

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 202__ року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем
вищої освіти

на тему

**«Дослідження впливу магнітного поля на структуру та
властивості ливарних алюмінієвих сплавів»**

**«Investigation of the influence of magnetic field on the structure and
properties of aluminium alloys»**

Виконав здобувач вищої освіти:

II курсу, групи ПМ-22М-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

_____ МIRONYUK B.C.

Керівник роботи:

к.т.н. доцент _____ Олександр КУЗИК

Рецензент: _____

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва
Рівень вищої освіти _____ магістр _____
Галузь знань _____ 13 Механічна інженерія _____
Спеціальність _____ 131 "Прикладна механіка" _____
Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри _____
к.т.н. доцент, Олександр КУЗИК
“ _____ ” _____ 202__ року

**ЗАВДАННЯ НАКВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ
(МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ
ОСВІТИ**

Миронюк Валентин Сергійович

1. Тема роботи: "Дослідження впливу магнітного поля на структуру та властивості ливарних алюмінієвих сплавів"

2. Керівник роботи Кузик Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "04"серпня 2023 року № 19-13

3. Строк подання роботи до захисту "22" грудня 2023 року _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є дослідження впливу магнітного поля при заливанні в ливарну форму на зміну структури та механічні і технологічні властивості ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати способи покращення структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів модифікуванням їх добавками та обробкою зовнішнім впливом (магнітним полем).

2. Запропонувати лабораторну установку для обробки ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9 магнітним полем під час заливання у ливарну форму.

3. Розробити методику дослідження впливу та оптимізувати значення магнітного поля при обробці ливарного алюмінієвого сплаву.

4. Вибрати основні методики дослідження структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів, модифікованих впливом змінного магнітного поля.

5. Провести експериментальні дослідження впливу змінного магнітного поля при заливанні в ливарну форму на властивості сплаву АЛ9.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 2	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 3	доц., Олександр КУЗИК		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1	02.10	
2	Розділ 2	23.10	
3	Розділ 3	04.12	
4	Графічний матеріал	18.12	

Дата видачі завдання

«4» 09 2023 року

Керівник роботи

_____ Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

«_____» _____ 2023 року

_____ Валентин МИРОНЮК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконав здобувач вищої освіти Миронюк Валентин Сергійович студент II курсу, групи ПМ-22М-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка на тему "Дослідження впливу магнітного поля на структуру та властивості ливарних алюмінієвих сплавів", яка складається з пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Пояснювальна записка містить 58 сторінок тексту, формату А4, 13 рисунка, 7 таблиць. Ілюстративний матеріал містить 12 слайдів.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена дослідження впливу магнітного поля при заливанні в ливарну форму на зміну структури та механічні і технологічні властивості ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9.

Розглянуто експериментальні та теоретичні дослідження способів покращення структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів модифікуванням їх добавками та обробкою зовнішнім впливом (магнітним полем). Показано, що одним із найбільш перспективних способів зовнішнього впливу на розплав є обробка магнітним полем при плавці та кристалізації.

Запропоновано пристрій для обробки розплаву магнітним полем у процесі заливання розплаву в ливарну форму. Експериментально встановлено, що для даної конструкції пристрою для обробки розплаву АЛ9, максимальні механічні властивості сплаву оптимальні при значення магнітної індукції $B=0,5$ Тл і куту нахилу індукційної котушки пристрою $\alpha=40...50^\circ$. Пристрій може бути використаний як основа для створення промислової установки для обробки магнітними полями розплаву при заливанні ливарні форми.

Виявлено, що обробка магнітним полем сплаву АЛ9 збільшує показники тимчасового опору на розтяг в 1,12...1,19 рази і відносне подовження в 1,42...1,97 рази. При порівнянні обробленого магнітного поля сплаву АЛ9 з вихідним сплавом не обробленим при різних складах шихти виявлено підвищення рідкотекучості в межах 9,6...12,2 см. Оброблений магнітним полем сплав АЛ9 має балову пористість 2-3, тоді як у вихідному стані сплав має пористість – 3-4 в середньому.

Показано, що підвищення механічних властивостей є наслідком

подрібнення складових мікроструктури. Сплави, оброблені зовнішнім магнітним полем, мають підвищені значення рідкотекучості та нижчий бал пористості, що дозволяє отримувати якісніші виливки.

Наукова новизна магістерської роботи полягає в наступному:

- запропоновано механізм впливу магнітного поля на структуру і властивості ливарних алюмінієвих сплавів;
- експериментально доведено подрібнення структури та покращення властивостей ливарних алюмінієвих сплавів при заливанні в ливарну форму і відповідно показники та властивості деталей виготовлених методом лиття.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розплав, ливарний алюмінієвий сплав, структура, властивості, магнітне поле, виливка, модифікування.

ABSTRACT

The qualifying master's thesis was completed by the student of higher education Valentin Serhiyovych Myroniuk, II year student, group PM-22M-1, OPP "Applied mechanics" specialty 131 Applied mechanics on the topic "Investigation of the influence of magnetic field on the structure and properties of aluminium alloys. The explanatory note contains 58 pages of text, A4 format, 13 figures, 7 tables. Illustrative material contains 12 slides.

The qualifying master's thesis is devoted to the study of the influence of the magnetic field during pouring into the casting mold on the change in structure and mechanical and technological properties of the cast aluminum alloy AL9.

Experimental and theoretical studies of ways to improve the structure and properties of cast aluminum alloys by modifying them with additives and processing by external influence (magnetic field) are considered. It is shown that one of the most promising methods of external influence on the melt is treatment with a magnetic field during melting and crystallization.

A device for treating melt with a magnetic field in the process of pouring the melt into a casting mold is proposed. It was experimentally established that for this

design of the AL9 melt processing device, the maximum mechanical properties of the alloy are optimal at the value of magnetic induction $B=0.5$ T and the angle of inclination of the induction coil of the device $\alpha=40...50^\circ$. The device can be used as a basis for creating industrial installation for magnetic field treatment of melt when pouring into foundry molds.

It was found that magnetic field treatment of AL9 alloy increases the indicators of temporary tensile strength by 1.12...1.19 times and relative elongation by 1.42...1.97 times. When comparing the processed magnetic field alloy AL9 with the original alloy that was not processed at different compositions of the charge, an increase in fluidity was found within the range of 9.6...12.2 cm. has a porosity of 3-4 on average.

It is shown that the increase in mechanical properties is a consequence of grinding the components of the microstructure. Alloys processed by an external magnetic field have increased fluidity values and a lower porosity score, which makes it possible to obtain higher-quality castings.

The scientific novelty of the master's thesis is as follows:

- the mechanism of influence of the magnetic field on the structure and properties of cast aluminum alloys is proposed;
- experimentally proved the grinding of the structure and improvement of the properties of cast aluminum alloys when pouring into the casting mold and, accordingly, the indicators and properties of the parts produced by the casting method.

KEY WORDS: melt, cast aluminum alloy, structure, properties, magnetic field, casting, modification.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ ТА МОДИФІКУЮЧА ОБРОБКА СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ.....	11
1.1 Структуроутворення сплавів алюмінію із кремнієм.....	12
1.2 Модифікування алюмінієвих сплавів елементами домішок.....	18
1.3 Модифікування сплавів зовнішнім впливом.....	23
1.4 Обробка сплавів електричним струмом.....	25
1.5 Модифікація розплаву обробкою електромагнітними полями.....	27
Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.....	34
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	36
2.1 Характеристика та плавка ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9.....	36
2.2 Дослідження технологічних властивостей алюмінієвих сплавів.....	37
2.3 Пристрій для обробки ливарного алюмінієвого сплаву магнітним полем.	39
2.4 Методика проведення металографічних досліджень алюмінієвих сплавів.....	41
2.5 Дослідження механічних властивостей.....	45
Висновки до другому розділу.....	45
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	46
3.1 Оптимізація параметрів обробки ливарного алюмінієвого сплаву магнітним полем.....	46
3.2 Вплив магнітного поля на структуру ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9.....	47
3.3 Вплив магнітного поля на механічні і технологічні властивості алюмінієвого сплаву АЛ9.....	49
Висновки до третього розділу.....	51
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	53
Список використаних джерел.....	54

ВСТУП

В технологіях ливарного виробництва велика увага приділяється розробці та дослідженню способів зовнішніх впливів на алюмінієві розплави ультразвуку, вібрації, електричного струму, магнітного поля та ін. Зовнішня обробка сплавів сприяє подрібненню структури та підвищенню механічних та експлуатаційних властивостей виливків без модифікування їх спеціальними добавками. Основною перевагою обробки зовнішнім впливом в порівнянні з модифікуванням різними добавками є відсутність зміни хімічного складу розплаву, що не призводить до накопичення шкідливих домішок в ливарних сплавах при подальшому їх плавленні. Зазначимо, що широке поширення має обробка розплавів у магнітогідродинамічних перемішувачах, а також застосування електромагнітних кристалізаторів при безперервному та напівбезперервному литті виливків. Перспективним є розробка та дослідження ефективних технологій обробки алюмінієвих сплавів магнітним полем при заливанні в ливарну форму, що дає можливість отримувати виливки будь-якої конфігурації та не обмежувати матеріал форми.

Однак, обробка розплавів магнітним полем при заливанні в ливарну форму практично не досліджена, наявні результати мають уривчастий характер. Також недостатньо інформації про конструкцію дослідних установок для даних технологій. Механізм фізико-хімічного впливу магнітного поля на процес кристалізації сплавів досліджено недостатньо як в експериментальному, так і теоретичному плані. Тому дослідження впливу магнітного поля на структуру та властивості ливарних алюмінієвих сплавів у процесі плавки та лиття виливків є актуальною.

Метою роботи є дослідження впливу магнітного поля при заливанні в ливарну форму на зміну структури та механічні і технологічні властивості ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати способи покращення структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів модифікуванням їх добавками та обробкою зовнішнім впливом (магнітним полем).
2. Запропонувати лабораторну установку для обробки ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9 магнітним полем під час заливання у ливарну форму.
3. Розробити методику дослідження впливу та оптимізувати значення магнітного поля при обробці ливарного алюмінієвого сплаву.
4. Вибрати основні методики дослідження структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів, модифікованих впливом змінного магнітного поля.
5. Провести експериментальні дослідження впливу змінного магнітного поля при заливанні в ливарну форму на властивості сплаву АЛ9.

Об'єкт дослідження – процес покращення структури і властивостей ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9 обробкою його зовнішнім магнітним полем.

Предметом дослідження – закономірності впливу магнітного поля на показники та властивості зразків та деталей виготовлених методом лиття.

Практична значення отриманих результатів роботи.

- запропоновано пристрій та розроблено методику обробки металевих розплавів магнітним полем при заливанні в ливарну форму, яке не обмежує матеріал форми, конфігурацію та масу виливків.

- запропоновано механізм впливу магнітного поля при заливанні в ливарну форму формування структури алюмінієвих сплавів.

- експериментально доведено модифікуючий вплив обробки розплаву магнітним полем при заливанні в ливарну форму на структуру, механічні та технологічні властивості алюмінієвих сплавів.

- показано, що обробка розплавів магнітним полем при заливанні в ливарну форму є перспективною технологією, що дозволяє отримувати сплави з дрібнозернистою структурою та заданими властивостями.

Апробація результатів дослідження.

Основні результати кваліфікаційної магістерської роботи доповідались і обговорювались на Всеукраїнському творчому конкурсі наукових робіт «Процеси та обладнання машинобудівних виробництв» Центральноукраїнський національний технічний університет м. Кропивницький.

РОЗДІЛ 1.

ЗАСТОСУВАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ ТА МОДИФІКУЮЧА ОБРОБКА СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

Широке застосування у виробництві виливків з алюмінієвого сплаву пов'язане з хорошими його технічними характеристиками: низькій температурі плавлення, високій рідко текучості, що обумовлює хорошу заповнюваність ливарної форми, хорошій оброблюваності, малій щільності та високим комплексом властивостей.

У зв'язку зі структурними особливостями литих сплавів, що мають грубі крихкі включення кремнію та інтерметалічні фази – характеристики міцності силумінів невисокі, особливо низька пластичність [2, 3]. Силуміни з дрібнозернистою кристалічною структурою мають більш високі механічні і ливарні властивості. Тому подрібнення виділень α -твердого розчину і кремнію є основною задачею покращення властивостей алюмінієво-кремнієвих сплавів. Для покращення структури та механічних властивостей ливарних алюмінієвих сплавів регулюють режими плавки, лиття та умови кристалізації виливків, але найбільш ефективним є модифікація, що є визначальним в структуроутворенні силумінів.

Модифікування сплавів сприяє подрібненню та глобуляризації елементів структури, що призводить до підвищення механічних властивостей виливків [4]. В даний час існують наступні способи модифікування [5]:

- у вигляді домішків – застосування модифікаторів I та II роду;
- рафінуванням – використання ремодифікаторів, розкислювачів, десульфураторів, дегазаторів;
- термочасове - витримка розплаву при різних перегрів;
- силове - із застосуванням перемішування розплаву, ультразвуку, струшування, вібрації та інших силових методів на кристалізацію виливки;
- суспензійне – обробка розплаву твердими металевими порошками;
- накладанням на кристалізацію розплаву електромагнітних полів;

- змішуванням розплавів;
- прискоренням процесу охолодження виливка;
- спадкове - використання шихти переплаву з більш дисперсною структурою.

1.1 Структуроутворення сплавів алюмінію із кремнієм.

Алюмінієві сплави в яких основним легуючим елементом є кремній належать до силумінів. Велика кількість малопластичного кремнію в структурі ускладнює пластичну обробку алюмінієвих сплавів з великою кількістю евтектики, тому їх як правило використовують переважно як ливарні сплави.

