10 мкм утворюються при швидкості охолодження  $10...10^4$  К/с. Тобто для отримання дрібнодисперсної структури модифікуючої лігатури необхідні певні швидкості охолодження при її затвердінні.

Таким чином, для досягнення високих швидкостей охолодження розплаву модифікуючої лігатури необхідні такі умови:

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

- 1) якісний контакт розплаву з холодним матеріалом високою теплопровідності (наприклад, мідь та її сплави);
- 2) мінімальні втрати тепла розплаву при його транспортуванні від нагрівача до пристрою, що охолоджує;
- 3) мінімальна товщина або діаметр шару розплаву в напрямку тепловідведення.

Розглянемо два відомі способи швидкого охолодження розплаву.

Одностороннє охолодження, основним недоліком одностороннього охолодження є нерівномірність структури і властивостей за перебігом матеріалу, пористість, змінна товщина продукту, нерівномірність умов охолодження.

Над швидке охолодження методами лиття проводиться без поділу розплаву на частини. Головною умовою досягнення високих швидкостей охолодження при литті розплаву є забезпечення максимально тонкого струменя або порції розплаву в момент охолодження.

Двостороннє охолодження розплаву досягається при його роздавлюванні між двома холодними поверхнями (пресування, здавлювання дисками, роликами або валками).

Основний недолік цього способу - невеликі габарити одержуваних зразків і труднощі з виробництва в промислових масштабах.

Метод прокатки розплаву у валках, при якому струмінь розплаву потрапляє в зазор між двома швидкообертливими масивними металевими валками, притиснутими один до одного з силою, дозволяє отримати однорідну по перерізу стрічку. Використання зубчастих валків дозволяє отримати лускаті плівки. Швидкість охолодження при цьому становить  $10^5 \dots 10^7$  К/с. Однак якщо товщина стрічки перевищує 100...200 мкм через короткий час контакту розплаву з охолоджувальними валками, структура по перерізу буде неоднорідною, розмір зерна буде збільшуватися від периферії до центру. Крім того, цей метод є досить трудомістким і в конструктивному

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відношенні найскладнішим.

Недоліком двостороннього охолодження є можливість деформування первісно затверділого шару в процесі подальшого здавлювання і, відповідно, зміна мікроструктури [4].

У роботі [23] розглянуто отримання та дослідження матеріалу з швидко закристалізованих гранул, які піддавали реакційному механічному легуванню вуглецем, що дозволяє віднести його до розряду жароміцних алюмінієвих матеріалів.

На підставі вищевикладеного був вибраний метод одностороннього охолодження, з використанням гравітаційного лиття алюмінієвого сплаву на суху металеву поверхню. Цей метод не вимагає спеціального оснащення та обладнання для експериментальних цілей, простий в монтажі і не вимагає спеціалізованих навичок лиття при створенні матеріалу.

#### 1.6 Практичне застосування сплаву АК7.

Алюмінієво-кремнієвий сплав  $AlSi7Mg0,3$ , або АК7 це типовий силумін, що знайшов широке застосування у авіабудуванні, автомобілебудуванні, будівництві, і машинному виробництві [1]. Він володіє не поганою зварюваністю, оброблюваністю, високою стійкістю до корозії, має гарні ливарні властивості. Виливки складної форми виготовлені з такого сплаву володіють низькою усадковою пористістю та підвищеною щільністю. Гарні якості цього сплаву забезпечують його застосовування у відповідальних конструкціях і вузлах, що працюють при середніх навантаженнях.

Силумін АК7 (або АЛ9) виплавляється за ДСТУ 2839-94 з шихтових матеріалів або чистого алюмінію. Його склад це вміст алюмінію (до 93,6 %) і легованого добавками кремнію у кількості 6...8 %. Так як кремній утворює в його структурі крихкі включення і інтерметалічне з'єднання то він знижує

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міцність і пластичність сплаву. Хімічний склад сплаву представлений в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад у % матеріалу АК7

Fe	Mn	Cu	Zn	Mg	Si	Ni	Al	домішки
до 1,3	0,2...0,6	до 1,5	до 0,5	0,2...0,5	6...8	До 0,3	87,6...93,6	3,3

Al – це основа, його відсотковий вміст наведено приблизно. У литих чушках вміст магнію знаходиться в межах 0,2...0,55 %.

Для виготовлення автомобільних литих дисків регламентовані вимоги щодо хімічного складу наведено в таблиці 1.6 та механічні властивості в таблиці 1.7.

Таблиця 1.6 – Хімічний склад сплаву придатний до лиття ESA-M2A123-A AlSi7Mg0,3 (A356.0)

Cu	Si	B	Ti	Mn	Sr	Mg	Fe	Zn
До 0,03	6,5...7,5	До 0,20	0,1...0,18	До 0,03	0,014...0,034	0,25...0,45	До 0,13	До 0,03

Сумарний вміст домішок не більше 2,2 %. Домішки інші не більше 0,03 % кожна, загальна сума не більше 0,1 %.

Таблиця 1.7 – Міждержавний стандарт на механічні властивості дисків коліс з легких сплавів для пневматичних шин.

Вид матеріалу	Межа міцності, МПа	Межа плинності, МПа	Відносне видовження, %	Твердість, НВ
Термооброблений	210	140	5	75...95
Нетермооброблений	160	80	5	45...60

Мінімальні домішки берилію підвищують щільність і чистоту сплаву АК7, а також сприяють зміцненню оксидної плівки, утворюється на його поверхні, і позитивно впливають на його проти окислювальні властивості [1].

Не менш шкідливі добавки заліза, які викликають формування евтектичних кристалів у вигляді пластин і знижують пластичність силуміну АК7. Однак, їх вміст можна в значній мірі знизити при виготовленні виливків литтям в землю, тоді як при литті під тиском і в металічні форми кількість евтектики максимально.

У залежності від хімічного складу і частки неметалічних прикладів, розрізняють кілька модифікацій алюмінієво-кремнієвого сплаву АК7:

- АК7 - нормальної чистоти сплав, що відрізняється невисокою пластичністю і хорошими механічними властивостями;
- АК7ч - чистий і менш крихкий сплав, здатний витримувати сильні вібрації тривалий час;
- АК7пч - підвищеної чистоти сплав, що володіє покращеними антифрикційними і механічними параметрами.

На ринку можна зустріти матеріали АК7п, АК7 і АК7ч в чушках, вагою 13...14,5 кг. Вони повністю відповідають ДСТУ 2839-94, поставляється з усіма необхідні ректифікатами і документами.

Сплав алюмінію АК7 відноситься до силумінів системи Al-Si-Mg, відрізняється хорошими технологічними властивостями - рідко текучістю, зварюваністю, корозійною стійкістю і при цьому він дуже погано оброблюється різанням, оскільки в його структурі утворюються крихкі голчасті кристали кремнію і його з'єднань. Для того щоб підвищити міцність сплаву, його в розплавленому стані модифікують галогенідами такими як хлоридом натрію. Утворені силіциди натрію обволікають кристали кремнію, затрудняють їх зростання і підвищують розподіл механічної міцності алюмінієво-кремнієвого сплаву в 2 рази.

Виливки АК7 зміцнюють за допомогою термічного гартування та

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

штучного старіння. Для виключення перепалу використовують двох - або триступінчастий нагрів до 500...550 градусів, витримуючи деталі в гарячій воді по 2...3 години. Після високотемпературної обробки пластичність і міцність сплаву АК7 підвищується, що особливо важливо при виробництві складних і тонкостінних литих заготовок.

Завдяки відмінним ливарним властивостям, сплав АК7 активно використовується при литті складних деталей і механізмів, що застосовуються в машинобудуванні.

- деталей літаків;
- корпусу pomp;
- карбюраторів;
- редукторів;
- картерів двигунів;
- поршнів ДВЗ;
- литі автомобільні диски;
- головок циліндрів ДВЗ.

Такі виливки добре зарекомендували себе при експлуатації в агресивних середовищах і температурах, що не перевищують 200 °С (рисунок 1.3).

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Приклади готових виробів, що відливають зі сплаву АК7.

Силумін АК7 – один із алюмінієвих сплавів, допущених до виготовлення різного посуду. Зокрема з неї роблять посуд, що використовується при жарінні і запіканні їжі, а також різні їдальні прилади – цілком металічні і комбіновані виделки, ложки.

Вироби зі сплаву АК7, на відміну від чавунних аналогів, відрізняються більш легким вагою і меншим коштом, а за ступенем зносостійкості ні в чому їм не поступаються.

Сплав алюмінію для харчових цілей, що маркується АК7п, затребуваний при виготовленні окремих вузлів і корпусів навантажуваних кухонних побутових приладів: м'ясорубок та соковижималок. У його складі вміст миш'яку і свинцю повинні бути знижені до мінімуму, а домішки берилію повністю виключені. Використання АК7 при виготовленні столового посуду та приладів у кожному випадку вимагає обов'язкового узгодження з МОЗ.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.7 Теоретичні погляди на існування мікрогетерогенності в металевих розплавах.

Чи є розплавлений сплав після плавлення гомогенним або ні в атомному масштабі, було проблемою для багатьох експериментальних досліджень, які використовували безліч методів, що інтерпретувалися як ознаки існування процесу розчинення мікрогетерогенності сплаву, які були успадковані від твердого сплаву [4].

Багато експериментальних результатів демонструють неоднорідність рідких евтектичних сплавів, тобто наявність мікроскопічних доменів, збагачених всередині різними компонентами. Гуртуючись на результатах своїх денситометричних експериментів на розплавах П.С. Попель сформулював гіпотезу про метастабільну мікрогетерогенність рідких сплавів евтектичного типу. За його словами, термодинамічно стійкий стан евтектичних розплавів при всіх температурах їх існування є станом однорідного розчину. Їх мікронеоднорідність визначається тривалим існуванням мікродоменів різного складу, які були успадковані від вихідного гетерогенного зливка. Опіраючись на їх розмір (близько 10 нм і більше), ці домени можна розглядати як дисперсні частинки, а сам розплав - як мікрогетерогенну (колоїдну) систему, що складається як з дисперсної, так і з безперервної фаз. Після закінчення плавлення евтектичний розплав релаксує в термодинамічно стабільний стан. Однак цей процес може протікати кінетично дуже повільно і закінчуватися встановленням метастабільного рівноваги між дисперсними частинками і навколишнім розплавом. Така мікрогетерогенна структура необоротно руйнується при перегріві над ліквідусом до температур, які залежать від складу розплаву або інших зовнішніх факторів. Пізніше багато експериментальних результатів побічно підтвердили обґрунтованість концепції мета стабільною мікрогетерогенністю евтектичних розплавів [23, 24].

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура і мікроструктура розплавлених сплавів AlSi були недавно вивчені за допомогою нейтронографії [25] і мало кутового розсіювання нейтронів (SANS). Було виявлено, що при температурах більше 100 градусів вище ліквідусу в евтектичному розплаві існують багаті кремнієм частинки або скупчення. Для частинок такого типу вони повинні мати розмір, що перевищує приблизно 10 нм, щоб бути видимими в дифракційному експерименті. Походять з цих частинок дифракційні піки також вказують на те, що вони мають досить певну структуру, навіть якщо вони мали велику ширину.

