

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний
(повне найменування інституту, факультету)

Фізичного матеріалознавства
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Модулювання впливу швидкості охолодження литва зі сплава МЛ10 на його параметри мікроструктури»

Виконав: студент(ка) VI курсу, групи ІФ219м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Демиденко Е. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шаломсєв В. А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Цибірко Е. І.

(прізвище та ініціали)

2020 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інженерно-фізичний
 Кафедра Фізичне матеріалознавство
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 132 Матеріалознавство (Прикладне матеріалознавство)
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) _____
(назва освітньої програми(спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри д.т.н., професор
Ольшанецький В. Ю.

«16» жовтня 2020 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Демиденку Едуарду Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Моделювання впливу швидкості охолодження литва зі сплаву МЛ10 на його параметри мікроструктури

керівник проекту (роботи) Шаломсєв Вадим Анатолійович, д.т.н., професор

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

Затверджені наказом закладу вищої освіти від « » 20 20 року №

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Литий сплав МЛ10, метод виготовлення відливок — литво в піщано-глинисту форму

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд літературних джерел; методика проведення досліджень; результати дослідження та їх обговорення; економічна ефективність від використання результатів дослідження; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Тривимірна модель формозразку; криві охолодження для різних технологій литва; моделювання швидкості охолодження; вплив швидкості кристалізації на мікроструктуру; мікроструктура зразків; макрофрактограми зламів зразків

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	приймав виконане завдання
1, 2, 3	Шаломєєв В. А., професор		
4	Круглікова В. В., доцент		
5	Нестеров О. В., доцент		
№ к	Скач О. В.		

7. Дата видачі завдання « 10 » Вересня 2020 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел	10.09 – 10.10	
2	Методика проведення досліджень	10.10 – 31.10 1.11 – 5.11	
3	Результати дослідження та їх обговорення	6.11 – 25.11	
4	Економічна ефективність від використання результатів дослідження	25.11 – 3.12	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	3.12 – 10.12	

Студент(ка)

Демиденко Е. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

Шаломєєв В. А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 90с., 10 рис., 15 табл., 26 джерел, 9 додатків.

Об'єкт дослідження – ливарний магнієвий сплав МЛ10.

Мета дослідження – вивчення впливу швидкості охолодження при литві на параметри мікроструктури та механічні властивості сплаву МЛ10.

У роботі досліджено можливість підвищення механічних властивостей сплаву МЛ10 за рахунок підвищення швидкості охолодження литва.

Проведено аналіз наукової інформації про вплив швидкості охолодження литва на параметри мікроструктури та механічні властивості ливарного магнієвого сплаву. Викладено методику проведення дослідження. Проаналізовано вплив швидкості охолодження на структуру та властивості сплаву МЛ10, зроблені висновки. Розраховано економічний ефект від впровадження нової технології у виробництво. Розглянуто охорону праці при проведенні досліджень та безпеку у надзвичайних ситуаціях.

МЛ10, ШВИДКІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ,
ЗЕРНО, СТРУКТУРА, МОДЕЛЮВАННЯ, КОРПУС ПАЛИВНОГО НАСОСУ,
ЛИТВО, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Огляд літературних джерел	9
1.1 Магнієві сплави, їх властивості та класифікація	9
1.1.1 Маркування магнієвих сплавів	10
1.1.2 Класифікація магнієвих сплавів	12
1.1.2.1 Деформівні магнієві сплави	13
1.1.2.2 Ливарні магнієві сплави	14
1.2 Литво магнієвих сплавів	16
1.2.1 Литво під високим тиском	16
1.2.2 Литво під вакуумом.....	17
1.2.3 Литво в пісок	18
1.2.4 Литво в постійні форми	18
1.3. Процеси кристалізації при литві.....	19
1.4 Деформація магнієвих сплавів.....	22
1.4.2 Екструзія магнієвих сплавів	23
1.4.3 Деформаційні методи, що дозволяють отримувати УМЗ і наноструктури	25
1.5 Термічна обробка магнієвих сплавів	27
2 Методика проведення досліджень	33
2.1 Проведення дослідних плавок, термічної обробки і визначення хімічного складу металу	33
2.2 Визначення механічних властивостей	34
2.3 Моделювання процесів лиття за допомогою ProCast.....	34

3	Вплив швидкості охолодження на структуру та властивості сплаву Mg-Zr-Nd	38
3.1.	Моделювання технологій лиття за допомогою програми ProCast	39
3.2	Дослідження мікроструктури і механічних властивостей зразків з розробленого магнієвого сплаву Mg-Zr-Nd з різною швидкістю охолодження	46
3.3	Висновки за розділом 3	55
4	Економічна ефективність від використання результатів дослідження	56
4.1	Тенденції розвитку світового ринку технологій	56
4.2	Техніко-економічні розрахунки	60
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях Ошибка! Закладка не определена.	7
5.1	Аналіз потенційних небезпек	67
5.2	Заходи забезпечення безпеки	68
5.3	Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці	73
5.4	Заходи з пожежної безпеки	74
5.5	Заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій	75
	Висновки	78
	Перелік посилань	79
	Додаток А Криві охолодження	82
	Додаток Б Моделювання швидкості охолодження для різних технологій	83
	Додаток В Модель впливу швидкості охолодження кристалізації на відстань між осями дендритів 2-го порядку	84
	Додаток Г Модель впливу швидкості кристалізації на мікроструктуру сплаву	85
	Додаток Д Результати моделювання мікроструктури	86

Додаток Е Макрофрактограм зламів після випробування на розтяг	87
Додаток Ж Мікроструктури дослідних зразків при різних швидкостях кристалізації	88
Додаток И Мікроструктура зразків після термообробки	89
Додаток К Результати механічних випробувань	90

ВСТУП

В сучасному машинобудуванні широко застосовуються легкі кольорові сплави, зокрема на основі магнію. Головними перевагами магнієвих сплавів, що забезпечують їх широке застосування у техніці, є високі механічні властивості при малій питомій вазі, а також висока питома міцність, що робить використання легких матеріалів на основі магнію перспективним. Магнієві сплави знаходять широке застосування в авіаційній, автомобільній, текстильній і радіотехнічній промисловості, у виробництві переносних інструментів і в багатьох інших галузях техніки.

Застосування виливків з магнієвих сплавів в авіабудуванні дозволяє істотно знизити масу агрегатів, що забезпечує збільшення їх ККД, підвищення швидкості, корисного навантаження, дальності пробігу, зниження витрати палива. Постійно зростаючі вимоги до експлуатаційної надійності і довговічності авіаційної техніки обумовлює необхідність підвищення механічних властивостей і жароміцних виливків з магнієви сплавів.

У зв'язку з цим, розробка нових технологій литва магнієвих сплавів дозволить отримувати виливки з підвищеним комплексом механічних властивостей для авіаційних двигунів, що забезпечить їх надійну та довготривалу експлуатацію.

Найбільш поширеним авіаційним магнієвим сплавом є сплав МЛ10. Деталі з цього сплаву широко застосовуються для різних конструкцій в авіації, що забезпечує зменшення їх ваги та підвищенню експлуатаційних характеристик. Але, в ряді випадків, механічні та спеціальні властивості цього сплаву не відповідають сучасним вимогам, тому підвищення механічних властивостей за рахунок нової технології литва перспективним напрямком.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Магнієві сплави, їх властивості та класифікація

Основним і досить ємним споживачем магнієвих сплавів є авіаційна промисловість. В даний час з магнієвих ливарних сплавів виготовляють різноманітні вироби для літаків і вертольотів: зі сплаву МЛ15 - деталі внутрішнього набору фюзеляжів, кабіни пілота, панелей приладів, кронштейни, рами, передкрилки, елементи двигунів; зі сплаву МЛ10 - деталі насосів, редукторів, маслоагрегатів, вентиляторів, корпуси двигунів.

Також провідне місце за масштабом використання і номенклатурі виливків з магнієвих сплавів займає автомобільна промисловість. Застосування магнієвих сплавів в автомобілях, з одного боку, покращує їх експлуатаційні характеристики шляхом помітного зниження маси, з іншого - відбувається помітна економія вуглеводнів і зниження шкідливих викидів в атмосферу. Практично всі автомобілі, що сходять з конвеєрів світових виробників, мають деталі з магнієвих сплавів [1].

Особливістю магнієвих сплавів як конструкційного матеріалу при їх експлуатації є висока питома міцність. За цим показником магнієві сплави поступаються тільки титану (таблиця 1.1) [2].

Зниження маси машин за рахунок високої питомої міцності магнієвих сплавів дозволяє збільшити ККД, підвищити швидкість, корисне навантаження, знизити витрату пального. У багатьох випадках однотипні литі деталі з магнієвих сплавів на 25 ... 30% легше алюмінієвих, в чотири рази легше сталевих і в два рази легше титанових.

Таблиця 1.1 - Питома міцність сплавів [2]

Матеріали	Сталі	Латуні, бронзи	Цинкові сплави	Алюмінієві сплави	Титанові сплави	Магнієві сплави
Питома міцність Дж/кг	7...13	6...11	4...8	8...14	14...20	13...5

При негативних температурах не відбувається різкого охрупчення магнієвих сплавів, а лише незначно зменшується ударна в'язкість і відносне видовження, що робить магнієві сплави особливо придатними для роботи при криогенних температурах. Магнієві сплави мають високу теплопоглинаючу здатність. За температуропровідністю вони перевершують більшість конструкційних матеріалів. Тому в умовах передачі однакової кількості теплоти виріб з магнієвого сплаву нагрівається значно менше, ніж вироби з інших матеріалів, що забезпечує в них порівняно невеликі термічні напруги.

Магнієві сплави технологічні. Їх можна відливати всіма способами лиття. Мала тепломісткість цих сплавів дозволяє підвищити продуктивність і зменшити знос інструменту при литті під тиском в порівнянні з алюмінієвими сплавами. Деталі з магнієвих сплавів добре шліфуються, поліруються, а по легкості обробки різанням (відносна оброблюваність) вони перевершують усі інші конструкційні матеріали. Це дозволяє вести їх обробку при високих швидкостях різання не тільки твердосплавним і швидкорізальним інструментом, але і інструментом з легованої сталі [3].

1.1.1 Маркування магнієвих сплавів

Для позначення марки використовують букви та цифри. Приклад маркування: МЛ5, МА6, МА2пч, МЛ5он. Принцип маркування: буква М –

сплав на основі магнію, Л – ливарний сплав, А – деформівний, букви пч – сплав підвищеної чистоти; цифра – умовний номер сплаву [2].

У США і деяких інших країнах магнієві сплави маркують по системі, розробленої Американським товариством з випробувань матеріалів (ASTM) відповідно до хімічним складом і станом поставки. Позначення сплавів починається з двох літер, які мають два основних легованих елементів. Букви розташовуються по спадаючій вмісту елементів або при рівних їх кількостях - в алфавітному порядку. За нею йдуть цифри, що вказують вміст елементів в цілих відсотках. Наступні букви (А, В, С) відображають модифікацію сплаву за змістом другорядних легуючих елементів або домішок. Чистота сплаву збільшується від С до А, тобто А - найбільш чистий. Символ Х позначає, що сплав новий і поки не стандартизований, тобто так званий «тимчасово стандартизований сплав», наприклад AZ81XA.

Позначення магнієвих сплавів по ASTM наведені нижче:

- А — алюміній,
- Z — цинк,
- М — марганець,
- К або W — цирконій,
- Н — торій,
- Е — рідкоземельні метали,
- L — літій,
- Q - срібло.

Наприклад, сплав AZ31В містить номінально 3% алюмінію, 1% цинку, має відмінні риси по вмісту марганцю і домішок (заліза, нікелю), що показує буква В, тобто сплав середньої чистоти по домішках.

У Британському стандарті (BS) магнієві сплави позначаються символом MAG (MAGNESIUM) і порядковим номером. Для сплавів, що деформуються позначення ускладнюється введенням додаткової літери, яка вказує вид напівфабрикату, наприклад MAG-E-121 - магнієвий сплав для пресованих виробів.

Зниження маси машин за рахунок високої питомої міцності магнієвих сплавів дозволяє збільшити ККД, підвищити швидкість, корисне навантаження, знизити витрату пального. У багатьох випадках однотипні литі деталі з магнієвих сплавів на 25 ... 30% легше алюмінієвих, в чотири рази легше сталевих і в два рази легше титанових.

1.1.2 Класифікація магнієвих сплавів

Класифікація за способом виробництва:

- деформівні;
- ливарні.

Класифікація за рівнем міцності:

- маломіцні;
- середньої міцності;
- високоміцні сплави.

Класифікація за густиною:

надлегкі. До цієї категорії відносяться сплави з літієм;
легкі (всі інші магнієві сплави).

Класифікація за можливою температурою експлуатації:

- призначені для роботи при звичайних температурах (сплави загального призначення);
- жароміцні (для тривалої експлуатації до 200°C);
- високожароміцні (для тривалої експлуатації до 250...300°C);
- для роботи в умовах кріогенних температур.

1.1.2.1 Деформівні магнієві сплави

За основними легувальними елементами деформівні магнієві сплави поділяють на п'ять основних груп:

1. Сплави системи Mg-Mn мають добру технологічність та зварюваність. Сплави не зміцнюються термічною обробкою, хоча і спостерігається змінна розчинність марганцю в гратці магнію. Основною метою введення Mn є покращення зварюваності та підвищення корозійної стійкості. Представник групи – сплав MA1. З нього виготовляють ємності для бензину, мастила, деталі трубопроводів. Подвійні сплави Mg-Mn майже не використовують, більше застосування має сплав MA8, що містить 1,3% Mn, 0,2%Ce.

2. Сплави системи Mg-Al-Zn-Mn. До цієї групи належать сплави MA2-1, MA2-1пч, MA5. Сплави мають більшу міцність ($\sigma_B = 260 \dots 280$ МПа) порівняно із сплавом MA8, більш технологічні при деформуванні, добре зварюються. Недолік сплавів – це схильність до корозії під навантаженням.