Алюміній із кремнієм утворюють евтектичну діаграму стану без утворення хімічних сполук між ними (рисунок 1.1).

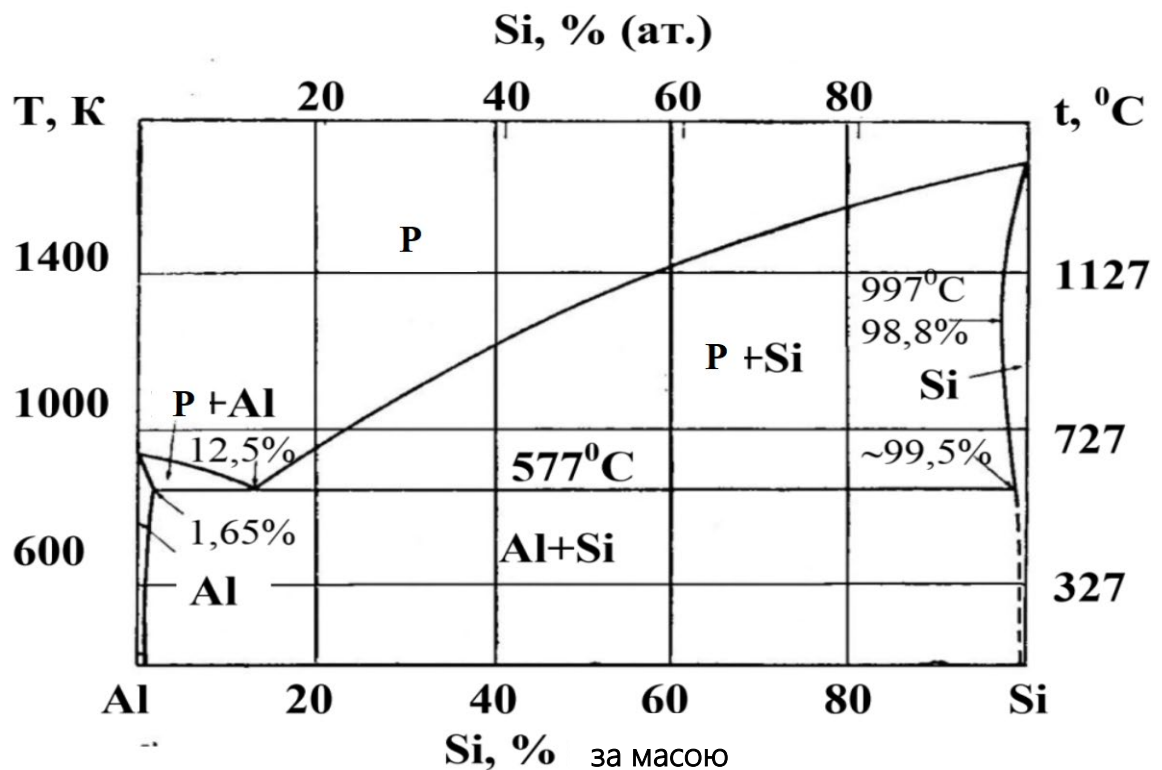


Рисунок 1.1 – Діаграма стану сплавів Al - Si [2].

Евтектика між твердим розчином алюмінію (α) та кремнієм Si утворюється при температурі 577°C і концентрації кремнію 11,7 чи 12,7%, – за різними даними. Дана розбіжність концентрації кремнію у евтектиці можна пояснити різною чистотою шихтових матеріалів. Наприклад та чи інша кількість фосфору, що завжди наявна в технічно чистих матеріалах, особливо в кремнії, утворює у розплаві фосфід алюмінію, температура плавлення якого дорівнює 2527°C. Тому фосфід алюмінію AlP знаходиться в розплаві у вигляді твердих частинок, що полегшує зародження і поява первинних кристалів Si при менших концентраціях, ніж при застосуванні чистих шихтових матеріалів, що не містять домішок фосфору. Розчинність кремнію у твердому розчині наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив температури на розчинність кремнію в алюмінію

Температура розплаву, °C	577	527	427	327	227
%, за масою	1,65	1,10	0,45	0,10	0,01
%, атомні	1,58	1,05	0,44	0,10	0,01

З табличних даних можна бачити, що при зниженні температури розчинність кремнію в алюмінію різко зменшується. При температурі 200°C практично дорівнює нулю.

Різниця в атомних розмірах алюмінію та кремнію, атомні радіуси яких відповідно 1,43 Å та 1,30Å, становить близько 10%, тому спотвореннями кристалічної решітки алюмінію при розчиненні в ній атомів кремнію можна нехтувати. Внаслідок цього значного зміцнення даних сплавів загартуванням не досягається. Зазначимо, що відсутність інтерметалевих сполук та висока швидкість дифузії кремнію в алюмінії призводить до розпаду загартованого твердого розчину занадто швидко, що супроводжується утворенням рівноважної Si – фази.

Встановлено, що твердий розчин при температурі 255°C повністю розпадається лише за 8 хвилин, з утворенням включень Si великого розміру, порівняно з евтектичними включеннями. Тому для подвійних Al-Si, термічна обробка не застосовується.

Твердий розчин кремнію в алюмінії, практично чистий алюміній, це м'яка і пластичну фазу (твердість 225...235 МПа), а кремній має високу твердість (порядку 8000...10000 МПа) і виконує роль як фази-зміцнювача. Характер зміни механічних властивостей подвійних Al-Si сплавів наведено на рисунку 1.2.

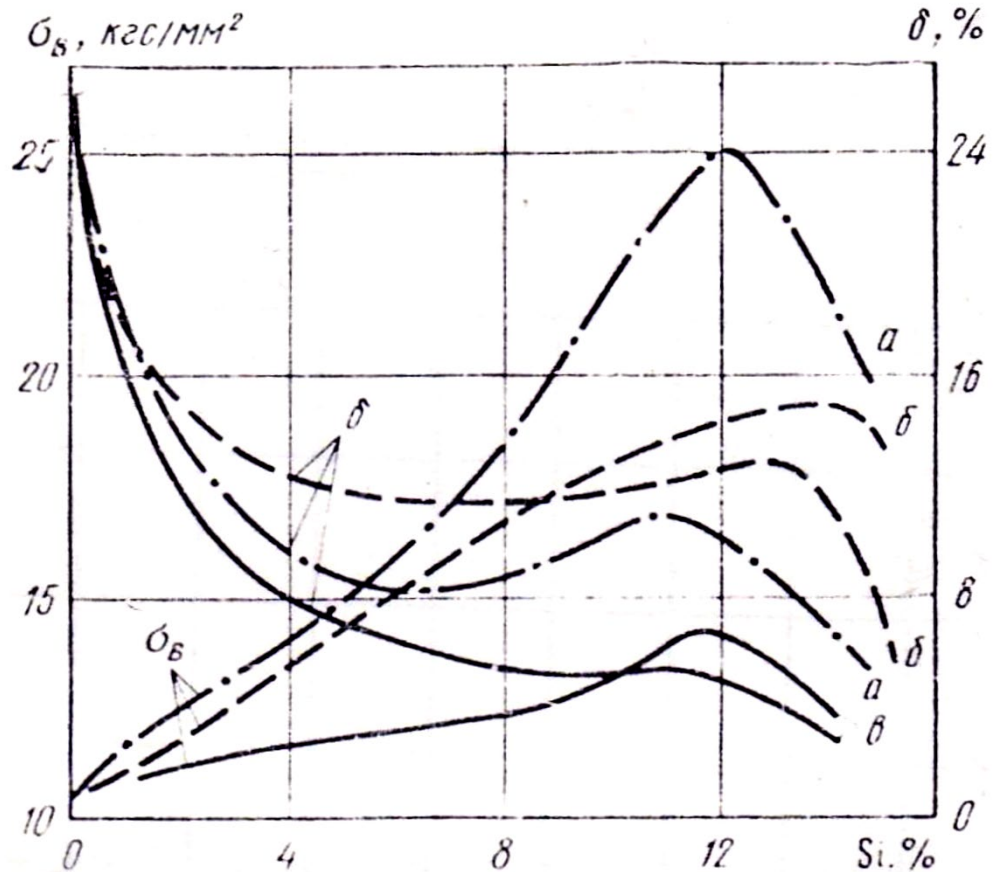


Рисунок 1.2 – Залежність впливу вмісту кремнію на механічні властивості подвійних силумінів: а – лиття в кокіль; б – піщану форму з модифікуванням; в – без модифікування

З рисунку можна бачити, позитивний вплив високої швидкості охолодження та модифікування як на міцність, так і пластичність. Збільшення міцності зі збільшенням концентрації кремнію до 12% можна пояснити збільшенням об'єму евтектичних колоній, а поява первинних кристалів кремнію призводить до зниження механічних властивостей. Внаслідок великої різниці модулів пружності α - твердого розчину і кремнію в останньому виникають великі локальні напруження, які перевищують середній рівень напружень у перерізі виливки. Такі напруження призводять до виникнення дефектів у вигляді тріщин, що поширюються потім у α -твердий розчин і чим більше включення,

тим більш вірогідне руйнування. Тому модифікуючи роль силумінів, спрямована на подрібнення кристалів Si є надзвичайно великою.

Структуру евтектики немодифікованих Al-Si сплавів, за морфологічними ознаками, розглядають як пластинчасту, грубогольчасту, а в модифікованих сплавах як сфероїдизовану. Дана класифікація ґрунтується на будові евтектик, яку можна спостерігати під час металографічних досліджень. Зазначимо, що кремній кристалізується у вигляді дендритів, які у модифікованих сплавах характеризуються надзвичайної розгалуженістю.

На характер структури як не модифікованих так і модифікованих алюмінієвих сплавів сильно впливають умови охолодження. Розплав, який витримують до температур близьких до евтектичних різко огрублює структуру. Немодифіковані сплави, які швидко охолоджуються, наприклад при литті в кокіль, мають структуру, що не відрізняється від модифікованої.

Найбільш високу модифікуючу дію забезпечують натрій та стронцій. Але з зв'язку з низькою температурою плавлення, що становить $97,5^{\circ}\text{C}$ металевий натрій не застосовується. При його введенні спостерігається піроефект, розплав закипає та підвищується чадність. Введення натрію виконують нанесенням сольових флюсів, що містять хлориди та фториди натрію на поверхню розплаву або його всередину. Обмінні реакції між флюсом та розплавом обумовлюють виділення вільного натрію, який переходить у розплав, що спрощує процес модифікування натрієм і робить його не обтяжливим.

Значним недоліком є порівняно малий час 30...40 хв. збереження ефекту модифікування через низьку температуру кипіння натрію, яка становить приблизно $873...883^{\circ}\text{C}$. Швидкому випаровуванню натрію в розплаві (коефіцієнт активності дорівнює 100 [3]) сприяє висока його активність. У зв'язку з швидким випаровуванням натрію, його вміст в поверхневому шарі набагато більше, ніж обсяг розплаву.

Більше тривалий ефект модифікування біля 3...4 годин, забезпечує стронцій, який вводиться у вигляді 5...10% лігатури Al-Sr. Недоліки цього

способу є вища вартості та необхідності нагрівання до вищої температури сплавів.

Немодифіковані заевтектичні силуміни кристалізуються при невеликих швидкостях охолодження, що обумовлює виділення первинних кристалів кремнію у вигляді великих включень, які часто мають неправильну форму. Наприклад модифікація фосфором значно збільшує число кристалів, при цьому кристали набувають вид невеликих поліедрів, які можна розглядати як різні перерізи куба. Таким чином, модифікація заевтектичних силумінів суттєво підвищує механічні властивості.

Зазначимо, що в алюмінієвих твердих розчинах зі збільшенням вмісту кремнію утворюється евтектична сполука кремній в алюмінії. Наприклад у сплавах Al із вмістом 11.7% Si відбувається утворення евтектичної суміші [29]. Із вмістом Si >11.7%, в алюмінієвому сплаві евтектичної структури, виявлено виділення кристалів вільного кремнію, зі збільшенням концентрації якого їх кількість також збільшується. В алюмінієвому литті під високим тиском, крім присутності евтектичної структури, важливе значення має пластичність, яка проявляється при температурах, що нижчі за затвердіння алюмінієвих сплавів. Відповідно до [30], таблиця 2 узагальнює механічні властивості алюмінієвих сплавів з різним вмістом Si (8 та 12%), що визначені при високих температурах.

Таблиця 1.2 Механічні властивості алюмінієвих сплавів при підвищених температур [30]

Температура, °C	Сплав Al+8%Si		Сплав Al+12%Si	
	межа міцності, кг/мм ²	відносне видовження, %	межа міцності, кг/мм ²	відносне видовження, %
25	15,3	1	18,6	8,0
100	14,8		16,8	10,5
150	13,9		13,4	12,8
200	12,3		10,1	13,0
250	11,4		7,7	15,0
300	7,7	2,5	5,5	21,5

З таблиці 1.2 можна бачити, що зі зростанням температури збільшується показник відносного видовження, при цьому максимальна межа міцності у алюмінієвого сплаву з вмістом кремнію 12% при температурі $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, який дорівнює 18.6 кг/мм^2 . Той же показник для алюмінієвого сплаву з вмістом кремнію 8% при температурі $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює 15.3 кг/мм^2 [30].

Таким чином, величина відносного видовження даного алюмінієвого сплаву з вмістом 12% Si показує, що даний сплав є легованим, та відливався в піщано-глинясту форму. Низькотемпературне видовження нижче для алюмінієвих сплавів, що отримані литтям під тиском. При високих температурах сплави Al з Si, що містять значні кількості твердорозчинної евтектики, мають велику пластичність, і в них не відбувається розтріскування [30-32].