Мікроструктура розпавленої гіперевтектики Al<sub>180</sub>Si<sub>20</sub>, гіпоевтектики Al<sub>193</sub>Si<sub>7</sub> та евтектики Al<sub>188</sub>Si<sub>12</sub> була недавно вивчена при різних температурах в серії експериментів SANS [25]. Шкала довжин в вимірюваннях становила від 1 до 100 нм, і вони, безсумнівно, продемонстрували існування частинок в широкому діапазоні розмірів частинок для всіх сплавів при трьох досліджених температур 1473 К).

Були змінені інтенсивності SANS, при трьох різних значеннях хвильового вектора Q, для трьох сплавів при неперервному нагріванні і подальшому охолодженні.

Падіння інтенсивності близько 973 К, швидше за все, існує з-за руйнування оксидного шару навколо злитка, і розпавлений сплав тепер заповнює весь контейнер для зразка. Після цього інтенсивність обох сплавів залишається більше або менше постійної приблизно до 1100 К, що вказує на те, що мікроструктура не змінюється помітно в цьому діапазоні температур. Для гіпоевтектичного сплаву незмінні інтенсивності монотонно падають при нагріванні до 1473 К дуже схожим чином для всіх трьох значень Q. Для всіх сплавів значення температури, яке потрібно для повного розчинення більших частинок, вище для меншого Q. При наступному охолодженні до охолодження Інтенсивності не змінюються, показуючи, що зміна мікроструктури, яке відбулося при нагріванні необоротно і відповідає

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термодинамічно метастабільним або. Для евтектичного сплаву зміна мікроструктури під час нагрівання від 1100К до 1473 К відбувається в два етапи: спочатку відбувається швидке зміна з 1100К до  $p_1$  - повільна зміна між 1173 К і 1373 К. Під час охолодження від 1473 К виміряні інтенсивності залишаються незмінними [26].

Видно, що після плавлення гіпоевтектичний сплав містить частинки розміром до 150 нм, і їх кількість різко зменшується при нагріванні до 1473 К. Розщеплення на більш дрібні частинки здається необоротним. Частинки середнього розміру, можливо, в результаті неповного руйнування великих частинок, мабуть, існують при найнижчій температурі (973 К) після охолодження, і трохи признаки для утворення великих частинок, по крайній мірі, до деякої ступеня, під час охолодження. Це частково зворотне зростання частинок відбувається, ймовірно, через те, що сплав не був достатньо нагрітий, щоб досягти повністю гомогенного стану [25, 26].

У випадку гіперевтектичного сплаву великі частинки, які ще можна спостерігати після плавлення, повністю розчиняються при нагріванні до 1473 К. Дрібні частки, середній розмір яких становив близько 7 нм при 973 К, при 1473. До зменшили свій рідній розмір приблизно до 3 нм. Для евтектичного сплаву існують три різні розподіли по розмірах після закінчення плавлення. Частинки середнього розміру з максимальним розміром близько 15 нм швидко розчиняються в процесі нагрівання, і кількість великих частинок значно зменшується, коли зразок нагрівається до 1473 К. Коли зразок знову охолоджують до 973 К, кількість частинок збільшується, у той час як частинки середнього розміру не рекомбінують. Кількість дрібних часток збільшується при нагріванні і частково рекомбінується при наступному охолодженні [26]. Кількість дрібних накопичень часток змінюється вперевіг циклу нагрівання / охолодження. Параметри розподілу по розмірах майже однакові для конкретної температури, що вказує на те, що розподіл за розмірами змінюється майже зворотно. Однак при нейтронографічних змінах

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

на евтектичному сплаві AlSi спостерігалася значна різниця в формі між статичними факторами, зміненими при 973K до і після нагріву сплаву до 1473K [26]. Таким чином, зворотність не є повною, і можна припустити, що евтектичний сплав AlSi значно більше неоднорідний, ніж як гіпо -, так і гіперевтектичний, незалежно від його термічної історії. Це узгоджується з змінами в'язкості.

Зазначається, що розмір дрібних частинок після нагріву до 1473 K становить близько 3 нм, і він дуже схожий на всі сплави. Оскільки розмір великих частинок збільшується з збільшенням концентрації Si, можна припустити, що від 1000 до 4000 атомів в маленькій частинці знаходяться в термодинамічній рівномірності з. З сучасних експериментів SANS неможливо точно визначити склад частинок, але вони повинні бути збагачені Si, щоб мати досить великий контраст, щоб їх можна було виявити при вимірі SANS.

З виконаного аналізу можемо зробити наступні висновки.

1) У сучасній промисловості активно застосовуються такі методи модифікування: модифікування солями, модифікування лігатурами, модифікування стронцієм.

2) З економічної точки зору витрати на модифікування призводять до подорожчання продукту та забруднення навколишнього середовища.

3) У зв'язку з цим виникає інтерес вивчення принципу само модифікування з технологічної та економічної точки зору для металургів, які займаються традиційними методами модифікування. що може позитивно вплинути на вартість продукту і зробити його більш конкурентоздатним серед інших подібних товарів.

4) Проведений детальний аналіз результатів SANS, отриманих раніше на гіпо-, гіпер- і евтектичних розплавах Al-Si, на додаток до більш ранніх результатів показав, що евтектичний розплав є гіперевтектичний, незалежно від його термічної історії. Зазначено, що розмір дрібних частинок після

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагріву до 1473 К становить близько 3 нм і дуже схожий для всіх сплавів. Оскільки розмір великих частинок збільшується з збільшенням концентрації Si, можна припустити, що від 1000 до 4000 атомів в маленькій частинці знаходяться в термодинамічному рівні з оточення.

5) Для отримання високих експлуатаційних властивостей гіпоeutектичного сплаву Al<sub>93</sub>Si<sub>7</sub> необхідно знати температуру метастабільного стану розплаву, при якій відбувається утворення мікро гетерогенних частинок, розміром близько 15 нм. Таку температуру можна визначити експериментально для конкретного сплаву, методами вимірювання структурно-чутливих характеристик при нагріванні та охолодженні.

6) Загартуванням з рідкого стану можна отримати лігатуру, хімічний склад якої відповідає стану сплаву, і використовувати її для модифікування взамін лігатур Al-Sr і Al-Ti-B.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Методика отримання зразків для досліджень.

Для виконання досліджень необхідно виготовити серію зразків із алюмінієвого сплаву. Послідовність виготовлення наступна.

1) Виконати заливку базового сплаву  $ASi7Mg0,3$  піддавши розплав модифікації дотримуючись всіх технологічних вимог, в металевий кокіль (6 зразків), 3 зразки з партії відправити на термообробку, виконати випробовування на механічні властивості. Виконати хімічний аналіз зразка «свідка». Провести металографічні дослідження.

2) Виконати заливку зразка в кокіль «Rensli» (1 зразок), виконати металографічний аналіз структури зразка. Виконати хімічний аналіз зразка «свідка».

3) Виконати заливку зразка методом «на куточок» (1 зразок), виконати металографічний аналіз структури зразка. Виконати хімічний аналіз зразка свідка.

4) Виявити метод найбільш підходящий для проведення робіт зі створення модифікатора методом швидкої кристалізації сплаву (порівняння структури та виявлення методики з більш дисперсною структурою).

5) Виготовити модифікатор.

6) Розрахувати кількість металу для заливки і виконати плавки базового зразка з додаванням модифікатора отриманим шляхом швидкої кристалізації 0,5 % і виявити ефективність роботи модифікатора протягом 3-х годин (12 зразків), з них 6 зразків відправити на термообробку. Зробити хімічний аналіз зразка. Провести металографічні дослідження.

Підготовка оснастки наступні.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Підготовка металевих кокілів для заливання експериментальних зразків розглядається на рисунку 2.1.

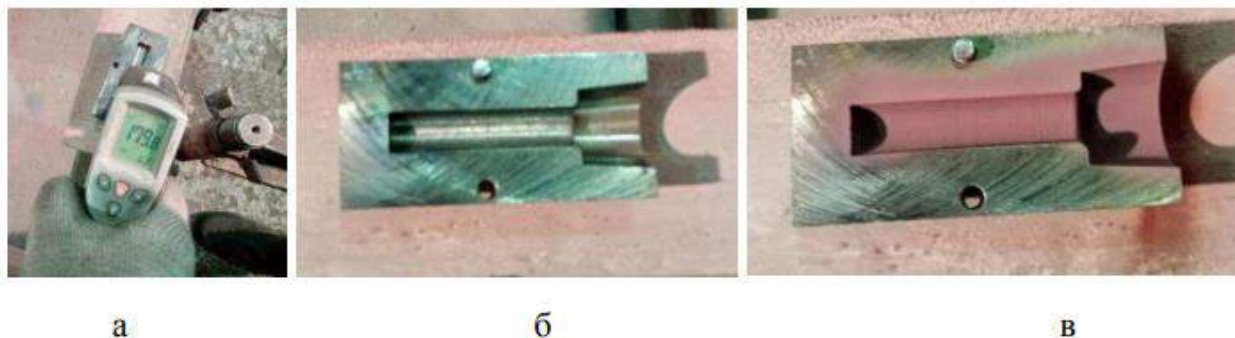


Рисунок 2.1 – Фарбування металевих кокілей грунтом «DR-087 Dycote»:  
а - вимірювання температури нагріву кокіля перед фарбуванням (180 °С);  
б - кокіль перед фарбуванням; в - кокіль після фарбування.

Схема процесу змащування напрямних і підготовки кокіля до заливання наведено на рисунку 2.2.

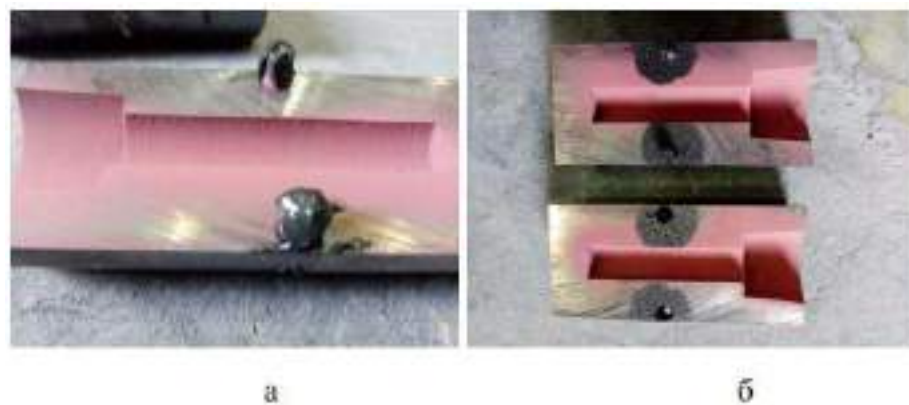


Рисунок 2.2 – Підготовка напрямних шляхом змащування  
консистентним мастилом.

Підготовка оснащення до експериментальних плавки і заливка алюмінієвого сплаву  $ASi7Mg_{0,3}$  наведено на рисунку 2.3.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38



Рисунок 2.3 – Оснащення для заливки зразків:

а - кліщі, тиглі графітові (2 шт.), дзвіночок, б - форма для заливання металу для проведення хімічного аналізу, в - кокіль металевий для заливання зразків (2 шт.)

Для того щоб взяти порцію металу необхідно попередньо титановим черпаком підготувати місце для забору металу, відсунувши забірним інструментом шлак, флюс, і окисну плівку, що утворилася на поверхні рідкого  $ASi7Mg0,3$ .

Приготовлений базовий розплав необхідно швидко закристалізувати і отримати модифікатор «ШОС» (швидко охолоджений сплав).

При проведенні робіт з заливки зразків необхідно слідувати правилам охорони праці на робочому місці і використовувати як індивідуальні так і колективні засоби захисту.

