

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

«ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____ Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем
вищої освіти

на тему:

**«Дослідження особливостей формування
герметичності в магнієвих ливарних сплавах»**
«Study of the peculiarities of the formation of tightness in magnesium
casting alloys»

Виконав здобувач вищої освіти:

II курсу, групи ПМ-23М-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

_____ Валентин АРДУНАТІЙ

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
“ _____ ” _____ 2024 року

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

Ардунатій Валентин Сергійович

1. Тема роботи: "Дослідження особливостей формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах"
2. Керівник роботи Кузик Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент
Затверджені наказом вищого навчального закладу від "07"серпня 2024 року № 30-13
3. Строк подання роботи до захисту "9" грудня 2024 року _____
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи є дослідження особливостей формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах з метою виявлення факторів, що впливають на утворення дефектів, та визначення основних причин появи негерметичності у виливках.
Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні завдання:
 1. Проаналізувати вплив складу магнієвих сплавів на їх герметичність.
 2. Дослідити впливу факторів, що впливають на формування пористості та дефектів, що можуть знижувати герметичність.
 3. Описати механізм формування пористості і герметичності у виливках з магнієвого ливарного сплаву МЛ10 та МЛ 12 та вплив структури сплаву на цей процес.
 4. Вивчити метод покращення герметичності.
 5. Оцінити можливостей контролю якості герметичності в готових виробах.
 6. Дати рекомендації щодо покращення герметичності в магнієвих ливарних сплавах.

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	22.11	
4	Графічний матеріал	05.12	

Дата видачі завдання

«4» 09 2024 року

Керівник роботи

Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

« » 2024 року

Валентин АРДУНАТІЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконав здобувач вищої освіти Ардунатій Валентин Сергійович студент II курсу, групи ПМ-23М-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка на тему "Дослідження особливостей формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах", яка складається з пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Пояснювальна записка містить 52 сторінок тексту, формату А4, 11 рисунка, 6 таблиць. Ілюстративний матеріал містить 1 слайдів.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена дослідженню особливостей формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах з метою виявлення факторів, що впливають на утворення дефектів, та визначення основних причин появи негерметичності у виливках.

В результаті проведених досліджень встановлено, що герметичність магнієвих виливків, пов'язана не стільки з усадковою мікропористістю, що утворюється в ході затвердіння виливки в умовах щодо повільного охолодження, властивого лиття в разові піщані форми, скільки з формою і протяжністю мікропор у виливку.

Виявлено, що сплав, що має незначну кількість усадочних пір МЛ 10 програє в герметичності сплаву з більшою часткою пір у виливках МЛ 12. Показано, що визначальним для отримання герметичної виливки є вузький температурний інтервал кристалізації сплаву та наявність у структурі виливки достатньої кількості евтектичної складової для блокування порожнин, що утворюються в тілі виливки внаслідок утрудненого живлення через двофазну область.

Встановлено, що сплав МЛ 10 демонструє максимальну кількість відкритої пористості в зразках литих сплавів, що веде до негерметичності тонкостінних виливків з нього. Дослідження показали, що головною причиною порушення герметичності виливків зі сплаву МЛ10 є висока пористість, спричинена недостатньою кількістю евтектики в структурі та міждендритними порожнинами.

Для сплаву МЛ10 характерні вузький інтервал кристалізації та значне тепловиділення, що призводить до утворення концентрованих усадкових раковин. У сплаві МЛ12 розширений інтервал кристалізації та більша кількість евтектики забезпечують компактнішу структуру пористості, що позитивно впливає на герметичність.

Сплав МЛ12 демонструє вищу герметичність завдяки більшій кількості евтектичної фази, яка сприяє замиканню міждендритних порожнин. У сплаві МЛ10 пористість має протяжний характер, що значно знижує герметичність.

Встановлено, що зниження щільності сплаву МЛ10 у порівнянні з МЛ12 пов'язане з меншою кількістю легуючих елементів, що впливає на утворення пористості.

Для підвищення герметичності виливків зі сплаву МЛ10 рекомендовано збільшити кількість евтектики в структурі шляхом легування та оптимізації технологічних процесів лиття.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розплав, магнієвий ливарний сплав, структура, властивості, виливка, щільність, пористість, герметичність

ABSTRACT

The qualification master's thesis was completed by the higher education applicant Ardunaty Valentyn Serhiyovych, a II year student, group PM-23M-1, OPP "Applied Mechanics", specialty 131 Applied Mechanics on the topic "Study of the features of the formation of tightness in magnesium casting alloys", which consists of an explanatory note and illustrative material. The explanatory note contains 52 pages of text, A4 format, 11 figures, 6 tables. The illustrative material contains 1 slides.

The qualification master's thesis is devoted to the study of the features of the formation of tightness in magnesium casting alloys in order to identify factors that influence the formation of defects, and determine the main causes of the appearance of leaks in castings.

As a result of the conducted research, it was established that the tightness of magnesium castings is associated not so much with the shrinkage microporosity formed during the solidification of the casting under conditions of relatively slow cooling, characteristic of casting in one-time sand molds, as with the shape and length of micropores in the casting.

It was found that the alloy with a small number of shrinkage pores ML 10 loses in tightness to the alloy with a larger proportion of pores in the castings ML 12. It was shown that the narrow temperature interval of crystallization of the alloy and the presence in the structure of the casting of a sufficient amount of eutectic component to block the cavities formed in the casting body due to difficult feeding through the two-phase region are decisive for obtaining a tight casting.

It was established that the alloy ML 10 demonstrates the maximum amount of open porosity in samples of cast alloys, which leads to the leakage of thin-walled castings from it. Studies have shown that the main reason for the violation of the tightness of castings from the ML10 alloy is high porosity, caused by an insufficient amount of eutectic in the structure and interdendritic cavities.

The ML10 alloy is characterized by a narrow crystallization interval and significant heat release, which leads to the formation of concentrated shrinkage shells. In the ML12 alloy, the extended crystallization interval and a larger amount of eutectic provide a more compact porosity structure, which positively affects the tightness.

The ML12 alloy demonstrates higher tightness due to a larger amount of the eutectic phase, which contributes to the closure of interdendritic cavities. In the ML10 alloy, the porosity is of an extended nature, which significantly reduces the tightness.

It was established that the decrease in the density of the ML10 alloy compared to ML12 is associated with a smaller amount of alloying elements, which affects the formation of porosity.

To increase the tightness of castings from the ML10 alloy, it is recommended to increase the amount of eutectic in the structure by alloying and optimizing the

casting processes.

KEYWORDS: melt, magnesium casting alloy, structure, properties, casting, density, porosity, tightness

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ МАГНІЄВИХ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОТРИМАННЯ	10
1.1 Застосування, склад і властивості магнієвих ливарних сплавів	10
1.2 Сучасні ливарні магнієві сплави	15
1.3 Основні тенденції у розвитку магнієвих сплавів	18
1.4 Особливості пластичності та міцності магнієвих сплавів	20
Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.	22
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	24
2.1 Плавка та характеристика магнієвого ливарного сплаву МЛ 10, МЛ 12	24
2.3 Визначення хімічного складу	26
2.2 Визначення щільності та пористості магнієвих ливарних сплавів	27
2.3 Методика проведення металографічних досліджень магнієвих ливарних сплавів	27
Висновки до другого розділу	28
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ В МАГНІЄВИХ ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ	30
3.1 Дослідження герметичності магнієвого сплаву МЛ 10 з промислових виливків	36
3.1 Особливості кристалізації та затвердіння магнієвих ливарних сплавів	37
3.3 Особливості формування герметичності у виливках з магнієвих сплавів	39
Висновки до третього розділу.....	41
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	43
Список використаних джерел.....	45

ВСТУП

Причиною виникнення негерметичності у виливках з магнієвих сплавів найчастіше є просочування рідин через стінки по мікроскопічних наскрізних каналах (пористості). Утворення пористості, що порушує герметичність стінок литих деталей, пов'язане з усадковими процесами та процесами живлення двофазної області затвердніваючого металу. При цьому зазвичай сплави, що мають широкий температурний інтервал кристалізації, демонструють велику пористість порівняно зі сплавами з вузьким інтервалом кристалізації.

Сучасні промислові ливарні магнієві сплави, що використовуються для отримання герметичних виливків, зазвичай володіють вельми широким інтервалом кристалізації (більше 100 °C), а виливки з них часто отримують у піщаних формах, які не забезпечують високу швидкість охолодження при кристалізації. Такі магнієві виливки як правило уражаються розсіяною усадковою пористістю, яку зазвичай виправляють шляхом просочування різними складами, що заповнюють пори і, за рахунок цього, відновлюють герметичність. Однак, правильніше використовувати сплави, які зберігають герметичність литих деталей без використання операції просочення, тому виявлення особливостей формування герметичності магнієвих ливарних сплавів серед використовуваних в даний час або створення нових є актуальною задачею.

У магістерській роботі порівнювалися промислові магнієві сплави системи Mg-PЗМ-Zn-Zr, МЛ 10 та МЛ 12 що використовуються для отримання герметичних виливків з метою визначення основних причин появи негерметичності у виливках.

Метою роботи є дослідження особливостей формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах з метою виявлення факторів, що впливають на утворення дефектів, та визначення основних причин появи негерметичності у виливках.

Об'єктом дослідження є магнієві ливарні сплави МЛ 10 та МЛ 12, що використовуються для виготовлення деталей, які потребують герметичності.

Предметом дослідження є особливості формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах, зокрема вплив факторів на утворення дефектів та пористості, що можуть впливати на герметичність.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні завдання:

1. Аналіз впливу складу магнієвих сплавів на їх герметичність.
2. Дослідження впливу факторів, що впливають на формування пористості та дефектів, що можуть знижувати герметичність.
3. Описати механізм формування пористості і герметичності у виливках з магнієвого ливарного сплаву МЛ10 та МЛ 12 та вплив структури сплаву на цей процес.
4. Вивчення методів покращення герметичності.
5. Оцінка можливостей контролю якості герметичності в готових виробах.
6. Дати рекомендації щодо покращення герметичності в магнієвих ливарних сплавах.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ МАГНІЄВИХ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОТРИМАННЯ

1.1 Застосування, склад і властивості магнієвих ливарних сплавів

Близько половини всього виробленого магнію застосовують для легування алюмінієвих сплавів, а інша частина використовується для виготовлення магнієвих сплавів. Через недостатній рівень механічних властивостей чистий магній рідко використовується у техніці, натомість переважно застосовуються магнієві сплави. Висока питома міцність цих сплавів дозволяє зменшити масу компонентів машин.

У літакобудуванні магнієві сплави застосовують для виготовлення коліс і вилок шасі, важелів, корпусів приладів, насосів, коробок передач, а також деталей кабін і планера літака. Вони широко використовуються в конструкціях вертольотів, ракет і космічної техніки, включаючи корпуси, обтічники, паливні баки та стабілізатори. Крім того, магнієві сплави знаходять застосування у виробництві електронних і оптичних пристроїв, таких як ноутбуки, плеєри, телефони, кінокамери та фотоапарати.