Слід зазначити, що у нагрітому стані в сплавах Al-Si зі збільшенням вмісту Si до 4,5% значно підвищується пластичність. Si в алюмінієвих сплавах покращує їх ливарні властивості, підвищують рідкотекучість та зменшують величини усадки. Також зазначено, що лиття в піщано-глинясті форми сплавів Al-Si, мають крупнозернисту голчасту структуру [29].

Таким чином, модифікування алюмінієвих сплавів значно підвищує їх механічні характеристики. Модифікування сприяє подрібненню структури сплавів з допомогою введення у сплави різних хімічних реагентів, у вигляді натрію або фториду лужних металів. При відливанні сплавів під високим тиском та швидкому охолодженні, формується велика кількість центрів кристалізації Al-Si, які не встигають вирости до розмірів пластин або голок, що обумовлює в силумінів високу твердість і високі характеристики міцності. З одного боку при модифікуванні покращуються властивості міцності, а з іншого – збільшуються величини їх відносного видовження. А при виплавці сплавів під високим тиском у більшості випадків знижується величини відносного видовження [31, 32].

1.2 Модифікування алюмінієвих сплавів елементами домішок

При лиття металів і сплавів як правило застосовують домішкове модифікування, яке є універсальним, відносно дешевим, технологічно гнучким і високоефективним методом управління структурою сплаву при кристалізації [6].

Для модифікування силумінів, раніше, застосовували фтористий натрій, металевий натрій або його сполуки, що давали надійний ефект подрібнення евтектичного кремнію [2, 7, 8], але через нерівномірний розподіл натрію в розплаві ці способи не знайшли широкого застосування. Модифікація солями дозволяє отримувати більш чисті сплави, ніж модифікування натрієм, але процес має виконуватись за певною схемою [9]. У ливарних підприємствах широко використовували універсальний флюс: (30% NaF + 50 % NaCl + 10 % KCl + 10 % Na_3AlF_6); чи (40...60 % NaF + 25...45 % NaCl + 15 % Na_3AlF_6), який забезпечує одночасне рафінування та модифікування розплаву. Також використовували подвійний модифікатор (67% NaF + 33% NaCl) та легкоплавкий потрійний модифікатор (25% NaF + 62,5% NaCl + 12,5% KCl) [10]

Модифікування силумінів полягає в сильному подрібненні зерна при невеликому додаванні до сплаву натрію, який розташовується на поверхні кластерів, що служать за певних умов центрами кристалізації, і перешкоджає приєднанню атомів до них із розпорядкованої зони. Зазначимо, що сфероїдизація кристалів, викликає підвищення механічних властивостей сплавів, у той час як немодифіковані силуміни мають кристали у формі грубих голок або пластин, що знижує пластичні властивості сплавів.

Але при модифікуванні силумінів натрієм та його солями, існує небезпека отримання не повністю модифікованої або перемодифікованої структури. Таке явище знижує рідкотекучість розплаву та підвищує схильність до газопоглинання. Але основним недоліком є обмежений час витримки розплаву після введення модифікатора (зазвичай до 30 хв). Це пов'язано з випаровуванням і окисленням легкоплавкого натрію і особливо несприятливо для серійного та масового виробництва лиття з розливних печей, в яких оброблений флюсами

натрію містять розплав забезпечує повністю модифіковану структуру лише в початковий період розливу.

На сьогодні замість натрію та його сполук широко застосовують такі модифікатори як берилій, сурма, барій та особливо стронцій [11-14]. Зазначено, що стронцій, як і натрій, подрібнює алюмінієво-кремнієву евтектику та одночасно забезпечує стабільний ефект модифікування розплаву, який зберігається при тривалому його вистояванні до 6 годин та багаторазовій переплавці модифікованого сплаву до 3- 4 разів.

Виявлено, що стронцій створює більш тривалий ефект модифікування алюмінієво-кремнієвих сплавів порівняно з натрієм, незважаючи на те, що натрій є сильнішим модифікатором. Автори даної роботи вважають [15], що натрій сприяє більшому збільшенню поверхневого натягу силуміну АЛ4, ніж стронцій, проте його вплив швидко зменшується з часом внаслідок зменшення концентрації натрію, і через 20 - 25 хвилин поверхневий натяг сплаву знову зростає [15]. Однак застосування стронцію як модифікатора алюміній-кремнієвих сплавів у промисловості обмежена. Введення стронцію в металевому вигляді ускладнене через самозаймання, токсичність пару, необхідність підвищення температури розплаву, що збільшує газопоглинання стронцію. Також застосування цього металу обмежують висока вартість чистого стронцію та його невеликий видобуток із природних ресурсів. Крім того, стронцієві лігатури недостатньо технологічні у вживанні, погано засвоюються розплавом, потрібне точне дозування складу, щоб уникнути утворення в структурі сплавів надлишкових стронцієвих фаз, що погіршують механічні властивості виливків. Оскільки фізико-хімічні властивості стронцію і барію подібні, тому як модифікатор можна використовувати барій в кількості 0,1% [19].

Введення в силуміни 0,2% добавок сурми також забезпечується тривале модифікування до 4 годин, підвищується щільність виливків, істотно покращуються їх пластичність та властивості міцності, особливо при підвищених температурах. Вони не призводять до газової пористості навіть при

литті з малими швидкостями кристалізації. Структура і властивості виливків менш чутливі до охолодження, що сприяє для виготовлення деталей складної конфігурації. Однак, добавки сурми можуть викликати укрупнення зерна α -твердого розчину при литті, що знижує пластичність та міцність сплавів [20].

Проведені дослідження комплексного модифікування силумінів для забезпечення впливу не тільки на евтектику, а на всі структурні складові промислових алюмінієвих сплавів, особливо на розмір первинних зерен. Отримані позитивні результати були при обробці силумінів розплавів комплексними модифікаторами типу Al-Sr-Ti-B і Al-Sb-Zr-B. При спільному впливі модифікуючих елементів суттєво покращилися міцність та пластичність сплавів за рахунок сприятливих умов структуроутворення виливків. Позитивний вплив сурми та стронцію на формування евтектичної складовою посилюється введенням цирконію, бору та титану. Поєднання даних добавок сприяє подрібненню зерна α -твердого розчину та більш рівномірному розподілу α +Si евтектики. Зазначимо, що їхнє розчинення в алюмінії викликає зміцнення твердого розчину. Бор також сприяє зміцненню структури, зміцнює межі зерен, що підвищує міцність сплаву та стабілізує механічні властивості, особливо при роботі виливків за підвищених температур експлуатації [18].

Д.М. Худокормов, А.М. Галушко та С.М. Леках [23] проводили дослідження щодо впливу модифікування залізовмісної фази в алюмінієвому сплаві (11 % 81). Виявлено, що модифікування змінює гострокутну форму фази залізовмісної на більш рівноосну. Завдяки цьому суттєво підвищуються механічні властивості виливків а саме: межа міцності на розтяг збільшилася на 10...19%, відносне подовження - в 1,6...2,8 разів, твердість - на 5%. Дослідження показали, що найбільш ефективними компенсаторами заліза в силумінах, є хром, молібден і марганець. Це пояснюється існуванням певного взаємозв'язку між формою зростання кристалів з переважно ковалентним характером зв'язку та електронною будовою легуючих атомів. Таким чином, формозміна кристалічних утворень відбувається тільки під впливом перехідних елементів з п'ятьма електронами на незаповненій d-оболонці.

В даний час як модифікатори ливарних сплавів все більше застосування знаходять ультрадисперсні порошки хімічних сполук (нанопорошки), які виконують роль додаткових центрів кристалізації при первинній кристалізації.

Для підвищення якості виливків пропонують використовувати графітізуючу та інокулюючу модифікацію розплаву дисперсними та тонкодисперсними матеріалами, завдяки чому можна якісно змінити технологію модифікування. Використання комплексних ультрадисперсних модифікаторів, які синтезуються з відходів феросплавів, титаномagneзних, кремнійполімерних та ін. виробництв на спеціальних високочастотних установках методом плазмохімічного синтезу різко збільшує абсорбційну та каталітичну активність системи, оскільки значно зростає частка поверхні обсягом частки.

Введення в розплав тугоплавких карбідів, боридів та нітридів з температурою плавлення 1600...4200 °С позитивно впливає на розмір виділень евтектики, механічні та технологічні властивості сплавів. Встановлено [24], поверхня частинок ультрадисперсних модифікаторів має властивість досить швидко окислюватися, що ускладнює їх використання для обробки розплавів, оскільки вони не можуть служити центрами кристалізації. Пропонується плакувати поверхню частинок сумішшю твердих вуглеводнів метанового ряду, що в подальшому дає можливість зберігати в негерметичних ємностях тривалий час до 9 місяців, оскільки захисний шар стримує окисні процеси. При плакуванні частинок ефективність модифікатора покращується, а витрата модифікатора для зниження відбілу на 1 мм зменшується від 0,10 до 0,001...0,0015% при використанні плакованих частинок ультрадисперсних модифікаторів. Крім того, ультрадисперсні модифікатори збільшують тривалість збереження ефекту модифікування.

Вивчалася можливість використання комплексного модифікатора системи Al-Sr-Ti-B у вигляді нанопорошків, отриманих з лігатури цієї системи методом електроерозійного диспергування у вуглецевмісних середовищах (гас, трансформаторне масло). Показано [18], що застосування комплексних модифікаторів тривалої дії для обробки силумінів дозволяє суттєво покращити

властивості виливків, забезпечуючи при цьому стабільність результатів великосерійного та масового виробництва лиття після багаторазових переливів і переплавів силумінів. Механічні властивості сплаву, модифікованого таким комплексним модифікатором, виявилися вище, ніж у сплаву, модифікованого звичайним модифікатором Al-Sr-Ti-B. Значення межі міцності та відносного подовження сплаву, обробленого модифікатором на основі нанопорошку, склало для зразків, відлитих у кокіль, 380...400 МПа та 3...6 %, а для вирізаних з виливків - 280...320 МПа та 3 ...7%. Показники міцності та пластичності зберігалися при тривалому вистояванні розплаву біля 2 годин. При використанні напорошкових модифікаторів твердість значно вища, ніж у сплаву, обробленого звичайним модифікатором.

Таким чином, застосування комплексних модифікаторів на основі нанопорошків для обробки розплавів системи алюміній-кремній представляє інтерес для дослідників і є предметом подальшого вивчення з метою підвищення механічних та технологічних властивостей виливків.

Крім домішкових модифікаторів, модифікуючий вплив формування структури сплавів можуть надавати газові домішки. Так, у численних дослідженнях протягом останніх десятиліть активно розвиваються теоретичні та технологічні основи модифікуючого впливу водню на структуру та властивості алюмінієвих сплавів. При вивченні впливу водню та умов приготування на властивості ряду алюмінієвих сплавів запропоновано водневий механізм кристалізації та розроблено ефективні технології їх отримання. На підставі експериментальних та теоретичних результатів обґрунтовано використання водню як модифікатора структури алюмінієвих сплавів та рекомендовано ресурсозберігаючі технологічні прийоми плавки з регламентованими параметрами газоутримання [27, 28].

Запропоновано [29] механізм впливу водню на мікроструктуру силумінів з позиції квантовомеханічної поведінки атомів впровадження у сплавах. рівні енергій вільних електронів, взаємодіючи з періодичним полем кристалічних ґраток металів, що розщеплюються на сполучні і антисполучні функції.

Сполучні функції дають максимум електронної густини на зв'язку, антизв'язуючі хвильові функції дають нульову електронну густину між сусідніми атомами. Атоми застосування, розташовуючись у міжвузлях, знову змішують сполучні і антисполучні повертаючи електронний розподіл до моделі вільних електронів, характерний для рідкого стану металів. Тому атоми застосування водню Н знижують температуру основного металу. Розчиняючись у розплаві системи Al - Si під час проведення температурної обробки, водень при кристалізації сприяє значному переохолодженню, подрібненню структури, що, своєю чергою, призводить до підвищення герметичності та механічних властивостей сплавів. Технології, що ґрунтуються на використанні модифікуючого ефекту водню, є перспективним напрямком у процесах отримання алюмінієвих сплавів.

На сьогоднішній день домішкова модифікація має низку недоліків, основними з яких є відсутність універсальності модифікаторів, їх екологічна небезпечність та відносно короткий час живучості. Не можна не враховувати і факт зміни хімічного складу сплаву після модифікування, що надалі накладає низку обмежень щодо використання даного сплаву в наступних переплавах та створює необхідність проведення рафінувальних операцій, які потребують додаткових витрат часу та коштів.

На відміну від застосування елементів-модифікаторів, фізична дія на кристалізацію виливки дозволяє отримати модифікуючий ефект у сплавах, при цьому подрібнюється структура та підвищуються властивості, але не змінюється хімічний склад.

1.3 Модифікування сплавів зовнішнім впливом

Дослідженню способів модифікування структуру сплаву без введення спеціальних добавок, останнім часом, все більше приділяється увага. Одним з найбільш ефективних способів підвищення якості виливків при одночасному зниженні матеріальних та енергетичних витрат на їх виготовлення є розробка нових методів лиття, що ґрунтуються на використанні зовнішнього впливу на

рідкий розплав, а також розплав в процесі кристалізації на всіх етапах формування структури та властивостей виливка.

Застосування зовнішніх фізичних впливів обумовлює активацію твердих домішків, які будуть в якості центрів кристалізації [30]. Примусове переміщення розплаву щодо намерзлої кірки широко використовується для підвищення властивостей виливків. Частина кристалів з фронтальної частини затвердіння змивається та заміщується у розплаві, які при малих перегрівих можуть бути центрами кристалізації, додатково подрібнювати структуру та підвищувати комплексні властивості виливків.