## 2.2 Методика приготування робочих сплавів.

Загальна методика приготування сплавів та їх призначення наведена в таблиці 2.1.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Опис та призначення плавки.

№ плавки	№ зразків	Призначення	Вид сплаву	Обладнання
1	1 – 6	Виготовлення зразків. Отримання даних з властивостям сплаву, отриманого за серійною технологією.	Серійна технологія	Плавильна піч. Установка для рафінації
2	Модифікатор, залиття на «куток»	Виготовлення лігатури ШОС. Вибір методу та отримання ШОС для експерименту.	Модифікатор, пластинки товщиною 0,5 мм.	Плавильна піч. Установка для рафінації
	Модифікатор, залиття в кокіль «Rensli»		Модифікатор, циліндричні зразки з діаметром 12 мм.	
3	7 – 18	Виготовлення експериментальних зразків. Отримання даних за властивостями сплаву, отриманого за технологією з додаванням ШОС.	Дослідна технологія	Піч з електроопромом

2.2.1 Приготування та заливка сплаву за серійною технологією, плавка №1.

Приготування сплаву  $AlSi7Mg0,3$  виконується в плавильній печі ІАТ 2,5, потім метал заливається порційно по 0,5 т., рідкого металу в ківш для транспортування. Далі проводять рафінування в кінці якого виконують операцію модифікування сплаву покупною лігатурою  $AlSr$ , рисунок 2.4.



Рисунок 2.4 – Лігатура алюмінію – стронцій  $AlSr$ .

Після чого приготовлений сплав був залитий в «металеві» кокілі, отримані вилівки показані на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Зразки, що отримані за серійною технологією виготовлення.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41





а



б

Рисунок 2.7 – Зразки модифікатора:

а – заливка в кокіль «Rensli»; б – заливка на куток

2.2.3 Отримання робочого сплаву за експериментальною технологією, плавка №3.

Для приготування розплаву  $AlSi7Mg0,3$  використовувалася стандартна піч опору СШОЛ 10/10. Нагрів тиглю відбувався до температури  $600\text{ }^{\circ}C$ . Потім завантажували кусковий чушковий алюміній марки А8, рисунок 2.8.



Рисунок 2.8 – Послідовне завантаження шматкового алюмінію в тиглі.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Розплавлений алюміній нагрівали до температури 850...900 °С. Далі вводили (Si) кремній 7 % від загальної ваги плавки при температурі 850 °С (рисунок 2.9).

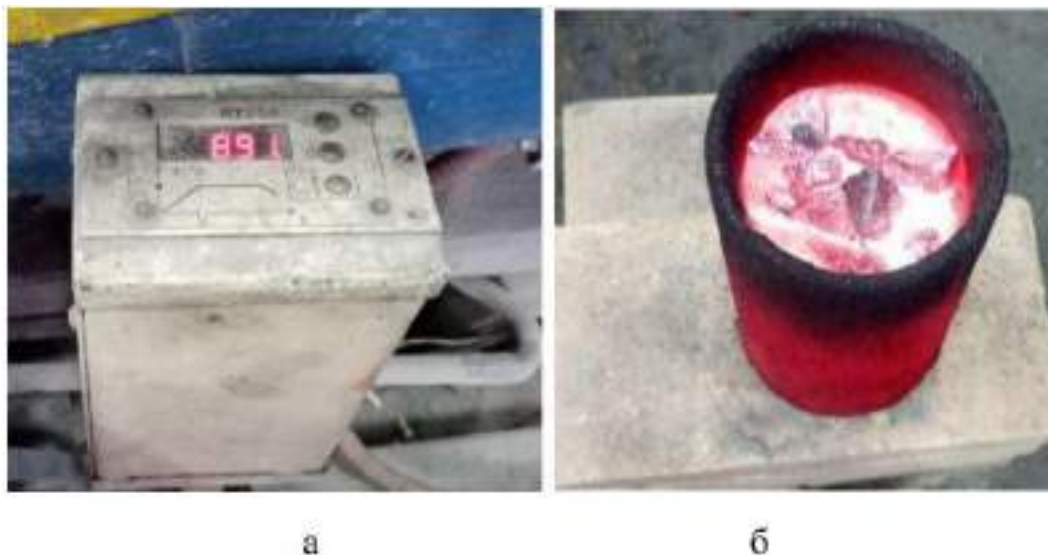


Рисунок 2.9 – Додавання кремнію:

- а - температура в печі під час завантаження шматкового кремнію в розплав;
- б - завантаження шматкового кремнію

Кремній в розплаві доводили до повного розплавлення, далі знімали окисну плівку, перемішували і охолоджували розплав до температури 700...720 °С. Вводили магній (Mg) 0,4% від загальної ваги плавки під дзеркало металу і перемішували (рисунок 2.10).

Далі витримували метал протягом 5...10 хвилин, після чого його перемішували. Проводили рафінування гексохлоретаном (перхлоретану) ( $C_2Cl_6$ ) 0,1% від загальної ваги плавки. Для цього необхідно було препарат помістити в харчову фольгу і герметично запакувати, потім помістити мішечок з рафінуючим препаратом в інструмент «дзвіночок». Дзвіночок опустити на дно тигля і рухами вгору вниз проводити очищення металу спостерігаючи процес реакції акції металу з препаратом. Після процедури

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

рафінування необхідно зняти окисну полону і шлак



а

б

Рисунок 2.10 – Додавання магнію:

а – температура в печі під час завантаження магнію в розплав;

б – завантаження магнію, видно характерні спалахи білого кольору.

Ввести модифікатор ШЗС 0,5 % від загального об'єму ваги плавки під дзеркало металу, перемішати, не знімати окисну полону. Витримка 15 хвилин і 3 години, перед заливкою зразків знімати окисну полону. Готовий розплав необхідно перевірити на хімічний аналіз.

У разі непопадання в ТУ необхідно провести підшихтовку для виправлення вмісту хімічних елементів в розплаві, після чого повторити хімічний аналіз.

Після отримання виливків, зразки під номерами 4 – 6, 13 – 18 були відібрані для подальшої термічної обробки (рисунок 2.11). Режим термічної обробки обрано Т6. Інформацію про варіанти зразків наведено в таблиці 2.2.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



Рисунок 2.11 – Зразки після термічної обробки.

Таблиця 2.2 – Коротка характеристика та нумерація зразків.

№ зразка	Вид зразків	Стан (ТО +), (без ТО –)	Характеристика	Вид технології
1 – 3	Металевий кокіль	–	Базова	Базова
4 – 6	Металевий кокіль	+	Базова	Базова
підготовчі	Кокіль «Rensli», кутник	–	Модифікатор ШОС	Дослідна
7 – 9	Металевий кокіль	–	Модифікована ШОС, витримка 15 хв.	Дослідна
10 – 12	Металевий кокіль	–	Модифікована ШОС, витримка 180 хв.	Дослідна
13 – 15	Металевий кокіль	–	Модифікована ШОС, витримка 15 хв.	Дослідна
16 – 18	Металевий кокіль	–	Модифікована ШОС, витримка 180 хв.	Дослідна

### 2.3 Методика дослідження зразків.

Виготовлення та підготовка зразків до механічних випробувань здійснювалася токарною обробкою та представлена на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Підготовка зразків до механічних випробувань:  
а – відокремлення верхньої частини зразка від нижньої б – підготовка до механічних випробувань.

Підготовка зразків на одновісне розтягування ГОСТ 497-84 (рисунки 2.13 і 2.14).

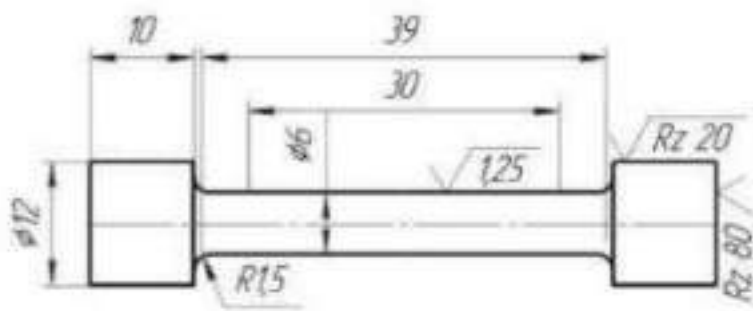


Рисунок 2.13 – Геометричні розміри зразка на одновісне розтягування

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



а

б

Рисунок 2.14 – Виготовлення гантелі для випробувань на одновісне розтягування.

Методика підготовки мікрошліфів, обладнання та матеріали.

При підготовці мікрошліфів та дослідженні мікроструктури використовується наступне обладнання:

- Автоматичний шліфувально-полірувальний верстат «Tegramin-25».
- Шліфувальний папір.
- Полірувальні тканини.
- Алмазні монокристалічні суспензії, суспензії агрегованого та колоїдного кварцу.
- Ємності для травлення зразків, встановлені у витяжній шафі.

Мікроаналіз виконують на інвертованому світловому мікроскопі «DMi8 Leica», призначеному для дослідження мікроструктури металів, сплавів та інших непрозорих об'єктів має об'єктиви зі збільшенням: x25, x50, x100, x200, x500 (рисунок 2.15).

Приготування зразків виконувалось у відповідності ГОСТ 9.302 – 88. Зразки вирізались за допомогою стрічкової пилки. Поверхню шліфу обробляли на токарному верстаті. Після обробки зразки повинні мати чистоту поверхні не нижче 5-6 класу. Гострі кромки необхідно закруглити.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розмір зразків 10×10 та 15×15 мм. Зона відбору зразка в перебігу виливки визначається інженером - металознавцем або технічною документацією.



Рисунок 2.15 – Зовнішній вигляд мікроскопа «DMi8 Leica»

Зразки встановлюють у форму для заливки з поліпропілену діаметром 40 мм і заливають сумішшю, приготованої з рідини та порошку для холодної заливки або розплавленої сірки. Заливка виконується у витяжній шафі.

Поверхню зразка шліфують на шліфувальних паперах різних номерів з поступовим зменшенням великої кількості частинок абразиву SiC. Зернистість шліфувального паперу становить 120 (P120) та 2500 (P2500).

Зразок необхідно охолоджувати водою, не можна допускати його розігріву та можливої зміни структури поверхневого шару.

Підготовку зразків для дослідження мікроструктури проводили на установці «Tegramin-25 Struers». Шліфувально-полірувальна напівавтоматична система (рисунок 2.16) призначена для підготовки зразків. Для кількісного аналізу використовувалася програмне забезпечення: «CamTool» (зйомка зразків) та «Pro 3 Image Expert» (обробка даних).

Перед обробкою на полірувальному сукні зразок ретельно промивали.

Полірування виконувалось з застосуванням алмазних суспензій до повного видалення ризок та подряпин.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після полірування зразок промивають водою і миючим засобом; поліровану поверхню протирають ватою, змоченою спиртом, а потім просушують прикладанням фільтрувального паперу.



Рисунок 2.16 – Шліфувально-полірувальна напівавтоматична система «Tegramin-2 Struers»

Хімічне травлення виконувалось відповідно до ДСТУ 8972:2019.

Зразок занурюють полірованою поверхнею вниз у травник складу: 0,5...2 % розчин плавикової кислоти (HF), витримують протягом 10...20 секунд, похитуючи, щоб забезпечити взаємодію повітря поверхнею. Можна чергувати полірування і травлення.