3. Сплави системи Mg-Zn-Zr. До цієї групи належать сплави MA14, MA15, MA19, MA20. Сплави мають високу міцність, що зумовлено дією цирконію. Цирконій сприяє очищенню металу від заліза (утворює сполуки Zr_2Fe_3 , $ZrFe$, що осаджуються з розплаву), подрібнює зерно, стримує ріст зерен при рекристалізації, підвищує опір корозії. Найбільшу міцність серед сплавів цієї групи має сплав MA19 додатково легований неодимом та кадмієм ($\sigma_B=380 \dots 400$ МПа). Недоліком сплавів є схильність до утворення тріщин, що ускладнює деформування при підвищених температурах і зварюваність. Сплави призначені для виготовлення навантажених незварюваних деталей (обшивка літаків, деталі вантажнопідйомних машин, деталі космічних апаратів, штамповані барабани авіаційних колес, деталі вузлів управління).

4. Сплави системи Mg-Nd (MA11, MA12) відносять до жароміцних, їх використовують для деталей, які в процесі експлуатації нагріваються до $250 \dots 300^\circ\text{C}$. Вміст неодиму в сплавах знаходиться в межах 2,5...3,5%.

Жароміцність сплавів підвищується внаслідок стабілізації твердого розчину неодимом та уповільнення коагуляції зміцнювальної фази Mg_9Nd . Додатково сплави легують марганцем і нікелем (МА11), цирконієм (МА12). Марганець та нікель підвищують опір повзучості, тривалу міцність. Але введення нікелю знижує опір корозії. Цирконій сприяє подрібненню зерна, поліпшує технологічну пластичність. Сплави системи Mg-Nd можуть зміцнюватися термообробкою.

5. Сплави системи Mg-Li. До цієї групи належать сплави МА18, МА21. Основна галузь використання сплавів літако- та вертольотобудування. Зі сплаву МА18 виготовляють деталі приладів та апаратів які працюють при кімнатній та криогенних температурах, зі сплаву МА21 – крупногабаритні поковки та штамповки. При введенні літію ($\rho_{Li} = 0,53 \text{ г/см}^3$) в магній зменшується густина магнієвих сплавів.

1.1.2.2 Ливарні магнієві сплави

За хімічним складом ливарні магнієві сплави близькі до деформівних для відповідних систем. Призначення легувальних елементів таке саме як у деформівних сплавах. Основні легувальні елементи: Al, Zn, Mn, Zn, Ce, Zr, La, Nd, Y, Cd, In. Перевагою ливарних сплавів порівняно із деформівними є економія матеріалу, висока точність розмірів деталей та чистота поверхні відливок інколи без обробки різанням. Проте механічні властивості ливарних сплавів порівняно з деформівними більш низькі. Певне підвищення властивостей відбувається внаслідок подрібнення зерна. Існують різні способи впливу на розмір зерна: – перегрівання розплаву перед литвом. Використовують для сплавів легованих Al; – введення до розплаву спеціальних присадок (магнезит, хлорне залізо) та цирконію.

1. Сплави системи Mg-Al-Zn. Представники цієї групи – МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6. Основним легувальним елементом є алюміній. Для поліпшення корозійної стійкості додатково легують марганцем. Порівняно з алюмінієвими сплавами сплави МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6 мають більш широкий інтервал кристалізації (180...250°C), гіршу рідкотекучість, в об'ємі зливка утворюється значна усадкова пористість, герметичність зливок порушується. Крім того, сплави схильні до утворення гарячих тріщин. Такі недоліки негативно впливають на рівень механічних властивостей. Найкращі ливарні властивостей мають сплави МЛ5 та МЛ6, які використовують для відповідальних складних відливок (литво в земляні форми або в металевий кокіль).

2. Сплави системи Mg-Zn-Zr (МЛ12, МЛ15, МЛ8, МЛ18). Сплави мають більш високу міцність, порівняно із сплавами першої групи, властивості менш чутливі до товщини відливки та до наявності пор. Сплав МЛ12 корозійностійкий, має високу рідкотекучість, відливки щільні. Жароміцність сплаву підвищується внаслідок легування цирконієм. До недоліків слід віднести схильність до утворення тріщин при кристалізації та незадовільну зварюваність.

3. Сплави системи Mg-РЗМ-Zr (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19). Сплави мають високу жароміцність і можуть тривало експлуатуватися при температурах 250 ... 350°C та короткотривало при температурах до 400°C. Висока жароміцність сплавів пояснюється малою схильністю зміцнювальних фаз до коагуляції в інтервалі робочих температур. Основним легувальним елементом в сплавах МЛ9, МЛ10, МЛ19 є неодим, в МЛ11 – церій. Сплави зміцнюються термічною обробкою. [2]

1.2 Литво магнієвих сплавів

Розплавлений магній не пошкоджує залізо так як розплавлений алюміній, який має високу спорідненість до заліза; таким чином магнієві сплави можна плавити та зберігати в тиглях, що виготовленні з чорних металів. Розплавлений магній має тенденцію окислюватися та горіти, якщо не використовувати заходи для захисту поверхні від окислення. На відміну від алюмінієвих сплавів, які мають тенденцію утворювати безперервну непроникну оксидну плівку на ванні розплаву, що обмежує подальше окислення, сплави магнію утворюють рихлу проникну оксидне покриття на поверхні розплавленого металу. Це дозволяє кисню проходити та підтримувати горіння на поверхні. Отже, необхідний захист розплавленого металу за допомогою флюсу або захисного газового покриття для запобігання потрапляння кисню.

1.2.1 Литво під високим тиском

Литво під високим тиском (HPDC) забезпечує привабливу гнучкість при проектуванні та виробництві компонентів з легких матеріалів. Відмінні характеристики заливки матриці магнієвих сплавів дозволяють економічно виробляти великі, тонкостінні та складні відливки за допомогою цього процесу, замінюючи сталеві конструкції, що виготовленні із багаточисленних штамповок та зварних конструкцій. Відливки з магнію під тиском можуть бути спроектовані з тонкими стінками в областях, де міцність не є проблемою, та с більш товстими стінками, де вимоги до міцності вищі. Магній можна відливати з більш тонкими стінками (1 – 1,5 мм) в порівнянні з алюмінієм (2 – 2,5мм). Нестачу жорсткості магнію в порівнянні з алюмінієм можна

компенсувати розташуванням ребер зі збільшенням товщини стінки. У порівнянні з алюмінієм, магній має більш низьку температуру твердіння та меншу спорідненість до заліза в сталевому обладнанні, що призводить до значного скорочення тривалості циклу литва та збільшення строку служби штампу при литві під тиском. Існує два основних типи литва під тиском: литво під тиском з гарячою камерою та литво під тиском з холодною камерою.

1.2.2 Литво під вакуумом

Не дивлячись на високу продуктивність, найбільшим недоліком звичайного литва під тиском (магнію або алюмінію) є високий рівень пористості через захопленні гази, що виникають в результаті вприскування розплавленого металу з дуже великими швидкостями під час литва під тиском. Проблема пористості менш серйозна для тонкостінних секцій (<2,5 мм), де механічні властивості в значній мірі забезпечуються дрібнозернистою литою обшивкою без пор. Коли більш товсті стінки необхідні для жорсткості або довговічності вплив пористості на механічні властивості (особливо на пластичність та втомну міцність) більш серйозний.

Вакуумне литво під тиском – це інноваційний процес, при якому знижений тиск, що створюється в камері для вприскування та порожнині матриці безпосередньо перед вприскуванням, не залишає захопленого повітря у відливці та дозволяє виготовляти відносно великі тонкостінні відливки зі значно кращими властивостями. Відливки, що виготовленні за допомогою такого процесу, призначені для компонентів, від яких вимагаються герметичність та високі механічні властивості за рахунок термічної обробки. Таким чином, вакуумне литво під тиском розширює можливості звичайного литва під тиском при збереженні його економічних вигод. Також нині використовують литво під надвисоким вакуумом, що дозволяє отримати

відливки з вищими механічними властивостями. За рахунок зниження пористості.

1.2.3 Литво в пісок

Широкий спектр магнієвих відливок вагою до 1400 кг можуть бути виготовленні з використанням процесів литва в піщані форми. Литво в піщані форми магнієвих сплавів дуже схоже на литво інших металів, за винятком того, що для запобігання реакцій метал-форма необхідно використовувати відповідні інгібітори у формовочних сумішах та піщаних сумішах стрижня. Ці інгібітори включають наступні компоненти, що використовуються окремо чи у комбінації: сірка, борна кислота, фторборат калію та фторсилікат аммонію. Для відливок загального призначення зазвичай використовується недороге обладнання для виготовлення дерев'яних моделей. Через тенденцію до окислення та низької густини розплавленого магнію литникову систему необхідно спроектувати таким чином, щоб мінімізувати турбулентний потік та забезпечити послідовне твердіння магнієвих відливок.

1.2.4 Литво в постійні форми

Литво в постійну форму (РМС) схоже на литво в піщані форми, але відрізняється тим, що в ній використовується металева форма. Існує два основних типи процесів литва в постійну форму, в залежності від того, використовується металеві стрижні (для кожної форми) або піщані стрижні, що руйнуються (напівпостійні форми). У порівнянні з литвом у піщані форми, литво у постійні форми має переваги, включаючи кращу якість поверхні,

точний постійний контроль розмірів та покращені механічні властивості за рахунок більш швидкого твердіння. Однак є також практичні обмеження складності форм, які можна відливати у процесі РМС.

1.3. Процеси кристалізації при литві

Перехід металу із рідкого стану в твердий називається первинною кристалізацією. Вона протікає внаслідок переходу системи з нестійкого термодинамічного стану в стійкий, тобто із стану з більшою вільною енергією в стан з меншою енергією.

Однією з характеристик енергетичного стану системи є вільна енергія. Вільною енергією називають частину повної енергії речовини, яка оборотно змінюється при зміні температури, поліморфних перетвореннях, плавленні. З підвищенням температури величина вільної енергії зменшується. При температурі T_S величини вільних енергій металу в рідкому та твердому станах рівні. При температурі вище за T_S більш стійкий рідкий метал, що має менший запас вільної енергії, а нижче цієї температури більш стійкий твердий метал. Процес кристалізації буде розвиватися лише в тому випадку, коли рідкий метал охолодити нижче T_S .

Температура, при якій практично починається процес кристалізації, називається фактичною температурою кристалізації T_K . Різницю між T_S та T_K називається ступенем переохолодження ΔT .

При дуже повільному охолодженні ступінь переохолодження мала та кристалізація відбувається при температурі, близькій до рівноважної. Зі збільшенням швидкості охолодження ступінь переохолодження зростає, та процес кристалізації протікає при температурах значно більш низьких, ніж рівноважна температура кристалізації. Необхідна для кристалізації ступінь переохолодження залежить від природи та чистоти металу. Чим чистіше

метал, тим більше переохолодження потрібне для виникнення зародків твердих кристалів.

На початку кристалізації на багатьох ділянках рідкого сплаву утворюються центри кристалізації (зародки кристалів). Доки їх оточує рідина, кристали ростуть вільно та можуть мати правильну геометричну форму. Однак при зіткненні кристалів, що ростуть, їх правильна форма порушується, так як на ділянках контактів (границях) їх ріст зупиняється. Кристал зростає лиш в тому напрямку, де він контактує з рідиною. В результаті після кінцевого твердіння кристали мають несиметричну (неправильну) форму. Їх називають зернами або кристалітами.

Швидкість процесу кристалізації визначається двома величинами: швидкістю утворення центрів кристалізації та швидкістю росту кристалів.

Під швидкістю зародження центрів кристалізації розуміють число зародків, що виникають за одиницю часу в одиниці об'єму. Під швидкістю росту кристалів розуміють швидкість збільшення лінійних розмірів кристалу за одиницю часу.

Число центрів (ЧЦ) кристалізації і швидкість росту кристалів (ШР) залежать від ступеня переохолодження. При рівноважній температурі кристалізації T_s число зародків і швидкість їхнього зростання дорівнюють нулю, тому затвердіння не відбувається. При збільшенні ступеня переохолодження ці параметри зростають і досягають максимуму, але при різних ступенях переохолодження

Таким чином, швидкість охолодження визначає величину зерна: чим вона вища, тим дрібніше зерно металу. Метал, що має дрібнозернисту будову, володіє не тільки більш високою міцністю, але також і більшою ударною в'язкістю і пластичністю.

Охолодження з високою швидкістю для отримання дрібного зерна неможливо для виливків великої маси. В цьому випадку в рідкий метал вводять тугоплавкі частинки (оксиди і ін.), Які є штучними центрами кристалізації і називаються модифікаторами, а сам процес - модифікуванням.

Модифікування, практично без зміни складу металу, забезпечує при кристалізації отримання дрібного зерна.

Кристали, що утворюються в процесі затвердіння металу, можуть мати різну форму в залежності від швидкості охолодження і кількості домішок. У напрямку відводу теплоти кристал росте швидше, ніж в інших напрямках, в результаті утворюється деревовидний кристал – дендрит.

Дендритна будова кристалів є типовим для литого металу. Кристалізація рідкого металу починається біля стін виливниці. При цьому вельми інтенсивне охолодження призводить до утворення величезного числа центрів кристалізації. Через велику швидкість охолодження кристали, що утворилися, не встигають вирости, тому перша зона зливка має дрібнозернисту будову.

Після утворення першої зони умови кристалізації змінюються. Зниження температур охолоджуваного металу і підвищення температури стінок виливниці призводять до зменшення швидкості охолодження. Для цієї стадії кристалізації характерний спрямоване відведення теплоти перпендикулярно стінок виливниці. Кристали, що утворюються в цей момент, ростуть перпендикулярно стінок виливниці всередину рідкого металу. Це призводить до утворення другої зони зливка - зони стовпчастих кристалів.

В процесі подальшої кристалізації спрямованість відведення теплоти втрачається, швидкість охолодження значно зменшується, тому в центральній частині зливка утворюються великі рівновісні кристали.

Рідкий метал має більший питомий об'єм, ніж твердий, тому у верхній частині зливка, яка застигає в останню чергу, утворюється порожнина - усадкова раковина, зазвичай оточена найбільш забрудненою частиною металу. Верхню частину зливка відрізають і переплавляють, а інший метал піддають обробці тиском.

1.4 Деформація магнієвих сплавів

Традиційне виробництво листового матеріалу практикується протягом попередніх 80 років. Відомими були такі виробники як Electron в Біттерфелде, Dow, Alcoa і ін. На сьогоднішній день серед інших пропонується листовий матеріал від компанії M & VMAGToronto. Ці компанії використовують безперервно-литі заготовки для прокатки листів різної товщини (від 0,5 до 150 мм). Технологія листового виробництва складається з наступних стадій: литво слябів, гомогенізаційний відпал, механічна поверхнева обробка (шліфування) багатоетапна прокатка з обрізанням бічної кромки і проміжним відпалом, кінцева термічна обробка [4].