Примусове перемішування реалізують за рахунок використання різних вібраційних зовнішніх впливів таких як: вібрація модифікуючого дзвіночка, заливної лійки, з використанням форми, що має низьку частоту (30...150 Гц) або ультразвукових коливань [31, 33, 96-99, 100, 101-103]. Також застосовуються способи перемішування розплаву у формі, серед яких найбільш вивченим є перемішування сплавів у відцентровій формі шляхом застосування змінної швидкості обертання [34, 35]. Однак знаходять застосування та інші методи впливу на розплав: електромагнітні [36, 37, 40-46, 47-65], гідродинамічні з використанням енергії струменя розплаву, струменя інертного газу, що пропускається через рідкий метал залитої виливки [31, 38]. Різні варіанти високотемпературної пічної обробки також використовуються для гомогенізації розплаву та подрібнення структури виливків [38-40, 68-73, 76-78, 80-85].

Незважаючи на значні витрати часу та електроенергії, застосування складного та дороговартуючого обладнання даних способів, а також абсолютного дотримання температурних режимів плавки, вони добре подрібнюють зерна та збільшують кількість центрів кристалізації порівняно із класичними способами домішкового модифікування, ефект застосування яких залежить від рівномірного розподілу елементів модифікатору в об'ємі розплаву, що впливають на зміну хімічного складу сплаву.

1.4 Обробка сплавів електричним струмом

Обробка алюмінієвого сплаву електричний струм, при кристалізації ефективно впливає на його рух, процеси тепломасопереносу та дозволяє керувати структурою і властивостями виливків. Слід зазначити, що оскільки електричний струм є внутрішнім джерелом енергії, то він додатково прогріває виливок і стабілізує температурне поле за часом і об'ємом. Це істотно знижує можливість утворення дефектів у виливках, запобігання появі яких особливо важливо при отриманні тонкостінних деталей.

Автори [41] при кристалізації алюмінієвого сплаву використовували ефект Пельтьє, який виникає між рідкою та твердою фазою при впливі постійного струму на рідкий розплав. Така спрямована кристалізація від анода до катоду дозволяє керувати процесом кристалізації кокільних виливків.

Дослідження впливу електричного струму на мікроструктуру та властивості алюмінієвих сплавів [42, 43] виявили, що з пропусканні струму через сплав виникає магнітне полі, що створює сили, які знижують швидкість руху макрооб'ємів розплаву межі поділу фаз. В результаті структура металу виливки стає дрібнозернистою, що призводить до підвищення механічних властивостей виливка металу. Дане може пояснити ускладненням зростання зерен через неможливість злиття більш тугоплавких домішкових та легуючих елементів, які виступають в якості центрів кристалізації, при цьому підвищується швидкість розчинення металевих домішок та інших елементів, які також є центрами кристалізації. Зазначимо, що обробка струмом розплаву, виникає ефект дегазації, що теж покращує механічні властивості металу виливки. З проведених досліджень встановлено [45, 46], що в результаті обробки міцність підвищується на 25...30 %, а відносне подовження — в 7...8 раз. Також обробка розплаву струмом дозволяє збільшити кількість стружки у шихті без зміни фізико-механічних властивостей сплавів.

Розроблений ефективний спосіб в якому П-подібну ливарну форму з відкритим дном встановлюють на двосекційний кристалізатор, кожна з секцій

якого є електродом ланцюга постійного або змінного електричного струму, що дозволяє створити спрямовану кристалізацію лопаток газових турбін. Після замикання ланцюга між електродами по виливку протікає електричний струм, що обумовлює більш щільну структуру металу. Це досягається як створенням теплових умов, так і електросиловим впливом на метал у процесі його кристалізації, що забезпечує дрібнозернисту будову виливка та покращення експлуатаційних властивостей сплавів. Подрібнення дендритної будови виливка можна пояснити наявністю електромагнітної конвекції в результаті силового впливу при кристалізації розплаву, при цьому руйнуються дендритні гілки, які стають додатковими центрами кристалізації. Слід зазначити, що під впливом електричних полів виникає магнітне поле, накладання якого зменшує переохолодження і перешкоджає розвитку дендритної структури. При цьому швидкість зародження центрів кристалізації збільшується, а швидкість їх росту – знижується, що обумовлює утворення щільної дрібнозернистої структури виливка [44].

І.Ф. Селянин зазначає [45], що мікроструктура силумінів, у процесі кристалізації при пропусканні змінного електричного струму, подрібнюється, залістисті α - і β -фази кристалізуються з подовженої пластинчастої форми в компактну. ТермоЕРС сплаву АК7ч при переході з рідкого стану в твердий різко збільшилася у вузькому інтервалі температур. Це можна пояснити наявністю ефекту Пельтьє межі поділу твердої і рідкої фаз, а також, існування контактної різниці потенціалів між цими фазами. При підвищенні вмісту заліза в сплаві АК7ч кристалізація набуває евтектичного характеру, що обумовлює збільшення кількості твердої фази в порівнянні з кристалізацією сплаву з меншим вмістом заліза, у якого основна кількість твердої фази випадає в області температури ліквідусу.

Проведені в роботі [46] дослідження, підтверджують наведене вище. Довжина піку термоЕРС змінюється при модифікуванні сплавів внаслідок збільшення числа зародків нової фази, що сприяє подрібненню структури.

Дослідження [47] мікроструктури поперечних та поздовжніх шліфів, оброблених постійним електричним струмом при кристалізації, виявили значну анізотропію властивостей зразка вздовж і поперек напрямку пропускання струму, яка пов'язана з напрямом максимальної напруженості електричного поля диполя зародка. Слід зазначити додаткове зниження механічних напружень при впливі електричного струму щільністю в діапазоні $10^4 \dots 10^8$ А/м на виліток, що знаходиться в твердому стані, після завершення процесу кристалізації та охолодження її до температури $(0,2 \dots 0,5)T_{пл}$, ефект при цьому рівносильний операції відпалу.

Таким чином, вплив електричного струму істотно скорочує міждендритний простір і підвищує дисперсність структури, знижує вміст газів та неметалічних включень, покращує умови розчинення модифікатора, що позитивно впливає на механічні властивості виливків. Однак, при використанні установки, що створює електричний струм, виникають певні складності забезпечення рівномірної обробки розплаву, існує ймовірність хімічної неоднорідності, особливо при отриманні масивних виливків складної конфігурації.

1.5 Модифікація розплаву обробкою електромагнітними полями

Обробка сплаву при кристалізації електромагнітним впливом істотно змінює сили міжатомної взаємодії, що визначають якість литого металу, яке залежить від структури і властивостей сплаву. Накладання магнітних полів сприяє переохолодженню сплаву, зростанню швидкості кристалізації та подрібненню розмірів первинних кристалів а також підвищує щільність виливків [48, 49-64]. Електромагнітний вплив створює додаткові конвективні потоки, що обумовлює обламування гілок дендритів та перенос їх у сплав, змінюючи характер кристалізації від послідовного до об'ємного. Це призводить до збільшення кількості центрів кристалізації та зміни характеру макроструктури.

Інший погляд, при накладенні магнітного поля практично повністю пригнічується конвективне перемішування металу, зменшується інтенсивність тепломасопереносу в рідкій фазі виливка, що в умовах інтенсивного різноспрямованого тепловідведення призводить до зниження міждендритної ліквідації. Структура виливка, отриманого за допомогою електромагнітного лиття, має тонку, рівномірну кристалічну будову, однорідний хімічний склад, і, як наслідок, високі механічні властивості [49].

В роботі [50] зазначається, що з кристалізації алюмінієвих сплавів з магнієм і міддю в магнітному полі з індукцією $0,5 \dots 1,0$ Тл подрібнюється макро- і мікроструктура сплавів, а також зростає межа міцності на 30%.

Вивчаючи вплив змінного магнітного поля частотою 50 Гц та індукцією 30 мТл на дифузію атомів заліза у сплаві Al-Fe, В.І. Дубодєлов виявив суттєве розширення дифузійної зони, а саме прискорення дифузії. У цьому спостерігається пряма залежність ступеня впливу магнітного поля від хімічного складу сплаву. При малих концентраціях заліза в сплаві ефект розширення дифузійної зони максимальний, але зі збільшенням його вмісту знижується, а при масовій частці 15% заліза в сплаві, прискорення дифузії припиняється [51].

Магнітогідродинамічні (МГД) пристрої створюють у металі виливки електромагнітні сили, які ефективно управляють рухом розплаву, процесами тепломасоперенесення, структурою, властивостями і формою виливків [50-55]. Електромагнітні перемішувачі та електромагнітні кристалізатори застосовують при безперервному литті виливків, МГД-заливні установки використовують при спеціальних видах лиття цинкових, свинцевих, алюмінієвих сплавів та чавуну. При безперервному литті алюмінієвих сплавів застосовують МГД-заливні установки з урахуванням електромагнітних жолобів із газовими чи електричними камерними печами. При обробці сплаву МГД методом при кристалізації в ливарній формі магнітне поле створюють за допомогою електромагніту, в зазорі якого вміщена форма, або охоплює її соленоїда [56].

Для ливарного виробництва, спеціально було створено магнітодинамічні насоси (МДН), принцип роботи яких заснований на взаємодії струму,

індукованого в кільцевому каналі з рідким металом, та зовнішнього магнітного поля [57]. Лиття з електромагнітним перемішуванням сприяє утворенню глобулярних кристалів і подрібненню структури виливків. Дане можна пояснити циркуляцією розплаву в замкнутому об'ємі виливка при кристалізації внаслідок нерівномірного розподілу електромагнітних сил усередині рідкої фази [50].

Дослідники П.П. Мочалов та З.М. Гецелєв вважають [64], що лиття з формуванням форми зливка магнітним полем дозволяє повністю виключити механічну взаємодію між виливком та кристалізатором, що забезпечує високу якість поверхні.

Дослідження впливу МГД-обробки магнієвого розплаву в постійному та змінному магнітному полі на структуру виливків та ступінь засвоєння цирконію магнієм встановлено, що розмір зерна у виливках зменшився, і засвоюваність магнієм цирконію після обробки лігатури в постійному магнітному полі зросла в 2,5 рази. Індукція магнітного поля становила в межах 0,20 до 0,59 Тл. [65]. Це можна пояснити активацією твердих включень під дією магнітного поля, які змочуються рідким розплавом і стають додатковими центрами кристалізації при кристалізації виливки.

Дослідження МГД-обробки магнієвого сплаву Mg-Al-Mn-Zn у змінному магнітному полі виявили більш дрібнозернисту мікроструктуру сплаву, який зазвичай піддають тільки термочасовій обробці або модифікації вуглецевими елементами. Розмір зерен в зразках з-під струменя та від сплаву ставав приблизно однаковим після 20...25 хв обробки в магнітному полі і в подальшому не змінювався [65].

Кристали, що мають відмінні магнітні властивості або анізотропію магнітної сприйнятливості від розплаву, що випадають при об'ємній кристалізації, займають певне положення щодо прикладеного магнітного поля обумовлюють покращення властивостей сплавів. Дослідження кристалізації алюмінієвого сплаву з вмістом міді 35% у магнітному полі з індукцією 1 Тл показали, що кристали Al_2Cu орієнтуються довгими осями вздовж вектора магнітного поля. При цьому межа міцності на розтяг в напрямку орієнтації

кристалів збільшується в 1,8 рази, до 112 МПа, а при згинанні у поперечному напрямку – в 1,5 рази, до 228 МПа [50].

Дослідження впливу електромагнітного на якість безперервно литих заготовок і прокату, встановлено, що застосування електромагнітного перемішування в кристалізаторі різко зменшує протяжність зони стовпчастих дендритів і розміри самих дендритів. Якість макроструктури по дефекту усадкової ліквіації покращується в залізовуглецевих сплавів. Зазначається, що реверсування магнітного поля знижує ефект електромагнітного перемішування.

Відомо, що при затвердінні металу газові включення, які виділяються з розплаву при зниженні його температури і які проникають у розплав на початку затвердіння з боку матеріалу ливарної форми через в'язку кірку, при нерухомому стані рідкого металу під дією підйомної сили Архімеда прагнуть спливи вздовж шорсткої поверхні кірки металу. Однак виступи кристалів, що ростуть, перешкоджають їх переміщенню.

На думку автора [67], при впливі на розплав магнітного поля рідкий метал починає обертатися біля центральної осі нерухомої форми, створюється доцентрова сила, яка змушує газові та шлакові частинки рухатися у напрямку до центру форми по траєкторії у вигляді комбінації параболи та спіралі Архімеда. Траєкторія руху газових та шлакових частинок представлена на рисунку 1.3.

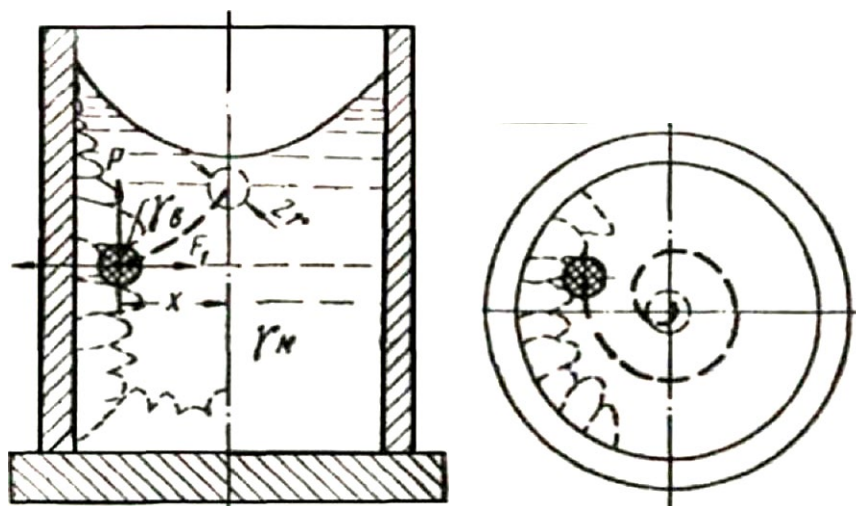


Рисунок 1.3 – Траєкторія руху сторонньої частинки в рідкому металі при його обертанні у формі з нерухомими стінками

Одночасно ці частинки зливаються одна з одною, внаслідок чого збільшується швидкість руху до центру осі обертання і вгору по вертикальному напрямку. Таким чином, рух рідкого розплаву посилює ефект його рафінування та усуває небезпеку утворення порожнин, раковин.