Якщо травник слабо взаємодіє з металом або утворить на поверхні шліфу плівки, що перешкоджають доступу розчину, застосовують метод втирання реактиву ватою.

Травлення вважається закінченим, коли полірована поверхня стане злегка матовою.

Шліф після травлення швидко промивають у проточній воді і просушують фільтрувальним папером.

Визначення розмірів дендритного осередку алюмінієвого твердого розчину виконувалось наступним чином.

Розмір дендритного осередку визначвся за допомогою програми аналізу

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цифрових образів, що дозволяє проводити вимірювання методом порівняння зі шкалою еталонів мікроструктур.

Для проведення вимірювань поверхню шліфу проглядали у кількох місцях і вибирали три, а при нерівномірному осередку - не менше п'яти типових місць.

У програмі аналізу цифрових зображень проводиться зйомка і масштабування зображення мікроструктури (рисунок 2.17).

Визначення розміру дендритного осередку проводили вручну за допомогою інструменту лінійка. Виміри проводили у поперечному перерізі дендритних осередків твердого розчину.

Отримані численні значення оцінки мікроструктури зберігали у вигляді таблиці, які в подальшому статистично обробляли в програмі Excel.

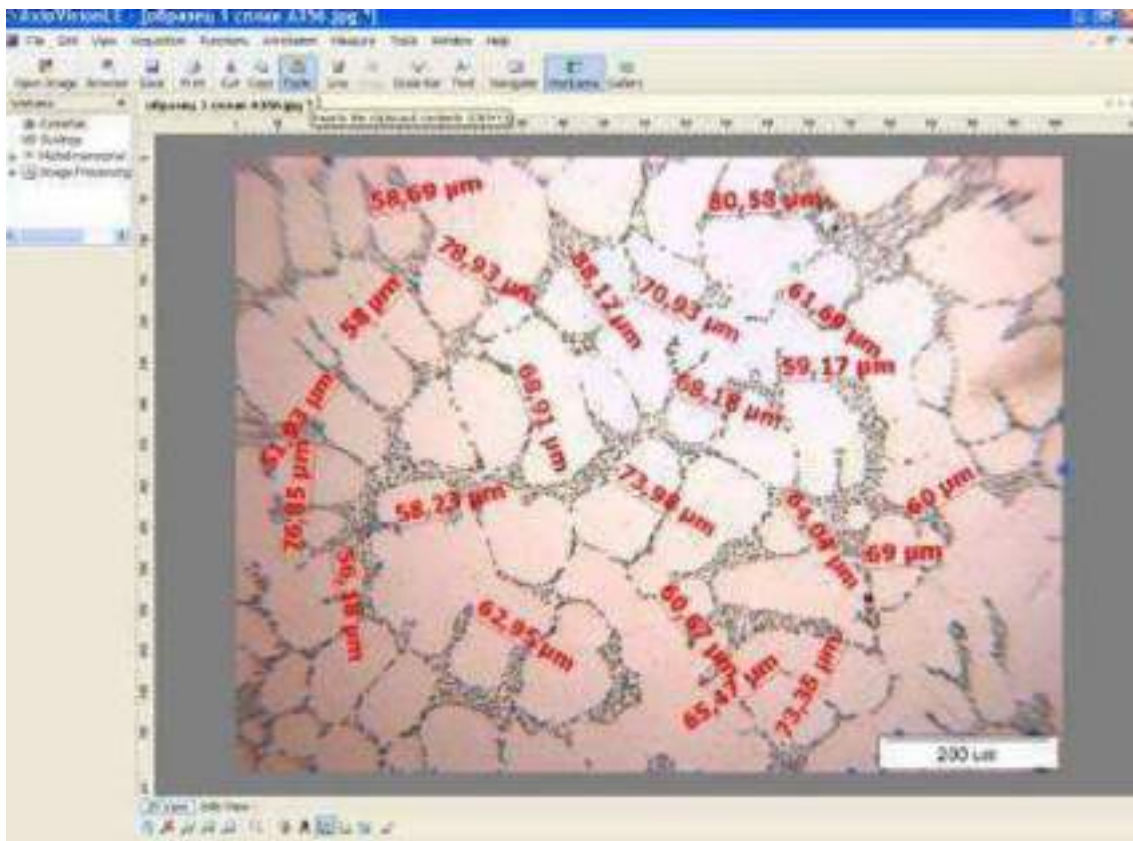


Рисунок 2.17 – Приклад вимірювання дендритного осередку.

При підготовці макрошліфів (рисунок 2.18) та дослідженні

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

макроструктури ливарних алюмінієвих сплавів використовували наступне обладнання та матеріали: ємності для травлення, токарний верстат, стрічкова пила, витяжна шафа, відеокамера CAM-SC30 «OLYMPUS», стереоскопічні мікроскопи: SZ61 «OLYMPUS» та MC-2, зовнішній вигляд яких зображено на рисунку 2.19.

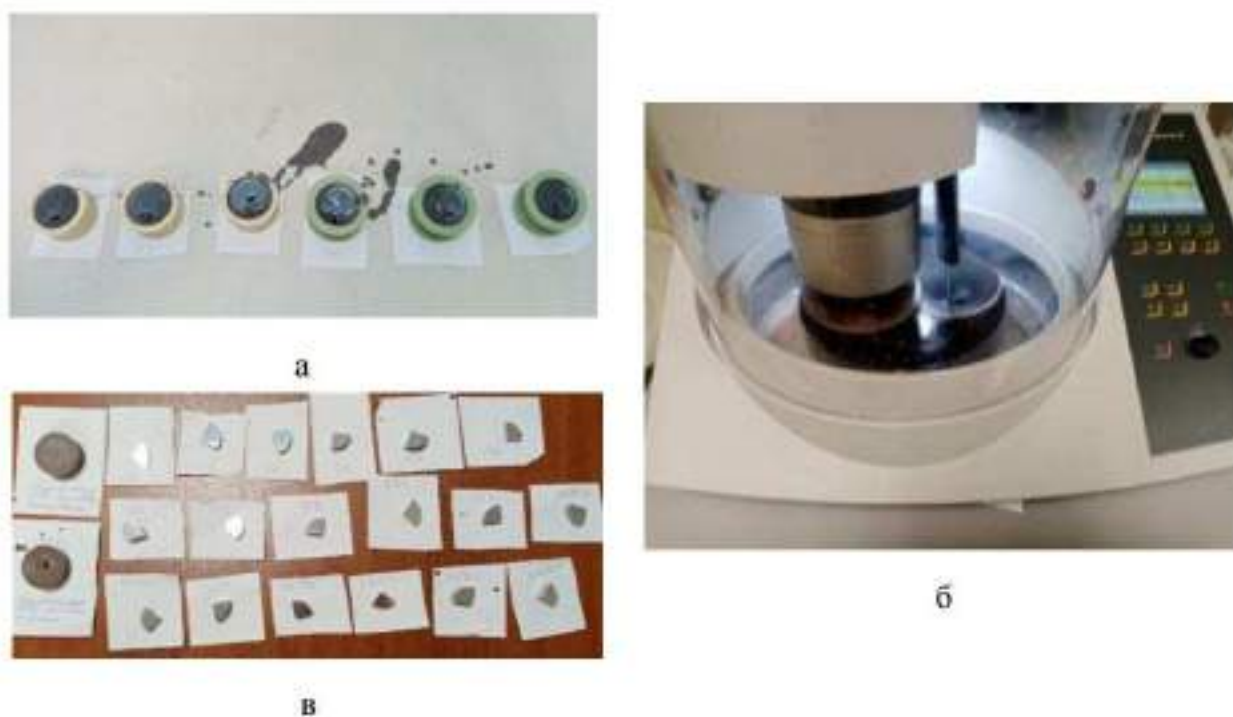


Рисунок 2.18 – Підготовка мікрошліфів:

а - заливання шліфів сіркою; б - обробка шліфів на напівавтоматичному шліфувальному верстаті, в - готові зразки до вивчення на мікроскопі.



Рисунок 2.19 – Зовнішній вигляд стереоскопічних мікроскопів:

а - SZ61 «OLYMPUS», б - MC-2

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Методика гідростатичного зважування була наступна.

Спочатку виконувався замір дистильованої води. Для оцінки впливу температури слід зауважити, що щільності води і повітря зменшуються з ростом температури (при кімнатному діапазоні температур).

Першим зважували тіло в повітрі, поклавши його на чашку ваг. Позначали його вагу, що вказували ваги, через  $T_1$ . При зважуванні тіла у воді, воно підвішується на тонкому дротику до гачка чашки ваг. Силою, що виштовхує тіло, можна знехтувати, а вагу дротика слід врахувати.

На другому етапі зважують тіло в повітрі, підвішене на дроті. Показання ваг при цьому будуть  $T_2$ . На третьому етапі зважують тіло у воді, як показано на рисунку 2.20, підвішене на дроті. Показання ваг при цьому будуть  $T_3$ .



Рисунок 2.20 – Зважування зразків гідростатичне.

При зважуванні слід прийняти деякі застереження:

- над чашкою ваг поміщають «П» подібну підставку, на яку ставлять скляну склянку з водою; тіло повинне вільно висіти на дроті всередині води, не торкаючись стінок скляночки;
- на поверхні тіла і дроту не повинно бути бульбашок повітря;
- через поверхню води, для зменшення капілярної дії повинна проходити тонка, тобто не перекручена частина дроту.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ШВИДКО ОХОЛОДЖЕНИХ ЛІГАТУР НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АК7

3.1 Результати досліджень сплаву виготовленого за серійною базовою технологією.

Хімічний склад сплаву AlSi7Mg0,3 виготовлений за стандартною технологією наведено в таблиці 3.1 і відповідає вимогам технічної документації.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сплаву AlSi7Mg0,3 (зразки № 1 – 6).

Зона	Масова частка елементів, %								
	Fe	Mn	Ti	Cu	Sr	Si	Zn	Mg	B
SAEJ452	До	До	До	До	0,01...	6,5...	До	0,25...	До 0,02
	0,20	0,10	0,20	0,20	0,04	7,5	0,10	0,45	
Металевий кокінь	0,082	0,001	0,119	0,003	0,0245	7,25	0,004	0,290	0,0008

Механічні властивості і щільність сплаву, отриманого за серійною технологією наведені в таблиці 3.2.

Зразки під номерами 3 і 5 не відповідають технічним умовам.

Макро і мікроструктура сплаву AlSi7Mg0,3 виготовлені за стандартною базовою технологією представлені на рисунках 3.1 і 3.2.