Процес прокатки відбувається на клітях різного типу. Залежно від віку стану використовуються кліті тріо і кварто. Сучасні кліті кварто оснащені зовнішнім або внутрішнім підігрівом і пристроєм очищення робочих валків.

Також подібні кліті обладнані системою.

Безперервно-литі заготовки піддаються реверсивній прокатці. Число проходів при цьому залежить від вихідної товщини сляба. Внаслідок низької теплоємності прокат швидко остигає нижче критичної температури прокатки, що призводить до різкого зниження пластичності матеріалу і утворення тріщин на кромці листа. Для продовження процесу прокатки в подібному випадку необхідна обрізка крайок і проміжний відпал. Швидке охолодження прокату при малих товщинах призводить до режимів прокатки, що складаються іноді з комбінації одного проходу і подальшому проміжному відпалі. Щоб уникнути швидкого охолодження прокатку можна здійснювати пакетами [5]. Зрозуміло, прокатка пакетами є дуже витратною в зв'язку з додатковою технологічною операцією по підготовці пакетів, різницею в товщині окремих листів і всіма витікаючими наслідками. У зв'язку з цим, подібна технологія застосовується дуже рідко. Кінцева термічна обробка відбувається в температурних інтервалах між 300 і 400°C.

У стратегічних цілях здійснюється прокатка листів з шириною 4 м і більше. У подібних випадках процес складається з пресування труб великого діаметра, розрізу їх, редагування і подальшій прокатці на клітях типу кварто. Така технологія, що включає проміжний і кінцевий відпал, природно, не підходить для виробництва листів у великих обсягах.

Розробки в області вигідною технології для виробництва листа з магнію сконцентровані на методах, які, з одного боку, знижують трудомісткість процесів прокатки і відпалу, збільшуючи тим самим вихід придатного матеріалу, і, з іншого боку, покращують однорідність литої структури. Таким чином, вдасться здійснити підвищення пластичності листового матеріалу.

Нові можливості відкриваються при використанні ливарно-прокатних комплексів. Ця технологія дозволяє істотно скоротити виробничі витрати і тому привертає величезний інтерес по всьому світу. Значні переваги відображені у використанні вихідного матеріалу. Тут, на відміну від технології з застосуванні безперервно-литих заготовок, відсутні операції механічної обробки поверхні слябів, проміжного відпалу при чорновій прокатці, а також зменшеній кількості проходів. Ще одна перевага поєднання лиття і прокатки полягає швидкому охолодженні (до 10 разів) і одночасною частковою деформації. Це призводить, крім отримання дрібнозернистої структури, до запобігання зейгерування і утворення пор, пустот і тендітних виділень. Таким чином, істотно підвищується пластичність і якість матеріалу. Гомогенізуючий відпал при цьому, як правило, не потрібно.

1.4.1 Екструзія магнієвих сплавів

Виробництво деталей та виробів механічною обробкою пов'язано з отриманням великої кількості стружкових відходів, в тому числі при використанні магнію і його сплавів. Все більша увага інженерів і дослідників

привертають технології переробки металеві стружки. Найбільш перспективним для цього є порошкова металургія. Широко використовуються твердофазні методи переробки, такі, як подрібнення сировини з подальшою гарячою екструзією або рівноканального кутового пресуванням, які вимагають менших енерговитрат і менше впливають на хімічний склад сплаву. Вторинна переробка стружки дозволяє також ефективно вирішувати проблему її утилізації.

Актуально впровадження економічних технологій переробки стружки в компакту форму [6], серед яких гаряча екструзія - вельми перспективна область порошкової металургії як для масового серійного виробництва в різних галузях промисловості, так і для отримання виробів спеціального призначення із заданими властивостями. Цим способом з мінімальною кількістю стадій переробки і хорошими економічними показниками з стружки отримують профілі - коло, куток і більш складні форми, які можна використовувати в тих областях техніки, де потрібні матеріали малої щільності та середні за величиною показники міцності (400-500 МПа).

Технологія гарячої екструзії має загальновідомі переваги методів класичної порошкової металургії - високим коефіцієнтом використання матеріалу, низькими капітальними вкладеннями. Багато спресованих порошкових деталей мають рівну і навіть більшу міцність, ніж деталі, отримані класичними технологіями лиття та обробки тиском. Гаряча екструзія дозволяє уникнути застосування такої важливої для порошкової металургії операції, як спікання [5]. Інтенсивне пластичне деформування при підвищених температурах в процесі екструзії руйнує і диспергує оксидний шар на поверхні частинок металу, що дозволяє компактувати спочатку дискретний матеріал до порівняно високої щільності [7].

1.4.2 Деформаційні методи, що дозволяють отримувати УМЗ і наноструктури

Останні 20 - 30 років у всьому світі активно досліджують і розвивають галузь науки, спрямовану на розробку матеріалів з нано і ультрадрібнозернистою структурою, отриманих деформаційними методами. Інтерес до таких матеріалів не випадковий, адже формування в металах і сплавах нано і УДЗ структури призводить до суттєвого підвищення міцності, при задовільному рівні пластичності. Крім того, в ряді випадків, відбувається також поліпшення експлуатаційних властивостей, таких як втомна міцність, зносостійкість, корозійна стійкість, електропровідність, холодостійкість і ін [8]. Тому дослідження, спрямовані на вивчення впливу УДЗ структури на властивості металів і сплавів, знаходяться зараз на піку популярності [9].

Згідно [10] УДЗ структура - це полікристалічна структура, що складається з досить рівновісних зерен з переважно великокутовими межами розміром не більше 1 мкм. Нанокристалічні матеріали або нанокристали - це матеріали з розміром зерен не більше 100 нм. Умова наявності в таких матеріалах переважно великокутових границь має велике значення, так як тільки матеріали з такими границями можуть забезпечити стабільність отриманих властивостей.

В даний час основним способом отримання матеріалів з УМЗ структурою є інтенсивна пластична деформація. У загальному розумінні, інтенсивна пластична деформація - це спосіб обробки металів під високим гідростатичним тиском, який може використовуватися для досягнення дуже високого ступеня деформації в об'ємній заготівлі без внесення суттєвих змін в її геометричні розміри і здатний забезпечити надзвичайно велике подрібнення зерна [11]. Для того, щоб обробка тиском вважалася методом ПД, при її реалізації повинен виконуватися ряд умов, найважливіші з яких наведені нижче [11]:

- інтенсивна пластична деформація повинна проходити при низьких температурах (зазвичай, не більше 0,4 Тпл). Це правило є найважливішим правилом, що пред'являються до процесу. Перевищення цієї межі призведе до розвитку інтенсивних процесів звороту і рекристалізації, через що в матеріалі не буде досягнута щільність дислокацій 10^{14} см⁻², яка необхідна для формування заданої структури. Невиконання цієї вимоги призводить до збільшення розміру зерна до більш ніж мікронного значення, що вже вибивається із заданого для УДЗ структур межі;

- справжня ступінь деформації процесу повинна бути не менше 6 - 8. Не дивлячись на те, що для досягнення заданої щільності дислокацій, що дорівнює 10^{14} см⁻² досить справжніх ступенів деформації, рівних 1 - 2, такі ступеня деформації не забезпечують належного розвитку структури. В цьому випадку в матеріалі присутній переважно малокутове розорієнтування зерен, яка не може забезпечити стабільних властивостей. Для подальшого розвитку структури і формування переважно великокутових границь, необхідне подальше збільшення ступеня деформації;

- для ефективного формування УДЗ структури необхідний високий гідростатичний тиск (понад 1 ГПа). Високий тиск дозволяє ефективно підвищити міцність, а також підвищує деформівність металу. Крім того, високий тиск впливає на дифузію, сповільнюючи або повністю пригнічуючи аннігіляцію деформаційних дефектів ґратки;

- для формування рівновісної УДЗ структури в металі має реалізовуватися завихрення протягом матеріалу, яке відповідає немонотонному характеру деформації;

- в процесі деформування, незважаючи на високі навантаження і їх інтенсивність, заготовки матеріалу не повинні механічно пошкоджуватися або руйнуватися.

Також, слід знати, що процес утворення УДЗ структури пов'язаний з природою матеріалу і його внутрішньою будовою. Низька енергія дефектів упаковки, а також впорядкованість сплавів допомагають ефективніше

збільшувати щільність дислокацій, що призводить до формування більш дисперсної структури при інших рівних умовах [11].

Варто також враховувати, що методи ПД повинні забезпечувати формування структур, з переважно великокутовими границями зерен, так як тільки такі структури приведуть до якісної зміни властивостей. Крім того, ці структури повинні бути однорідні по всьому об'єму заготовки, щоб забезпечити стабільність отриманих властивостей.

Взявши за основу ці правила, вчені розробили ряд методів ПС для отримання УДЗ структур. Найбільш популярними з них є кручення під високим тиском (в ряді робіт цей метод ще називають крутіння під гідростатичним тиском, а також інтенсивна пластична деформація кручення) і рівноканальне кутове пресування. Так само існують такі методи як акумульована прокатка, мультіосьова деформація (так само відома як всебічне кування), гвинтова екструзія і інші методи. Так само варто відзначити, що останнім часом безліч робіт направлено на вивчення можливості отримання УДЗ структури металевих матеріалів більш традиційними деформаційними методами, такими як ротаційне кування і радіально-зсувна прокатка.

1.5 Термічна обробка магнієвих сплавів

Термічна обробка магнієвих сплавів подібна до термічної обробки алюмінієвих сплавів. Мета термічної обробки деформівних напівфабрикатів з магнієвих сплавів – підвищення міцності, усунення (або зменшення наклепу) та підвищення пластичності, зняття внутрішніх напружень та стабілізація властивостей. Для покращення механічних властивостей, усунення ліквідації ливарні магнієві сплави, як і деформівні, відпалюють. Завдяки тому, що більшість ливарних магнієвих сплавів розроблено на основі систем із наявністю евтектик і обмеженою змінною розчинністю в твердому стані, то до

них застосовується зміцнювальна термічна обробка. Термічну обробку магнієвих сплавів позначають умовно буквою «Т» та цифрою. Наприклад, термічна обробка деформівних магнієвих сплавів має позначення: Т2 – відпал, Т4 – гартування, Т6 – гартування та старіння. В табл. 1.2 наведено найбільш розповсюджені режими термічної обробки магнієвих ливарних сплавів [12].

Гомогенізаційний відпал проводиться для усунення ліквациї та підвищення пластичності перед обробкою тиском. Гомогенізація часто поєднується з нагріванням до температури обробки тиском.

Рекристалізаційний (високотемпературний) та низькотемпературний (для зняття залишкових напружень) відпали.

Таблиця 1.2 – Класифікація режимів термічної обробки ливарних магнієвих сплавів [15]

Умовне позначення режиму	Вид термічної обробки	Призначення
T1	Штучне старіння без попереднього гартування	Для підвищення механічних властивостей сплавів на основі системи Mg-Zn-Zr (МЛ12, МЛ15)
T2	Відпал	Для зняття залишкових напружень після литва. Використовують для сплавів МЛ5, МЛ7-1, МЛ11

Кінець таблиці 1.2

T4	Гомогенізація та гартування на повітрі	Для підвищення σ_B та δ . Використовують для сплаву МЛ5
T6	Гомогенізація, гартування на повітрі та старіння	Для підвищення міцності (головним чином σ_B) при зниженні δ . Використовують для сплавів МЛ5, МЛ8, МЛ9, МЛ10 та інші.
T61	Гомогенізація, гартування в гарячу воду та старіння	Теж саме. Використовують для сплавів МЛ8 та МЛ10.

Температуру та тривалість відпалу обирають в залежності від хімічного складу та вимог, які висувають до рівня механічних та технологічних властивостей сплавів. Температури початку та кінця рекристалізації деформівних сплавів в залежності від хімічного складу, чистоти сплаву та умов деформації змінюються в широких межах: 150...300 та 200...400°C відповідно. Найбільш високі температури характерні для сплавів, які леговані РЗМ. Температура рекристалізаційного відпалу відповідно 250...350°C. Більш високі температури призводять до росту зерен [12].

Залишкові напруження, що виникають при деформації, можуть привести до короблення та поводки виробів з магнієвих сплавів, а також підвищують схильність сплавів до корозії під навантаженням і чутливість до надрізу. Відпал для зняття залишкових напружень проводять при температурах 150...300°C, що нижче температур рекристалізації, впродовж 0,5...1 год. відразу після обробки, що призводить до утворення залишкових напружень.

Зміцнювальна термічна обробка полягає в істинному гартуванні та старінні [12]. Основне призначення зміцнювальної термічної обробки – створення гетерофазної структури.

Гартування. Підвищена здатність магнієвих сплавів при високих температурах до окислення обумовлює особливості термічної обробки магнієвих сплавів. Для зменшення здатності до окислення та до самозаймання перед завантаженням в піч відливки та напівфабрикати ретельно очищують від магнієвого пилу, стружки, зачищають від заусенців, просушують. Нагрівання виробів під гартування проводиться в атмосфері нейтрального газу (вуглекислого або аргону) або в повітряній атмосфері з додаванням 0,5...1,0% сірчаного газу.

Особливість магнієвих сплавів – повільне проходження дифузійних процесів в гратці Mg як при нагріванні так і при охолодженні. Для більш повного розчинення надлишкових фаз та для отримання високих характеристик механічних властивостей температуру нагрівання під гартування обирають близькою до температури солідусу сплавів (на 5...10°C нижче за неї). Тому перепад температур в різних зонах печі для запобігання перепаду повинен бути не більше $\pm 5^\circ\text{C}$. Температура нагріву під гартування залежить від хімічного складу сплаву та обирається за допомогою діаграми стану.

На тривалість витримки при температурі гартування впливає швидкість розчинення зміцнювальних фаз, котра залежить від хімічного складу і від розміру зерна.