Дослідження проведені Я.Г. Дорфманом сталевих виливків під впливом обертаючого магнітного поля і без нього [68] з використанням спеціально виготовленого експериментального асинхронного статора із чотирма сердечниками та частотою струму 50 Гц. Обертальний рух розплаву відбувався послідовно; спочатку дія обертаючого магнітного поля викликала рух зовнішнього шару рідкого металу, потім силами його внутрішнього тертя захоплюються і наступні шари.

Відомо, що при затвердінні залізовуглецевих сплавів, мікроструктура виливка має дендритний характер з розвиненими великими кристалами і добре вираженою в периферійній зоні орієнтацією своїх осей у напрямку центру виливка. У результаті досліджень процесу кристалізації залізовуглецевих сплавів в результаті кругового руху рідкого сплаву в магнітному полі спостерігав шарувате розташування кристалів і різке їх подрібнення, при цьому щільність виливка збільшувалася, а усадочна пористість утворювалася у вигляді відкритого конуса [67]. Слід припустити, що обертальний рух сплаву при нерухомому стані стінок форми подрібнює і усуває стовпчасту структуру виливка під дією обертаючого магнітного поля.

Вивчаючи вплив електромагнітної дії на сплав при кристалізації бронз марок БрОЦ 4-3 і БрОФ 7-0,2, виявлено, що співпадання напрямку магнітного поля і лиття виливка мають найбільш сприятливу структуру в порівнянні з литтям при зустрічному напрямку магнітного поля та лиття а також литтям без електромагнітної обробки. Цей факт можна пояснити характером напрямку зростання кристалів: вектор зростання кристалів спрямований у бік, протилежний витягуванню виливка. У цьому випадку сила конвективного потоку, необхідна для обламування ростучого дендриту, буде менше, якщо вектор магнітного поля буде направлений в протилежну сторону по відношенню

до вектора зростання кристала. Застосування електромагнітного перемішування дозволяє усунути дефекти, знизити явище ліквації, підвищити і стабілізувати механічні властивості виливків з олов'яної бронзи [48]. Аналогічні висновки були зроблені і щодо впливу електромагнітного перемішування на якість виливків берилієвої бронзи БрБ2 [69]. Автори вважають, що подрібнення зерна у виливку та більш рівномірний поділ частинок берилію пов'язані з постійним перемішуванням розплаву в робочому об'ємі додатковими вимушеними конвективними потоками рідкого сплаву, які створені електромагнітними силами. Дрібнозерниста структура є сприятливою для подальшої обробки виливків тиском.

Досліджуючи вплив зовнішнього осьового магнітного поля на залізовуглецевий сплав, встановлено, що при неоднорідному розтіканні струму в металі та дії зовнішнього осьового магнітного поля значно прискорюється перемішування сплаву, що сприяє вирівнюванню його температури на поверхні та підвищення однорідності складу та структури виливка.

Дослідження впливу магнітного поля на ливарну форму з феромагнітних сипучих матеріалів ущільнених вібрацією, при кристалізації та заливанні під дією постійного магнітного поля частинки металевого піску зчіплюються між собою і запобігають деформації форми силами динамічного та гідростатичного напору сплаву. Показано, що магнітна форма значно підвищує точність виливки в порівнянні з піщаною формою в умовах серійного виробництва, за рахунок зменшення припуску на механічну обробку знижується вага виливка.

Дослідження виливків виготовлених в магнітних формах, міцність яких забезпечується намагніченістю струмопровідних частинок, показали можливість отримання в магнітній формі виливків із тонкими стінками із силуміну. Показано підвищення швидкість охолодження виливків у магнітній формі, що сприяє зменшенню дифузії в рідкій фазі та послаблює дендритну ліквацію. Спостерігається дрібнозерниста мікроструктура, підвищена щільність, міцність та твердість. Автори відзначають [60, 61], можливість управління міцністю виливка у процесі його формування, твердістю та іншими властивостями

шляхом зміни індукції магнітного поля. Але оцінити ступінь управління можна лише побічно через складність теплових процесів у формі.

Згідно [5], при додаванні елемента-модифікатора до або під час електромагнітної обробки можна інтенсифікувати процес модифікування шляхом подрібнення фазових компонентів модифікаторів до нанометрових розмірів для отримання колоїдних металевих розчинів, найбільш чутливих до дій різних магнітних і електромагнітних полів.

Таким чином, аналіз вищенаведених практичних даних застосування електромагнітних методів обробки сплаву є актуальним напрямом дослідження. Вважається, що під дією електромагнітних полів відбувається прискорення процесу дифузії, розвивається спрямована циркуляція сплаву, яка забезпечує інтенсивне конвективне тепломасоперенесення. Це призводить до руйнування ростучих кристалів біля фронту затвердіння. Уламки кристалів перемішуються разом з рідким металом, збільшуючи число центрів кристалізації. При цьому зменшується величина температурного градієнта та знижується нерівномірність хімічного складу по перерізу виливки. Створюються умови для переходу від спрямованого затвердіння до об'ємного, зменшується зона стовбурних кристалів, що забезпечує значне подрібнення структури виливка.

Слід зазначити, що обробка сплаву магнітним полем є ефективним способом фізичного впливу на сплав з метою формування необхідної структури виливків, особливо в умовах безперервного та напівбезперервного лиття. Однак застосування способів обробки сплавів магнітним полем стримується, що пов'язано, в першу чергу, зі складністю створення спеціальних пристроїв для обробки розплавів безпосередньо в ливарній формі з урахуванням конфігурації виливки, а також недостатньою вивченістю процесів, що відбуваються при кристалізації розплавів. Перспективним напрямком є розробка та дослідження ефективних технологій обробки сплавів магнітним полем при заливанні у ливарну форму, дає можливість отримувати виливки будь-якої маси та розмірів, не обмежуючи матеріал форми.

Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.

Аналіз проблеми покращення структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів модифікуванням їх добавками та обробкою зовнішнім впливом дав можливість зробити наступні висновки:

1. Способи модифікування структури алюмінієвих сплавів елементами-модифікаторами наряду з покращенням механічних і технологічних властивостей, як правило змінюють хімічний складу виливків, що ускладнює подальше їх використання.

2. Аналіз структуроутворення сплавів алюмінію із кремнієм, які належать до силумінів, показав суттєвий вплив вмісту кремнію на механічні властивості подвійних силумінів. Алюміній із кремнієм утворюють евтектичну діаграму стану без утворення хімічних сполук між ними, при зниженні температури розчинність кремнію в алюмінію різко зменшується, тобто на характер структури сильно впливають умови охолодження. Модифікування сплавів введенням різних хімічних реагентів у вигляді натрію або фториду лужних металів сприяє подрібненню структури сплавів.

3. Теоретичні та експериментальні дослідження впливу зовнішньої дії вібрації, електричного чи магнітного поля на розплави в період плавки і в процесі кристалізації дозволяють отримати дрібнозернисту структуру сплавів і підвищити їх технологічні і механічні властивості.

4. Одним із перспективних напрямків є вдосконалення технології обробки розплаву магнітним полем при заливанні в ливарну форму з метою формування необхідної структури виливків і отримання заданих механічних властивостей.

Метою роботи є дослідження впливу магнітного поля при заливанні в ливарну форму на зміну структури та механічні і технологічні властивості ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні завдання:

1. Проаналізувати способи покращення структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів модифікуванням їх добавками та обробкою зовнішнім впливом (магнітним полем).
2. Запропонувати лабораторну установку для обробки ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9 магнітним полем під час заливання у ливарну форму.
3. Розробити методику дослідження впливу та оптимізувати значення магнітного поля при обробці ливарного алюмінієвого сплаву.
4. Вибрати основні методики дослідження структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів, модифікованих впливом змінного магнітного поля.
5. Провести експериментальні дослідження впливу змінного магнітного поля при заливанні в ливарну форму на властивості сплаву АЛ9.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

2.1 Характеристика та плавка ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9

Матеріалом для дослідження був ливарний алюмінієвий сплав АЛ9 (ГОСТ 1583-93), виготовлений з різних шихтових матеріалів – чушкових матеріалів та вторинної сировини (лому, відходів). Хімічний склад сплаву АЛ9, що використовували в магістерській роботі наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сплавів ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9 виливків за ДСТУ 2839-94 [116]

Марка сплаву	Хімічний склад, %					
	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Al
АЛ9	6...8	до 0,5	до 0,2	0,2...0,4	до 0,3	89,6...93,8

Основними структурними компонентами сплаву АЛ9 є первинні кристали твердого розчину α_{Al} і подвійна евтектика ($\alpha_{Al} + Si$). Фаза Mg_2Si , відповідає за показники міцності, кристалізується в надзвичайно дрібнозернистій тонкопластинчастій формі, яку на мікроструктурі складно знайти. Сплав АЛ9 має високі механічні та ливарні властивості, корозійну стійкість, не схильний до тріщиноутворень в процесі кристалізації та подальшого охолодження.

Сплав отримували шляхом розплавлення чушок із застосуванням лому, відходів та повернення. З метою забезпечення відповідності хімічного складу одержуваних сплавів вимогам ДСТУ 2839-94, розраховували шихту а добавки попередньо подрібнювалися та зважувались.

Експериментальні плавки проводили в печі ICT-0,06. Контроль температури здійснюють хромель-алюмелевими термопарами.

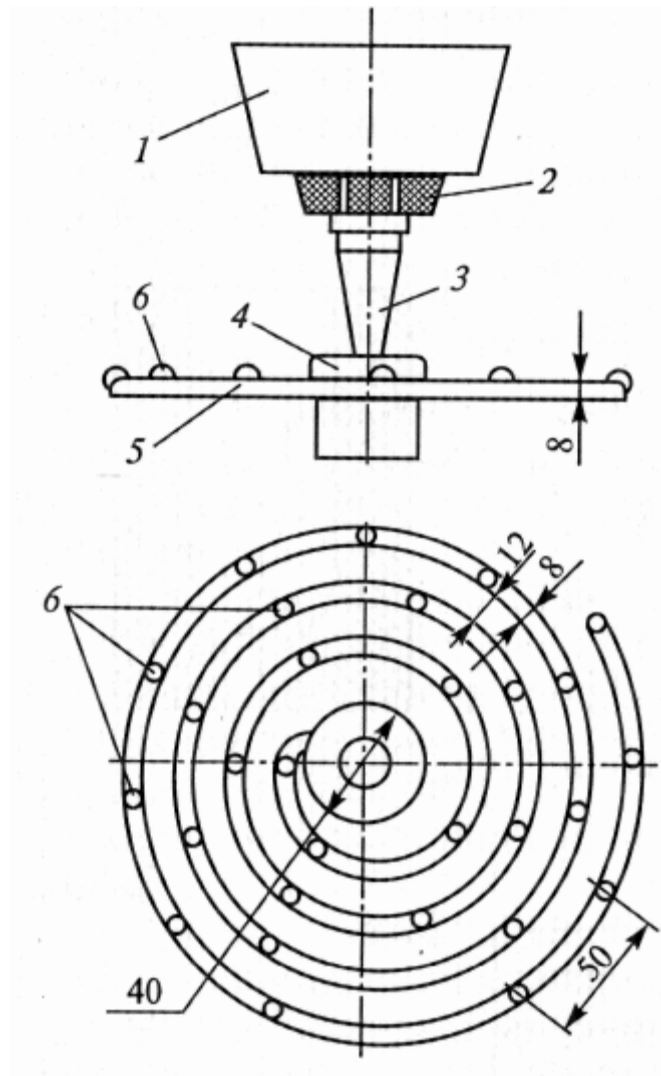
Заливку проб і зразків проводили при температурі 720...750 °С в піщано-глинясті форми ($T_{\phi} - 20$ °С) і в металевий кокіль.

2.2 Дослідження технологічних властивостей алюмінієвих сплавів.

Для практики ливарного виробництва особливо велике значення має плинність розплавів, виміряна в середовищі, що відповідає умовам при заливання (заповнення) форми, так звана рідина.

Рідина характеризує здатність сплаву заповнювати форму і точно відтворювати конфігурацію порожнини під виливок. Якщо вона низька, то для великих тонкостінних виливків перебіг металу може припинитися раніше, ніж буде заповнена форма. У виливку виникає дефект "недолив". Якщо при низькій рідині у формі утворюються зустрічні потоки, то вони можуть не злитися і тоді утворюється дефект.

Рідкотекучість визначали по спіральному зонду (канал проби виконаний у вигляді спіралі, розташованої в горизонтальній площині, в перерізі якої трапеція з основами 5 і 8 мм і висотою 11 мм) (рис. 2.1). Оцінювали довжину каналу проб, залитого сплавом.



1 – чаша-нарощувалка; 2 – сітка; 3 – стояк; 4 – зумпф; 5 – спіраль; 6 – виступи

Рисунок 2.1 – Схема спіральної проби для визначення рідкотекучості

Розплав заливали у форму через чашу-нарощалку 1 через сітку 2, стояк 3 і зумпф 4, який потім потрапляє в спіральний канал 5, що має форму трапеції. Невеликі виступи 6, завдані через 50 мм, полегшують вимірювання довжини спіралі. Спіральний канал дозволяє отримати довгі прутки порівняно невеликих за габаритами формах. Відхилення довжини проби середнього значення становить близько 8 %. Температура заливки для сплаву АЛ9 складала 720...730 °С.