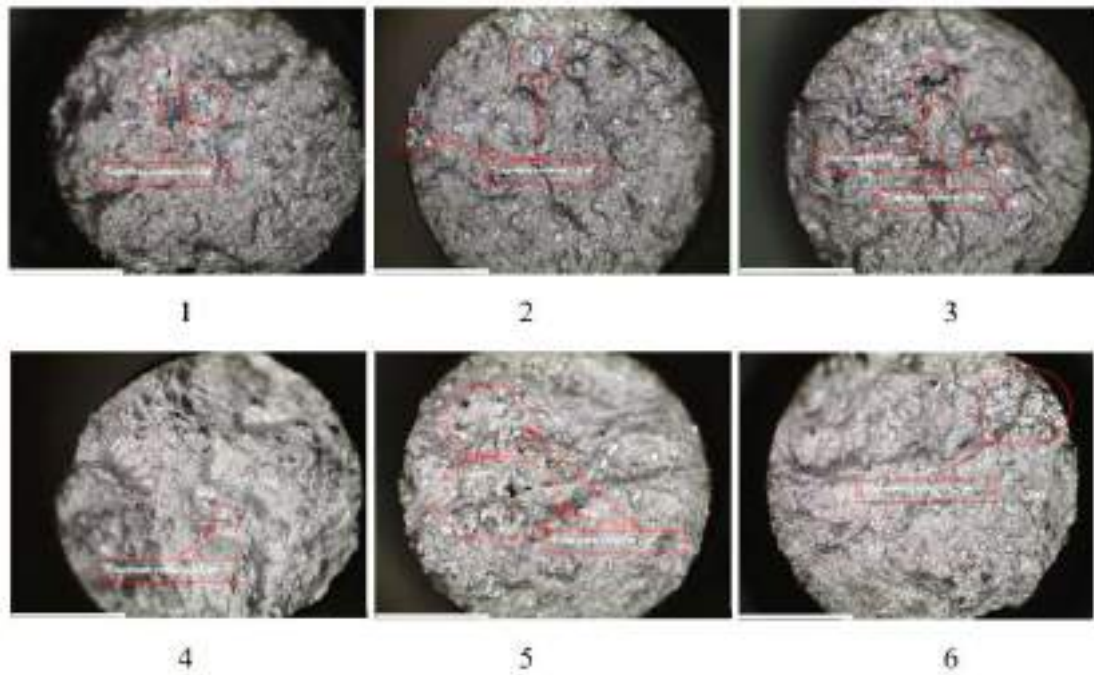


Рисунок 3.1 – Макроструктура зламів зразків AlSi7Mg0,3 сплаву серійної технології (збільшення x20):

1 – 3 - не термооброблені зразки; 4 – 6 - термооброблені зразки.

Таблиця 3.2 – Властивості зразків AlSi7Mg0,3 за базовою технологією.

№ зразка	Терм. Обр.	Механічні властивості				Густина, г/см <sup>3</sup>
		$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_n$ , МПа	НВ	
Вимоги технічної документації	–	80	5	160	45...60	-
	+	140	5	210	75...95	-
1	–	88,54	8,94	205,42	58,6	2,6692
2	–	91,9	6,23	196,16	59,8	2,6653
3	–	90,84	4,5	184,74	62,6	2,6651
4	+	191,29	15,17	288,24	84,9	2,6675
5	+	192,14	3,74	254,08	85,2	2,6603
6	+	191,16	4,99	262,49	84,9	2,6577

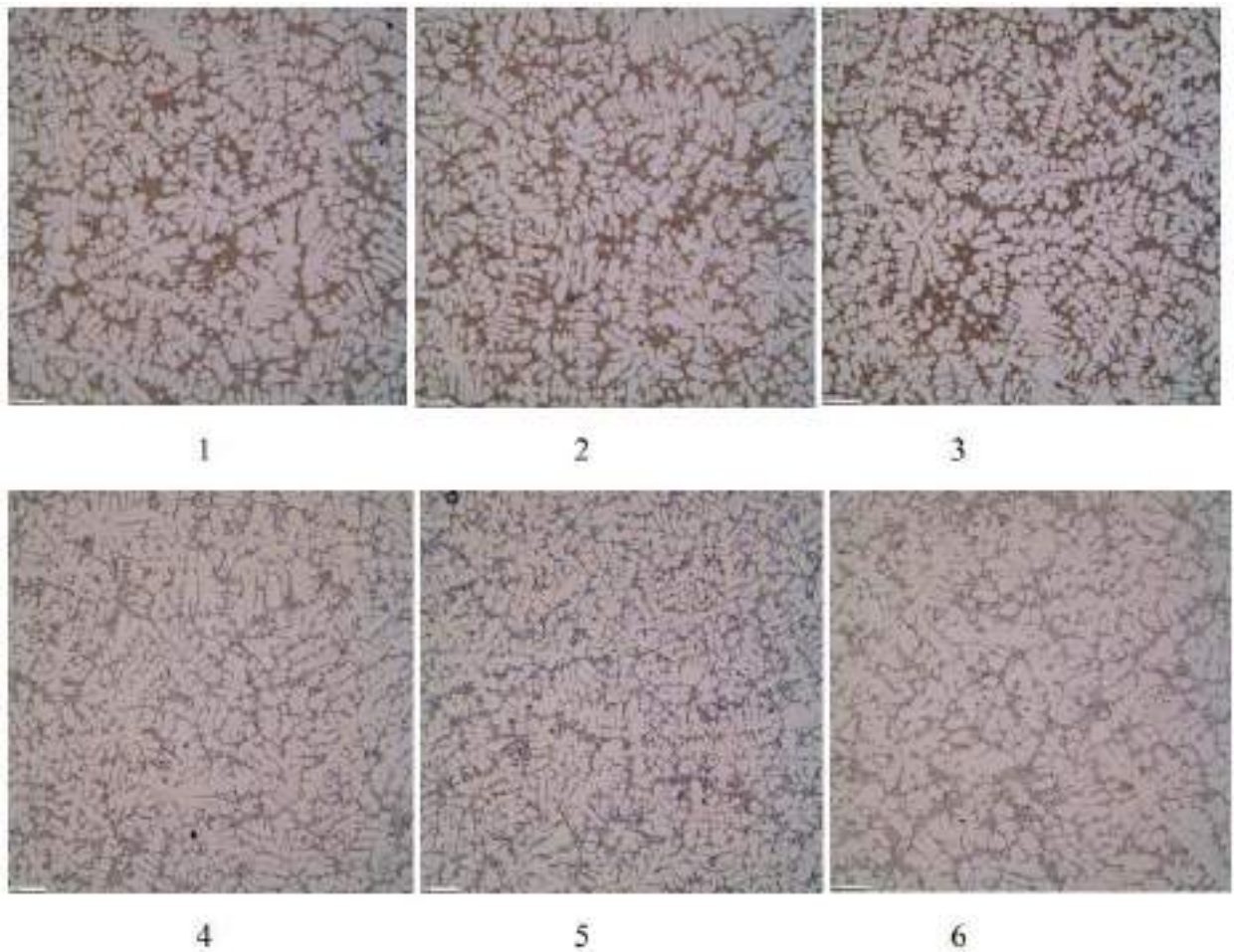


Рисунок 3.2 – Макроструктура зразків AlSi7Mg0,3 сплаву серійної технології:  
 1 – 3 - не термооброблені зразки; 4 – 6 - термооброблені зразки.

Дефекти, що виявлені в макроструктурі зламів зразків представлені в таблиці 3.3.

Розміри осей вторинних дендритів зразків виготовлених з AlSi7Mg0,3 за базовою технологією представлені на рисунку 3.3.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Дефекти макроструктури зламів зразків виготовлених з AlSi7Mg0,3 за базовою технологією.

Зразок	Кількість	Розмір скупчення усадкових раковин, мм
1	2	1,5
2	2	0,9
3	2	2 і 1,3
4	1	0,4
5	2	2
6	1	1,5

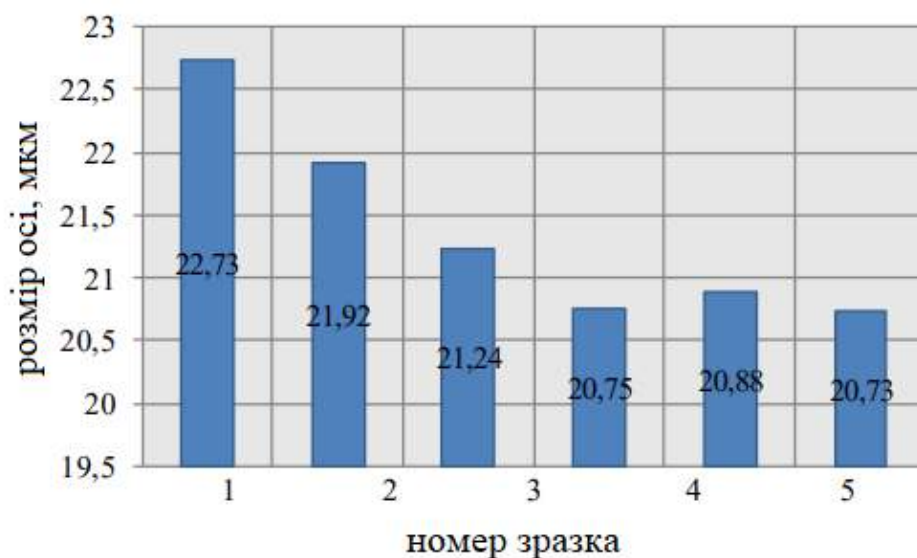


Рисунок 3.3 – Розмір осей вторинних дендритів (мкм):

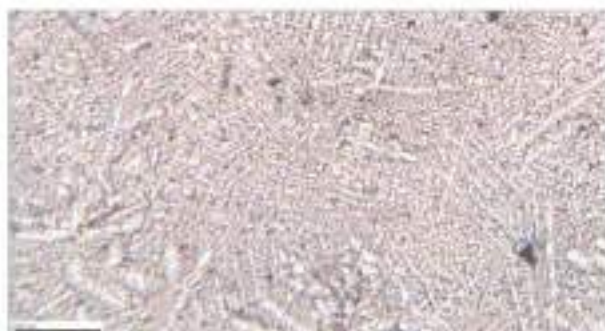
1 – 3 - не термооброблені зразки; 4 – 6 - термооброблені зразки.

### 3.2 Лігатура, отримана методом швидкої кристалізації.

Хімічний склад сплаву AlSi7Mg0,3 використовуваного для отримання швидко охолодженої модифікуючої лігатури приведено в таблиці 3.4. Мікроструктури модифікаторів ШОС представлені на рисунку 3.4. Розміри осей вторинних дендритів, зразків лігатури ШОС представлені на рисунку 3.5.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад ШОС AlSi7Mg0,3, зразки з кокіля «Rensli» і куточка.

Масова частка елементів, %								
Si	B	Zn	Sr	Mn	Cu	Mg	Ti	Fe
7,33	0,0008	0,004	0,0233	0,001	0,004	0,296	0,122	0,085



а



б

Рисунок 3.4 – Мікроструктура швидко закристалізованих зразків, а– заливка в кокіль «Rensli», б – заливка на куточок.

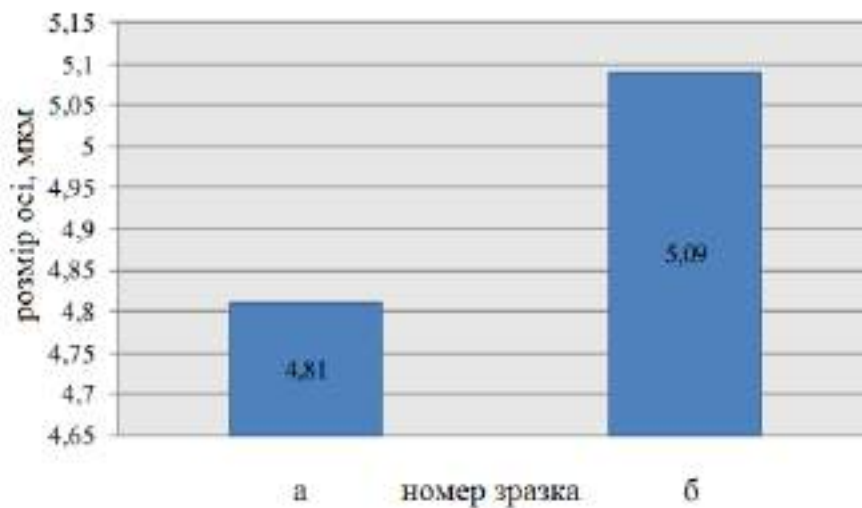


Рисунок 3.5 – Розмір осей вторинних дендритів (мкм) зразків лігатури ШОС вироблених різними способами:  
а – заливка в кокіль «Rensli»; б – заливка на куточок

3.3 Сплав, отриманий за експериментальною технологією, модифікований швидко закристалізованою лігатурою складу базового сплаву.