Магнієві сплави мають низьку щільність ($1,5 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$) та високу міцність у відношенні до їхньої ваги. Більшість виливків із магнієвих сплавів у світі виробляються для галузі автомобілебудування. Зниження ваги мобільних транспортних засобів на 100 кг дозволяє заощадити 0,5 л бензину/100 км. Передбачається, що в найближчому майбутньому масу виливків із магнієвих сплавів у середньому автомобілі виросте до 40...160 кг, двигуни внутрішнього згоряння будуть виготовлені в основному з магнієвих сплавів, а вага автомобіля знизиться з 1200 до 900 кг [12, 13].

Тим не менш, деталі з магнієвих сплавів отримують різними методами: литтям, деформаційною обробкою та комбінованими, які входять:

- 1) Рідкі та напівтверді процеси лиття:

- лиття під високим та низьким тиском;
- гравітаційне лиття;
- тиксолілення (Thixomolding);
- лиття вичавлюванням.

2) Процеси деформації:

- екструзії;
- прокатка листів та профілів;
- кування.

За даними Міжнародної магнієвої асоціації (ІМА), можна зробити висновок, що більше 90% деталей із магнієвих сплавів, виробляється зараз литтям під високим тиском [12, 15]. Очікується, що протягом наступних 10 років частка лиття під високим тиском ще більше зросте.

Дешевизна, при масовому виробництві деталей у такий спосіб дозволяє отримувати литі деталі, що наближаються за вартістю до аналогічних алюмінієвим. Однак це стосується лише тих галузей промисловості, де вимоги до литих деталей із магнієвих сплавів не високі і на перше місце виступає їх мала вага та дешевизна, наприклад в автомобілебудуванні чи виробництві товарів народного споживання.

У вітчизняній же промисловості, кількість магнієвих виливків у останні роки як не збільшувалося, а й знижувалася. Незважаючи на те, що в останні роки вітчизняна промисловість знижувала споживання магнію для виробництва виливків цивільного авіабудування. Незалежно від напрямку використання сплавів їх вдосконалення в сучасному світі неможливе без використання комп'ютерного моделювання термохімічних процесів та діаграм стани багатокомпонентних систем на основі магнію [16].

Завдяки високій демпфуючій здатності магнієві сплави використовуються для виготовлення кожухів, призначених для розміщення електронної апаратури керованих снарядів. Мала здатність поглинати теплові нейтрони та практично повна відсутність взаємодії з ураном обумовлюють застосування магнієвих

сплавів для виробництва оболонок тепловиділяючих елементів в атомних реакторах.

Магнієві сплави класифікують залежно від методу виробництва напівфабрикатів і готових виробів на дві основні категорії: а) деформівні сплави, які застосовуються для виготовлення напівфабрикатів за допомогою різних способів обробки тиском; б) ливарні сплави, призначені для створення деталей методом фасонного литва.

Магнієві сплави, що поділяються на деформівні та ливарні, маркуються відповідно літерами МА і МЛ (табл. 1.1).

Таблиця 1 – Хімічний склад магнієвих сплавів

Марка	Основні компоненти, % (магній – основа)		
	Al	Zn	Mn
МА2	3,0...4,0	0,2...0,8	0,15...0,5
МА2–1	3,8...5,0	0,8...1,5	0,3...0,7
МА3	5,5...7,0	0,5...1,5	0,15...0,5
МА5	7,8...9,2	0,2...0,8	0,15...0,5
МЛ4	5,0...7,0	2,0...3,5	0,15...0,5
МЛ5	7,5...9,0	0,2...0,8	0,15...0,5
МЛ6	9,0...10,2	0,6...1,2	0,1...0,5

Для виготовлення листів, поковок, штамповок, профілів, прутків та смуг в промисловості використовуються такі групи деформівних магнієвих сплавів:

1. на основі системи магній – манган (МА1, МА8, МА8пч);
2. на основі системи магній – алюміній – цинк (МА2, МА2–1, МА3, МА2–1пч, МА5);
3. на основі системи магній – цинк – цирконій (МА14, МА15, МА19, МА20);
4. на основі системи магній – рідкісноземельний метал (РЗМ) – манган (МА11, МА12, МА17);
5. на основі систем магній – ітрій та магній – ітрій – кадмій (ВМД10);

6. на основі системи магній – літій (МА18, МА21).

Сплави першої групи.

Сплави системи магній – манган (МА1, МА8, МА8пч) характеризуються високою корозійною стійкістю та гарною пластичністю в гарячому стані. Вони добре зварюються і використовуються в відпаленому або нагартваному стані для виготовлення виробів, що не піддаються великим навантаженням.

Сплави другої групи.

Сплави системи магній – алюміній – цинк (МА2, МА2–1, МА2–1пч, МА3, МА5) мають високу міцність або пластичність в залежності від вмісту алюмінію. Зі збільшенням вмісту алюмінію міцність сплавів зростає, а пластичність знижується.

Сплави третьої групи.

Сплави системи магній – цинк – цирконій (МА14, МА15, МА19, МА20) вирізняються високою міцністю, гарною пластичністю в гарячому стані та задовільною корозійною стійкістю. Вони застосовуються для виготовлення середньонавантажених деталей. Ефективність цирконію знижується у присутності алюмінію, силіцію, мангану, нікелю або сурми, тому вміст цих елементів має бути мінімальним.

Сплави четвертої групи.

Сплави системи магній – рідкісноземельний метал (РЗМ) – манган (МА11, МА12, МА17) мають підвищену жароміцність порівняно з іншими сплавами. Зокрема, сплави з церієм здатні витримувати температуру до 200 °С, а з неодимом — до 250–300 °С.

Сплави п'ятої групи.

До цієї групи належать сплави, леговані ітрієм, зокрема сплав ВМД10, що належить до системи магній – ітрій – кадмій. Він вирізняється високою технологічністю, що дозволяє виготовляти всі види деформівних напівфабрикатів. ВМД10 — високоміцний магнієвий сплав, чия механічна міцність перевищує характеристики більшості серійних магнієвих сплавів. Цей

сплав знаходить широке застосування при виготовленні масивних виробів, які потребують підвищеної тріщиностійкості.

Сплави шостої групи.

Легування магнію літієм дозволяє створювати сплави з щільністю 1,3...1,6 г/см³, що значно підвищує питомі механічні характеристики. Жорсткість конструкцій з магнієво-літійових сплавів перевищує жорсткість виробів з інших матеріалів, зокрема сталі та титану.

Крім того, рівень міцності сплавів системи магній–літій можна підвищити шляхом додаткового легування алюмінієм, цинком, кадмієм або рідкісноземельними металами (РЗМ). Сплав МА18 має найменшу щільність (1,6 г/см³) серед магнієвих сплавів, він вирізняється високою пластичністю, ударною в'язкістю та технологічністю. Листове штампування, гнуття та витягування цього сплаву можна виконувати в холодному стані.

Ливарні сплави.

За хімічним складом ливарні магнієві сплави поділяються на три основні групи:

- на основі системи магній – алюміній – цинк (МЛ3, МЛ4, МЛ4пч, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6);
- на основі системи магній – цинк – цирконій (МЛ8, МЛ12, МЛ15, МЛ17, МЛ18);
- на основі системи магній – рідкісноземельний метал (РЗМ) (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19).

Сплави першої групи.

Сплави системи магній – алюміній – цинк (МЛ3, МЛ4, МЛ5, МЛ6) призначені для виготовлення високонавантажених виливків, що експлуатуються в умовах підвищеної вологості. Для покращення корозійної стійкості в сплави додають 0,1...0,5 % мангану, а для зменшення окислюваності — 0,001...0,002 % берилію або 0,5...0,1 % кальцію. Ці сплави відносять до високоміцних. Основним зміцнювачем є алюміній, розчинність якого в магнії

при евтектичній температурі становить 17,4 %, а при нормальній температурі — 2,8 %. Цинк також зміцнює магній, але менш ефективно, ніж алюміній.

Сплави другої групи.

Сплави системи магній – цинк – цирконій (МЛ8, МЛ12) також є високоміцними. Вони мають підвищені механічні властивості і хорошу оброблюваність різанням. Легування лантаном покращує ливарні властивості, збільшує жароміцність і зварюваність, але знижує міцність і пластичність при нормальних температурах. Сплави цієї групи мають задовільні ливарні властивості, з подрібненим зерном, зміцнюються при термічній обробці, що дозволяє отримувати виливки з однорідними властивостями, навіть у деталях з різною товщиною перетину.

Сплави другої групи.

Сплави системи магній – цинк – цирконій (МЛ8, МЛ12) використовуються для виготовлення виливків, які працюють при температурах 200...250 °C і високих навантаженнях.

Сплави третьої групи.

Сплави системи магній – РЗМ – цирконій (МЛ10, МЛ11, МЛ19) характеризуються високою жароміцністю та доброю корозійною стійкістю. Вони призначені для тривалої експлуатації при 250...350 °C і короткочасної роботи при 400 °C. Ці сплави мають відмінні ливарні властивості, високу герметичність, малу схильність до утворення мікрорихлості та усадкових тріщин, а також однорідні механічні властивості в деталях різної товщини. Сплави з РЗМ використовуються для виготовлення виливків, що працюють під статичними та утомними навантаженнями.

Для виготовлення виливків найбільш часто застосовують сплави першої групи. Найкращі ливарні властивості мають сплави МЛ5 і МЛ6, які використовуються для виробництва високонавантажених виливків, що працюють в складних атмосферних умовах (висока вологість).

1.2 Сучасні ливарні магнієві сплави

Зазвичай, ливарні магнієві сплави ділять на дві групи: містять алюміній і алюміній, що не містять [7]. Крім того, у вітчизняній практиці сплави ділять ще на три групи: сплави системи Mg-Al-Zn-Mn (МЛ3, МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6), на основі системи Mg-Zn-Zr (МЛ8, МЛ12, МЛ15), на основі системи Mg-PЗМ-Zr (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19) [18, 19].

Стандарт встановлює хімічний склад для 14 ливарних магнієвих сплавів, частина з яких є одними і тими ж сплавами, але мають різні вимоги щодо чистоти, наприклад, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он. Таким чином, справді різними можна вважати лише 11 сплавів. Ці сплави були розроблені дуже давно, багато хто в 40-50 роки минулого століття, коли вимоги до цих конструкційним матеріалам, були значно нижчими від сучасних. Тим не менш, особливості формування литої структури цих сплавів досі не до кінця вивчено, що веде до помилок при розробці ливарної технології. Переважно у промисловому виробництві на Україні в даний час використовуються сплави, засновані на системах легування Mg-Al-Zn-Mn (МЛ5), Mg-Zn-Zr (МЛ12), Mg-PЗМ-Zn-Zr (МЛ10, МЛ19).

У практиці вітчизняного ливарного виробництва для отримання корпусних виливків, що працюють, у тому числі, під тиском рідин або газів найчастіше використовують магнієвий сплав МЛ 10. Виливки, що виходять з нього, не завжди витримують експлуатацію при підвищеному тиску гідравлічних рідин.

1.3 Основні тенденції у розвитку магнієвих сплавів

Легуючі компоненти, розчинні в магнії та утворюють твердий розчин α -Mg можуть різний вплив на властивості Mg-сплавів, наприклад на зміцнення твердого розчину, корозійну стійкість, їх тепло- та електропровідність і т.д. В даний час питання підвищення міцності магнієвих сплавів за рахунок

зміцнення твердого розчину на основі магнію привертає велику увагу. Усвідомлення того, що легування твердого магнієвого розчину одним елементом не призводить до збільшення міцності магнієвих сплавів понад те, що було досягнуто раніше (межа σ_B на рівні 250 МПа) змушує сучасних дослідників шукати нові підходи до легування магнію.