Пористість сплавів оцінювали за п'ятибальною шкалою ВІАМ згідно з ДСТУ 2839-94 [116], наведеною в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Шкала пористості ВІАМ згідно ДСТУ 2839-94

Номер еталону	Кількість пор на 1 см ² , шт.	Діаметр пор, мм	Кількість пор на 1 см ² , шт.
1	до 5	до 0,1	до 5
2	до 10	до 0,1 до 0,2	до 8 до 2
3	до 15	до 0,3 до 0,5	до 12 до 3
4	до 20	до 0,5 до 0,1	до 0,14 до 6
5	до 25	до 0,5 до 1,0 до 0,1	до 15 до 8 до 2

Кількість і розмір пор визначили як середнє арифметичне трьох вимірювань. Контроль пористості та їх діаметр проводили візуально, неозброєним оком користуючись оптичним приладом із збільшенням до 10 разів.

2.3 Пристрій для обробки ливарного алюмінієвого сплаву магнітним полем

В роботі досліджували вплив змінного магнітного поля на структуру та властивості ливарних алюмінієвих сплавів.

Магнітне поле створювали за допомогою спеціального пристрою зображеного на рисунки 2.2 і 2.3.

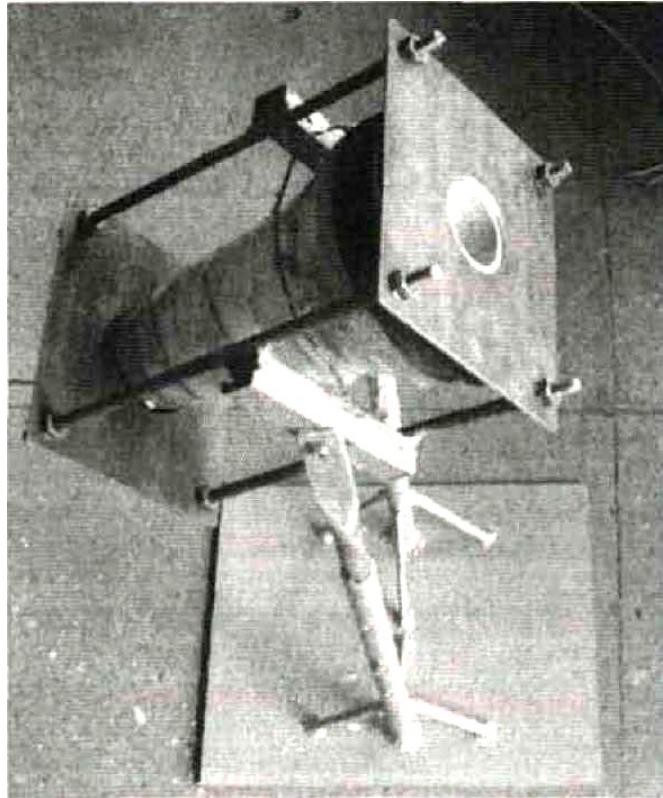
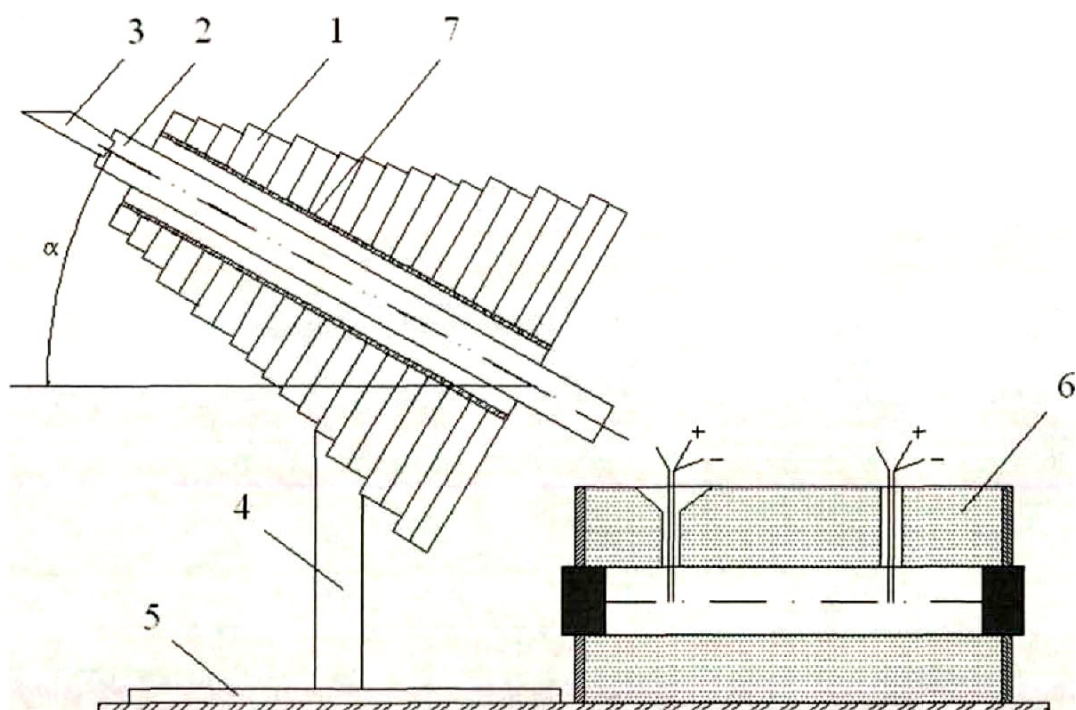


Рисунок 2.2 – Зовнішній вид пристрою для обробки алюмінієвого розплаву магнітним полем



1 - конусна індуктивна котушка; 2 - керамічний жолоб; 3 – воронка; 4 - стійки; 5 - станина; 6 - ливарна форма; 7 – трубчатий каркас з кварцового скла

Рисунок 2.3 - Схема пристрою для обробки алюмінієвого розплаву магнітним полем

Пристрій складається з конусоподібної індуктивної котушки 1, в середині якої встановлено керамічний жолоб 2 з воронкою 3. Індуктивна котушка 1 закріплена на стійках 4 з можливістю зміни їх висоти та куту нахилу, встановлених на станині 5. Конусоподібна індуктивна котушка намотана на трубчастий каркас 7 діаметром 50 мм із кварцового скла, в який вставляється керамічний жолоб 2. Намотка виконана пошарово мідним дротом ($d_d = 3$ мм), з числом шарів – 20. Найбільший зовнішній діаметр котушки становить $d_1 = 180$ мм, а найменший — $d_2 = 70$ мм, висота котушки $H = 280$ мм. У процесі модифікації розплаву величина індукції магнітного поля B по осі котушки може змінюватися в інтервалі від 0,1 до 0,9 Тл. Схема живлення котушки здійснюється за схемою, наведеною на рисунку 2.4.

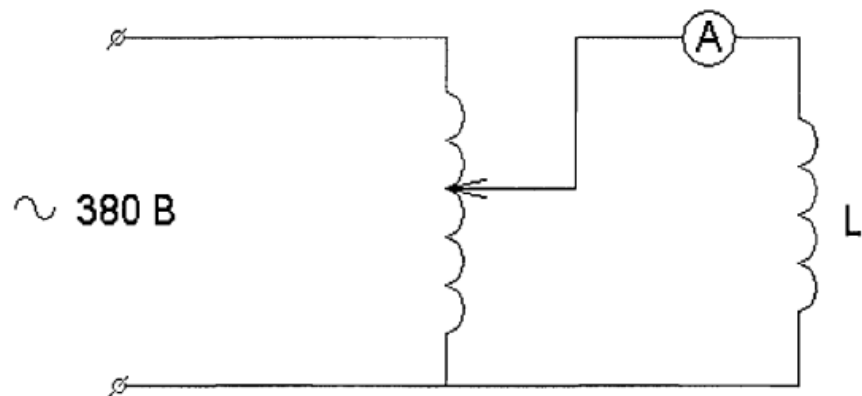


Рисунок 2.4 - Принципова електрична схема живлення індуктивної котушки

Магнітну індукцію визначили, виходячи з формул визначення магнітного потоку:

$$\Phi = L \cdot I, \Phi = B \cdot S \cdot N,$$

$$B = \frac{L \cdot I}{S \cdot N}$$

де L - індуктивність котушки, $L = 21,987$ Гн; I - сила струму, змінювали в інтервалі 0...10 А; S - площа перерізу дроту, $S = 7 \cdot 10^{-6}$ м²; N – число витків пристрою.

Під час обробки розплаву зовнішнім магнітним полем в нього наводяться електричні струми J і виникають електромагнітні сили f_e , що діють на розплав.

Схема напрямків індукційних токів, електромагнітних сил і магнітної індукції на рисунку 2.5.

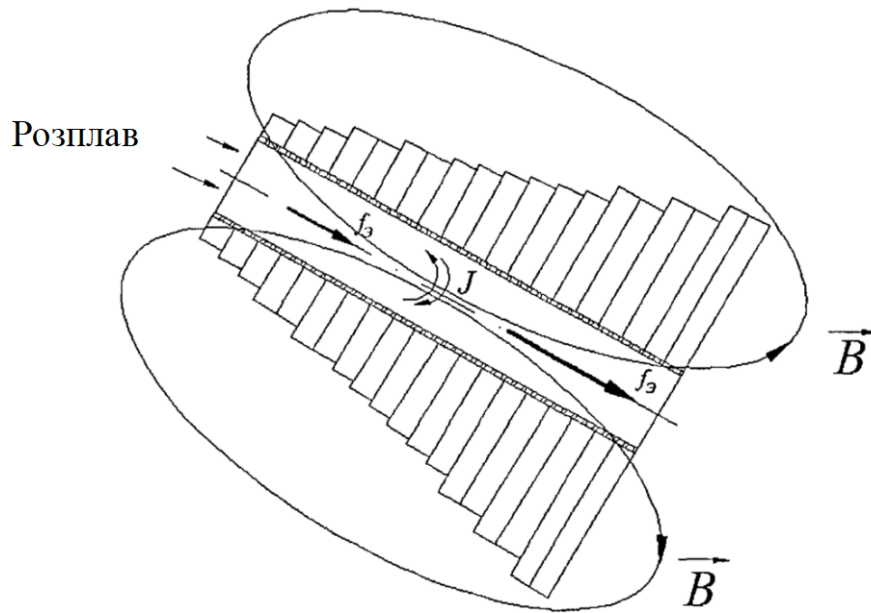


Рисунок 2.5 - Схема напрямків індукційних токів (J), електромагнітних сил (f_z) і магнітної індукції (B) індуктивної котушки для обробки розплавів магнітним полем

Конусоподібна форма індуктивної котушки сприяє підвищенню інтенсивності модифікуючого впливу магнітного поля на розплав за мірою його протікання по жолобу, що відбувається за рахунок посилення впливу електромагнітних сил f_z на розплав. Інтенсивність впливу магнітного поля, крім регулювання кута нахилу індуктивної котушки, можна змінити довжину трубчастого каркаса. Кут нахилу індуктивної котушки можна змінити (рис. 2.6).

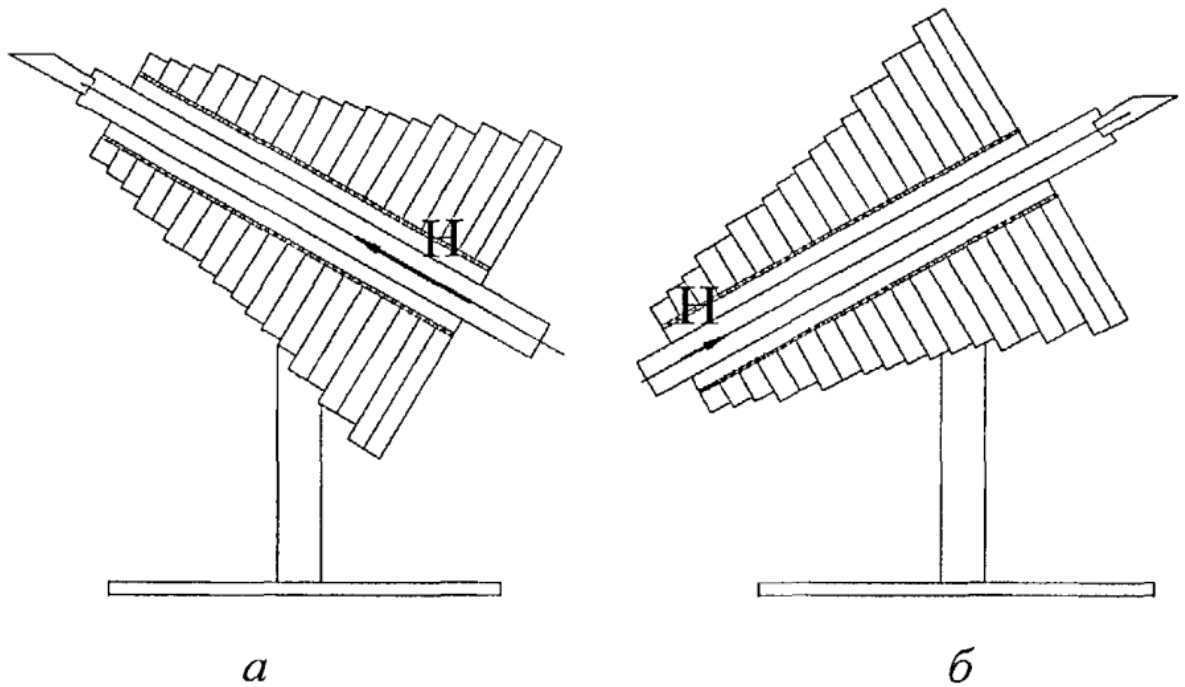


Рисунок 2.6 – Схема наряду куту нахилу індуктивної котушки

Обробка розплаву магнітним полем індуктивної котушки за схемою (рис. 2.6а) сприяє впливу електромагнітних сил, що зменшують швидкість руху газових і неметалевих включень у потоці розплаву, оскільки вони є діамагнетиками та піддаються «гальмуванню» магнітним полем і накопичуються в ливарній чаші форми. Таким чином, газовміщення в сплаві і його пористість зменшуються, що призводить до підвищеного рівня механічних властивостей.