Розглянемо зміну хімічного складу сплаву AlSi7Mg0,3 протягом плавки і витримки зразків. Заливка зразків металом підготовленим за технологією з додаванням ШОС, не термооброблювана партія зразків витримки в печі 15 хвилин хімічний аналіз представлений в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад зразків 7 – 9.

Масова частка елементів, %								
Ti	Mn	Mg	Sr	Fe	Si	Zn	Cu	B
0,004	0,002	0,260	0,0001	0,096	6,92	0,011	0,003	0,0009

Заливка зразків металом підготовленим за технологією з додаванням ШОС, термооброблювана партія зразків витримування в печі 15 хвилин хімічний аналіз представлений в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Хімічний склад зразків 10 – 12.

Масова частка елементів, %								
Ti	Mn	Mg	Sr	Fe	Si	Zn	Cu	B
0,004	0,002	0,355	0,0001	0,103	7,05	0,011	0,002	0,001

Заливка зразків сплавом підготовленим за технологією з додаванням ШОС, не термооброблювана партія зразків витримування в печі 3 години. Хімічний склад зразків після підсихтування наведено таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Хімічний склад зразків 13 – 15.

Масова частка елементів, %								
Ti	Mn	Mg	Sr	Fe	Si	Zn	Cu	B
0,007	0,002	0,452	0,0001	0,112	6,95	0,011	0,002	0,0019

Заливка зразків сплавом підготовленим за технологією з додаванням ШОС, термооброблювана партія зразків з витримуванням в печі 3 години. Хімічний склад зразків наведено таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Хімічний склад зразків 16 – 18.

Масова частка елементів, %								
Ti	Mn	Mg	Sr	Fe	Si	Zn	Cu	B
0,004	0,002	0,33	0,0001	0,104	7,03	0,01	0,001	0,0007

Механічний властивості і щільність сплавів, отриманих за технологією з застосуванням ШОС наведені в таблиці 3.9.

Зразки під номерами 7 – 15 і 18 не відповідають технічним умовам. Зразки під номерами 16 та 17 успішно пройшли випробування. Макро і мікроструктура сплаву AlSi7Mg0,3 виготовлені по технології з застосуванням ШОС наведені на рисунках 3.6 і 3.7.

Дефекти виявлені в макроструктури зламів зразків та їх кількість представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.9 – Порівняльні характеристики зразків виготовлених з AlSi7Mg0,3 за технологією з застосуванням ШОС.

ШОС+ витрим.	№ зразка	Терм. Обр.	Механічні властивості				Густина, г/см <sup>3</sup>
			$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_n$ , МПа	НВ	
	Вимоги	–	80	5	160	45...60	-
	технічної документації	+	140	5	210	75...95	-
15 хв	7	–	80,57	2,9	159,95	60,4	2,6680
15 хв	8	–	86,12	0,7	104,73	61,2	2,6709
15 хв	9	–	83,5	6,16	190,19	61,8	2,6736
180 хв	10	–	91,82	5,73	192,63	67,3	2,6706
180 хв	11	–	95,24	4,6	186,85	66,4	2,6658
180 хв	12	–	87,46	2,09	154,71	61,8	2,6703
15 хв	13	+	214,86	1,7	296,28	95,0	2,6708
15 хв	14	+	215,72	3,34	266,21	95,0	2,6671
15 хв	15	+	217,11	0,37	282,92	93,5	2,6721
180 хв	16	+	210,37	9,61	217,07	92,1	2,6677
180 хв	17	+	216,09	7,66	312,94	90,4	2,6695
180 хв	18	+	216,46	1,7	306,24	92,1	2,6693

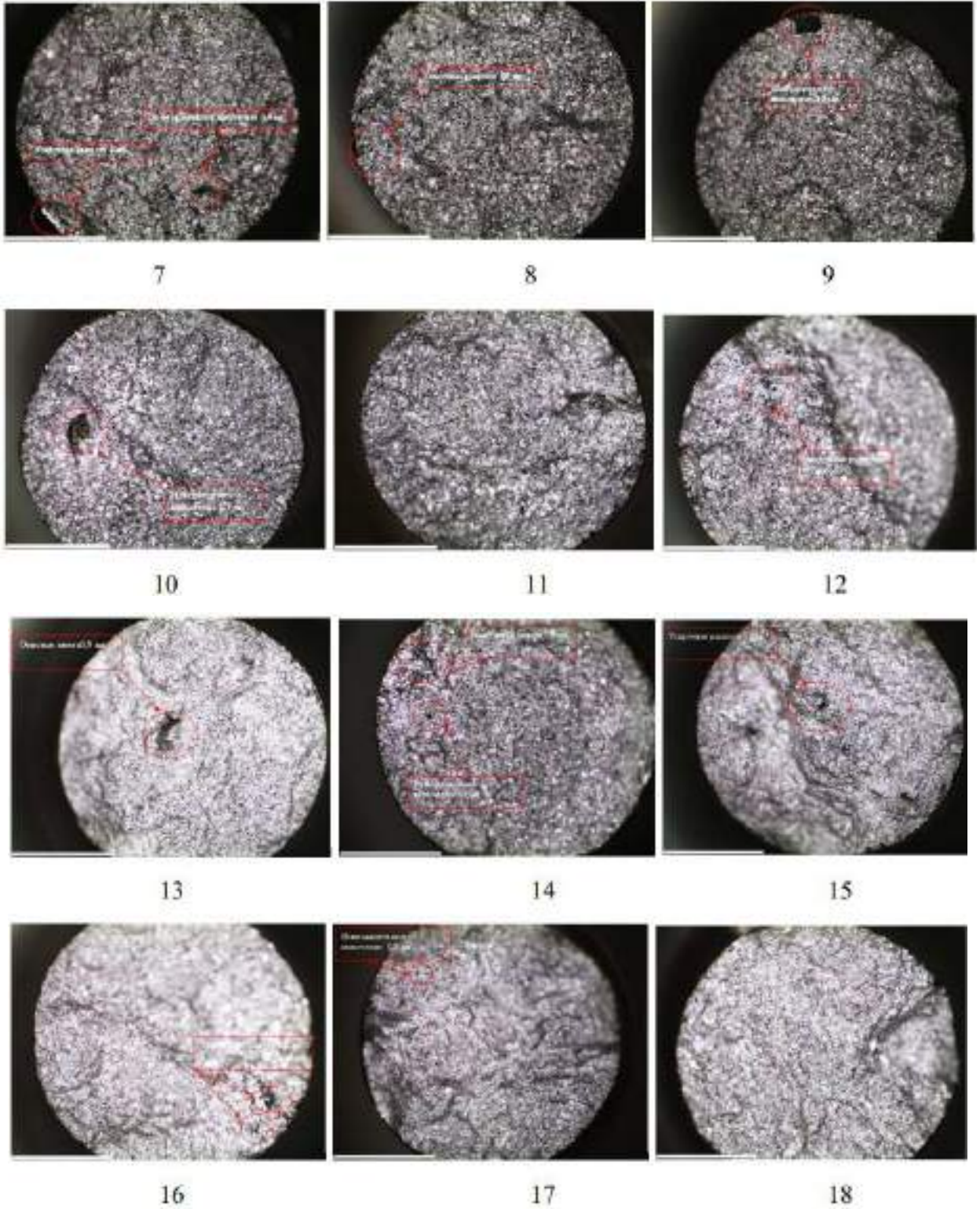


Рисунок 3.6 – Макроструктура зламів зразків AlSi7Mg0,3 сплаву з застосуванням технології з додаванням модифікатора ШОС:  
7 – 12 - не термооброблені зразки; 13 – 18 - термооброблені зразки.

Таблиця 3.10 – Дефекти макроструктури зламів зразків виготовлених з AlSi7Mg0,3 за технологією із застосуванням ШОС.

Зразок	Кількість	Дефекти
7	2	Не металеві включення 0,4 мм; розмір скупчення усадкових раковин 1 мм.
8	1	Розмір скупчення усадкових раковин 1,3 мм
9	1	Не металеві включення 0,7 мм
10	1	Не металеві включення 0,7 мм
11	-	-
12	1	Розмір скупчення усадкових раковин 0,7 мм
13	1	Окисна плівка 0,9 мм
14	2	Не металеві включення 0,1 мм; розмір скупчення усадкових раковин 1,4 мм.
15	1	Розмір скупчення усадкових раковин 0,5 мм
16	2	Розмір скупчення усадкових раковин 0,3 мм
17	1	Не металеві включення 0,2 мм
18	-	-

Розміри оцей вторинні дендритів зразків виготовлених з AlSi7Mg0,3 по технології з застосування ШОС, представлені на рисунку 3.8.



Рисунок 3.7 – Мікроструктура зразків AlSi7Mg0,3 сплаву з застосуванням технології з додаванням модифікатора ШОС.



Рисунок 3.8 – Розмір осей вторинних дендритів (мкм):

7 – 12 - не термооброблені зразки; 13 – 18 - термооброблені зразки.

3.4 Порівняльний аналіз сплавів отриманих по серійний і експериментальній технологіях.

Порівняння механічних властивостей зразків наведено на рисунках 3.9 – 3.12. Зразки № 8 і 12 не відповідають параметрам технічних умов. Зразки № 1 – 7, 9 – 11, 13 – 18 успішно пройшли випробування.

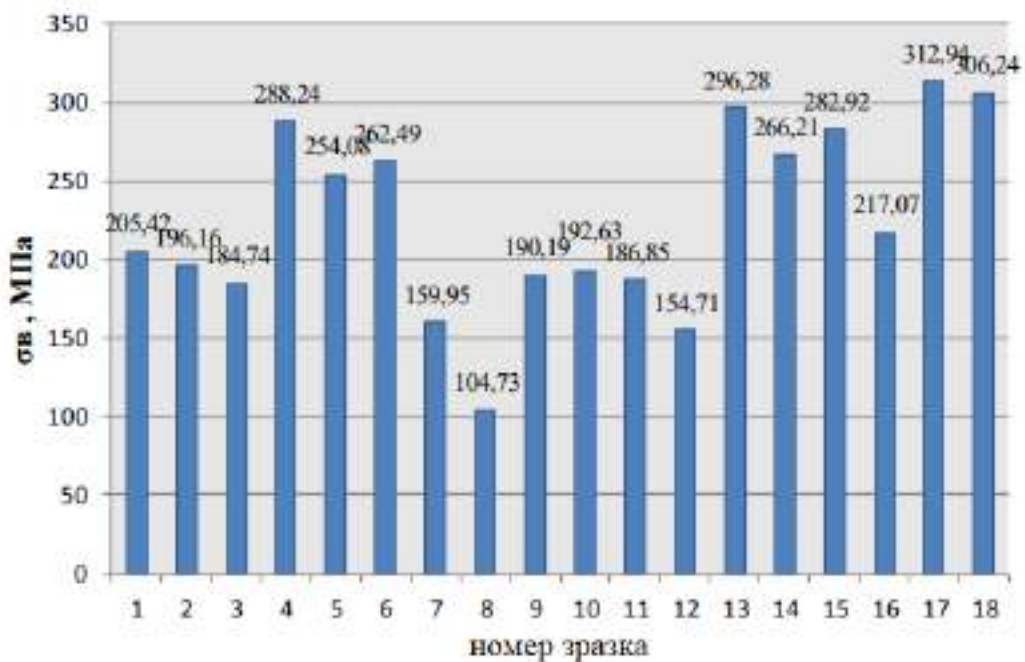


Рисунок 3.9 – Порівняння межі міцності зразків.