Внаслідок тривалого вдосконалення магнієвих сплавів за За кордоном, дослідникам вдалося значно покращити характеристики Mg- сплавів [29, 30] і розробити і запустити у виробництво багато серій Mg- сплавів, наприклад, AZ, AM, ZK, WE, LA.

В даний час приходить розуміння того, що фундаментальні основи зміцнення сплавів Mg лежить у площині спільного легування декількома легуючими компонентами, що вимагають більш ретельних розрахунків, оскільки атомні взаємодії у твердому розчині магнію ускладнюються. Однак при цьому, очікується, що мультилеговані сплави Mg за рахунок взаємодії між декількома компонентами сплаву приведуть до розробки ефективніших сплавів.

У цьому інтерес представляють роботи дослідників [28, 30], в яких показано, що при правильному доборі легуючих елементів (з оптимальним їх співвідношенням) у магнієвих сплавах можна синергетично покращити їх властивості.

Видно, що розвиток сплавів йде як у бік їх здешевлення, при збереження прийнятної рівня властивостей під час використання високопродуктивних технологій лиття, так і у бік підвищення експлуатаційних властивостей за рахунок застосування дорогих та дефіцитних легуючих компонентів. Для створення дешевих сплавів для масового лиття в основному використовуються сплави систем Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Si та Mg-Sn [31-34] без чи з незначними добавками РЗМ. Для створення дорогих високоміцних сплавів використовують сплави на базі систем Mg-РЗМ (наприклад, Gd та Nd) [23,31, 35].

У таблиці 1.2 показані деякі найпоширеніші зарубіжні сплави, які використовуються в даний час в ливарному виробництві.

Таблиця 1.2 - Властивості ливарних зарубіжних сплавів (ASTM B80 - 15)

Сплав	Стан	$\sigma_{0,2}$, ksi (МПа)	σ_B , ksi (МПа)	δ , %
EQ21A	T6	25.0(172)	34.0(234)	2
K1A		6.0(41)	24.0(165)	14
QE22A	T6	25.0(172)	35.0(241)	2
WE43A	T6	25.0(172)	32.0(221)	2
WE43B	T6	25.0(172)	32.0(221)	2
WE54A	T6	26.0(179)	37.0(255)	2

Таким чином, у традиційних закордонних промислових магнієвих сплавів межа міцності на розтягування (σ_B) зазвичай знаходиться в діапазоні 75-200 МПа, межа плинності при розтягуванні ($\sigma_{0,2}$) – 135...285 МПа, подовження – 2...10%.

1.4 Особливості пластичності та міцності магнієвих сплавів

Пластичність та міцність магнієвих сплавів визначається можливістю деформації кристалів магнію (твердого розчину на основі магнію). Пластична деформація в Mg здійснюється за рахунок активації певних систем ковзання та двійників. Ковзання може відбуватися в напрямку $\langle 1120 \rangle$ або $\langle a \rangle$ в основному на базисних площинах $\{0002\}$ та призматичної площини $\{1010\}$ першого порядку, а також у напрямку $\langle 1123 \rangle$ або $\langle c+a \rangle$ на пірамідальних площинах другого порядку $\{1122\}$ [13], тоді як двійникування відбувається переважно на пірамідальних площинах $\{1012\}$.

Внаслідок низької симетрії гексагональної щільноупакованої структури і, пов'язаного з цим відсутності достатньої кількості незалежних систем ковзання, механічні властивості Mg сильно залежать від кристалографічної орієнтації. На пластичність магнієвих сплавів також впливають особливості мікроструктури,

такі як розмір зерна, поведінка легуючих компонентів, які можуть знаходитися в розчиненому вигляді твердому розчині на основі магнію або у вигляді окремих фаз або можуть утворювати виділення при розпаді пересиченого твердого розчину [19-20].

Таким чином, зміцнення магнієвих сплавів зазвичай здійснюється з використанням трьох механізмів: зміцнення твердого розчину за рахунок розчинених елементів, зміцнення за рахунок виділення частинок-зміцнювачів в результаті розпаду пересиченого твердого розчину та зміцнення за рахунок подрібнення зерна. Міцність досягається за рахунок ретельного контролю мікро та макроструктури литої деталі у трьох напрямках [25]:

1. Зміцнення за рахунок керування межами зерен: керування розміром зерна, гранулометричним складом, розподілом та морфологією інтерметалевих частинок на межах зерен.

2. Зміцнення шляхом легування твердого розчину за рахунок взаємодії між атомами розчинених компонентів, дислокаційними структурами чи двійниковими кордонами у процесі термомеханічної обробки чи процесі експлуатації.

3. Зміцнення шляхом контрольованого розпаду пересиченого твердого розчину, одержуваного шляхом його загартування після лиття або високотемпературної термічної обробки, коли зміцнення досягається за рахунок утворення нанорозмірних твердофазних опадів, що перешкоджають руху дислокацій, зародження та зростання двійників у процесі деформації.

Типові легуючі компоненти, що використовуються для цього Al, Zn, Ca та РЗМ [21-23, 31, 32].

Тверді розчини на основі магнію поділяються на дві групи, одна представлена плавами Mg-Al, які зміцнюються за рахунок виділення випадково розташованих частинок зміцнювачів, а інша - у яких швидкість зміцнення у кілька разів вища, наприклад сплави, що містять РЗМ, наприклад, Gd, Y.

Зміцнюючі частинки, які зазвичай утворюються в сплавах Mg, мають форму стрижнів або пластин, що лежать на певних кристалографічних

площинах. При цьому, на міцність магнієвих сплавів впливають не тільки кількість, а й форма, орієнтація та розташування зміцнюючих частинок у структурі металу. Так, у сплавах із випадковим розташуванням зміцнюючих частинок, наприклад, сплавах системи Mg-Al-Zn (МЛ15) міцність, що досягається зазвичай нижче, ніж при формуванні упорядкованих призматичних виділень частинок, як у сплавах системи Mg-Y-PЗМ (МЛ19) [20]. На малюнку 3 представлено вплив деяких легуючих елементів на міцність сплаву з магнієм при кімнатній температурі.

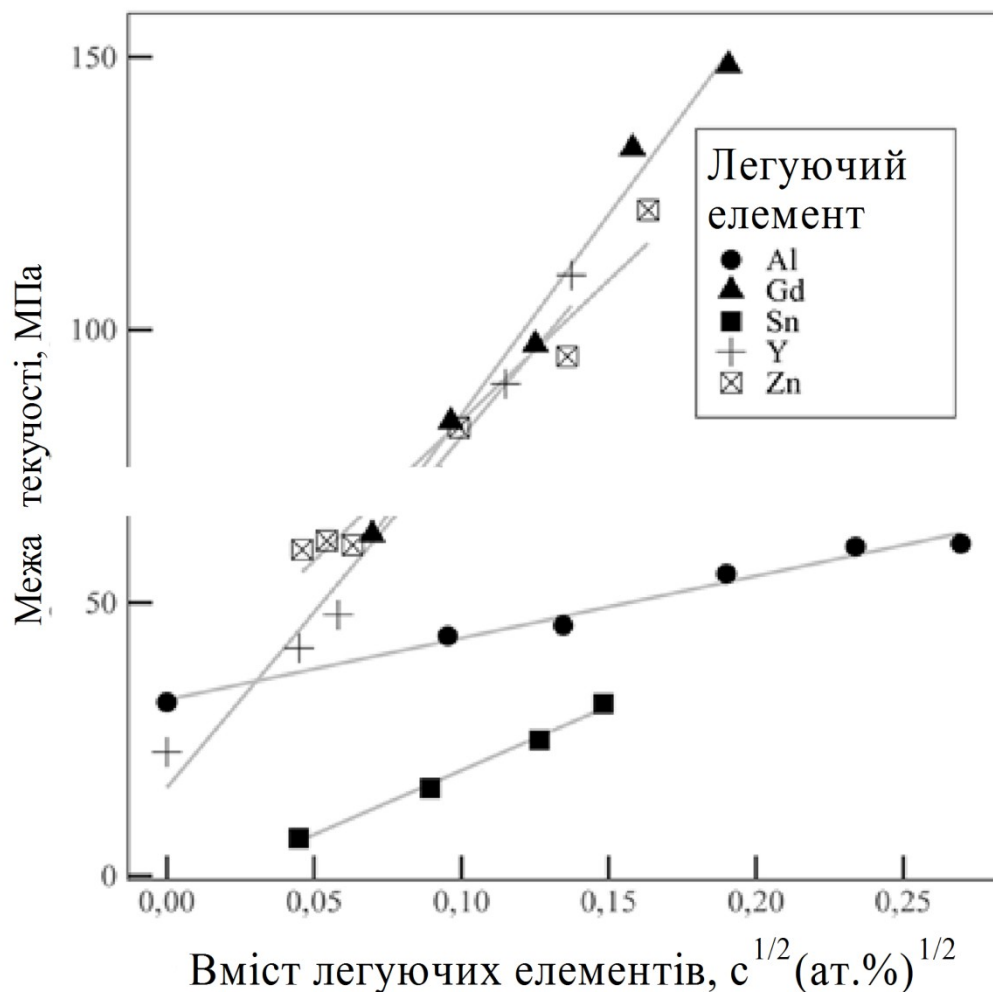


Рисунок 1.1 – Залежність межі плинності магнієвого металу від змісту легуючого компонента [28].

На сьогодні вважається, що вплив легуючих елементів на магній безпосередньо пов'язані з їх електронним будовою. EWF – це енергія, необхідна для переміщення електрона на рівні Фермі зсередини твердого тіла до його

поверхні без витрат кінетичної енергії EWF фундаментально характеризує атомні взаємодії або взаємодії між електронами та ядрами в обсязі.

Було показано, що модулі Юнга, межа плинності та твердість металів та сплави пов'язані з EWF [44, 45]. Встановлено, що легуючі компоненти більш низьким показником EWF сприяють виникненню двійників у сплавах з магнієм, що веде до поліпшення деформованості та підвищення пластичності та міцності твердого розчину на основі магнію, а, отже, і магнієвого сплаву. Елементи, що мають величину EWF більше, ніж у магнію, навпаки, зменшують пластичність твердого розчину.

Виходячи з цього, найбільш перспективними зміцнювачами для магнію є лужні та рідкісноземельні метали. Таким чином, сучасні магнієві сплави розробляються, багато в чому спираючись на дані про електронну будову атомів магнію і легуючих елементів та на результати розрахунку фазових рівноваг.

Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.

Причиною виникнення негерметичності у виливках з магнієвих сплавів найчастіше є просочування рідин через стінки по мікроскопічних наскрізних каналах (пористості). Утворення пористості, що порушує герметичність стінок литих деталей, пов'язане з усадковими процесами та процесами живлення двофазної області затверднюючого металу. При цьому зазвичай сплави, що мають широкий температурний інтервал кристалізації, демонструють велику пористість порівняно зі сплавами з вузьким інтервалом кристалізації.