Завдяки дуже високій стійкості твердого розчину для охолодження магнієвих сплавів з температури гартування використовують повітря, спокійне повітря. Для деяких сплавів необхідне обдування стисненим повітрям. Гартування магнієвих сплавів в гарячу ($\geq 80^\circ\text{C}$) або киплячу воду зменшує залишкові напруження у відливках, напівфабрикатах та виробках. Гартування в гарячу воду значно підвищує пружні властивості після старіння.

Після гартування фіксується пересичений легувальними елементами твердий розчин на основі магнію.

В результаті гартування підвищується границя міцності та характеристики пластичності, особливо у сплавів на основі системи Mg-Al-Zn. Тому для відливок із сплаву МЛ5 гартування (режим Т4) є завершальною термічною обробкою.

Старіння. Природне старіння в Mg-сплавах (окрім сплавів на основі системи Mg-Li) не відбувається, і структура загартованих сплавів при вилежуванні при кімнатній температурі майже не змінюється.

Ефект від зміцнення при штучному старінні в магнієвих сплавах значно менший порівняно з алюмінієвими і становить 25...35%.

Температура та час витримки при старінні вибираються в залежності від повноти розпаду пересиченого твердого розчину.

Старіння сплавів на основі системи Mg-Al (МА5: Mg-Al-Zn-Mn). Розпад пересиченого α -твердого розчину проходить шляхом виділення некогерентних дисперсних пластинок рівноважної фази $Mg_{17}Al_{12}$. Відстань між пластинками достатньо велика (200 нм), що пояснює слабкий ефект від зміцнення при старінні. При підвищенні температури та збільшенні тривалості старіння частинки коагулюють, що призводить до знеміцнення сплаву. 205 Причому ріст частинок зміцнювальної фази починається ще до повного розпаду пересиченого твердого розчину.

Старіння сплавів на основі системи Mg-Zn (МА14: Mg-Zn-Zr). Розпад пересиченого твердого розчину в сплавах цієї системи супроводжується утворенням проміжних стадій. Нижче температури 110°C утворюються зони Гін'є-Престона (зони ГП): $\alpha \rightarrow \alpha + \text{ГП} \rightarrow \alpha + \beta' \rightarrow \alpha + \beta(\text{MgZn})$. При температурах вище 110°C розпад твердого розчину проходить без утворення зон ГП: $\alpha \rightarrow \alpha + \beta'' \rightarrow \alpha + \beta' \rightarrow \alpha + \beta(\text{MgZn})$. Старіння сплавів на основі системи Mg-Mn. Старіння проходить без помітних попередніх стадій. Починається з виділення частинок α -Mn. Незначне зміцнення при старінні сплавів системи Mg-Mn пояснюється незначною кількістю зміцнювальної фази. Розпад

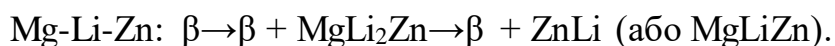
пересиченого твердого розчину проходить при більш високих температурах ніж в більшості магнієвих сплавів: максимум твердості спостерігається при 250...275°C.

Старіння сплавів на основі системи Mg-РЗМ (Ce, Nd, La) MA8 (Ce), MA15 (La), MA11 та MA12 (Nd). При старінні відбувається виділення метастабільних фаз, які мають когерентний зв'язок з матрицею. Старіння проходить за схемою: $\alpha \rightarrow \alpha + \text{ГП} \rightarrow \alpha + \beta'' \rightarrow \alpha + \beta' \rightarrow \alpha + \beta$ (Mg₉Nd). Частинки Mg₉Nd переважно виділяються по межах зерен, хоча спостерігаються виділення і в середині зерен. Зміцнювальні фази мало схильні до коагуляції, що обумовлює їхню високу жароміцність.

Старіння сплавів на основі системи Mg-Li-Al та Mg-Li-Zn. Для сплавів цих систем характерна висока дифузійна рухомість атомів легувальних елементів, що пояснюється наявністю β -твердого розчину.

Структура магнієволітієвих сплавів легованих Al або Zn в зістареному стані нестабільна. Спостерігається значне зменшення характеристик міцності після вилежуванні при кімнатній температурі або після низькотемпературного нагрівання.

Фазові перетворення, які проходять в магнієволітієвих сплавах при старінні:



Перехідні фази MgLi₂Al та MgLi₂Zn когерентно пов'язані з матрицею та забезпечують значне зміцнення цих сплавів на першій стадії старіння. Але значна невідповідність параметрів ґраток (~5%) зміцнювальних фаз та матриці, а також висока дифузійна рухомість атомів легувальних елементів сприяє в подальшому термічній нестабільності та знеміцненню.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Проведення дослідних плавок, термічної обробки і визначення хімічного складу металу

Дослідження проводили на зразках з базового промислового сплаву МЛ10 (ГОСТ 2856-79).

В тигельну піч ІПМ-500 завантажували заздалегідь нагріті шихтові матеріали і після розплавлення переливали у виймальні тиглі при 650...730 °С. Виймальні тиглі встановлювали в роздавальні печі, в яких доводили сплав за хімічним складом і рафінували флюсом ВІ-2 при 740...760 °С. Після цього в розплав підігрівали, витримували при 730 °С. Після цього заливали зразки у ливарні форми.

Шихтою для сплавів були наступні матеріали: магній первинний чушковий Мг 90, Мг 95, Мг 96 (ГОСТ 804-93), цинк чушковий Ц2 (ГОСТ 3640-94), лігатура Mg-Nd, лігатура Mg-Zr Л2.

Для дослідження впливу швидкості охолодження зразки з оптимізованого сплаву заливали у піщано-гліністу форму, сталевий кокіль зі сталі Ст. 3, мідний кокіль. В якості середовищ охолодження використовувалась повітря, технічна вода та рідкий азот. Швидкість охолодження визначали за показами хромель-алюмелевих термопар ТХА (тип К) з діапазоном вимірювання температур від -400°С до +1200°С. Дослідження металу проводили після термічної обробки в термічній шахтній печі типу Белв'ю, потужністю 112 кВт і продуктивністю 95 кг/год, а також у термічній печі типу ПАП-4М, продуктивністю 50 кг/год, за режимом: нагрів 540^{±5} °С, витримка 8 годин, охолодження на повітрі і старіння при 200^{±5} °С, витримка 15 годин, охолодження на повітрі.

Якість зразків в промислових умовах визначали за допомогою рентгенівського методу апаратами РАП-150/300, РУП 150/300, РУП 400-5 і

МИРА-2Д і реєстрували отримані дані на рентгенівські плівки РМ-1, РТ-1, РТ-2.

2.2 Визначення механічних властивостей

Механічні властивості зразків з магнієвих сплавів визначалися за допомогою розривної машини «INSTRUN 2801» за ГОСТ 1497 – 84 та ГОСТ 2856 – 79. Макро- і мікроструктуру зразків після механічних випробувань вивчали за допомогою методів світлової мікроскопії приладами «Neophot 32» та «OLYMPUS IX 70» при збільшеннях 100, 350 та 500 разів. Шліфи для аналізу мікроструктури вивчали після термічної обробки. Склад реактиву для щавлення: 1 % азотної кислоти, 20 % оцтової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколя.

Фазовий аналіз структурних складових магнієвих сплавів вивчали на електронному мікроскопі – мікроаналізаторі з системою енергодисперсійного мікроаналізу «SELMІ PEM-106И». У кожному аналізованому мікрооб'ємі записували енергодисперсійні спектри, які кількісно обробляли за спеціальною програмою на ПЕВМ. Обробкою цих спектрів визначали інтенсивності аналітичних ліній хімічних елементів, присутніх в спектрі.

2.3 Моделювання процесів лиття за допомогою ProCast

Для дослідження впливу швидкості охолодження на мікроструктуру та властивості розробленого магнієвого сплаву використовували програмний комплекс ProCast. Для цього побудовано макет зразка та ливарної форми у форматі .iges за допомогою програми SolidWorks та імпортовано у програмне

середовище ProCast (рис. 2.1). В банк матеріалів додано сплав визначеного хімічного складу (рис. 2.2). На основі хімічного складу програма автоматично розраховує всі необхідні параметри. Подальші розрахунки виконувались для режиму гравітаційного лиття. Для зразка та ливарної форми задавали відповідні матеріали та вводили параметри лиття. Вихідні параметри включали до себе: напрямок лиття; температури вихідного сплаву, форми та навколишнього середовища; коефіцієнти теплопровідності охолоджуючого середовища та поверхні, де відбувається теплообмін.

Вихідну кількість сплаву у формі зазначено на рівні 100 %, тобто виконувалась тільки задача охолодження.

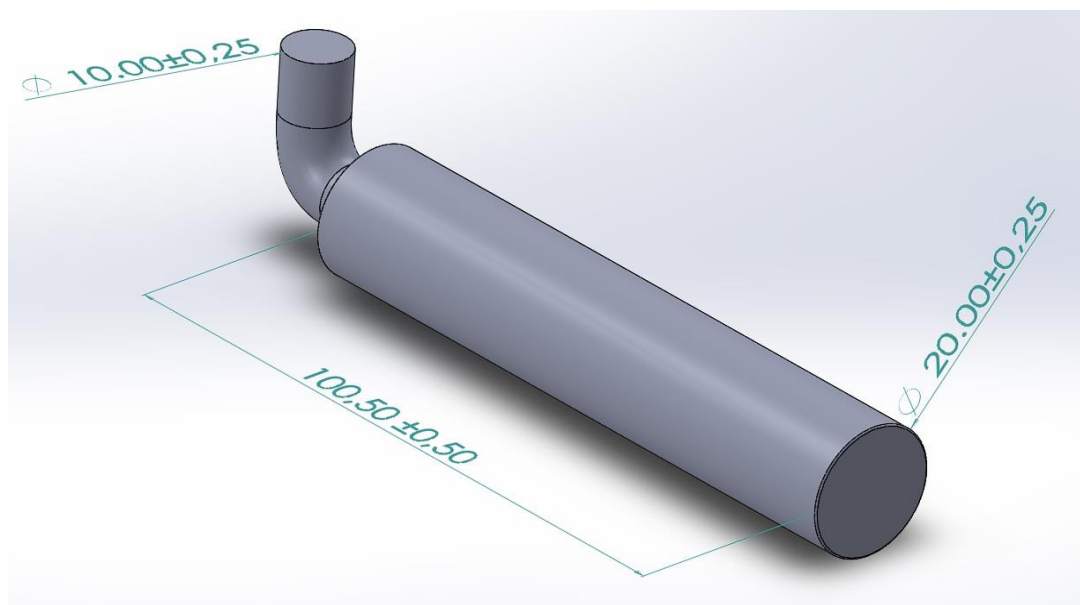


Рисунок 2.1 – Тривимірний модель формозразку

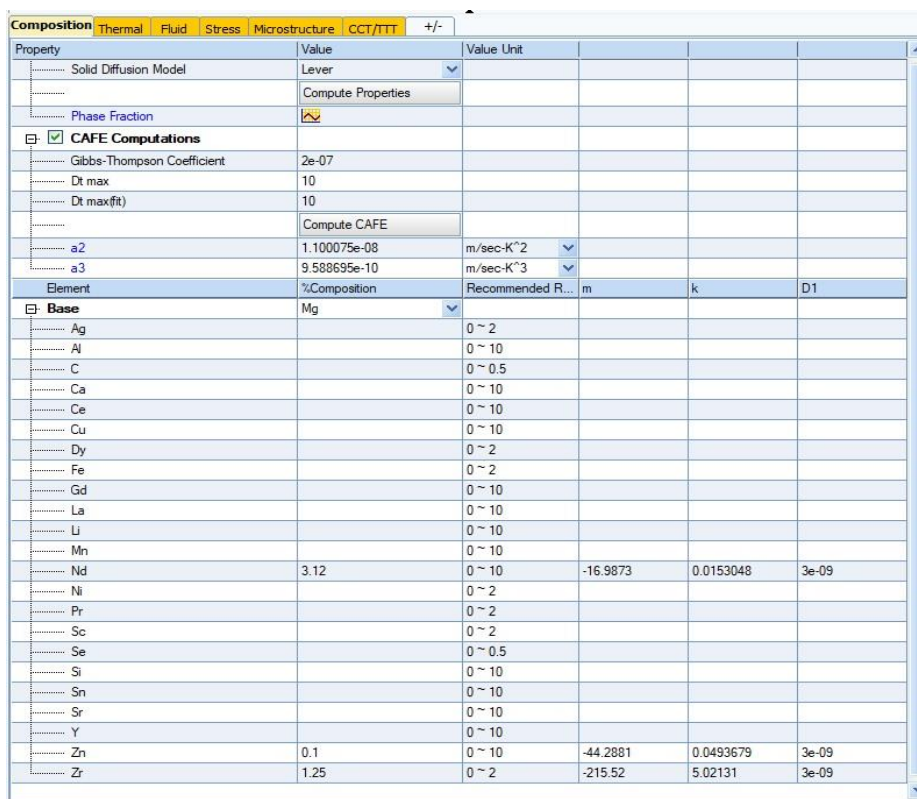


Рисунок 2.2 – Вікно для вводу та розрахунку параметрів дослідного сплаву

Для побудови мікроструктури програмою допускається нормальний розподіл зародків зерен для об'ємної рідини та границі розділу між рідиною та ливарною формою. Функція безперервного розподілу нуклеації (зародження зерен) ($dn/d(\Delta T_N)$) описує зміни густини зерна (dn), що були викликані підвищенням переохолодження ($d(\Delta T)$). Таким чином загальну густину зерен ($n(\Delta T)$), що утворились при заданому переохолодженні (ΔT), отримано за наступними рівняннями:

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T_N)} d(\Delta T_N), \quad (2.1)$$

$$\frac{dn}{d(\Delta T_N)} = \frac{n_{max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T_\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T - \Delta T_N}{\Delta T_\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

де n_{max} – максимальна густина центрів кристалізації;

ΔT – розрахункове значення місцевого переохолодження;

ΔT_{σ} – стандартне відхилення переохолодження;

ΔT_N – середнє переохолодження.