Направлення нахилу індуктивної котушки за схемою (рис. 2.6б), навпаки, призводить до гальмування потоку розплаву, що дає можливість управляти швидкістю заливання та охолодження розплаву в струменю.

По мірі протікання розплаву по керамічному жолобу 2 всередині конусної індуктивної котушки 1 відбувається модифікація розплаву магнітним полем, після чого розплав потрапляє в ливарну форму 6. Кут нахилу α індуктивної котушки дозволяє регулювати швидкість протікання розплаву та час його модифікування магнітним полем.

2.4 Методика проведення металографічних досліджень алюмінієвих сплавів

Дослідження мікроструктури проводилося на мікроскопі МІМ-8 у відбитому світлі при збільшеннях 100 та 200 разів (рис. 2.7). Оцінку отриманої структури для алюмінієвого сплаву проводили за ГОСТ 3443-87.



Рисунок 2.7 – Загальний вид металографічного мікроскопу МІМ-8

Для виявлення мікроструктури зразки механічно обробляли до чистоти $Ra \leq 1,6$ мкм і протравлювали в 4% спиртовим розчином HNO_3 (ГОСТ 4461-77). Підготовка шліфів для металографічних досліджень проводили на шліфувально-полірувальному верстаті із застосуванням абразивного матеріалу - алмазної пасти. Для дослідження зразки мікроструктури розрізали на шаблонах на відстані 15 мм від торця. Визначення розмірів структурних складових визначали методом випадкових січень. Статистичну обробку отриманих експериментальних даних виробляли за допомогою стандартного пакета Microsoft Office Excel.

2.5 Дослідження механічних властивостей

В магістерській роботі проводили дослідження механічних властивостей, а саме тимчасовий опір на розрив та відносне видовження.

Тимчасовий опір на розрив σ_B (МПа) і відносне довжина $\delta(\%)$ визначали за стандартною методикою згідно ДСТУ 2839-94 на стандартних зразках діаметрами 10 і 12 мм на універсальній розривній машині моделі Р-5.

В ході проведення досліджень виникла необхідність визначення механічних характеристик отриманих зразків з алюмінієвого сплаву. Границю міцності сплаву на розтягання σ_B визначали за ГОСТ 1497-84, регламентуючому методи випробувань на розтяг металів і виробів з них.

Висновки до другому розділу

1. Розроблено пристрій для обробки алюмінієвого розплаву магнітним полем.
2. Розроблено методику оптимізації значення магнітної індукції та кут нахилу індукційної котушки лабораторної установки.
3. Запропонована методика дослідження технологічних та механічних властивостей ливарного алюмінієвого сплаву.
4. Запропоновано методика проведення металографічних досліджень мікроструктури алюмінієвих сплавів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

3.1 Оптимізація параметрів обробки ливарного алюмінієвого сплаву магнітним полем

Експериментально встановлено, що для даної довжини індуктивної котушки при обробці розплаву АЛ9 отриманого з шихтових матеріалів, що містили 50...100% вторинної сировини, максимальні механічні властивості сплаву оптимальні при значення магнітної індукції $B=0,4...0,5$ Тл і куту нахилу індукційної котушки $\alpha=40...50^\circ$.

Результати дослідження механічних властивостей сплаву АЛ9 в литому стані, обробленого магнітним полем представлені в таблиці 3.1 [116].

Таблиця 3.1 - Вплив параметрів обробки магнітного поля на механічні властивості сплаву АЛ9

Кут нахилу індукційної котушки, град.	Індукція магнітного поля В, Тл	Межа міцності на розтяг σ_b , МПа
Сплав АЛ9 не оброблений магнітним полем		172
35	0,25	192
	0,40	198
	0,50	203
	0,60	195
45	0,25	210
	0,40	218
	0,50	221
	0,60	216
55	0,25	181
	0,40	188
	0,50	192
	0,60	186

Таким чином, з аналізу отриманих даних виявлено, що оптимальними параметри обробки розплавів магнітним полем є: індукцію магнітного поля в межах – 0,4...0,5 Тл і кут нахилу індуктивної котушки пристрою - 40...50°.

Аналізуючи раціональні параметри варіантів кутів нахилу індуктивної котушки пристрою та індукції магнітного поля за показниками межі міцності на розтяг ($\sigma_B = 221$, МПа) визначили, що найкращі параметри будуть $\alpha_{\text{опт.}} = 45^\circ$ і $B_{\text{опт.}} = 0,5$ Тл. Тому подальші дослідження проводили саме для цих оптимальних параметрів.

3.2 Вплив магнітного поля на структуру ливарного алюмінієвого сплаву АЛ9

Дослідження ефективності обробки магнітним полем на структурні компоненти сплаву АЛ9 проводили за металографічними дослідженнями. Сплав АЛ9 отримували з чушкових матеріалів і з вторинної сировини, а також з 50 % чушкових матеріалів і 50 % лому і відходів. Досліджували вихідний розплав (без обробки) та розплав оброблений магнітним полем в процесі заливання. Параметри магнітного поля склали: індукція 0,5 Тл та кут нахилу індукційної котушки 45°. Результати показали (рисунки 3.1-3.3), що обробка магнітним полем позитивно впливає на подрібнення складових мікроструктур сплаву АЛ9.

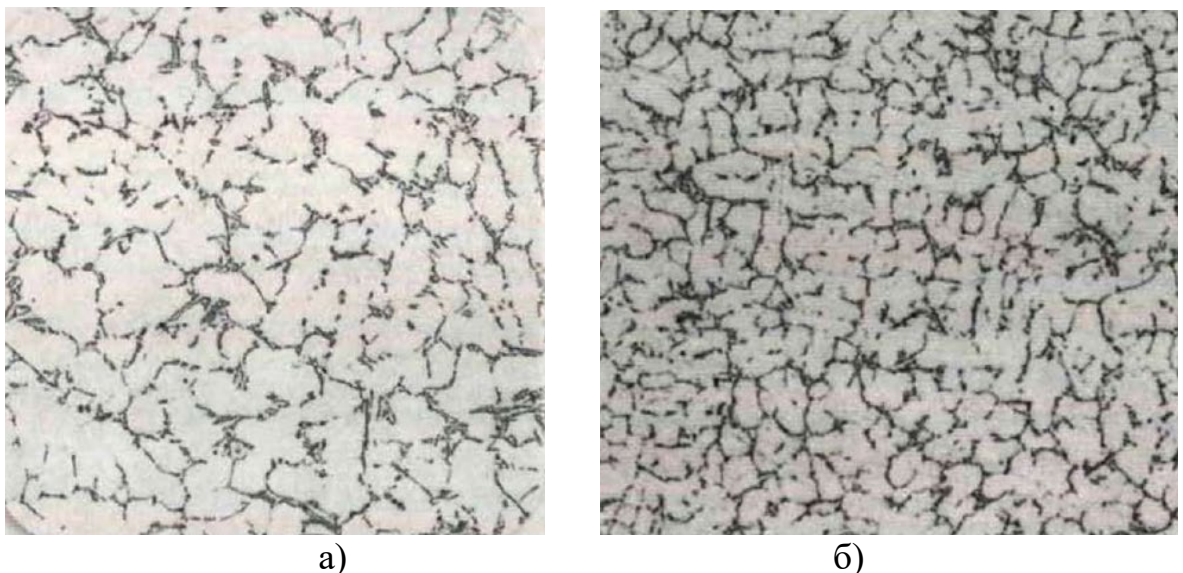
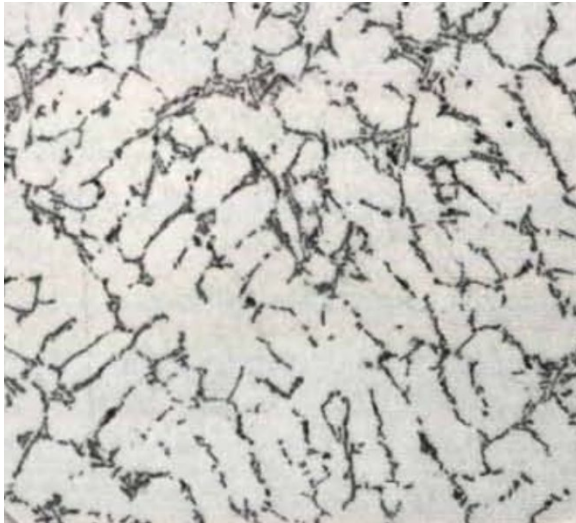


Рисунок 3.1 - Мікроструктура сплаву АЛ9, отриманого з чушкових матеріалів (х 100): а - сплав не оброблений магнітним полем; б - сплав, оброблений магнітним полем ($\alpha_{\text{опт.}} = 45^\circ$ і $B_{\text{опт.}} = 0,5$ Тл)

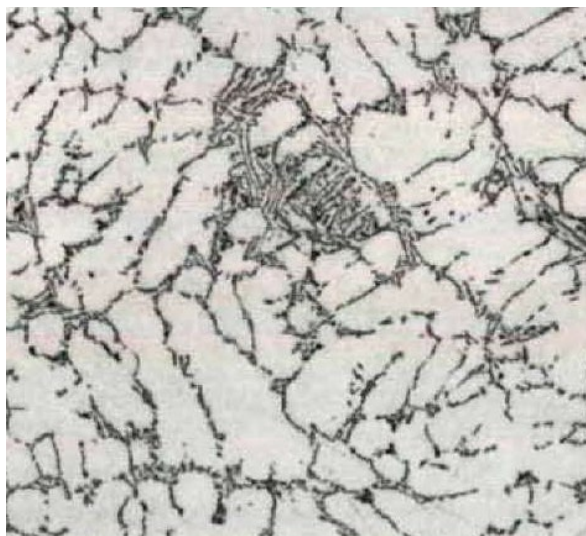


а)

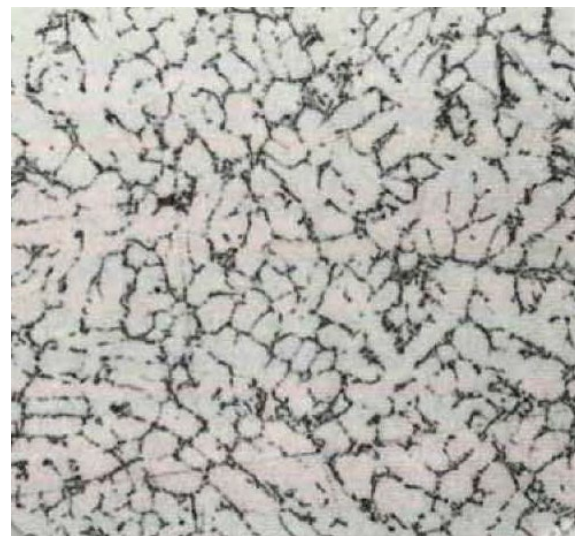


б)

Рисунок 3.2 - Мікроструктура сплаву АЛ9, отриманого із шихти: 50 % чушкових матеріалів + 50 % вторинної сировини (х 100): а – сплав не оброблений магнітним полем; б - сплав, оброблений магнітним полем ($\alpha_{\text{опт.}}=45^\circ$ і $B_{\text{опт.}}=0,5$ Тл)



а)



б)

Рисунок 3.3 - Мікроструктура сплаву АЛ9, отриманого з вторинної сировини (х 100): а - сплав не оброблений магнітним полем; б - сплав, оброблений магнітним полем ($\alpha_{\text{опт.}}=45^\circ$ і $B_{\text{опт.}}=0,5$ Тл)

Розміри зерна кожного сплаву в вихідному стані і оброблених магнітним полем представлені в таблиці 3.2. Заливка зразків проводилася в кокіль і піщано-глинисті (ПГФ) форми.

Таблиця 3.2 - Вплив способу обробки розплаву на мікроструктуру алюмінієвих сплавів АЛ9 ($\alpha_{\text{опт.}}=45^\circ$ і $B_{\text{опт.}}=0,5$ Тл).

Марка сплаву	Технологія обробки розплаву	Середній розмір зерен, мкм		Коефіцієнт подрібнення зерна	
		кокіль	ПГФ	кокіль	ПГФ
АЛ9 (100% чушкового матеріалу)	не оброблений	154	510	1	1
	оброблений магнітним полем	75	352	2,13	1,44

В результаті експериментальних досліджень виявлено, що обробка розплаву магнітним полем призводить до подрібнення зерен сплавів. Особливо ефективним подрібненням зерен є у сплавах, залитих в кокіль, що можна пояснити таким додатковим фактором, як підвищення швидкості охолодження.

3.3 Вплив магнітного поля на механічні і технологічні властивості алюмінієвого сплаву АЛ9

Результати експериментальних досліджень показали, що оброблені магнітним полем сплави мають більш високий рівень механічних і технологічних властивостей (табл. 3.3). Наведені показники механічних і технологічних властивостей сплаву АЛ9 в залежності від складу шихти: вихідного не обробленого магнітним полем та обробленого магнітним полем. Параметри магнітного поля склали: індукція магнітного поля $B=0,5$ Тл і кут нахилу індукційної котушки $\alpha=45^\circ$.