Сучасні промислові ливарні магнієві сплави, що використовуються для отримання герметичних виливків, зазвичай володіють вельми широким інтервалом кристалізації (більше 100 °C), а виливки з них часто отримують у піщаних формах, які не забезпечують високу швидкість охолодження при кристалізації. Такі магнієві виливки як правило уражаються розсіяною усадковою пористістю, яку зазвичай виправляють шляхом просочування різними складами, що заповнюють пори і, за рахунок цього, відновлюють герметичність. Однак, правильніше використовувати сплави, які зберігають герметичність литих деталей без використання операції просочення, тому виявлення особливостей формування герметичності магнієвих ливарних сплавів серед використовуваних в даний час або створення нових є актуальною задачею.

У магістерській роботі порівнювалися промислові магнієві сплави системи Mg-PЗМ-Zn-Zr, МЛ 10 та МЛ 12 що використовуються для отримання герметичних виливків з метою визначення основних причин появи негерметичності у виливках.

Метою роботи є дослідження особливостей формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах з метою виявлення факторів, що впливають на утворення дефектів, та визначення основних причин появи негерметичності у виливках.

Об'єктом дослідження є магнієві ливарні сплави МЛ 10 та МЛ 12, що використовуються для виготовлення деталей, які потребують герметичності.

Предметом дослідження є особливості формування герметичності в магнієвих ливарних сплавах, зокрема вплив факторів на утворення дефектів та пористості, що можуть впливати на герметичність.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні завдання:

1. Аналіз впливу складу магнієвих сплавів на їх герметичність.
2. Дослідження впливу факторів, що впливають на формування пористості та дефектів, що можуть знижувати герметичність.
3. Описати механізм формування пористості і герметичності у виливках з магнієвого ливарного сплаву МЛ10 та МЛ 12 та вплив структури сплавів на цей процес.
4. Вивчення методів покращення герметичності.
5. Оцінка можливостей контролю якості герметичності в готових виробах.
6. Дати рекомендації щодо покращення герметичності в магнієвих ливарних сплавах.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

2.1 Плавка та характеристика магнієвого ливарного сплаву МЛ 10, МЛ 12

Магнієві сплави плавлять у тигельних, відбивних і індукційних печах промислової частоти, футерованих магнезитом. Для цих цілей часто використовуються сталеві тиглі. Залежно від масштабу виробництва і маси виливка застосовуються три методи виплавки магнієвих сплавів: у стаціонарних і виймальних тиглях, а також дуплекс-процес, який поєднує відбивні та тигельні печі або індукційні та тигельні.

Сплави готували з магнію промислової чистоти Mg90 ГОСТ 804-93, цинку промислової чистоти Ц0, сплаву МЦр 1 НЗ, лігатури Mg-15% мас. Zr (Л4), лігатур: Mg-20 % мас. Nd, Mg-34 % мас. La, Mg - 25 % мас., Се – 13 % мас. La . Сплави виплавлялися в сталевому плавильному тиглі місткістю 2 кг рідкого магнію в печі індукційної із застосуванням покривного карналітового флюсу.

Однією з областей застосування ливарних магнієвих сплавів є виготовлення різних корпусів агрегатів, що працюють у тому числі під тиском рідин або газів. Для їх виготовлення призначені сплави, що мають, крім хороших характеристик міцності, високу герметичність в литому і термообробленому стані. Для отримання герметичних виливків у світовій практиці використовуються сплави систем Mg-P3M-Zn-Zr.

В роботі досліджували герметичність тонкостінних виливків з магнієвих ливарних сплавів МЛ 10 та МЛ 12 характеристики яких наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Склад промислових магнієвих сплавів, які досліджували для отримання герметичних корпусних виливків

Сплав марки	Вміст елемента, % мас.			
	Mg	Zn	PЗМ	Zr
МЛ10	основ.	0,1...0,7	2,2...2,8	0,4...1,0
МЛ12	основ.	4,0...5,0	0,7...1,6	0,6...1,1

Всі ці сплави мають хороші ливарні та характеристики міцності властивості.

2.3 Визначення хімічного складу

Для визначення хімічного складу одержаних сплавів використовували скануючий електронний мікроскоп РЕМ-106 з приставкою енергодисперсійного мікроаналізу.



Рисунок 2.1 – Скануючий електронний мікроскоп РЕМ-106

Склад отриманих сплавів та склад відповідно до стандартів представлений у таблиці 2.1.

2.2 Визначення щільності та пористості магнієвих ливарних сплавів

Для визначення пористості сплавів виливали зразки, що мають форму пластин товщиною 30 мм (рис. 2.2), для чого виготовляли форму з піщано-глинястої суміші з використанням кварцового піску та наповнювача.

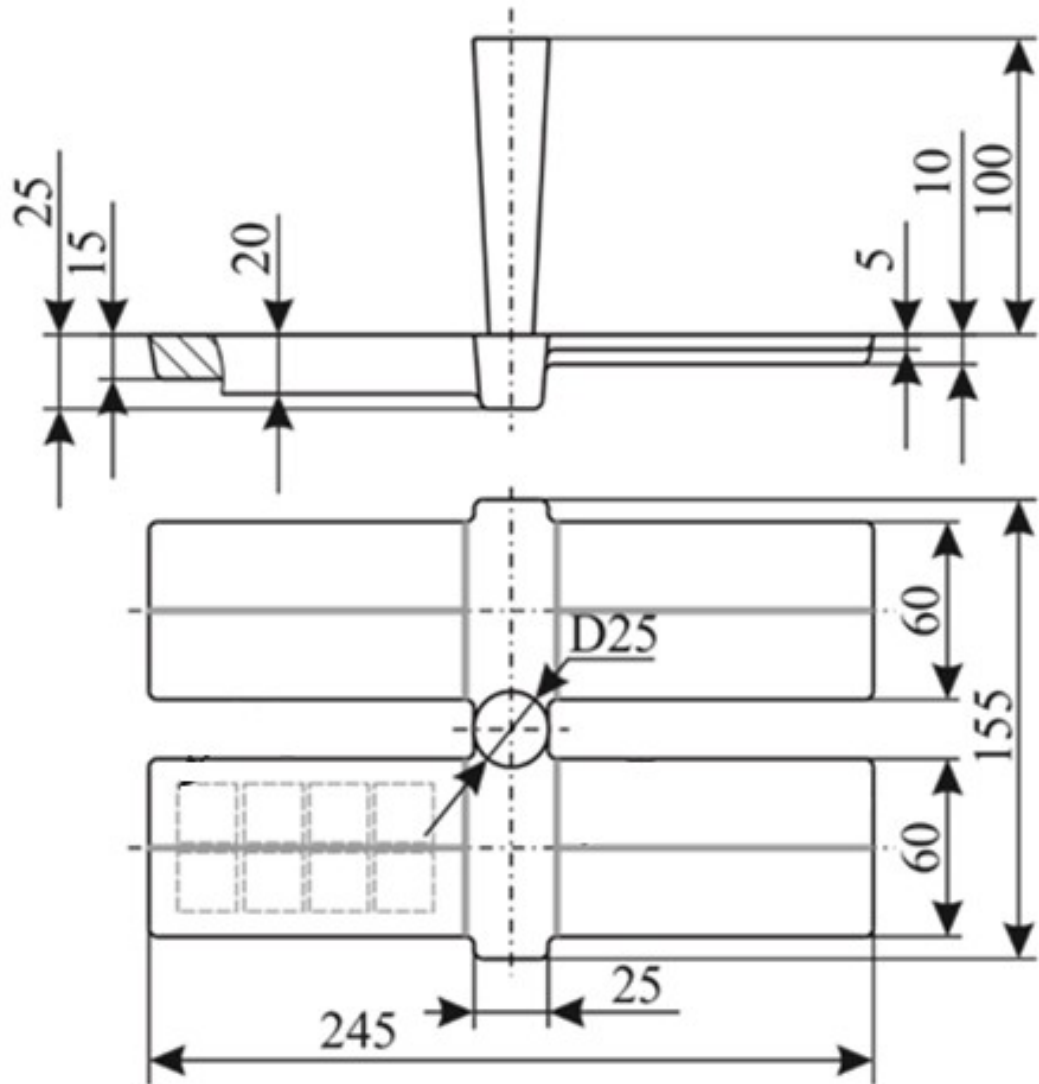


Рисунок 2.2 – Схема виливки зразків для дослідження герметичності.

Отримані пластини товщиною 30 мм використовували для вирізки зразків, що мають розмір близько 30x30x20 мм для визначення щільності та пористості. Зразки шліфували з усіх боків. Пластини з меншими розмірами, не дають змогу виготовити зразки, оскільки не містять достатньої кількості пір для значних вимірів.

Щільність визначали шляхом гідростатичного зважування. Зважування проводили на аналітичних вагах (рис. 2.3) з точністю $2 \cdot 10^{-4}$ г.



Рисунок 2.3 – Загальний вид аналітичних ваг

При цьому зразки сплавів масою близько 50 г зважували на аналітичних вагах на повітрі (m_1 г) і в дистильованій воді (m_2 г). Об'єм зразків (V , см³) визначали за формулою:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{\text{води}}}.$$

Щільність зразків (ρ , г/см³) визначали за такою формулою:

$$\rho = \frac{m_1}{V}.$$

Пористість зразків вимірювали ваговим методом. Цей метод найкраще підходить до вирішення задачі визначення відкритої пористості у виливках, оскільки ігнорує замкнуті пори, що утворюються всередині досліджуваних зразків і не впливають на герметичність виливки.

Зразки висушували і проводили їхнє попереднє зважування на аналітичних вагах з точністю $2 \cdot 10^{-4}$ г. Після чого зразки просочували

поліетилсилоксановою рідиною 132-316, Основні властивості якої наведено в табл. 2.2

Таблиці 2.2 – Технічні характеристики поліетилсилоксанової рідини 132-316

Найменування показника	Норма
Щільність при 20°C (г/см ³)	0,99-1,02
Кінематична в'язкість за 20 °С, сСт	250-300
Температура спалаху, °С, не мене	250
Т застигання, °С	-96

Так як кінематична в'язкість поліетилсилоксанової рідини 132-316 при температурі 20 °С становить 8 мм²/сек і швидко зменшується зі збільшенням температури, наповнення пір здійснювали протягом однієї години при температурі 110 °С. Перед зануренням зразки просушували за температури 145 °С. Після наповнення пір зразки витирали фільтрувальним папером і одноразовими безворсистими серветками, а потім повторно зважували. Щільність поліетилсилоксанової рідини 132-316 при 20 °С становить 0,99 г/см³. Відкриту пористість зразків (B_v) обчислювали за формулою:

$$B_v = \frac{m_1 - m_2}{0,958 \cdot V} \cdot 100\%$$

де m_1 , m_2 - маса зразка вихідна і після наповнення пір поліетилсилоксанової рідини 132...316 відповідно, г; V – обсяг зразка, см³.

Для визначення об'єму та форми усадкових раковин, що утворюються в досліджуваних зразка виливках сплавах, відливали циліндричний виливок діаметром 40 мм та висотою 120 мм. Заливання проводили в сталеву виливницю з підігріванням до 110±5 °С. Температура сплаву на момент заливання становила 700±10 °С. Температура форми контролювалася за

допомогою хромель алюмінієвої (ХА) термопари, встановленої в отвір у стінці виливниці, а металу, що заливається - за допомогою занурювальної ХА термопари.