Параметри росту зерен a_2 та a_3 (2.3) визначаються за моделлю Kurz et al. автоматично програмним модулем Thermo-Calc, що входить до складу програмного продукту ProCast.

$$v = a_2 \times (\Delta T)^2 + a_3 \times (\Delta T)^3 \quad (2.3)$$

З ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ Mg-Zr-Nd

Одним із способів забезпечення високих характеристик сплаву є підвищення швидкості охолодження виливків, що досягається застосуванням різних матеріалів ливарних форм і охолоджувальних середовищ (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Теплофізичні характеристики матеріалів для ливарних форм і охолоджувальних середовищ при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Матеріал	Густина ρ , кг/м ³	Питома теплоємність C_p , кДж/(кг*К)	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м*К)
Матеріал для ливарної форми			
Піщано-глиниста суміш	1800	1,05	0,29
Сталь	7200	0,84	29
Мідь	8930	0,38	395
Охолоджувальне середовище			
Повітря	1,205	1005	2,59
Вода	998,2	4183	0,599
Рідкий азот	808	1,97	136

Перспективним є застосування комп'ютерних програм для симуляції ливарних процесів, таких як ProCast, що дозволяють проаналізувати вплив технологій лиття на структуру і властивості виливків без значних витрат часу в максимально близьких до реальних умовах.

3.1. Моделювання технологій лиття за допомогою програми ProCast

Розрахунки проводили для наступних технологій лиття:

1. Лиття в піщано-глинисту форму ($V_{ox} = 2^{\circ}\text{C}/\text{c}$).
2. Лиття в сталевий кокіль, охолодження повітрям ($V_{ox} = 10^{\circ}\text{C}/\text{c}$).
3. Лиття в мідний кокіль, охолодження повітрям ($V_{ox} = 15^{\circ}\text{C}/\text{c}$).
4. Лиття в мідний кокіль, охолодження водою ($V_{ox} = 25^{\circ}\text{C}/\text{c}$).
5. Лиття в мідний кокіль, охолодження рідким азотом ($V_{ox} = 60^{\circ}\text{C}/\text{c}$).

Аналіз побудованих програмою кривих охолодження (рис. 3.1) показує, що, при використанні всіх технологій, швидкість кристалізації (охолодження до температури нижче температури солідус) висока. При цьому, швидкість охолодження до температури 20°C відрізнялась суттєво. Швидкість охолодження зразків, що охолоджувались повітрям, змінювалась із зниженням температури, а на лініях графіку видно перегини. Температура, при якій з'являвся перегин була тим вищою, чим повільнішою була початкова швидкість охолодження. Лінії, що описують швидкість охолодження водою та рідким азотом були рівнішими.

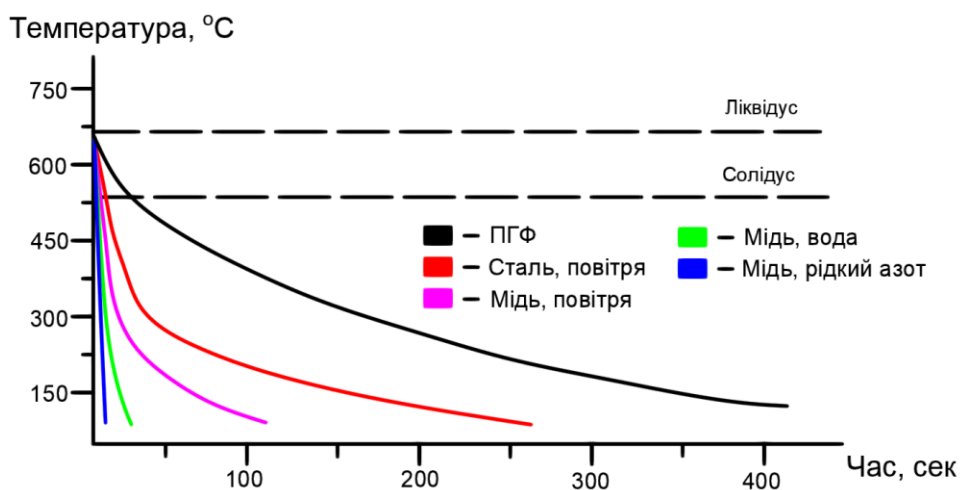


Рисунок 3.1 - Криві охолодження для різних технологій лиття

При використанні лиття в піщано-глинисті форми (ПГФ) швидкість охолодження рівномірна і становить близько $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Повне охолодження заготовки до 20°C займає понад 400 с.

Крива охолодження для лиття в сталевий кокінь показує, що після охолодження нижче 300°C швидкість охолодження знижується з $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Повне охолодження до 20°C становить приблизно 260 сек.

Крива охолодження для лиття в мідний кокінь показує, що швидкість охолодження знижується з $17^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $1,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ при температурі нижче 250°C . Повне охолодження заготовки до 20°C настає після 110 сек.

Крива охолодження для лиття в мідний кокінь, що охолоджується водою, виглядає більш плавною і пологою, без різких перегинів (рис. 3.2). Середня швидкість охолодження становить $25,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$, при цьому вона стабільна на весь період охолодження. До 20°C виливка охолоджується за 46 с.

Швидкість охолодження при використанні рідкого азоту дуже стабільна і становить близько $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$. До 20°C заготовка охолоджується за 12 с.

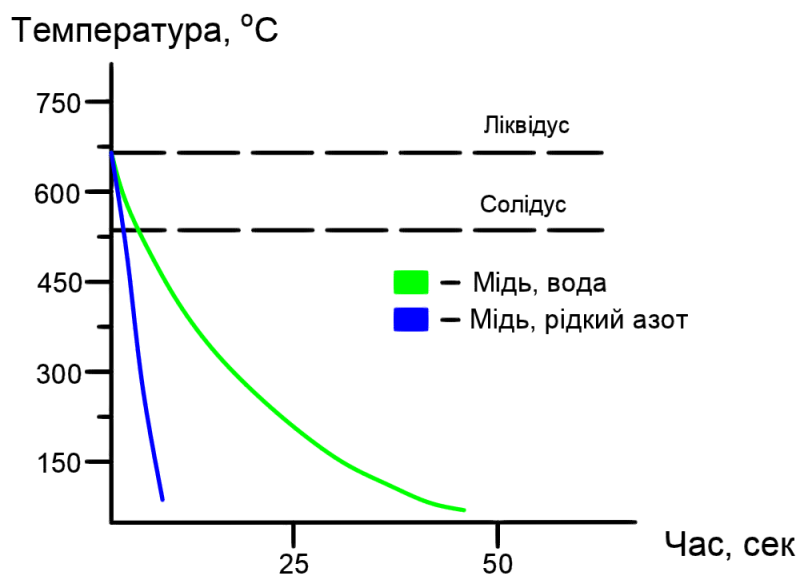
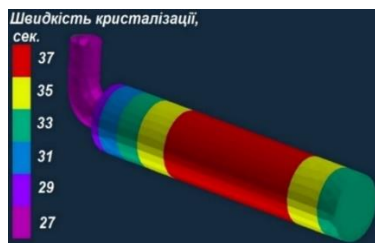


Рисунок 3.2 - Криві охолодження для лиття в мідний кокінь, що охолоджується водою і рідким азотом

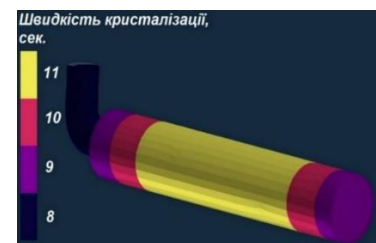
Аналіз розрахунків часу кристалізації для різних технологій лиття (рис. 3.3) показав, що в більшій мірі на неї впливає матеріал форми і в меншій мірі середовище охолодження. Різними кольорами вказано швидкість кристалізації виливка.

Охолодження заготовки до температури солідус при литті в ПГФ займає від 30 до 38 с, в залежності від місця виливки. Як видно з розрахунків (рис. 3.3, а), найдовше остигає центр заготовки, де товщина стінок форми вище. Таким чином, завжди слід враховувати, що швидкість охолодження заготовки залежить не тільки від матеріалу форми, але і від її конфігурації.

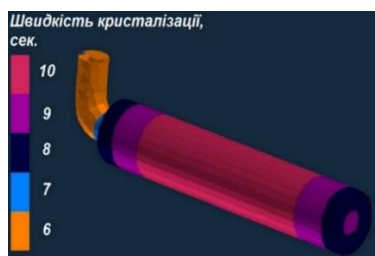
Температура солідус при литті в сталевий кокіль з охолодженням на повітрі досягається в середньому за 11 с (рис. 3.3, б). З торців зразок охолоджується швидше і твердіє за 8 - 9 с. Хоча вплив конфігурації форми залишився, його було скомпенсовано застосуванням більш теплопровідного матеріалу.



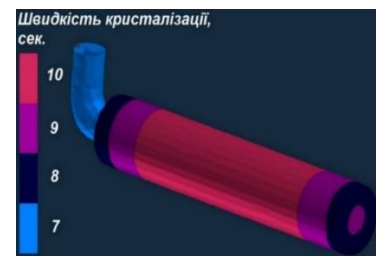
а



б



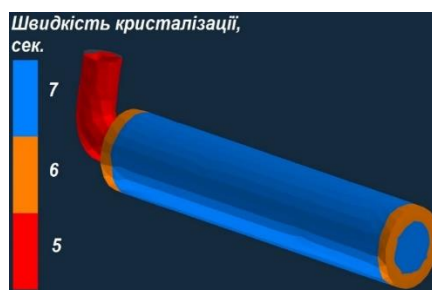
в



г

а - лиття в ПГФ; б - лиття в сталевий кокіль, охолодження повітрям;
в - лиття в мідний кокіль, охолодження повітрям; г - лиття в мідний кокіль,
охолодження водою;

Рисунок 3.3 – Моделювання швидкості кристалізації виливків при використанні різних технологій лиття



Д

д - лиття в мідний кокіль, охолодження рідким азотом

Рисунок 3.3, аркуш 2

Охолодження рідким азотом мало більш значний вплив на швидкість кристалізації, яка становила 5 - 7 с (рис. 3.3, д).

Згідно літературних даних, швидкість охолодження впливає на параметрі мікроструктури, такі як розмір зерна та відстань між осями дендритів 2-го порядку (рис. 3.4).

При литті в ПГФ ($V_{ox} = 2^\circ\text{C}/\text{c}$) відстань між осями дендритів становить 45 - 49 мкм (рис. 3.4, а). Їх розподіл за розмірами відповідає даним про швидкість охолодження в цих ділянках: в центрі заготовки відстань більше, а ближче до торців - менше.

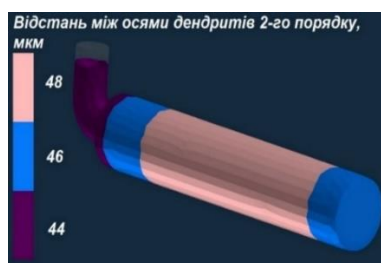
Більш висока швидкість охолодження при литті в сталевий кокіль з охолодженням повітрям ($V_{ox} = 10^\circ\text{C}/\text{c}$) позитивно позначилася на структурі сплаву. Відстань між осями дендритів 2-го порядку знизилась і становила 28 - 32 мкм (рис. 3.4, б). Також, спостерігається більш рівномірний розподіл значень за обсягом зразка.

Зміна сталевого кокілю на мідний ($V_{ox} = 15^\circ\text{C}/\text{c}$) не мала значного впливу на відстань між осями дендритів 2-го порядку. У центрі виливки воно досягало 31 мкм (рис. 3.4, в). Проте, область, що відповідала відстані 28 - 30 мкм, стала більше.

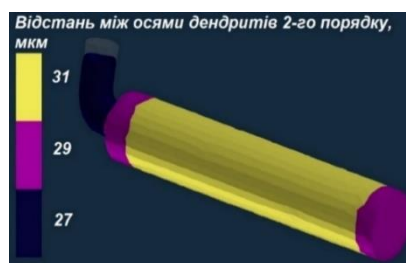
Для лиття в мідний кокіль з охолодженням водою ($V_{ox} = 25^\circ\text{C}/\text{c}$) відстань між осями дендритів 2-го порядку становило 26 - 29 мкм, а розкид за розмірами

менший (рис. 3.4, г), що забезпечує високу гомогенність одержуваної структури.

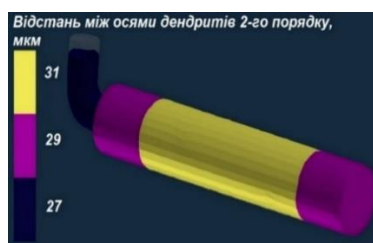
При охолодженні мідного кокілю рідким азотом ($V_{\text{ох}} = 60^\circ\text{C}/\text{с}$) відстань між осями дендритів становила 24 - 25 мкм. У порівнянні з охолодженням водою, мікроструктура відрізняється більшою гомогенністю за рахунок меншого розкиду дендритів за розмірами (рис. 3.4, д).



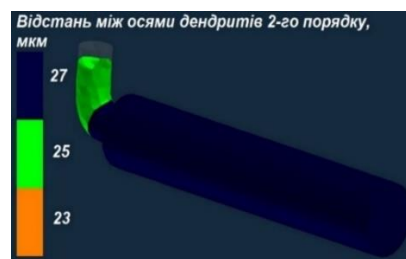
а



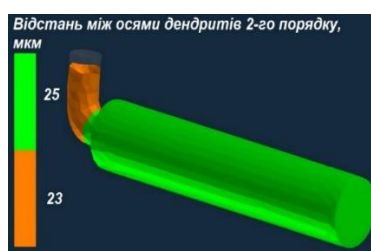
б



в



г

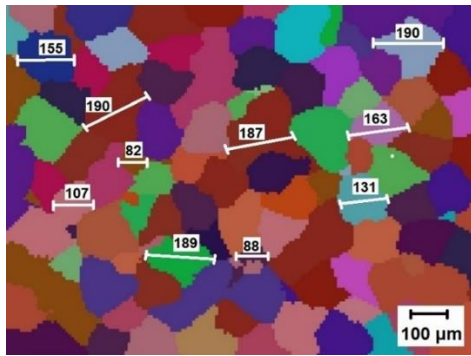


д

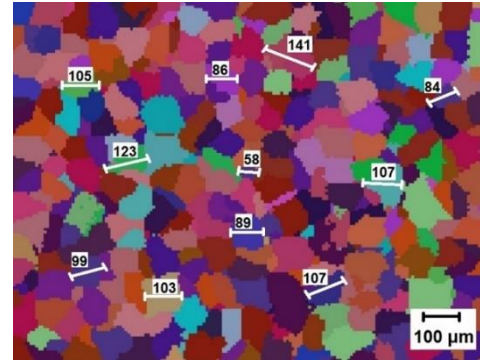
а $-2^\circ\text{C}/\text{с}$; б $10^\circ\text{C}/\text{с}$; в $15^\circ\text{C}/\text{с}$; г $25^\circ\text{C}/\text{с}$; д $60^\circ\text{C}/\text{с}$

Рисунок 3.4 – Модель впливу швидкості кристалізації на відстань між осями дендритів 2-го порядку

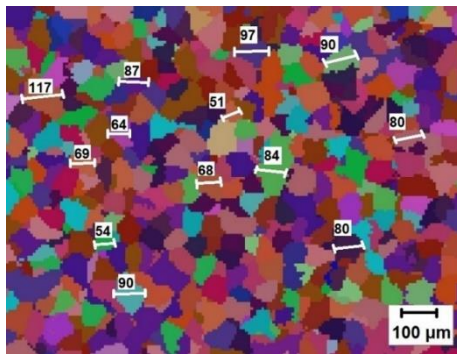
Моделювання мікроструктур виливків модулем САФ? показало, що середній діаметр мікрозерна був зворотно-пропорційний швидкості кристалізації сплаву (рис. 3.5).