Таблиця 3.3 – Механічні та технологічні властивості алюмінієвого сплаву АЛ9 в залежності від технології обробки та складу шихти

№ п/п	Склад шихти	Технологія обробки розплаву	Середнє значення механічних та технологічних властивостей			
			σ_b , МПа	δ , %	Пористість	Рідкотекучість, см
1	100 % чушкових матеріалів	Вихідна	192	3,2	3-4	67,5
		Магнітним поле	217	5,0	2-3	77,1
2	50 % чушкових матеріалів + 50 % вторинної сировини	Вихідна	193	2,9	3-4	62,0
		Магнітним поле	231	4,6	2-3	73,2
3	100% вторинної сировини	Вихідна	183	2,3	4-5	59,0
		Магнітним поле	216	4,5	3	71,2

З аналізу отриманих даних виявлено, що обробка магнітним полем сплаву АЛ9 збільшує показники тимчасового опору на розтяг в 1,12...1,19 рази і відносне подовження в 1,42...1,97 рази.

При порівнянні обробленого магнітного поля сплаву АЛ9 з вихідним сплавом не обробленим при різних складах шихти виявлено підвищення рідкотекучості в межах 9,6... 12,2 см.

Оброблений магнітним полем сплав АЛ9 має балову пористість 2-3, тоді як у вихідному стані сплав має пористість – 3-4 в середньому.

Отримані результати можна пояснити таким чином, що при обробці розплаву магнітним полем, вплив електромагнітних сил сприяє зменшенню швидкості руху газових і неметалевих включень у потоці розплаву, що

проходить через індукційну котушку, так як вони, будучи по фізичній суті діаманетиками, піддаються гальмуванню магнітним полем і після заливання в ливарну форму накопичуються в ливарній чаші. В результаті газовміщення в сплав і його пористість зменшується, що призводить до підвищеного рівня механічних властивостей, про що свідчать результати експериментальних досліджень, представлені в таблиці 3.3.

Крім того, можна припустити, що в процесі кристалізації розплаву після його обробки зовнішнім магнітним полем при заливанні, відбувається утворення віртуальних зв'язків між його компонентами. Зазначимо, що під віртуальними зв'язками слід розуміти такі, що існують приблизно 10^{-11} с. Таким чином, збільшується повний час руху атома при перескакуванні з одного положення в сусіднє, а, отже, знижується швидкість і коефіцієнт дифузії атомів компонентів розплаву, що призводить до подрібнення мікроструктури.

Висновки до третього розділу

1. Експериментально встановлено, що для даної конструкції пристрою для обробки розплаву АЛ9, максимальні механічні властивості сплаву оптимальні при значення магнітної індукції $B=0,5$ Тл і куту нахилу індукційної котушки пристрою $\alpha=40...50^\circ$

2. Результати експериментальних досліджень показали, що обробка магнітним полем сплаву АЛ9 сприяє більш високому рівню механічних і технологічних властивостей.

3. Обробка магнітним полем сплаву АЛ9 збільшує показники тимчасового опору на розтяг в $1,12...1,19$ рази і відносне подовження в $1,42...1,97$ рази. При порівнянні обробленого магнітного поля сплаву АЛ9 з вихідним сплавом не обробленим при різних складах шихти виявлено підвищення рідкотекучості в межах $9,6... 12,2$ см, а бал пористість 2-3, тоді як у вихідному стані сплав має пористість – 3-4 в середньому.

4. Показано, що підвищення механічних властивостей є наслідком подрібнення складових мікроструктури. Сплави, оброблені зовнішнім магнітним полем, мають підвищені значення рідкотекучості та нижчий бал пористості, що дозволяє отримувати більш якісні виливки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел, свідчить можливість використання різних технологій обробки металевих розплавів, що призводять до отримання дрібнозернистої структури та підвищених властивостей сплавів. Показано, що застосування модифікуючих присадок, поряд з підвищенням рівня властивостей ливарних сплавів може привести до зміни хімічного складу і зниження якості виливків.

Розглянуто експериментальні та теоретичні дослідження щодо впливу зовнішніх впливів на розплави в процесі плавки, заливання та кристалізації. Дані впливу дозволяють подрібнити структурні складові сплавів та підвищити їх технологічні та механічні властивості. Показано, що одним із найбільш перспективних способів зовнішнього впливу на розплав є обробка магнітним полем при плавці та кристалізації.

Запропоновано пристрій для обробки розплаву магнітним полем у процесі заливання розплаву в ливарну форму. Експериментально встановлено, що для даної конструкції пристрою для обробки розплаву АЛ9, максимальні механічні властивості сплаву оптимальні при значення магнітної індукції $B=0,5$ Тл і куту нахилу індукційної котушки пристрою $\alpha=40...50^\circ$. Пристрій може бути використаний як основа для створення промислової установки для обробки магнітними полями розплаву при заливанні ливарні форми.

Виявлено, що обробка магнітним полем сплаву АЛ9 збільшує показники тимчасового опору на розтяг в 1,12...1,19 рази і відносне подовження в 1,42...1,97 рази. При порівнянні обробленого магнітного поля сплаву АЛ9 з вихідним сплавом не обробленим при різних складах шихти виявлено підвищення рідкотекучості в межах 9,6...12,2 см. Оброблений магнітним полем сплав АЛ9 має балову пористість 2-3, тоді як у вихідному стані сплав має пористість – 3-4 в середньому.

Показано, що підвищення механічних властивостей є наслідком подрібнення складових мікроструктури. Сплави, оброблені зовнішнім магнітним полем, мають підвищені значення рідкотекучості та нижчий бал пористості, що дозволяє отримувати якісніші виливки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белоусов, Н. Н. Современные направления работ по модифицированию алюминиевых сплавов / Модифицирование силуминов: сб. статей. – Киев, 1970. – С. 20–52.
2. Могилев В. К., Лев О. И. Справочник литейщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 271 с.
3. Москалев І. Н. Ливарні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. – К.: НМКВО, 1993. – 368с.
4. Борисов Г. П., Недужий А. М., Пригунова А. Г. Формування недендритної структури первинної фази в сплаві АК7Ч при заливці розплаву в ливарну форму з різними ливниково-живильними системами / Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (21-23 травня 2019 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – 380 с.
5. Доценко Ю.В., Селиверстов В.Ю., Иванютина Н.Е. Перспектива применения предварительной обработки шихтовых материалов с повышенным содержанием железа для получения качественных отливок из сплава АК7Ч / Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 19 - 20 квітня 2012 р.) / Під ред. В.Г. Могилатенко, Р.В. Лютого, І.М. Гурія. – К: НТУУ "КПІ", 2012. – 135 с.
6. Сабірзянов Т.Г.Теплотехніка ливарних процесів / Т.Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 402 с.
7. Найдек В.Л. Комбинированная обработка алюминиевых сплавов продувкой инертным газом и жидким флюсом / В.Л. Найдек, Д. М. Бельский, Н. С. Пионтовская, А. В. Наривский // Металл и литье Украины. – 2010. – № 11. – С. 24–27.
8. Griffith W.M, Sanders R.E.J., Halderman G.J. High-Strength PM Aluminum Alloys, 1982, p. 209.
9. Nath J. Aluminum Castings Engineering Guide : USA: ASM International,

2018. – 316 p

10. Лакеев А.С., Щегловитов Л.А., Кузьмин Ю.Д. Прогрессивные способы изготовления точных отливок : Киев: Техніка, 1984. – 160 с

11. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. [Текст]: - К.: Держстандарт України, 1995.– 49 с.

12. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.

13. Верте Л. А. МГД-технологии в производстве черных металлов. – М.: Металлургия, 1990. – 120 с.

14. Повх И., Баринберг А., Баринберг В. Профессии магнитной гидродинамики // Наука и жизнь. – 1977. – № 6. – С. 40-46.

15. Дубоделов В. И. Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области металлургической магнитной гидродинамики // Процессы литья. – 1998. – № 3. – С. 36-43.

16. Цин М. Р. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.

17. Barglik J., Smagor A. Some aspects of electromagnetic stirring during process of continual steel casting // Proc. Of the 6th Intern. conf. on Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19—23, 2009, Dresden, Germany). – Dresden, 2009. – P. 684—687.

18. MULTIMAG – A MULTIpurpose MAGnetic field system for EMP / A. Cramer, J. Pal, Th. Gundrum, G. Gerdeth // Ibid. – Dresden, 2009. – P. 826-829.

19. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1992. – 336 с.

20. Thomas B., Chaudhary R. State of Art in Electromagnetic Flow Control in Continuous Casting of Steel Slabs // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19-23, 2009, Dresden, Germany). – Dresden, 2009. – P. 9-14.

21. Тир Л. Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. – М.: Металлургия, 1975. – 224 с.

22. Kim M., Kim J., Park J. Designing of Continuous Casting Machine for Near Net Shape Aluminium // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19-23, 2009, Dresden, Germany). – Dresden, 2009. – P. 323—325.

23. Мочалов П. П., Гецелев З. Н. Непрерывное литье с формированием слитка электромагнитным полем // Цв. металлы. – 1970. – № 8. – С. 62—63.

24. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. A. Magnetic Levitation of Large Liquid Volume // Proc. of the 6th Intern. Scientific Colloquium «Modelling for Material Processing» (Riga, Sept. 16-17, 2010). – Riga, 2010. – P. 15—20.

25. Okumura T., Yamamoto K., Shibata M. Large Scale Cold Crucible Levitation Melting Furnace with Bottom Taping Nozzle // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic proc. of materials EMP 2009 (Oct. 19-23, 2009, Dresden, Germany). – Dresden, 2009. – P. 521—524.

26. Electromagnetic separation of inclusions from molten copper by alternating electromagnetic field / M. Higuchi, H. Ambai, S. Shimasaki et al. // Proc. of the 6th Intern. conf. On Electromagnetic proc. of materials EMP 2009 (Oct. 19-23, 2009, Dresden, Germany). – Dresden, 2010. – P. 86—89.

27. Taniguchi S., Yoshikawa N., Takahashi K. Application of EMP to the separation of inclusion particles from liquid metal // Proc. of the Joint 15th Riga and 6th PAMIR Intern. conf. «Fundamental and Applied MHD» (Riga, June 27-July 1, 2005). – Riga, 2005. – P. 55—63.

28. Бояревич В. В. Электровихревые течения / В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.

29. Ладохин С. В., Чернявский В. Б., Гладков А. С. Экспериментальное исследование распределения электромагнитных полей в кристаллизаторе для получения слитков в электронно-лучевых установках // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 17—22.

30. Панасюк Л. С., Ульянов В. Л., Явич В. Е. Электромагнитное перемешивание жидкого металла при электронно-лучевой плавке // Литье тугоплавких металлов. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1970. – Вып 1. – С. 76-87.

31. Чернявский В. Б., Ладохин С. В., Гладков А. С. Плавильные тигли и кристаллизаторы с системами электромагнитного перемешивания для электронно-лучевой плавки металлов и сплавов // Процессы литья. – 2005. – № 1. – С. 48—55.
32. Effect of electromagnetic stirring on melt pool free surface dynamics during vacuum arc remelting / P. Chappelle, A. Jardy, J. Bellot, M. Minvielle. // J. of Materials Science. – 2008. – V. 43. – P. 5734—5746.
33. Effects of VAR Processing Parameters on Solidification Behavior of Ti-10V-2Fe-3Al Alloy Ingot / Yang Zhijun, Kou Hongchao, Chang Hui et al. // Special Casting & Nonferrous Alloys. – 2010. – № 4. – P. 295—297.
34. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
35. Протоковілов І. В. Магнітокерувана електрошлакова плавка багатокomпонентних титанових сплавів: Дис...канд. техн. наук / НАН України; Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона. – Київ, 2006. – 178 с.
36. Трочун И. П., Черныш В. П. Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // Свароч. пр-во. – 1965. – № 11. – С. 3—5.
37. Диаграмма состояния систем на основе алюминия и магния: Справочное издание / М.Е. Дриц, Н.Р. Бочвар [и др.]. - М.: Наука, 1977. – 228 с.
38. Белов, Н.А Влияние лития на структуру и механические свойства силуминов / Н.А. Белов, В.С. Золоторевский, Ю.В. Евсеев, В.А. Иванов // Технология легких сплавов. – 1989. - № 7. - С. 8-11.
39. Белов, Н.А. Диаграмма состояния Al-Si-Fe-Be и возможности нейтрализации Fe-фаз в силуминах / Н.А. Белов, Т.А. Курдюмова. // Известия АН СССР. Металлы. – 1989. - № 2. - С. 210-215.
40. Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. / Под ред. И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1971. 351с.
41. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение, 1984. 432 с.
42. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер. с

английского под ред. Ф.И. Квасова, Г.Б. Строганова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1979, 640с.

43. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. - М.: Металлургия, 1979. - 640с.

44. Плавка и литье алюминиевых сплавов: справ, изд. / М.Б. Альтман, А.Д. Андреев, Г.А. Балахонцев. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.

45. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М.В. Мальцев. - М.: Металлургия, 1964. - 282с.

46. Строганов Г.В. Сплавы алюминия с кремнием / Г.В. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. - М.: Металлургия, 1977. - 272с.

47. Кисунько В.З. Влияние структурных превращений в алюминиевых расплавах на их свойства / В.З. Кисунько, И.А. Новохатский, А.И. Погорелов//Литейное производство. 1986. №11. с. 10-12.

48. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия / Г.И. Эскин. - М.: Металлургия, 1988. - 232 с.

49. Taylor, J.A. The effect of Iron in Al-Si Casting Alloys / J.A. Taylor // 35th Australian Foundry Institute National Conference. - Adelaide, Australia, 2004. - P. 148-157.

50. Дубоделов В. И., Середенко В. А., Затуловский С. С., Косинская А. В. Структуро- образование до- и заэвтектических сплавов Al–Ni при их затвердевании в посто- янном однородном магнитном поле. Процессы литья. 2010. № 6 (84).

51. Ворон М. М., Дрозд Е. А., Берест Д. А. Структура и свойства сплавов системы Al–Si–Cu после кристаллизации в магнитном поле. Процессы литья. 2018. № 1. С. 49–55.