Розмір усадкової раковини визначався шляхом заповнення раковини, що утворюється, дрібнодисперсним кварцовим піском. Після цього пісок, що заповнив усадочну раковину, зважували на аналітичних терезах і обчислювався його об'єм. Насипна щільність піску становила $1,48 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$. Вимірювання повторювалися декілька разів та брали середній результат.

2.3 Методика проведення металографічних досліджень магнієвих ливарних сплавів

Мікроструктуру зразків вивчали, використовуючи оптичний мікроскоп та на мікроскопі МІМ-8 у відбитому світлі при збільшеннях 100 та 200 разів (рис. 2.4). Оцінку отриманої структури для алюмінієвого сплаву проводили за ГОСТ 3443-87.



Рисунок 2.4 – Загальний вид металографічного мікроскопу МІМ-8

Для виявлення мікроструктури зразки механічно обробляли до чистоти $Ra \leq 1,6 \text{ мкм}$ 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.

Висновки до другому розділу

1. Розроблено схему виливки зразків для дослідження герметичності зразків
2. Запропонована методика визначення щільності та пористості магнієвих ливарних сплавів МЛ10 та МЛ 12
3. Запропоновано методика проведення металографічних досліджень мікроструктури магнієвих ливарних сплавів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ В МАГНІЄВИХ ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ

3.1 Дослідження герметичності магнієвого сплаву МЛ 10 з промислових виливків

Очевидно, що наявність усадкової пористості в сплаві МЛ 10 є основною причиною недостатньої герметичності виливки. Аналізуючи утворені пористості у процесі затвердіння виливків зі сплав МЛ 10 слід зазначити, що наявність у його складі цирконію не сприяє наявності розчинених газів у кількості, що була б здатна вплинути на формування пористості у виливках. В результаті у виливках зі сплаву МЛ 10 присутня лише усадкова пористість.

Експериментальні виливки після видалення ливниково-живильної системи піддали випробуванням на гідроущільнення. Випробування проводили при надмірному тиску до 6 кгс/см^2 ($0,49 \text{ МПа}$) протягом 20 хв. Гідравлічну рідину використовували керосин ТС-1. На всіх виливках була виявлена негерметичність (рис. 3.1)



Рисунок 3.1 - Експериментальні виливки «Корпус насоса» із сплаву МЛ 10 після випробувань на гідроущільність.

Аналізуючи дослідні виливки «Копруп», можна припустити, що причинами негерметичності стінок виливки можуть бути дефекти в стінках виливки, викликані неметалічними включеннями (найчастіше оксидними плівками) або усадковими і газоусадковими дефектами. Але, зазначимо, що через наявність цирконію в сплаві, дефекти, викликані розчиненими газами, можна нехтувати.

Таким чином, основною причиною негерметичності виливки можуть бути лише неметалеві включення або усадочна пористість. Візуальний огляд та рентгенівське просвічування дефектних стінок не виявив наявності включень, які могли бути причиною виникнення негерметичності.

Наступним кроком досліджень особливостей формування негерметичності та визначення причини течії у виливках «Корпус» було виготовлення зламу в дефектних місцях (рисунок 3.2).

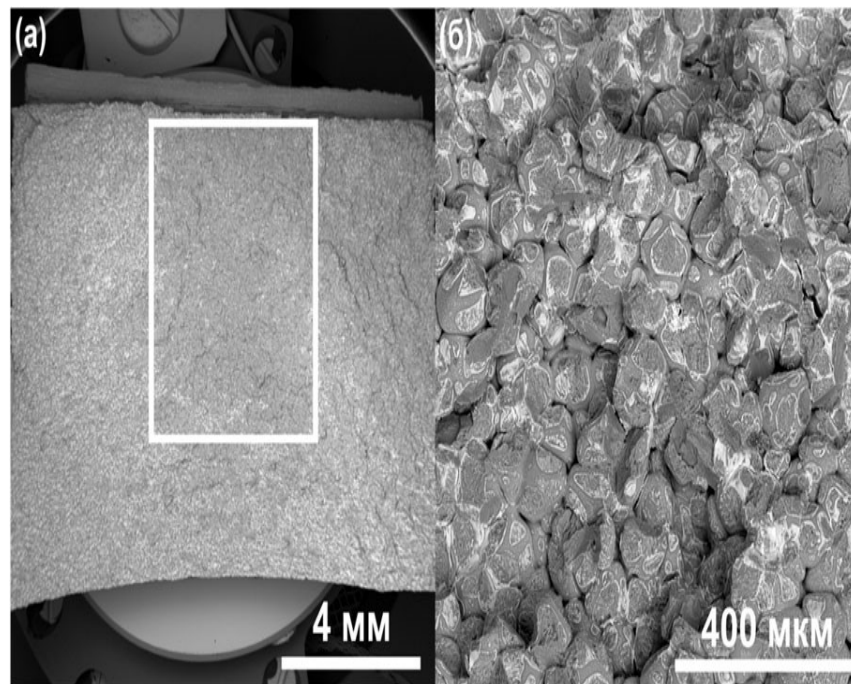


Рисунок 3.2 – Злам стінки з дефектною областю негерметичності виливки.

Для більш детального аналізу, злам збільшили та дослідили на оптичному мікроскопі (рисунок 3.3).

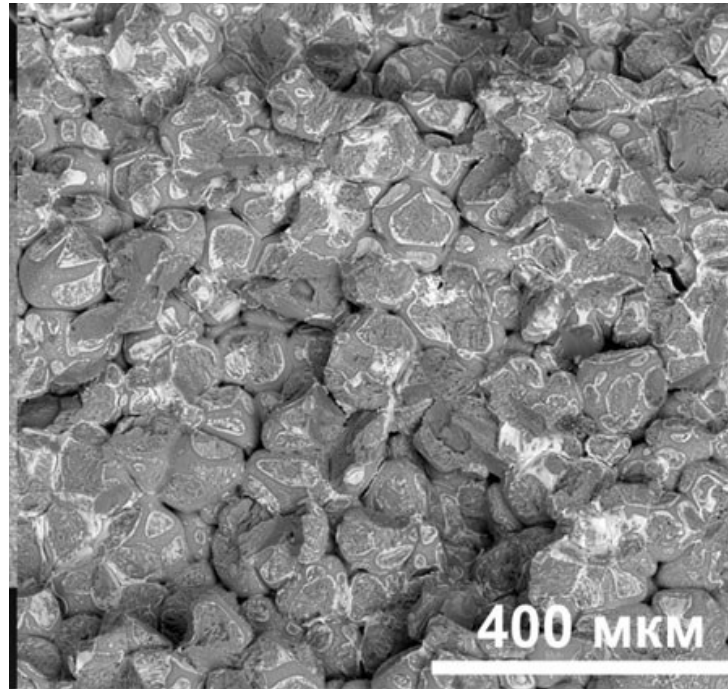


Рисунок 3.3 – Мікроструктура зламу стінки в області негерметичності виливки міждендритна пористість у дефектній області.

З дослідження мікроструктури (рис. 3.3) виявлено, що в дефектній області виливки спостерігається велика зона міждендритної пористості. На що вказують оголені гілки дендритів, що з'являються у виливку при недостатньому живленні дендритів, що ростуть, рідким сплавом.

Слід зазначити, що недостатнє живлення дендритів відбувається через ускладнене переміщення рідини зверху (із прибутку) вниз за наявності розвиненої двофазної області у виливку, яка характерна для магнієвих сплавів під час лиття в піщано-глинясті форми. Все це обумовлює вихід розплаву з міждендритного простору ростучої двофазної області, та спричиняє утворення розвинених порожнин, що порушують герметичність виливків.

Таким чином, прямий вимір пористості у виливках показав, що герметичність сплаву пов'язана з пористістю їх кількістю в структурі виливки, а також їх формою.

3.1 Особливості кристалізації та затвердіння магнієвих ливарних сплавів

Магнієві ливарні сплави в принципі не схильні до утворення газової пористості через велику розчинність водню в рідкому та твердий стан. Слід зазначити, що утворення газової пористості в литій структурі досліджуваних сплавів взагалі малоімовірне завдяки присутності хімічно активного цирконію, який зв'язує водень у нерозчинні гідриди. Тому схильність магнієвих сплавів, що містять цирконій, до появи мікропористості в структурі виливків з них визначається характером двофазної області, що формується, в затвердіваючому виливку.

Можна припустити, що кількість легуючих компонентів впливає на процес кристалізації сплаву і форму усадки не лише через зміни інтервалу кристалізації, але й за рахунок відмінності у величині прихованої теплоти кристалізації. Результати досліджуваних магнієвих ливарних сплавів МЛ 10 та МЛ 12 представлено на рисунку 3.4.

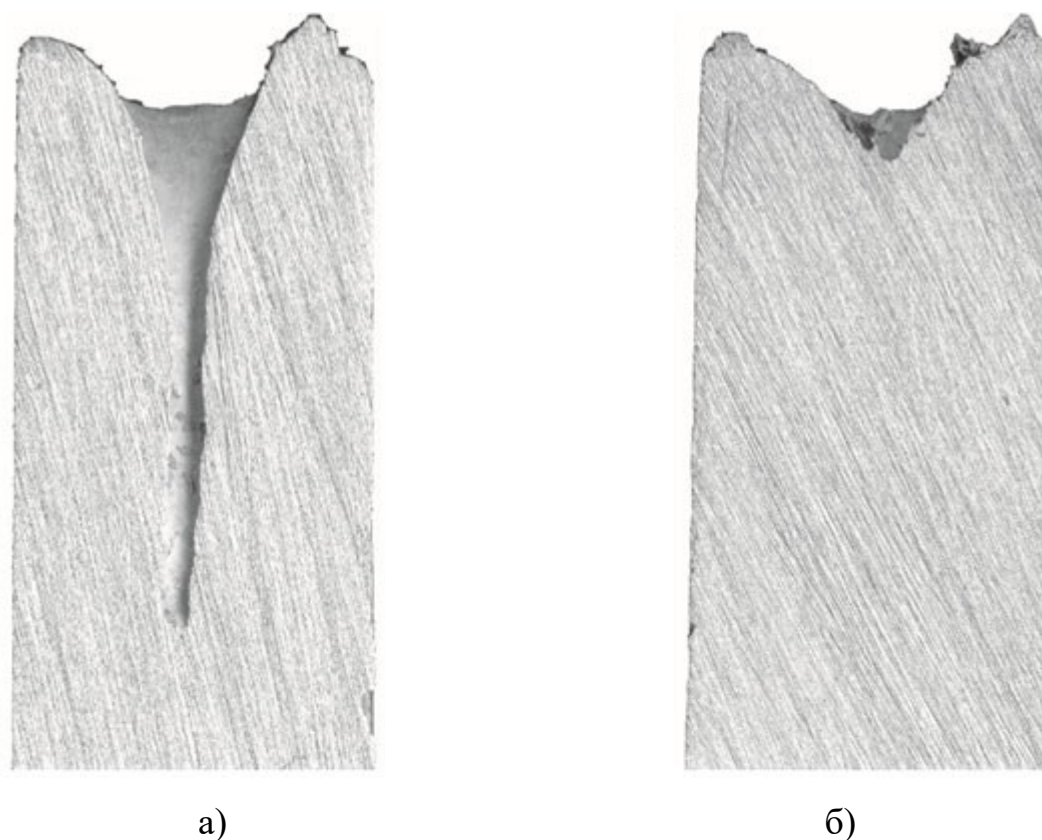


Рисунок 3.4 – Усадочні раковини в магнієвих ливарних сплавах:

а) – МЛ 10; б) – МЛ 12

З рисунка 3.4, очевидно можна бачити, що при затвердінні циліндричних зразків з досліджуваних магнієвих ливарних сплавів явно глибока усадочна раковина спостерігалася в сплаві МЛ10 (рис. 3.4 а). При затвердінні досліджуваного магнієвого ливарного сплаву МЛ 12 концентрована усадочна раковина відсутня (рис. 3.4, б).