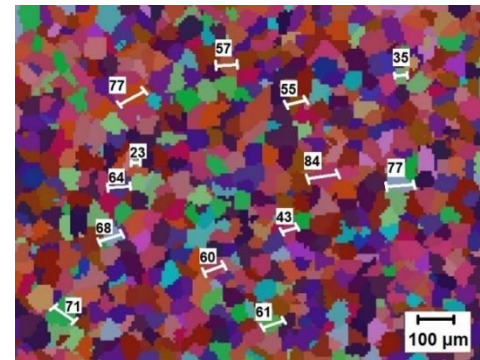
а



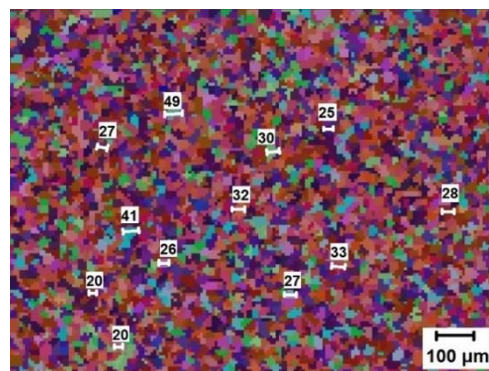
б



в



г



д

а – 2°C/c; б - 10 °C/c; в - 15°C/c; г –25 °C/c; д - 60 °C/c

Рисунок 3.5 – Модель впливу швидкості кристалізації на мікроструктуру сплаву

Результати розрахунків (табл. 3.2) показали, що використання сталевого кокілю ($V_{ок} = 10 \text{ °C/c}$) дозволяє зменшити середній розмір зерна в 1,5 рази, порівняно з литтям у ПГФ ($V_{ок} = 2 \text{ °C/c}$). При цьому, стандартне відхилення, що

виступає як показник гомогенності мікроструктури, знижується в 2 рази. Відстань між осями дендритів 2-го порядку зменшилася майже в 2 рази, також зменшився і розкид значень за об'ємом виливки. Використання мідного кокілю замість сталевого ($V_{ox} = 15^{\circ}\text{C}/\text{c}$) призводило до незначного зменшення між осями дендритів 2-го порядку (на 3 %). Однак, гомогенність мікроструктури виливки була вище при використанні мідного кокілю, що мало відображення у зменшенні середнього діаметру мікрозерна (приблизно на 20 %). Заміна середовища охолодження з повітря на воду для мідного кокілю ($V_{ox} = 25^{\circ}\text{C}/\text{c}$) призводило зменшення розміру зерна на 25 %. Також підвищувалась гомогенність мікроструктури та знижувалась відстань між осями дендритів 2-го порядку (на 15 %).

Таблиця 3.2 - Результати моделювання параметрів мікроструктури

Швидкість кристалізації, $^{\circ}\text{C}/\text{c}$	Охолодження до 20°C , сек	Відстань між осями дендритів 2-го порядку, мкм	Середній розмір зерна, мкм	Стандартне відхилення, мкм
2 (ПГФ, повітря)	450	45 - 49	148,2	43,4
10 (Сталь, повітря)	260	28 - 32	100,2	21,7
15 (Мідь, повітря)	110	28 - 31	79,3	18,2
25 (Мідь, вода)	48	26 - 29	59,5	17,6
60 (Мідний, рідкий азот)	12	24 - 25	30,0	8,4

Використання охолодження рідким азотом ($V_{ox}=60^{\circ}\text{C}/\text{c}$) дозволило подрібнити зерно в 2 рази та зменшити відстань між осями дендритів 2-го

порядку на 15 % порівняно з $V_{\text{ох}} = 25^{\circ}\text{C}/\text{с}$. При цьому, зниження стандартного відхилення було значним (більш ніж в 2 рази відносно мідного кокілю з охолодженням водою), що говорить про дуже високу гомогенності мікроструктури.

Таким чином, проведені розрахунки в програмі ProCast показують, що швидкість охолодження литої деталі значною мірою впливають на параметри мікроструктури, зокрема на відстань між осями дендритів 2-го порядку і розмір мікрозерна, що робить перспективним проведення практичних досліджень впливу швидкості охолодження на механічні властивості нового сплаву Mg-Zr-Nd.

3.2 Дослідження мікроструктури і механічних властивостей зразків з розробленого магнієвого сплаву Mg-Zr-Nd з різною швидкістю охолодження

Для практичного визначення впливу швидкості охолодження на мікроструктуру та властивості розробленого сплаву Mg-Zr-Nd, дослідні зразки виплавляли за стандартною технологією, після чого заливали у форми, що забезпечували різні швидкості охолодження (табл. 3.3). Швидкість охолодження визначали за показами хромель-алюмелевих термопар ТХА (тип К), що закарбовували у ливарні форми. Після виплавки, зразки піддавали стандартній термообробці Т6 за режимом: нагрів $540^{\pm 5}$ °С, витримка 8 годин, охолодження на повітрі і старіння при $200^{\pm 5}$ °С, витримка 15 годин, охолодження на повітрі.

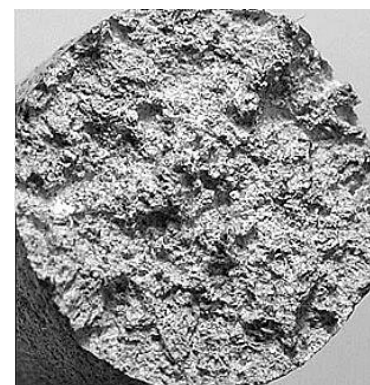
Таблиця 3.3 – Методи виплавки дослідних зразків та їх швидкість охолодження

Матеріал форми та охолоджувального середовища	Швидкість кристалізації вилівка, °C/c
Лиття в піщано-глинисту форму	2,5
Лиття в сталевий кокіль, охолодження повітрям	10
Лиття в мідний кокіль, охолодження повітрям	16
Лиття в мідний кокіль, охолодження водою	25
Лиття в мідний кокіль, охолодження рідким азотом	55

Аналіз макроструктур показав, що характер зламів змінювався з крупнокристалічного (рис. 3.6, а, б) до дрібнокристалічного (рис. 3.6, в, г, д) зі зростанням швидкості охолодження, а також підвищувалась гомогенність макроструктури.



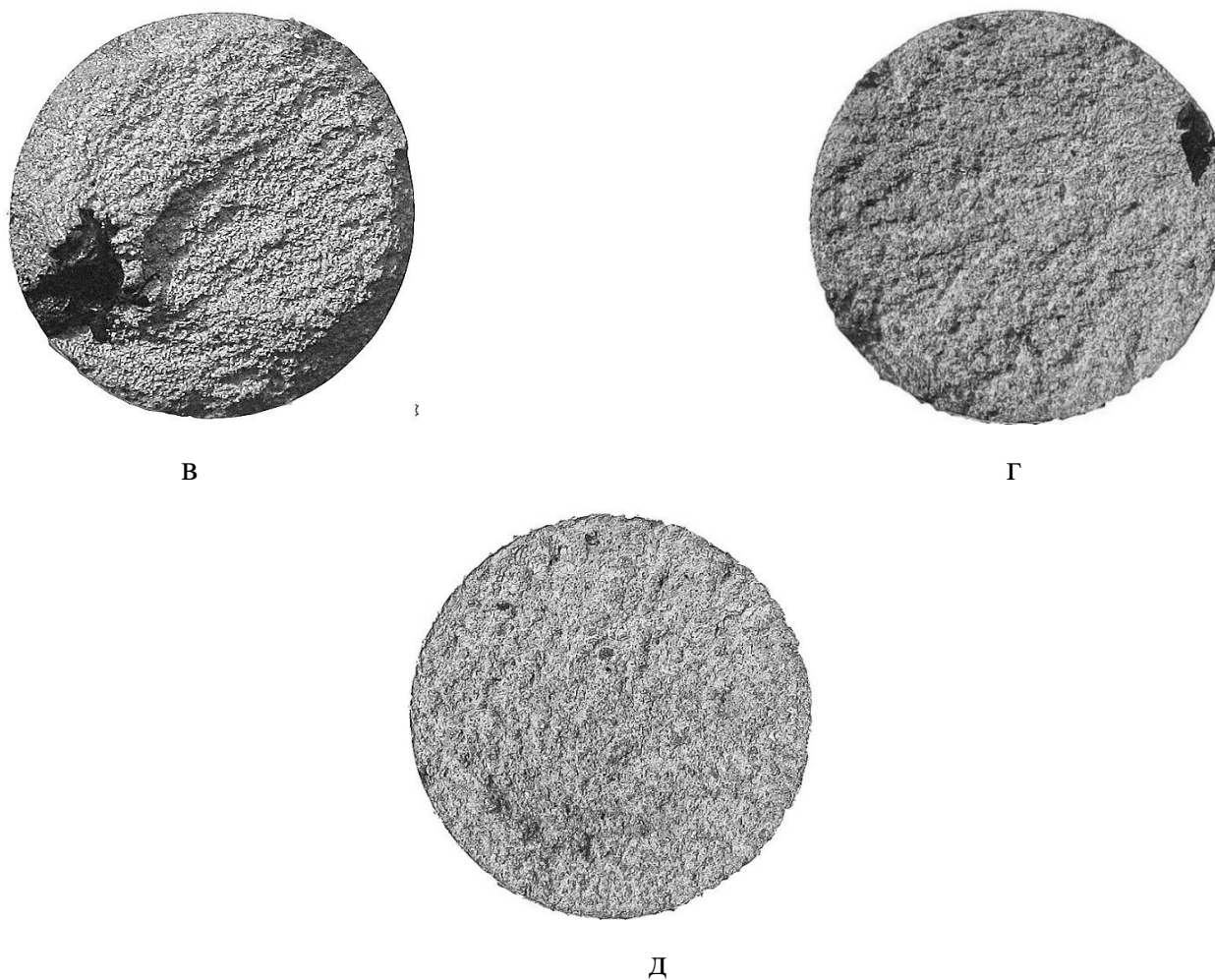
а



б

а – 2,5°C/c; б - 10 °C/c

Рисунок 3.6 – Макрофрактограми зламів після випробування на розтяг, x5

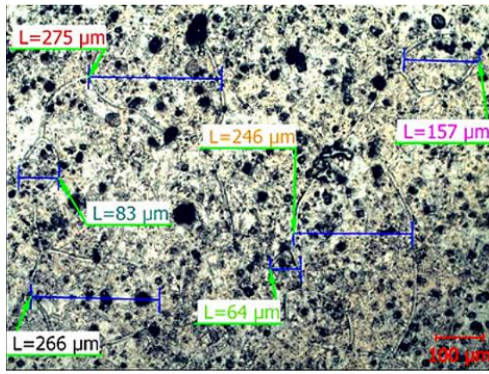


в - 16°C/с; г - 25°C/с; д - 55°C/с

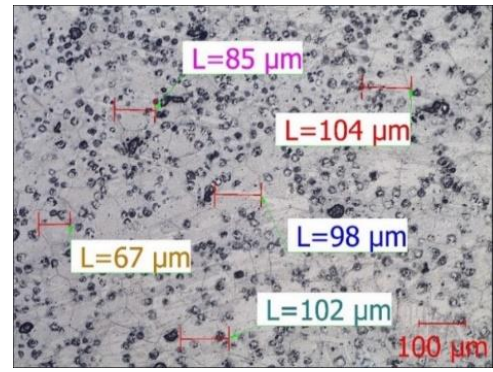
Рисунок 3.6, аркуш 2

Оцінка мікроструктури проводилася на поперечних шліфах зразків після термообробки. Склад мікроструктури після термообробки являє собою зерна δ -твердого розчину, виділення скупчень вторинної фази (евтектоїду) сферичної форми, що мають у своєму складі Zr, Nd, а також поодинокі інтерметаліди легувальних елементів (рис. 3.7). Термообробка призводила до зменшення хімічної неоднорідності сплаву, вирівнювання площини зерен, границі зерен, ставали більш тонкими та чіткими.

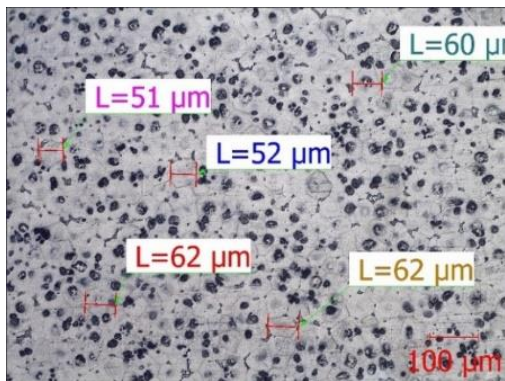
Спрогнозований програмою ProCast позитивний вплив підвищеної швидкості охолодження на кількісні параметри мікроструктури було підтверджено проведеною оцінкою (табл. 3.4). Підвищення швидкості охолодження призводило до значного подрібнення зерен.