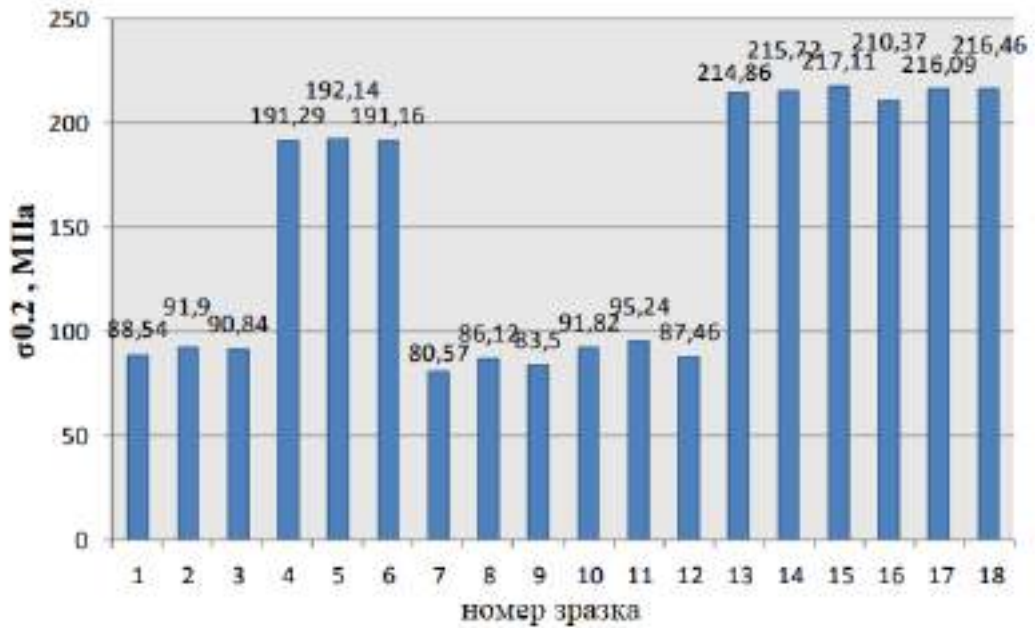


Рисунок 3.10 – Порівняння межі плинності зразків

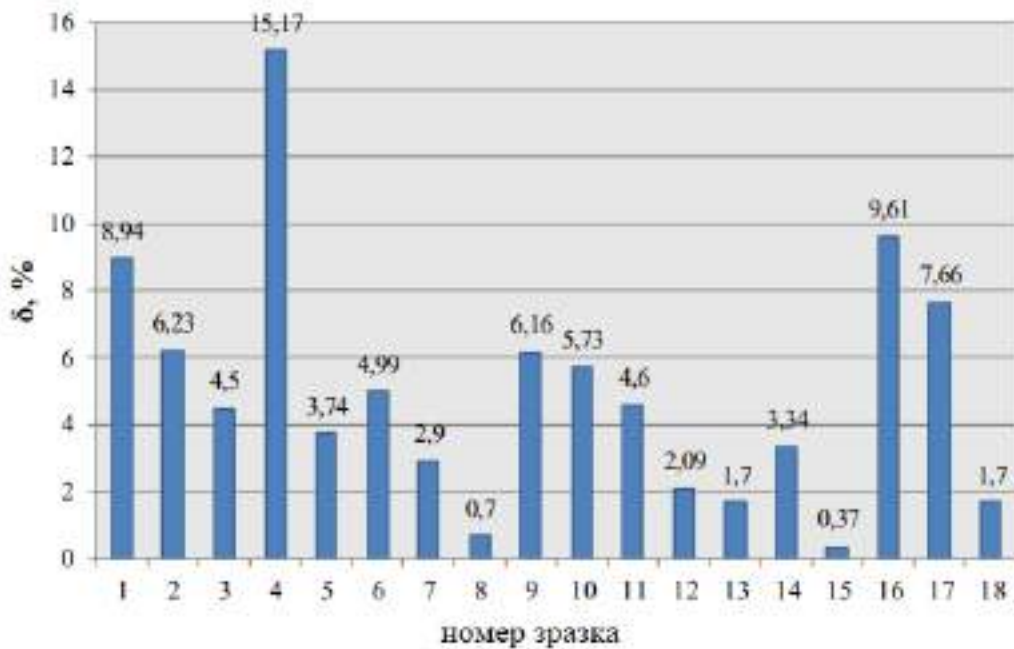


Рисунок 3.11 – Порівняння відносного видовження зразків.

При порівнянні відносного видовження зразків виявилось, що зразки № 3, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15 і 18 не відповідають параметрам технічних умов, а зразки 16 і 17 успішно пройшли випробування.

При порівнянні середніх значень твердості зразків виявилось, що зразки № 3, 8, 9, 10, 11, 12 не відповідають параметрам технічних умов, а зразки № 1, 2, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 15, 16, 17, 18 успішно пройшли випробування.

Порівнюючи механічні властивості за показниками:  $\sigma_b$ , МПа,  $\sigma_{0.2}$ , МПа і Твердість, НВ можна сказати що показники хоч і не стабільні, але експериментальні зразки в цілому продемонстрували більш високі показники, але по значенням відносного видовження суттєво програють зразкам виготовлених зі сплаву, приготованому за стандартною технологією. Показник щільності приблизно однаковий у всіх зразків.

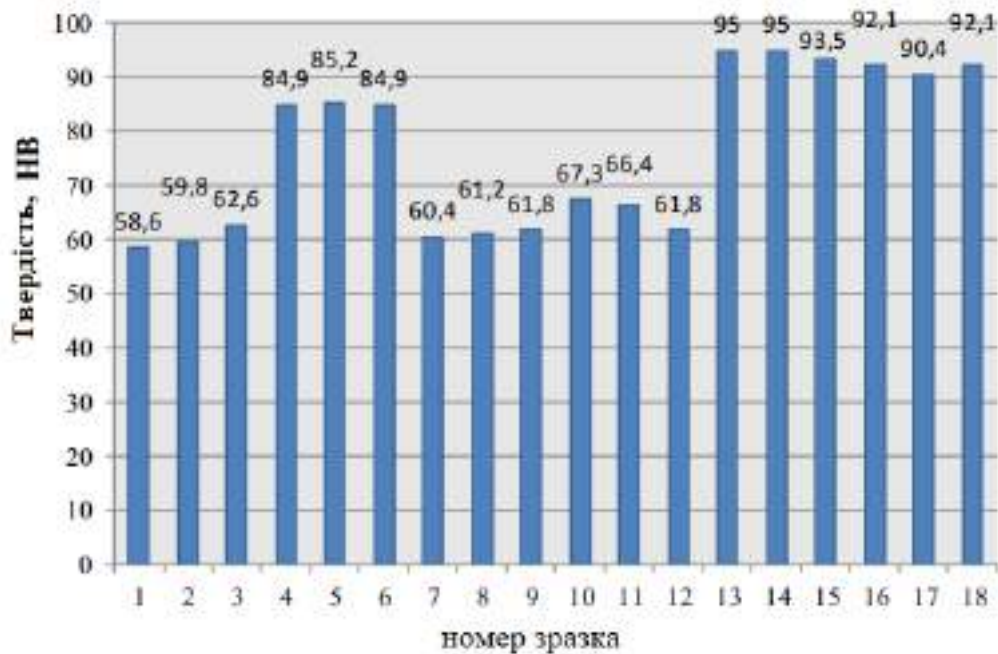


Рисунок 3.12 – Порівняння середньої твердості зразків.

Макро і мікроструктура. Для наочного порівняння не модифікованої і модифікованої структури наведено приклад розглянутий на рисунку 3.13.

Порівняння структури експериментальних зразків представлено на рисунках 3.14 і 3.15.

Аналіз макроструктури зламів зразків показав що наявності різного роду дефектів у зразків виготовлених за стандартною технологією менше ніж

у експериментальних що вказує в свою чергу на те що процедура рафінування (продування воднем і аргоном) стандартних базових зразків значно краще виконала очищення сплаву на відміну від експериментального сплаву (рафінування гексохлоретаном). Можливо, що рафінуючого препарату гексохлоретану було використано в недостатній кількості. Зазначимо що при візуальному огляді зламів видно що макроструктура базових зразків відрізняється від експериментальних. У експериментальних зразків видно характерний блиск а у базових зразків більш матова поверхня що наштовхує на міркування, що блискуча поверхня більш міцна.

Порівнюючи непромодифіковану структуру з модифікованою (рисунок 3.13) можна побачити різницю в структурі де в разі з модифікованою структурою евтектика і окремо а твердий розчин а в немодифікованій структурі такого ефекту не спостерігається. Характерною ознакою непромодифікованої структури є фаза евтектики Al-Si у вигляді голок.

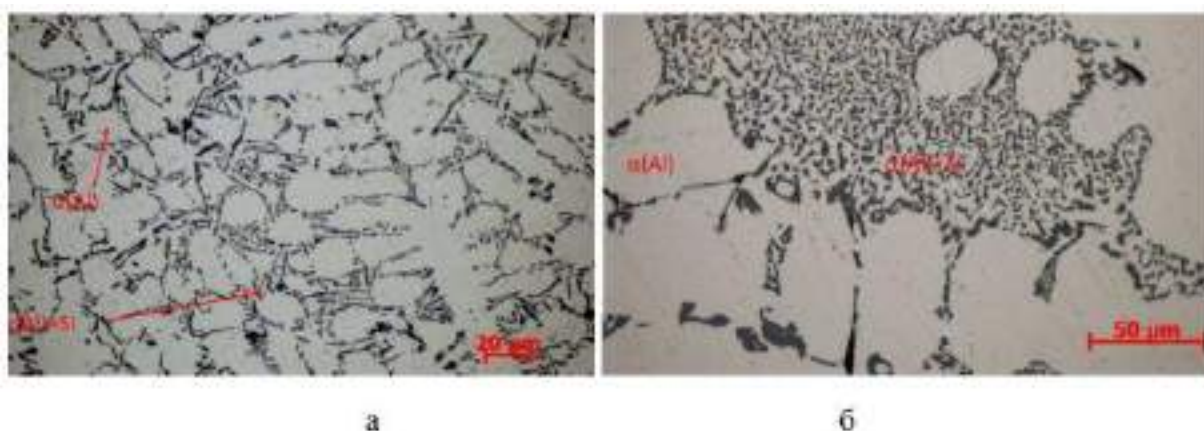


Рисунок 3.13 – Порівняння структури АК7:

а – не модифікована; б – модифікована

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68



а

б

в

Рисунок 3.14 – Порівняння структур не термооброблених зразків:  
 а - структура зразка 1 отриманого за стандартною технологією приготування розплаву; б - структура зразка 9 отриманого за технологією з додаванням ШЗС і витримкою в печі 15 хвилин; в) - структура зразка 10 отриманого за технологією з додаванням ШОС і витримкою в печі 180 хвилин.