Об'єм усадочної раковини у виливках досліджуваних магнієвих ливарних сплавах МЛ10 та МЛ 12 представлений рисунку 3.5.

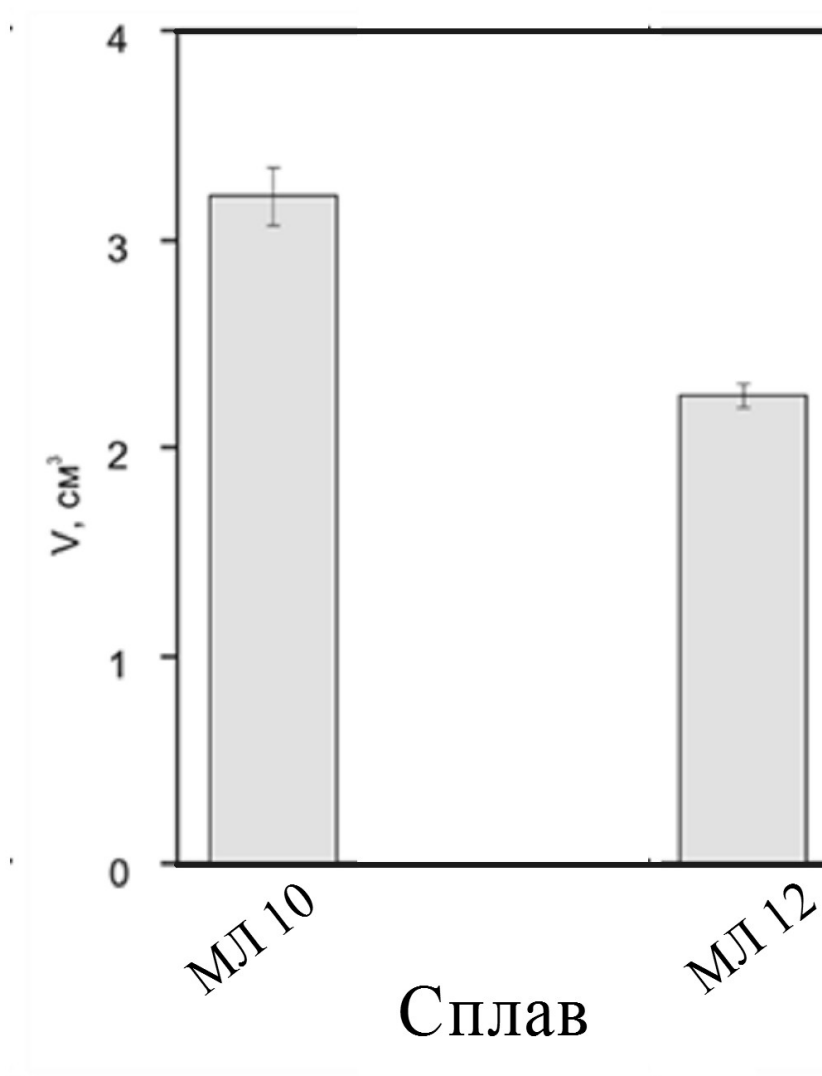


Рисунок 3.5 – Об'єм усадочних раковин в досліджуваних магнієвих ливарних сплавах МЛ10 та МЛ 12

Виявлено, що сплав МЛ 10, що має більш глибоку усадочну раковину, має велику величину питомої теплоти кристалізації. Слід припустити, що суміщення вузького інтервалу кристалізації і значного тепловиділення при кристалізації сплаву МЛ 10 призводить до формування глибокої усадкової раковини. На відмінну в сплав МЛ 12 форма усадкової раковини сильно відрізняється від магнієвого ливарного сплаву МЛ 10. Магнієвий сплав МЛ 12 формує неглибоку раковину, що не мають концентрованої вирви в центральній частині. Основною відмінністю складу сплаву МЛ 12 від МЛ 10 є кількість цинку, що міститься в даних сплавах вказаний в таблиці 3.1.

Таким чином, значна кількість цинку в сплаві МЛ 12 призводить до розширення температурного інтервалу кристалізації та зниження питомої теплоти кристалізації сплаву, що обумовлює формування неглибокої усадкової раковини.

Аналогічну тенденцію можна спостерігати і при виливанні плоских зразків з досліджуваних магнієвих ливарних сплавів показаних на рисунку 3.6.



а)

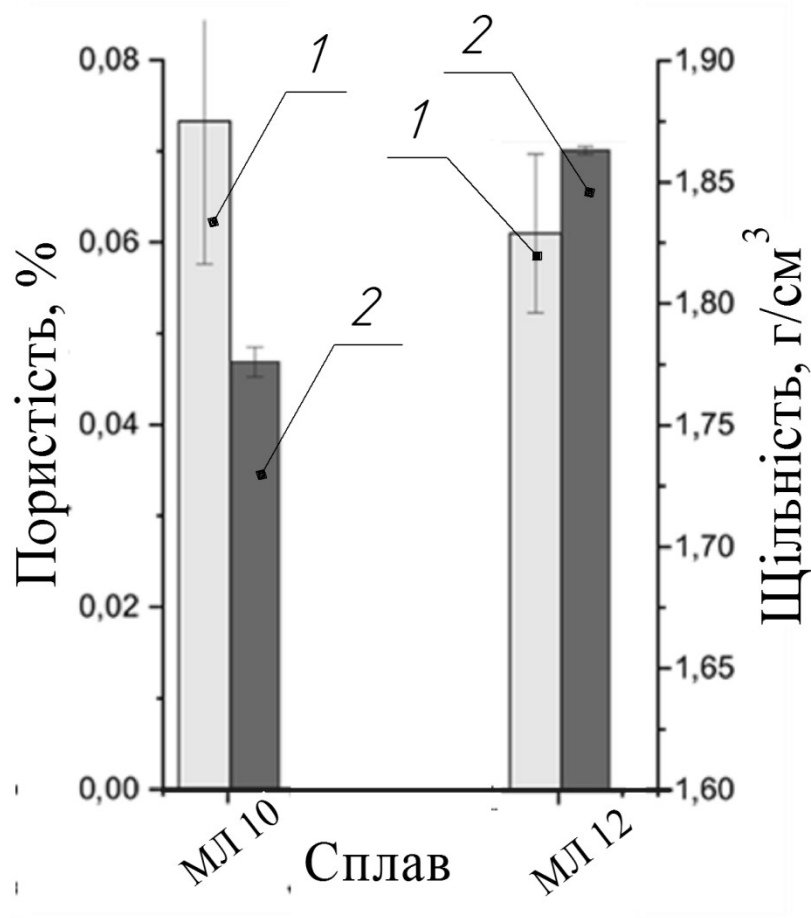


б)

Рисунок 3.6 – Зразки на пористість зі сплавів МЛ10 (а), МЛ 12 (б)

Дослідження пористості сплавів МЛ 10 та МЛ12 рисунку 3.6 аналогічно виявлено, що концентрована усадка спостерігалася в зразку зі сплаву МЛ 10. На

рисунку 3.7 представлені результати вимірювання пористості порівнюваних сплавів на зразках.



1 – пористість; 2 – щільність.

Рисунок 3.7 – Пористість та щільність досліджених сплавів, визначені гравіметричним методом та методом гідростатичного зважування відповідно

Пористість та щільність досліджених сплавів отримували з пластин товщиною 30 мм за однакових умов твердіння, відлитих в піщано-глинясту форму. Визначення пористості проводилося гравіметричним способом.

3.3 Особливості формування герметичності у виливках з магнієвих сплавів

Можна бачити, що висновки про вплив темпу кристалізації та величини інтервалу кристалізації на пористість у сплавах справедливі лише частково.

Виявлено, що сплав МЛ 12 має практично таку ж пористість як і сплав МЛ 10, причому щільність сплаву МЛ12 набагато вища, ніж в МЛ10. Сплав МЛ 12 має відносно велику пористість при значній щільності. Однак, найбільше збільшення маси випробуваних зразків магнієвих ливарних сплавів за рахунок поглинання ними поліетилсиліксанової рідини можна спостерігати в сплаві МЛ 10, який демонструє досить вузький інтервал кристалізації та максимальний розмір усадочної раковини (рис. 3.5), хоча за припущеннями повинен мати найменшу пористість.

Несподіваний результат, оскільки великий розмір усадкової раковини в сплаві вказує на малу кількість утвореної усадочної пористості, оскільки майже все зменшення об'єму при охолодженні рідкого металу і переході його в твердий стан реалізується у вигляді усадочних раковин. Але сплав МЛ10, який продемонстрував найбільшу усадочну раковину, водночас поглинає найбільшу кількість поліетилсиліксанової рідини (рис. 3.7). Тим часом сплав МЛ 12 має найменшу глибину усадочної раковини та відповідно, повинен мати найбільш розвинену пористість, але кількість поглиненої поліетилсиліксанової рідини в нього менша.

Така ж слід розуміти, що метод визначення об'єму усадочної раковини, що використовували в даних дослідженнях магістерської роботи, не може бути повністю об'єктивним для оцінки ймовірного загального об'єму пористості в сплавах, оскільки, не враховує усадку, що компенсується за рахунок зниження рівня металу у формі, та показує лише об'єм відкритої пористості, не враховуючи пори, що не з'єднуються з поверхнею дослідних зразків. На рисунку 3.8 запропонована схема формування усадочної раковини у виливку.