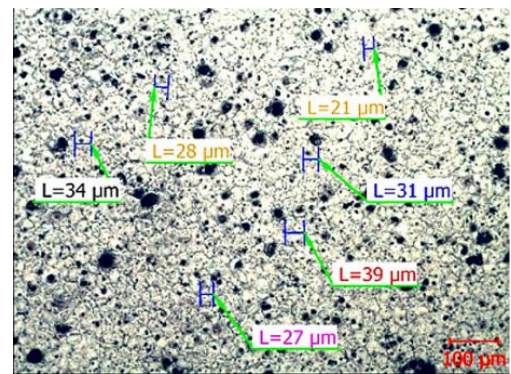
а



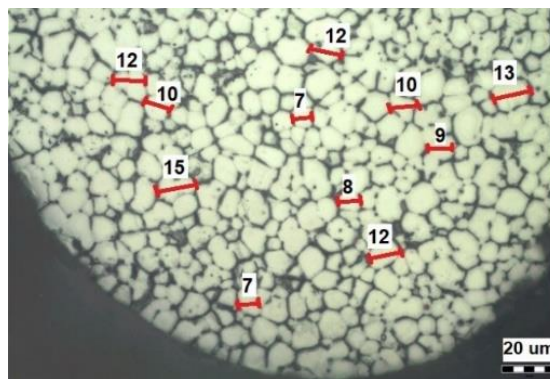
б



в



г



д

а – 2,5 °C/c; б - 10 °C/c; в - 16 °C/c; г - 25°C/c; д - 55 °C/c

Рисунок 3.7 – Мікроструктури дослідних зразків з розробленого сплаву Mg-Zr-Nd при різних швидкостях кристалізації

Таблиця 3.4 - Величина мікрозерна зразків, відлитих за різними технологіями

Швидкість кристалізації вилівка, °C/c	Номер мікроструктури за ГОСТ 21073.1-75	Середній діаметр зерна, мкм	Розмірна група, мкм	Стандартне відхилення, мкм
2,5	2	177	64 – 275	92,5
10	4	93,4	69 – 106	15,2
16	6	58,8	52 – 64	5,3
25	7	31	21 – 39	5,8
55	10	11	7 – 15	2,4

Регресійний аналіз отриманих результатів дозволив отримати емпіричне рівняння залежності (3.1), що описує зміни середнього діаметру зерна від впливом швидкості кристалізації вилівка

$$d_{\text{сер}} = -152,9243 * 0,9503^{V_{\text{ox}}}, \text{ мкм} \quad (3.1)$$

де $d_{\text{сер}}$ – середній діаметр зерна сплаву

V_{ox} – швидкість кристалізації сплаву

Середня похибка апроксимації $\bar{A} = 18,8 \%$.

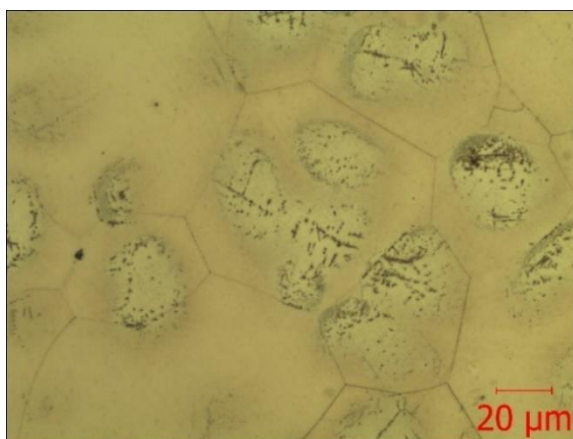
Мікроструктура зразків після термообробки при $V_{\text{ox}} = 10 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ (рис. 3.8, б), відрізнялася більшою питомою поверхнею зерен через їх менший розмір, ніж при $V_{\text{ox}} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ (рис. 3.8, а). Скупчення сферичної форми зміцнювальної фази виглядали більш щільними, що говорить про більшу кількість фази, що виділилась. Границі зерен також були чітко помітні, на границях зерен помітно деяка кількість вторинної фази.

Скупчення зміцнювальної фази при $V_{\text{ox}} = 16 \text{ } ^\circ\text{C/c}$, були більш щільними та дисперсними. Границі зерен чистіші, але деяка кількість зміцнювальної фази знаходилась поблизу границь зерен (рис. 3.8, в).

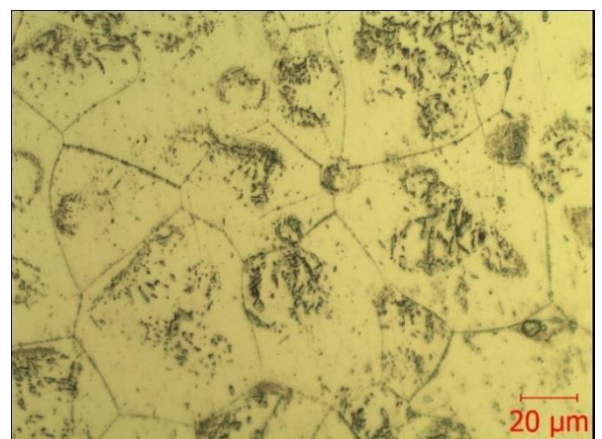
Мікроструктура зразків при $V_{ox} = 25 \text{ }^\circ\text{C/s}$ мала ще більш дрібну мікроструктуру (рис. 3.8, г). Кількість скупчень вторинної фази зросла порівняно з $V_{ox} = 16 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Дисперсність та щільність скупчень також підвищились.

Забезпечення швидкості кристалізації $V_{ox} = 55 \text{ }^\circ\text{C/s}$ призводило до утворення наддрібної мікроструктури (рис. 3.8, д). На границях зерен спостерігалась невелика кількість евтектики, також не були присутні сферичні скупчення зміцнювальної фази.

Таким чином, зміна швидкості охолодження виливки впливала на розподіл фаз, їх розмір та форму. Найбільш оптимальну структуру має зразок, відлитий при $V_{ox} = 25 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Скупчення зміцнювальної фази були щільні та дисперсні, а границі зерен чисті. При $V_{ox} = 2,5 \text{ }^\circ\text{C/s}$, скупчення фаз були великими за розмірами та менш щільними, ніж при інших швидкостях охолодження. Мікроструктури зразків, відлитих $V_{ox} = 10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ та $V_{ox} = 16 \text{ }^\circ\text{C/s}$, мали деяку кількість виділень зміцнювальних фаз близько до границь та на самих границях зерен. При $V_{ox} = 55 \text{ }^\circ\text{C/s}$ не утворювалось скупчень зміцнювальної фази.



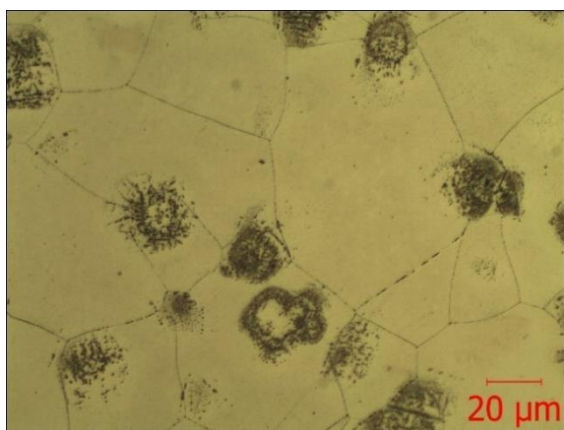
а



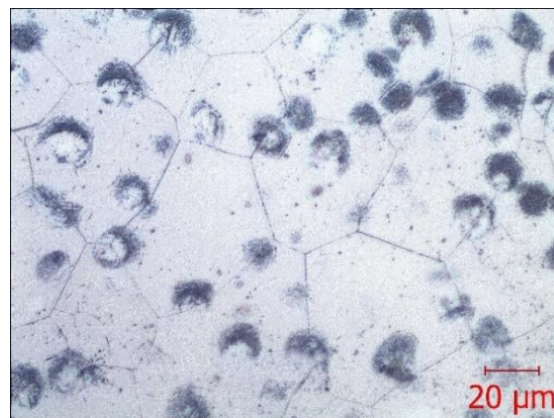
б

а – $2,5 \text{ }^\circ\text{C/s}$; б - $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$;

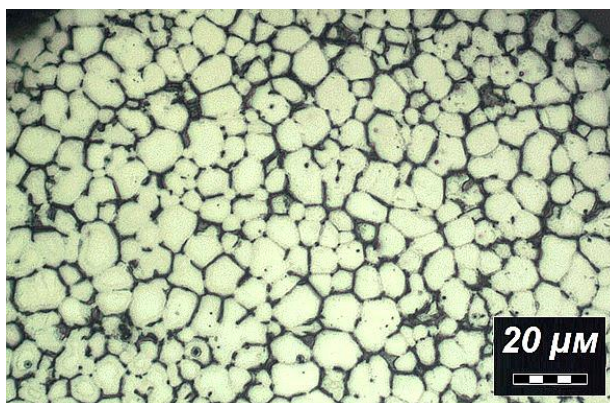
Рисунок 3.8 - Мікроструктури зразків після термообробки при використанні різних технологій лиття, $\times 500$



В



Г



Д

в - 16 °C/c; г - 25°C/c; д - 55 °C/c

Рисунок 3.8, аркуш 2

Аналіз результатів механічних випробувань (табл. 3.5) показав, що найменший комплекс властивостей мали зразки, відлиті при швидкості кристалізації $V_{ox} = 2,5$ °C/c. Зразки, відлиті при швидкості кристалізації $V_{ox} = 10$ °C/c мали вищу границю міцності на 10,6 МПа та відносне видовження на 2%. Утворення більш щільних та дисперсних скупчень вторинної фази при $V_{ox} = 16$ °C/c забезпечувало помітне зростання властивостей на 21,3 МПа та 2,5% відповідно. Подальше підвищення швидкості кристалізації до $V_{ox} = 25$ °C/c забезпечувало на 5,2 МПа вищу границю міцності та на 0,9 % вище відносне видовження.

Найвищий комплекс механічних властивостей отримано при $V_{ox} = 55$ °C/c. Утворення наддрібної мікроструктури призвело до значного

підвищення показників міцності: порівняно з $V_{ox} = 2,5$ °C/с, приріст границі міцності склав 55,4 МПа, а відносного видовження - 12,6 %.

За результатами механічних випробувань (табл. 3.5) побудовано математичні (3.2, 3.3) залежності, що описують вплив швидкості кристалізації на механічні властивості нового сплаву Mg-Zr-Nd.

Таблиця 3.5 - Результати механічних випробувань дослідних зразків

Швидкість кристалізації виливка, °C/с	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %
2,5	261,1	4,4
10	271,7	6,4
16	282,4	6,9
25	287,6	7,8
55	322,5	17,0

$$\sigma_B = 0,0007 * V_{ox}^3 - 0,0573 * V_{ox}^2 + 2,3291 * V_{ox} + 255,1865, \text{ МПа} \quad (3.2)$$

$$\delta = 0,0002 * V_{ox}^3 - 0,0143 * V_{ox}^2 + 0,3940 * V_{ox} + 3,5363, \% \quad (3.3)$$

де V_{ox} – швидкість кристалізації сплаву

Стандартна похибка апроксимація при визначенні σ_B становить $\bar{A} = 0,33$ %, а при визначенні δ - $\bar{A} = 1,15$ %.

Виходячи з результатів аналізу отриманих залежностей, найбільший вплив на границю міцності спостерігається при підвищенні швидкості охолодження до 15 °C/с та > 40 °C/с. Пластичність сильніше зростає при швидкостях охолодження > 30 °C/с. Таким чином, найбільш ефективним при литті сплавів є забезпечення швидкостей охолодження > 30 °C/с, яких можна досягти при охолодженні мідного кокілю рідким азотом.

Отримані результати впливу швидкості охолодження на мікроструктуру та властивості нового магнієвого сплаву системи Mg-Zr-Nd (табл. 3.6)

дозволяють вивести емпіричні рівняння регресії, що описують вплив розміру зерна сплаву на його границю міцності та відносне видовження (3.4, 3.5).

Таблиця 3.6 – Розмір мікрозерна та механічні властивості зразків з розробленого сплаву Mg-Zr-Nd

Середній діаметр зерна, мкм	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %
177	261,1	4,4
93,4	271,7	6,4
58,8	282,4	6,9
31	287,6	7,8
11	322,5	17,0

$$\sigma_B = 379,4068 \cdot d_{\text{сер}}^{-0,0735}, \text{ МПа} \quad (3.4)$$

$$\delta = 44,7520 \cdot d_{\text{сер}}^{-0,4510}, \% \quad (3.5)$$

де $d_{\text{сер}}$ – середній діаметр зерна, мкм

Стандартна похибка апроксимація при визначенні σ_B становить $\bar{A} = 1 \%$, а при визначенні δ - $\bar{A} = 9,4 \%$.

Використання встановлених залежностей дозволяє прогнозувати механічні властивості розробленого сплаву Mg-Zr-Nd виходячи з середнього розміру зерна мікроструктури.

У даному випадку механічні властивості зразків визначались після стандартного режиму термообробки Т6 для сплавів системи Mg-Zr-Nd. Проте, новий сплав Mg-Zr-Nd відрізняється підвищеним вмістом легувальних елементів, зокрема тугоплавкого цирконію, що викликає необхідність розробки нового режиму термічної обробки з метою подальшого підвищення комплексу механічних властивостей сплаву.

3.3 Висновки за розділом 3

1. Використання програми для симуляції ливарних процесів ProCast дозволило встановити можливість регулювання структурних параметрів зразків з нового магнієвого сплаву Mg-Zr-Nd шляхом зміни швидкості охолодження.

2. Аналіз мікроструктур зразків після термообробки показав, що підвищення швидкості кристалізації впливало на розмір мікрозерна, розподіл, щільність та об'єм скупчень зміцнювальної фази в бік їх зменшення.

3. Встановлено математичні залежності, що описують вплив швидкості кристалізації при литті на розмір мікрозерна, границю міцності та відносне видовження дослідного сплаву. Розмір зерна рівномірно зменшується при підвищенні швидкості охолодження. Найбільший вплив на границю міцності спостерігається при швидкостях охолодження < 15 °C/c та > 40 °C/c. Пластичність сильніше зростає при швидкостях охолодження > 30 °C/c.

4. За отриманими результатами виведено емпіричні рівняння, що дозволяють спрогнозувати механічні властивості дослідного сплаву Mg-Zr-Nd за середнім розміром мікрозерна.