а

б

в

Рисунок 3.15 – Порівняння структур термооброблених зразків:  
 а - структура зразка 4 отриманого за стандартною технологією приготування;  
 б - структура зразка 14 отриманого за технологією з додаванням ШОС і витримкою в печі 15 хвилин; в - структура зразка 16 отриманого за технологією з додаванням ШОС і витримкою в печі 180 хвилин.

Наявність скупчення усадкових раковин говорить про невідпрацьовану технологію заливки, зокрема, нанесення теплоізолюючого покриття на робочу частину кокіля, що в своєму випадку позначилося на нестабільних

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

результатах механічних досліджень.

Порівняння макроструктури темплетів експериментальних зразків представлено на рисунку 3.16.

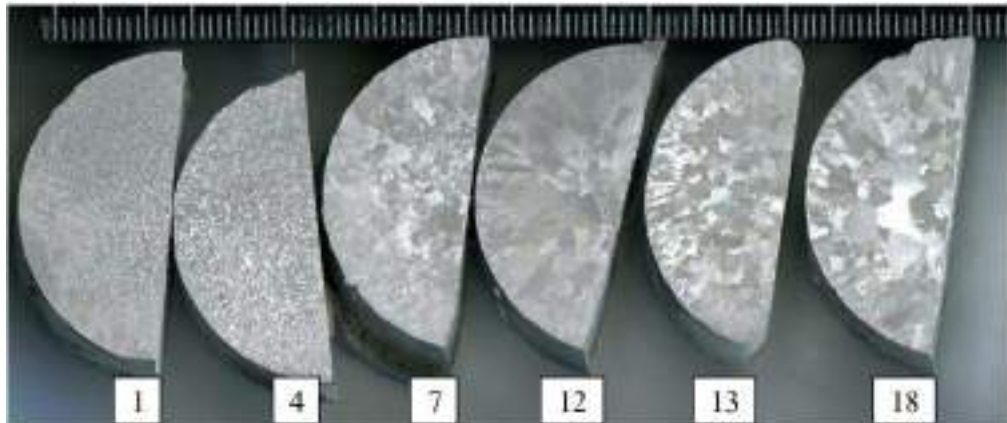


Рисунок 3.16 – Макроструктура темплетів зразків № 1, 4, 7, 12, 13 і 18.

Порівняння темплету диску колеса з темплетом експериментального зразка представлено на рисунку 3.17. На макроструктурі темплетів чітко видно різниця між базовими зразками та експериментальними зразками. На базових зразках структура дуже дисперсна на відміну від експериментальних зразків що говорить про те, що присутній ефект збільшення зерна лігатурою ШОС.

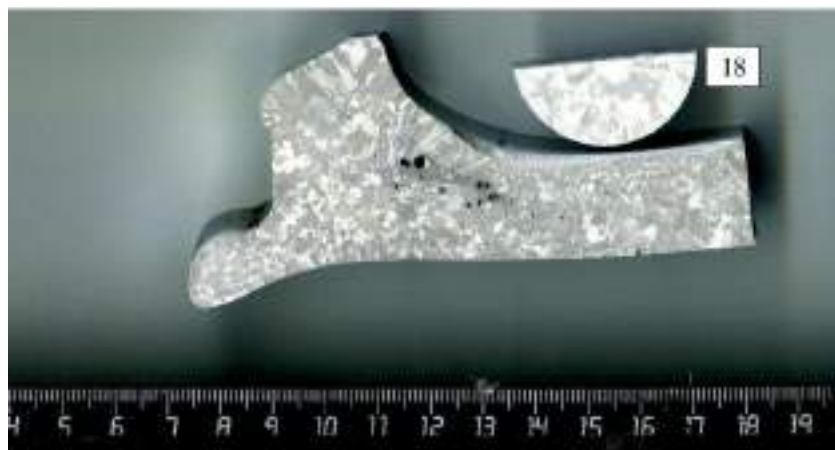


Рисунок 3.17 – Візуальне порівняння темплету литого диску колеса без застосування модифікування з темплетом зразка 18.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Розміри дендритного осередку. Порівняння осей вторинних дендритів експериментальних зразків представлено на рисунку 3.18.



Рисунок 3.18 – Розміри вторинних осей дендритів зразків.

Вторинні осі дендритів всіх представлених зразків виявилися приблизно однаковими.

## ВИСНОВКИ

1) Виконано аналіз застосування лігатур, що відповідають хімічному складу сплаву AlSi7, отриманих швидкою кристалізацією з рідкого стану. З проведених досліджень властивостей і структури сплаву AlSi7 за серійною та дослідною технологіями слідує:

- Межа міцності і твердість сплаву AlSi7 відповідають технічним вимогам.

- Відносне подовження знаходиться в межах від 0,37 до 15,17 % і не стабільно в межах всіх проведених експериментальних плавок. Дослідження мікроструктури показали непромодифікованість евтектики:

2) Приготування дослідної лігатури проводилося в низькотемпературному інтервалі плавлення для зменшення витрати електроенергії і підвищення продуктивності праці. В результаті не вдалося отримати гомогенного стану сплаву.

3) Кристалізація лігатури зі швидкістю  $10^2 - 0,5 \times 10^3$  К/с, виявилася недостатнім методом для отримання добре модифікованої евтектики. Можна припускати значний вплив на цей процес і термочасових факторів.

4) У той же час для досягнення гомогенності розплаву необхідно знати температуру переходу в цей стан, яка для кожного сплаву індивідуальна і суттєво вища за звичайну температуру перегріву, що забезпечує заливку заготовок і фасонних виливків.

5) Методи термочасової обробки, що дозволяють встановлювати температури переходу в гомогенний стан виміром структурно-чутливих характеристик дають можливість досягти позитивного ефекту для утворення «само модифікування» на сплаві АК7.

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А.М. Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с. ISBN 978-966-945-125-5
2. Abdoli H. Evolutions during synthesis of Al–AlN-nanostructured composite powder by mechanical alloying / H. Abdoli, E. Salahi, H. Farnoush, K. Pourazrang // Journal of Alloys and Compounds Volume 461, Issues 1–2,11 August 2008, Pages 166-172
3. Lipinski, T. Influence of Ti and melt number on microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy on agriculture machine parts. In: Proceedings of Engineering for Rural Development, Vol. 17, 2018, pp. 1431-1436. Jelgava, Latvia.
4. Матеріалознавство : навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 243 с . ISBN 978–966–350–756–9
5. Zula G. Dynamic Viscosity of Aluminum OxideEthylene Glycol (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nanouids / G. Zula, J. Fala, M. Gizowskab, A. Witek, M. Cholewac // ACTA PHYSICA POLONICA, Vol. 128 (2015), PP 240-244
6. A. Dolata-Grosz. Struktura strefowa kompozytow AK12-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-AK12-SiC kształtowana w Prozesie odlewania odsrod kowedo // Kompozyty. – 2002. – №5. – С. 305 – 308
7. C.G. Kang, P.K. Rohatgi Transient thermal analysis of solidification in a centrifugal casting for composite materials containing particle segregation // Metallurgical and Materials Transactions. – 1996. – 27B. – P. 277 – 285.
8. Lim, C.S.; Clegg, A.J. The production and evaluation of metal-matrix composite castings produced by a pressure-assisted investment casting process // Journal of Materials Processing Technology. – vol. 67, issue 1-3. – 1997. –P. 13 –

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18.

9. Liao H., Sun Y., Sun G. Effect of Al-5Ti-1B on the microstructure of near-eutectic Al-13.0%Si alloys modified with Sr. Journal of Materials Science 37, 2022, 3489 – 3495

10. Nová I., Fraňa K., Lipiński T., Monitoring of the Interaction of Aluminum Alloy and Sodium Chloride as the Basis for Ecological Production of Expanded Aluminum. Physics of Metals and Metallography 2021, 122(13), pp. 1288-1300

11. Lipiński T., Szabracki P. Mechanical Properties of AlSi9Mg Alloy with a Sodium Modifier. Solid State Phenomena Vol. 223, 2015, pp. 78-86

12. Ulewicz R., Selejdak J. et al. Process management in the cast iron foundry. 22nd International Conference on Metallurgy and Materials. Bron Czech Republic 15-17.05.2013, pp.1926-1931.

13. Lipiński T. Analysis of Mechanical Properties of AlASi9Mg Alloy with Al, Ti and B Additions. Manufacturing Technology 17(5), 2017, pp. 761-766.

14. Skocowsky P., Kiś M., Kubincowa Z. Modyfikacja stopów Al-Si antymonem. Archives of Foundry 6(21), 2006, pp. 269-274

15. Wang T., Fu H., Chen Z., Xu J., Zhu J., Cao F., Li T. A novel fading-resistant Al-3Ti-3B grain refiner for Al-Si alloys. Journal of Alloys and Compounds 511, 2012, pp. 45-49.

16. Yang, Y. Ultrasonic Cavitation Based Nanomanufacturing of Bulk Aluminum Matrix Nanocomposites / Yang Y., Li X. //Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol.129. 2007. - P.497-501.

17. Dudyk M., Ficek B., Suchanek B., Wasilewski P. Trwała modyfikacja antymonem siluminów AlSi6Cu2Mg (AK62) I AlSi8Cu4Mg (AK84). Krzepnięcie metali i stopów 15, 1990, pp. 67-76.

18. J.W. Kaczmar, K. Pietrzak, W. Włosin'ski. The production and application of metal matrix composite materials // Journal of Materials Processing Technology 106 – 2000. – P. 38–67

					MPTAM 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Wang E. R., X. D.Hui, S. S.Wang, Y. F.Zhao, G. L.Chen Improved mechanical properties in cast Al-Si alloys by combined alloying of Fe and Cu // *Materials Science and Engineering* – 2010. – № A 527. – P. 7878 – 7884

20. Dana Bolibruchová, Marek Matějka, Michal Kúriš. Analysis of the impact of the change of primary and secondary AlSi9Cu3 alloy ratio in the batch on its performance. *Manufacturing Technology* 19(5), 2019, pp. 734-739.

21. Matej Steinacher, Franc Zupani, Mitja Petri, Primo Mrvar. EFFECT OF AlTi5B1 AND AlSr10 ADDITIONS ON THE FLUIDITY OF THE AlSi9Cu3 ALLOY // *Materials and Technologies* 48(6): PP. 917-921

22. W. Schneider, D. Granger. Aluminium Grain refinement in DC casting of aluminium, Part II. – *Aluminium*, vol. 83, 6/2007, 74-75.

23. R.Simon, R. Smetek MTS 1500 – an automated melt treatment system for aluminium alloys utilizing granular fluxes. WFO Technical Forum, June 2007 –GIFA, Düsseldorf, 106-108

24. W.Schneider (Bonn), P.Hoefs und W.Reif (Berlin) und M.Kearns (London). Entwicklung einer AlTiC-Vortlegierung für die Kornfeinung von Aluminum. *ALUMINIUM*, 74, 1996, 7/, 536-538

25. R. Romankiewicz, F. Romankiewicz. Influence of Modification on the Structure and Morphology of Fracture of AlSi13Mg1CuNi // *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING* Volume 13 , SpecialIssue 2 / 2013 , PP. 85 - 88

26. P Popel, U. Dahlborg, M Calvo-Dahlborg. On the existence of metastable microheterogeneities in metallic melts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 192, pp.012012. ff10.1088/1757-899X/192/1/012012

					MPTAM 24.23618.000. ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					МРТАМ 24.23618.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76