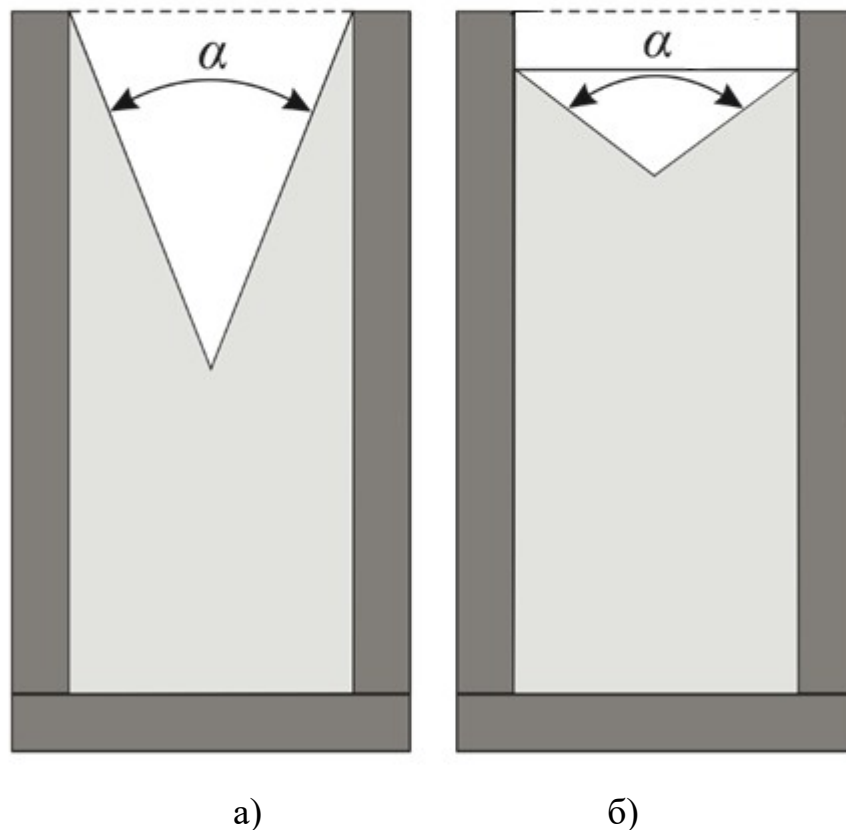


Рисунок 3.8 – Схема утворення усадочних раковин в досліджуваних сплавах з малим (а) і великим (б) кутом (α) розкриття раковини

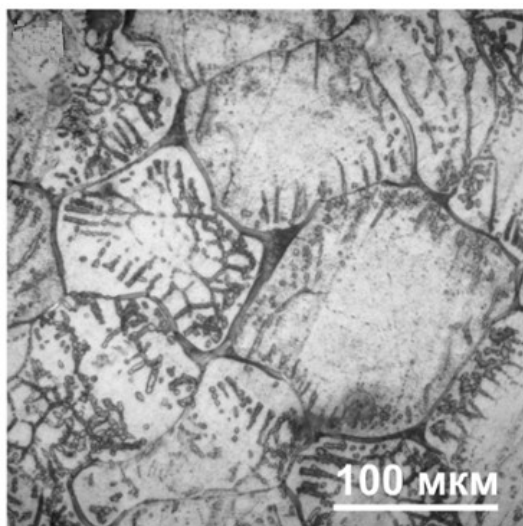
Можна бачити, що чим більше кут розкриття усадкової раковини (а) у виливку, тим більша частина усадки може компенсуватися за рахунок зниження рівня металу у формі. Загальна усадочна раковина являє собою суму об'єму, що утворився за рахунок зменшення рівня розплаву від початкового, до рівня розплаву після затвердіння та об'єму раковини.

Таким чином, сплав МЛ 10 реалізує усадку так, як схематично показано на рисунку 3.8 а, тому зменшення рівня розплаву в процесі затвердіння у них практично не відбувається, а вся усадка формується у вигляді раковини. Навідміну в сплаві МЛ 12 реалізується усадка за схемою, що демонструється на рисунку 3.50, б. і для нього визначити зниження рівня металу у формі практично важко. Це може пояснюватися наявністю концентрованих раковин в реальній виливці зі сплаву МЛ 12 хоча в циліндричному зразку вона не була значною.

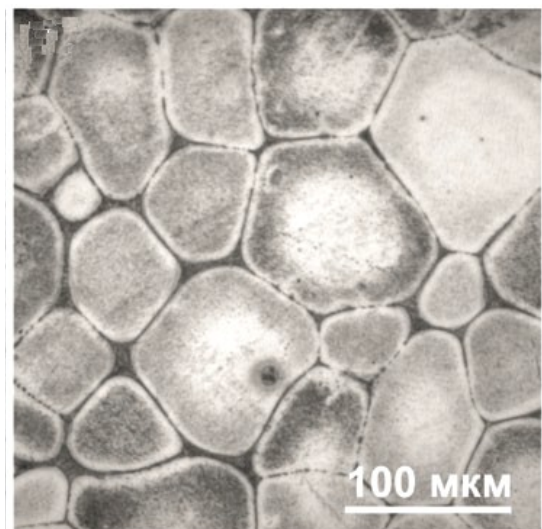
Принципову відмінність сплаву МЛ10 від МЛ 12, що призводить до утворення великої кількості відкритої усадочної пористості, можна помітити в їх складі (таблиця 3.1). З таблиці 3.1 можна бачити, що сплав МЛ10 є менш легованим в порівнянні зі сплавом МЛ 12. Загалом у магнієвому ливарному сплаві МЛ 10 міститься 2,8 % мас. легуючих компонентів без урахування цирконію, якого приблизно у 2 рази менше, ніж у МЛ12 сплавах. Таким чином, дана різниця відображається на щільності, яка є меншою в сплаві МЛ10 ніж в МЛ 12. В результаті кількість евтектичної фази у структурі МЛ 12 має бути набагато більше, ніж у сплаві МЛ 10

Слід зазначити, що мінімальна кількість евтектики призводить до того, що в момент твердіння евтектики навколо зерен твердого розчину на основі магнію утворюється дуже тонкий прошарок евтектичної рідини, яка затвердіває зі зменшенням об'єму, що обумовлює утворення великих протяжних порожнин з невеликий об'ємом. Дані канали, що утворюються в стінках виливків можуть призводити до негерметичності литого металу, оскільки вони можуть проходити через всю їх товщину.

Результати досліджень мікроструктури досліджуваних магнієвих ливарних сплавів МЛ 10 та МЛ 12 показані на рисунку 3.9.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Мікроструктура дослідних сплавів МЛ 10 (а) та МЛ 12 (б)

Дослідження мікроструктури досліджуваних магнієвих ливарних сплавів МЛ 10 та МЛ 12 проводили на зразках отриманих в однакових умовах при заливанні в піщано-глинясту форму.

Слід зазначити, що у разі великої кількості евтектики виділення інтерметалічної фази більш крупні, що обумовлює утворення пробок з евтектичної фази між зернами твердого магнієвого розчину в литому розплаві, що відновлюють герметичність литого металу.

Дослідження мікроструктури дослідних сплавів виявлено, у структурі МЛ 10 спостерігаються дуже тонкі, але протяжні порожнини, розташовані за межами зерен (рис. 3.9, а), у той час як у сплаві МЛ 12, (рис. 3.9, б) такого практично не спостерігається, і пористість має компактну будову. Дане можна пояснити більшою кількістю евтектики в структурі МЛ12. Тому реальна герметичність сплаву МЛ10 поступається сплаву МЛ 12, який має більшу кількість евтектики в структурі.

Таким чином, можна стверджувати, що однією з основних причин формування протікання у виливках зі сплаву МЛ 10 є недостатня кількість евтектики в структурі. Виходячи з цього, одним із напрямків у вдосконаленні сплаву для герметичних виливків є збільшення кількості евтектики в литій структурі до прийнятного рівня, що забезпечує замикання міждендритної пористості.

Висновки до третього розділу

1. Розроблено схему виливки зразків для дослідження герметичності зразків
2. Запропонована методика визначення щільності та пористості магнієвих ливарних сплавів МЛ10 та МЛ 12
3. Запропоновано методика проведення металографічних досліджень мікроструктури магнієвих ливарних сплавів.

1. Дослідження показали, що головною причиною порушення герметичності виливків зі сплаву МЛ10 є висока пористість, спричинена недостатньою кількістю евтектики в структурі та міждендритними порожнинами.

2. Для сплаву МЛ10 характерні вузький інтервал кристалізації та значне тепловиділення, що призводить до утворення концентрованих усадкових раковин. У сплаві МЛ12 розширений інтервал кристалізації та більша кількість евтектики забезпечують компактнішу структуру пористості, що позитивно впливає на герметичність.

3. Сплав МЛ12 демонструє вищу герметичність завдяки більшій кількості евтектичної фази, яка сприяє замиканню міждендритних порожнин. У сплаві МЛ10 пористість має протяжний характер, що значно знижує герметичність.

4. Встановлено, що зниження щільності сплаву МЛ10 у порівнянні з МЛ12 пов'язане з меншою кількістю легуючих елементів, що впливає на утворення пористості.

5. Для підвищення герметичності виливків зі сплаву МЛ10 рекомендовано збільшити кількість евтектики в структурі шляхом легування та оптимізації технологічних процесів лиття.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень встановлено, що герметичність магнієвих виливків, пов'язана не стільки з усадковою мікропористістю, що утворюється в ході затвердіння виливки в умовах щодо повільного охолодження, властивого лиття в разові піщані форми, скільки з формою і протяжністю мікропор у виливку.

Виявлено, що сплав, що має незначну кількість усадочних пір МЛ 10 програє в герметичності сплаву з більшою часткою пір у виливках МЛ 12. Показано, що визначальним для отримання герметичної виливки є вузький температурний інтервал кристалізації сплаву та наявність у структурі виливки достатньої кількості евтектичної складової для блокування порожнин, що утворюються в тілі виливки внаслідок утрудненого живлення через двофазну область.

Встановлено, що сплав МЛ 10 демонструє максимальну кількість відкритої пористості в зразках литих сплавів, що веде до негерметичності тонкостінних виливків з нього. Дослідження показали, що головною причиною порушення герметичності виливків зі сплаву МЛ10 є висока пористість, спричинена недостатньою кількістю евтектики в структурі та міждендритними порожнинами.

Для сплаву МЛ10 характерні вузький інтервал кристалізації та значне тепловиділення, що призводить до утворення концентрованих усадкових раковин. У сплаві МЛ12 розширений інтервал кристалізації та більша кількість евтектики забезпечують компактнішу структуру пористості, що позитивно впливає на герметичність.

Сплав МЛ12 демонструє вищу герметичність завдяки більшій кількості евтектичної фази, яка сприяє замиканню міждендритних порожнин. У сплаві МЛ10 пористість має протяжний характер, що значно знижує герметичність.

Встановлено, що зниження щільності сплаву МЛ10 у порівнянні з МЛ12 пов'язане з меншою кількістю легуючих елементів, що впливає на утворення пористості.

Для підвищення герметичності виливків зі сплаву МЛ10 рекомендовано збільшити кількість евтектики в структурі шляхом легування та оптимізації технологічних процесів лиття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белоусов, Н. Н. Современные направления работ по модифицированию алюминиевых сплавов / Модифицирование силуминов: сб. статей. – Киев, 1970. – С. 20–52.
3. Москалев І. Н. Ливарні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. – К.: НМКВО, 1993. – 368с.
6. Сабірзянов Т. Г. Теплотехніка ливарних процесів / Т.Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 402 с.
7. Реді І. Технологічні основи лиття витоплюваними моделями. Дніпропетровськ: Ліра, 2006. – 1056 с.
8. Голофаєв А.М., Гутько Ю.І., Тараненко Н.О. Технологічна оснастка ливарного виробництва: Навчальний посібник – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. - 304 с.
9. Технологія конструкційних матеріалів: навч. посіб. /С. В. Марченко, О. П. Гапонова, Т. П. Говорун, Н. А. Харченко. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – 146 с.
10. Science and Technology of Casting Processes / edited by Malur Srinivasan. – Rijeka : InTech, 2012. – 350 p.
11. Griffith W.M, Sanders R.E.J., Halderman G.J. High-Strength PM AluminumAlloys, 1982, p. 209.
12. Nath J. AluminumCastingsEngineeringGuide : USA: ASM International, 2018. – 316 p
13. Лакеев А.С., Щегловитов Л.А., Кузьмин Ю.Д. Прогрессивные способы изготовления точных отливок : Киев: Техніка, 1984. – 160 с
14. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. [Текст]: - К.: Держстандарт України, 1995.– 49 с.
15. 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.

16. Протоковілов І. В. Магнітокерована електрошлакова плавка багатокomпонентних титанових сплавів: Дис...канд. техн. наук / НАН України; Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона. – Київ, 2006. – 178 с.

17. Taylor, J.A. TheeffectofIroninAl-SiCastingAlloys / J.A. Taylor // 35thAustralian FoundryInstituteNationalConference. - Adelaide, Australia, 2004. - P.148-157.

18. Dobrzański L.A. et al. Structure and properties of magnesium cast alloys // J. Mater. Process. Technol. 2007. Vol. 192-193. P. 567–574.

19. Magnesium alloys and their applications / ed. Kainer K.U. Weinheim ; Chichester: Wiley-VCH, 2000. 798 p.

20. Pollock T.M. Weight Loss with Magnesium Alloys // Science. 2010. Vol 328, Iss 5981.pp. 986-987 DOI: 10.1126/science.11828483.

21. Friedrich H.E., Mordike B.L. Magnesium casting alloys // Magnes. Technol. Metall. Des. Data Appl. 2006. P. 145–218.

22. Robert L. Edgar Global Overview on Demand and Applications for Magnesium Alloys //Magnesium Alloys and their Applications materials of International Congress «Magnesium Alloys and their Applications» 26-28 September 2000 in Munich, pp. 3-8

23. Rainer Schmid-Fetzer, Joachim Gröbner, Dmytro Kevorkov Focused Development of Magnesium-Alloys Using Computational Thermochemistry as a Powerful Tool // Magnesium Alloys and their Applications materials of International Congress «Magnesium Alloys and their Applications» 26-28 September 2000 in Munich, pp. 9-13

24. StJohn D.H., Qian M.A., Easton M.A., Cao P., Hildebrand Z. Grain refinement of magnesium alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 2005. Vol. 36. P. 1669–1679.

25. Hidalgo-Manrique P., Robson J.D., Pérez-Prado M.T. Precipitation strengthening and reversed yield stress asymmetry in Mg alloys containing rareearth elements: A quantitative study//Acta Materialia, 2017, Vol. Precipitation strengthening and reversed yield stress asymmetry in Mg alloyscontaining rare-earth elements, P. 456-467. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.019>
26. Agnew, S.R., 2012. Deformation mechanisms of magnesium alloys, in: Advances in Wrought Magnesium Alloys. Elsevier, pp. 63–104. <https://doi.org/10.1533/9780857093844.1.63>
27. J.W. Christian, S. Mahajan, Deformation twinning, Progress in Materials Science, Vol. 39, Iss. 1–2, 1995, P. 1-157, [https://doi.org/10.1016/0079-6425\(94\)00007-7](https://doi.org/10.1016/0079-6425(94)00007-7).
28. Barnett, M.R., 2012. Twinning and its role in wrought magnesium alloys, in: Advances in Wrought Magnesium Alloys. Elsevier, pp. 105–143. <https://doi.org/10.1533/9780857093844.1.105>
29. Nan, X.-L., Wang, H.-Y., Zhang, L., Li, J.-B., Jiang, Q.-C., 2012. Calculation of Schmid factors in magnesium: Analysis of deformation behaviors. Scripta Materialia 67, 443–446. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.05.042>
30. Barnett, M.R., Keshavarz, Z., Beer, A.G., Atwell, D., 2004. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg–3Al–1Zn. Acta Materialia 52, 5093–5103. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.07.015>
31. Stanford, N., Barnett, M.R., 2013. Solute strengthening of prismatic slip, basal slip and twinning in Mg and Mg–Zn binary alloys. International Journal of Plasticity 47, 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.01.012>
32. Nie, J.F., 2003. Effects of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in magnesium alloys. Scripta Materialia 48, 1009–1015. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00497-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00497-9)
33. Nie, J.-F., 2012. Precipitation and Hardening in Magnesium Alloys. Metall Mater Trans A 43, 3891–3939. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1217-2>

34. Cáceres, C.H., Rovera, D.M., 2001. Solid solution strengthening in concentrated Mg–Al alloys. *Journal of Light Metals* 1, 151–156.

[https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(01\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(01)00008-6)

35. Hutchinson, C.R., Nie, J.F., Gorsse, S., 2005. Modeling the precipitation processes and strengthening mechanisms in a Mg-Al-(Zn) AZ91 alloy. *Metall Mater Trans A* 36, 2093–2105. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0330-x>

36. Gao L., Chen R.S., Han E.H. Effects of rare-earth elements Gd and Y on the solid solution strengthening of Mg alloys//*Journal of Alloys and Compounds*, 2009, Vol. 481, No. 1-2, P. 379-384.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.02.131>

37 Wang, F., Bhattacharyya, J.J., Agnew, S.R., 2016. Effect of precipitate shape and orientation on Orowan strengthening of non-basal slip modes in hexagonal crystals, application to magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A* 666, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.056>

38. Mendis, C.L., Kainer, K.U., Hort, N., 2015. High Strength Magnesium Alloys Through Precipitation Hardening and Micro Alloying: Considerations for Alloy Design. *JOM* 67, 2427–2432. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1561-y>

38. Robson, J.D., Stanford, N., Barnett, M.R., 2011. Effect of precipitate shape on slip and twinning in magnesium alloys. *Acta Materialia* 59, 1945–1956.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.060>

39. Abaspour, S., Cáceres, C.H., 2015. Thermodynamics-Based Selection and Design of Creep-Resistant Cast Mg Alloys. *Metall Mater Trans A* 46, 5972 – 5988. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3128-5>

40. Wang J., Yuan Y., Chen T., Wu L., Chen X., Jiang B., Wang J., Pan F. Multi-solute solid solution behavior and its effect on the properties of magnesium alloys//*Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, Vol. 10, No. 7, P. 1786-1820.

<https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.06.015>

41. Mordike B.L., Ebert T. *Magnesium Properties — applications — potential*//*Materials Science and Engineering A*, 2001. P. 37 – 45

42. Pan F., Yang M., Chen X. A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys//Journal of Materials Science & Technology, 2016, Vol. 32, No. 12, P. 1211-1221.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2016.07.001>

43. Polmear I. Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. – Elsevier, 2005.

44. Cáceres C.H., Rovera D.M. Solid solution strengthening in concentrated Mg–Al alloys//Journal of Light Metals, 2001, Vol. 1, No. 3, P. 151- 156.

45. Yang M., Pan F. Effects of Sn addition on as-cast microstructure, mechanical properties and casting fluidity of ZA84 magnesium alloy//Materials & Design, 2010, Vol. 31, No. 1, P. 68-75. doi:10.1016/j.matdes.2009.07.018

46. Yang M. Effects of Sr on the microstructure, tensile and creep properties of AZ61-0.7Si magnesium alloy//International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, Vol. 16, No. 1, P. 89-95.

47. Yang Z., Li J., Zhang J., Lorimer G., Robson J. Review on Research and Development of Magnesium Alloys//Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008, Vol. 21, No. 5, P. 313-328.

48. Andersson J.O., Helander T., Höglund L., Shi P.F., Sundman B. Thermo-Calc and DICTRA, Computational tools for materials science. CALPHAD. 2002. Vol. 26. P. 273–312.

49. Thermo-Calc Software TTMG3 Magnesium alloys database version 3 (accessed 1 March 2017).

50. Avraham S., Maoz Y., Bamberger M. Application of the CALPHAD approach to Mg-alloys design//Calphad, 2007, Vol. 31, No. 4, P. 515-521.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2007.03.004>

51. Luo Q., Guo Y., Liu B., Feng Y., Zhang J., Li Q., Chou K. Thermodynamics and kinetics of phase transformation in rare earth–magnesium alloys: A critical review//Journal of Materials Science & Technology, 2020, Vol. 44, Thermodynamics and kinetics of phase transformation in rare earth – magnesium alloys, P. 171-190.

52. Schmid-Fetzer R., Gröbner J. Focused Development of Magnesium Alloys Using the Calphad Approach//Advanced Engineering Materials, 2001, Vol. 3, No. 12, P. 947.

53. Hu Z., Yin Z., Yin Z., Tang B., Huang X., Yan H., Song H., Luo C., Chen X. Influence of Sm addition on microstructural and mechanical properties of as-extruded Mg–9Li–5Al alloy//Journal of Alloys and Compounds, 2020, Vol. 842, P. 155836. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155836>

54. Liu Z.R., Li D.Y. The electronic origin of strengthening and ductilizing magnesium by solid solutes//Acta Materialia, 2015, Vol. 89, P. 225-233.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.01.051>

55. Yoo M.H. Slip, twinning, and fracture in hexagonal close-packed metals//Metallurgical Transactions A, 1981, Vol. 12, No. 3, P. 409-418.
<https://doi.org/10.1007/BF02648537>

56. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals//Applied Physics Letters, 2011, Vol. 99, No. 4, P. 041907. doi:10.1063/1.3614475

57. Lu H., Hua G., Li D. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function—An alternative parameter for materials design//Applied Physics Letters, 2013, Vol. 103, No. 26, P. 261902.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4852675>

58. Hidalgo-Manrique P., Herrera-Solaz V., Segurado J., Llorca J., Gálvez F., Ruano O.A., Yi S.B., Pérez-Prado M.T. Origin of the reversed yield asymmetry in Mg-rare earth alloys at high temperature//Acta Materialia, 2015, Vol. 92, P. 265-277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.03.053>

59. Статическое и усталостное разрушение образцов из магниевых сплавов АМ60 с различным размером зерна / Г. В. Клевцов, Р. З. Валиев, Н. А. Клевцова, Кулясова О.Б., Фесенюк М.В. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – № 2(108). – С. 144-149. – EDN PUZMBV.

60. Влияние размера зерна на механические свойства и способность чистого магния и сплава МА14 поглощать водород при коррозионном растрескивании под напряжением / Е.Д. Мерсон, В. А. Полуянов, П. Н. Мягких, Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 94-99. – DOI 10.22226/2410-3535-2020-1-94-99. – EDN WSNEXC.

61. Влияние зеренной структуры материалов на усталостную долговечность в малоцикловой области / В. А. Скрипняк, Н. В. Скрипняк, В. В. Скрипняк, Козулин А.А., Скрипняк Е.Г. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7-3. – С. 83-85. – EDN SJBOON.

62. Luo A., Pekguleryuz M.O. Cast magnesium alloys for elevated temperature applications//Journal of Materials Science, 1994, Vol. 29, No. 20, P. 5259-5271.

63. Chen H., Liu J., Huang W. Oxidation behavior of molten magnesium in air/HFC-R134a atmospheres. J. Mater. Sci. 2006. Vol. 41, Is. 23. P. 8017–8024.

64. Chen H., Liu J., Huang W. Characterization of the protective surface films formed on molten magnesium in air/HFC-R134a atmospheres. Mater. Charact. 2007. Vol. 58, Is. 1. P. 51–58.

64. ДСТУ ISO 3116:2013 Магній та магнієві сплави. Здеформовані магнієві сплави. Технічні умови (ISO 3116:2007, IDT).

65. ДСТУ ISO 16220:2008 Магній і магнієві сплави. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови (ISO 16220:2005, IDT) (з 01.01.2010).

66. ДСТУ 2839-94 Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови (ГОСТ 1583-93). З Поправками (ІПС № 11-95), (ІПС № 4-97), (ІПС № 7-97), (ІПС № 10-97), (ІПС № 2-2004), (ІПС № 11-2005).