4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Тенденції розвитку світового ринку технологій

Основним і досить ємним споживачем магнієвих сплавів є авіаційна промисловість. В даний час з магнієвих ливарних сплавів виготовляють різноманітні вироби для літаків і вертольотів: зі сплаву МЛ15 - деталі внутрішнього набору фюзеляжів, кабіни пілота, панелей приладів, кронштейни, рами, предкрилки, елементи двигунів; зі сплаву МЛ10 - деталі насосів, редукторів, маслоагрегатів, вентиляторів, корпуси двигунів.

Також провідне місце за масштабом використання і номенклатурі виливків з магнієвих сплавів займає автомобільна промисловість. Застосування магнієвих сплавів в автомобілях, з одного боку, покращує їх експлуатаційні характеристики шляхом помітного зниження маси, з іншого - відбувається помітна економія вуглеводнів і зниження шкідливих викидів в атмосферу. Практично всі автомобілі, що сходять з конвеєрів світових виробників, мають деталі з магнієвих сплавів.

Росія і Китай - дві країни з найбільшими запасами магнезитів. За даними Геологічної служби США за станом на 2012 рік Росія володіла запасами в розмірі 650 млн. тон, а Китай - 500 млн. тон. У Китаї є 27 доведених родовищ магнезитів, які, головним чином, розподілені в провінції Ляонін, Шаньдунь, Сінцзяні, Тибет і Ганьсу. Запаси в Ляоніні є найбільшими і становлять приблизно 85,6% всіх китайських запасів. Окрім Китаю та Росії магній виготовляють в Турції, Іспанії, Австрії, Словачії, Бразилії.

На рис 5.1 показані основні країни, що виготовляють магній.

У 1 кварталі 2020 року Китай збільшив виручку від продажів магнію і продукції на світовому ринку магнію на 5,6% до 295 млн. дол. При цьому в натуральному вираженні обсяг продажів магнію збільшився на 9,5% до 456 тис.тонн. Збільшення продажів магнію Китай практикує не перший квартал

поспіль. Так в 4 кварталі 2019 року обсяг продажів Китаєм на світовому ринку магнію збільшився на 2,9%.

Серед компаній покупців магнію на світовому ринку теж багато країн. Серед таких країн виділяються Нідерланди, США, Канада, Німеччина, Японія, Індія, Мексика, Румунія, Республіка Корея і безліч інших країн. Серед усіх країн виділяється Канада, як один з великих покупців. У 1 кварталі 2020 року країна знизилася обсяги імпорту на 22,7% до 44 млн.дол. і в натуральному вираженні на 21,8% до 16 тис.тон. Варто відзначити, що кварталом раніше ситуація на ринку магнію була дещо іншою. Обсяг поставок магнію в Канаду збільшився на 14,1% в грошовому вираженні і на 26,9% в натуральному вираженні.

На вигляд ціни на ринку магнію в 1 кварталі 2020 року залишилися на тому ж рівні, що і були в 4 кварталі 2019 року. Китай знизив ціни всього на 1,2% до 2,4 дол / кг, в той час як Канада знизилася ціну магнію всього на 1,1% до 2,7%. При цьому в 4 кварталі 2019 року ціни на магній по обом країнам також знизилися. На 5,1% знизив ціни Китай і на 10,1% знизилася ціни Канада.

В економічній частині дипломної роботи треба порахувати доцільність використання технології литва магнієвого сплаву в мідну форму, що охолоджується рідким азотом у порівнянні з литвом у піщано-глинисту форму.

У таблиці 4.1 описаний зміст ідеї та її вигода для потенційних споживачів

Таблиця 4.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Оптимізація мікроструктури сплаву мЛ10 за рахунок швидкої	Відповідальні високонавантажені деталі	Вищі механічні властивості

У таблиці 4.2 описана характеристика потенційного ринку

Таблиця 4.2 - Характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	ОАО «Авісма титаномагнієвий комбінат» і литва у піщано-глинисті форми	Удосконалення технології литва
		Простіше виробництво
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потрібні інвестиції
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	-

У таблиці 4.3 наведено попередню характеристику потенційних клієнтів

Таблиця 4.3 - Характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що фор- мує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
1	Удосконалення технології	«Всеросійський науково- дослідницький інститут авіаційних матеріалів»		Підвищення рівня міцності та пластичності

На рисунку 4.1 представлена карта стейкхолдерів, яка допоможе візуалізувати зв'язки між стейкхолдерами.

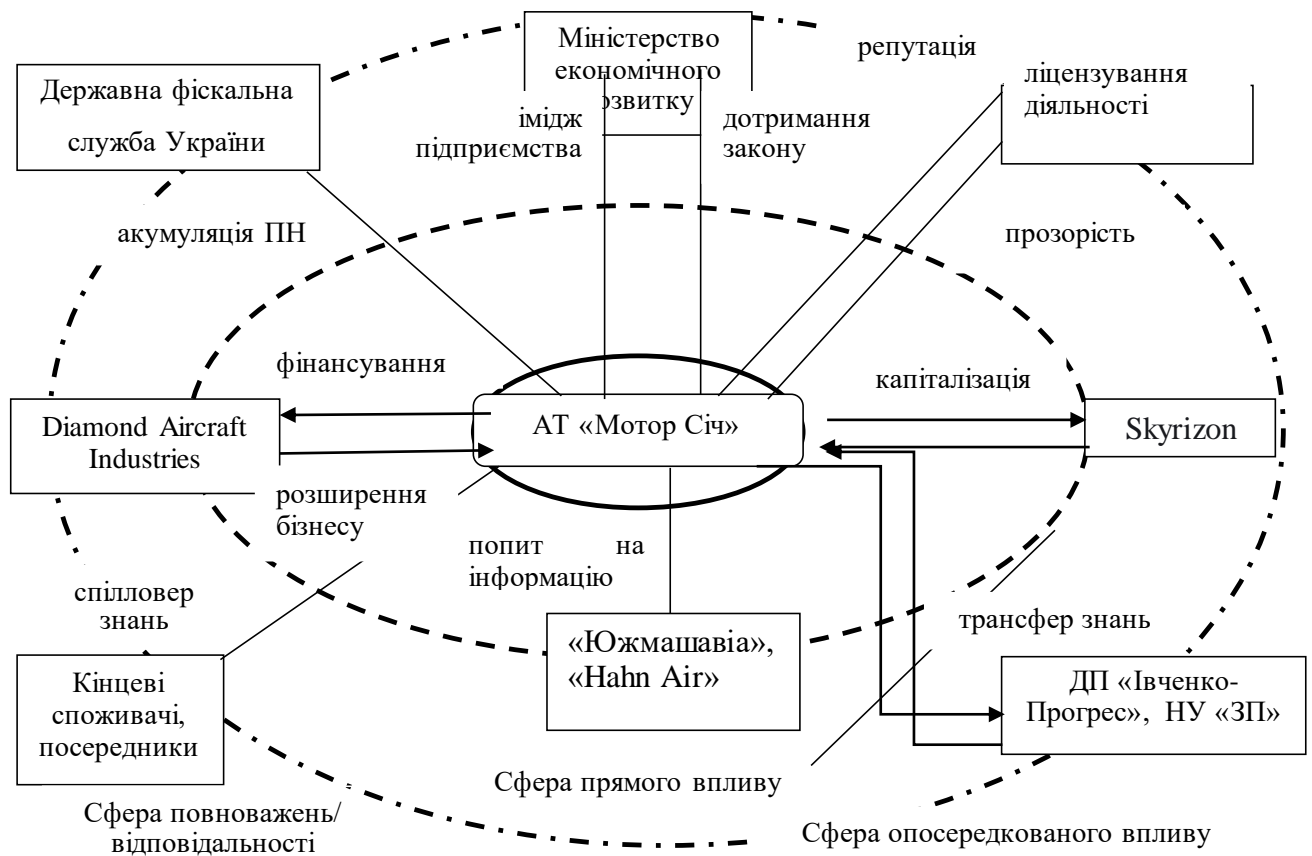


Рисунок 4.1 – Карта стейкхолдерів

4.2 Техніко-економічні розрахунки

Таблиця 4.4-Техніко-економічні показники виробів

Найменування виробу	Базовий виріб	Новий виріб
1. Зразок	МЛ10	МЛ10
2. Технологія зміцнення	Литво в піщано-глинисту форму	Литво в мідний кокіль, що охолоджується рідким азотом
3. Програма випуску, шт	100	100

Вартість сировини і основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховуються транспортно-заготівельні витрати. Сума витрат на сировину та матеріали зменшується на величину зворотних відходів, які створюються в процесі виробництва.

Вартість сировини та основних матеріалів наведена в таблиці 4.5

Таблиця 4.5 – Вартість основних матеріалів при литті у мідний кокіль, що охолоджується рідким азотом

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма використання, кг	Ціна	Вартість, грн
Сплав МЛ10	3,5	149050 грн/тону	521
Рідкий азот	35	460 грн/тону	16
Мідний кокіль	5 шт	200 грн	1000

Зворотні відходи (віднімаються)			100
Разом			1637

Основна заробітна плата основних виробничих робітників на одиницю виробу розраховується на основі трудомісткості виготовлення та часових тарифних ставок.

Розрахунок основної заробітної плати на одиницю продукції наведений в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка)

Найменування операції	Норма часу, год	Розряд робітника	Часова тарифна ставка	Заробітна плата на одиницю продукції, грн
Литво, ливарник	1	4	40	40
Гартування, терміст	8	3	35	280
Старіння, терміст	15	3	35	525
Усього				845

Додаткова заробітна плата виробничих робітників виплачується за кількість та якість виконаної роботи. Вона вміщує надбавки і доплати, премії за виробничі результати, оплату чергових та додаткових відпусток та інше. Додаткова заробітна плата складає 40 % від основної, та розраховується за формулою

$$ЗД = 30 \cdot \frac{K_d}{100}, \text{ грн}$$

де K_d – процент додаткової заробітної плати.

$$ЗД = 845 \cdot \frac{40}{100} = 338 \text{ грн}$$

Відрахування на соціальні заходи являють собою форму перерозподілу доходу на фінансування суспільних потреб, розраховуються згідно діючого законодавства і складають 22 % від фонду оплати праці. Відрахування на соціальні заходи розраховуються за формулою:

$$BC = (ЗО + ЗД + ПП) \cdot \frac{K_{bc}}{100}, \text{ грн}$$

де ПП – премії з прибутку, грн;

K_{bc} - % відрахування на соціальні заходи.

$$BC = (845 + 338 + 300) \cdot \frac{22}{100} = 326 \text{ грн}$$

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників і спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

Загальновиробничі витрати складають в середньому 400% до основної заробітної плати та розраховуються за формулою

$$ЗВВ = ЗО \cdot \frac{\alpha}{100}, \text{ грн}$$

$$ЗВВ = 845 \cdot \frac{400}{100} = 3380 \text{ грн}$$

де α - % загально виробничих витрат.

Вищенаведені витрати складають виробничу собівартість.

Адміністративні витрати вміщують витрати, пов'язані з утриманням адміністративно - управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інші. Адміністративні витрати складають в середньому 500% від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою

$$АВ = ЗО \cdot \frac{\beta}{100}, \text{ грн}$$

де β - відсоток адміністративних витрат.

$$АВ = 845 \cdot \frac{500}{100} = 4225 \text{ грн}$$

Витрати на збут складаються з витрат, пов'язаних з реалізацією продукції і вміщують витрати на тару та тарні матеріали, транспортування готової продукції, рекламу, витрати на маркетингові дослідження та інші. Витрати на збут складають 2% від виробничої собівартості і розраховуються за формулою

$$ВЗ = С_v \cdot \frac{\gamma}{100}, \text{ грн}$$

де $С_v$ – собівартість виробнича, грн;

γ - відсоток витрат на збут .

$$ВЗ = 9114 \cdot \frac{2}{100} = 1822 \text{ грн}$$

Прибуток складає 30% від повної собівартості і розраховується за формулою

$$П = С \cdot \frac{P}{100}, \text{ грн}$$

де P – рентабельність виробу, %.

$$П = 10936 \cdot \frac{30}{100} = 3280 \text{ грн}$$

Податок на додану вартість згідно законодавства становить 20% від оптової ціни і розраховується за формулою

$$ПДВ = Ц \cdot \frac{H_{\text{пдв}}}{100}, \text{ грн}$$

де $H_{\text{пдв}}$ – норматив податку на додану вартість, %.

$$ПДВ = 14216 \cdot \frac{20}{100} = 2843 \text{ грн}$$

Ціна продажу виробу розраховується за формулою

$$Ц_{\text{пр}} = Ц + ПДВ, \text{ грн}$$

$$Ц_{\text{пр}} = 14216 + 2843 = 17059 \text{ грн}$$

Калькуляція собівартості і ціни продукції наведена в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Калькуляція собівартості і ціни виробу

Статті витрат	Базова технологія	Нова технологія
Сировина і основні матеріали	500	1637
Основна заробітна плата основних виробничих робітників	845	845
Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	338	338
Відрахування на соціальні заходи з заробітної плати основних виробничих робітників	326	326
Загальновиробничі витрати	3380	3380
Адміністративні витрати	4225	4225
Собівартість виробнича	9614	10751

Розраховуємо економічну ефективність інноваційного проекту за показником економії експлуатаційних витрат розрахуємо за формулою:

$$E = (C_b \cdot K_e - C_n) \cdot N$$

де, E – економічний ефект від впровадження нової технології

C_b – собівартість базового виробу

C_n – собівартість нового виробу

K_e – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу

$$E=(9614 \cdot 1,5 - 10751) \times 100 = 367000 \text{ грн}$$

В ході розрахунків було визначено виробничу собівартість нової технології литва магнієвого сплаву, яка складає 10751 грн, а базового сплаву 9614 грн. Хоч базова технологія литва дешевша, проте значно вищі механічні властивості, які дає змогу отримати нова технологія, робить використання нової технології економічно доцільним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників»[13], а саме:

- вимог щодо облаштування робочих зон, що може бути пов'язано з незадовільним станом устаткування, захисних пристроїв, відсутності схем евакуації, захаращеність аварійних виходів.

б) Можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

в) Небезпеки, що пов'язані з безпосереднім виконанням дослідницьких робіт, а саме:

- небезпеки при виплавці дослідних плавок;

- небезпеки, що пов'язані з підготовкою зразків для визначення структури та механічних властивостей.

г) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії з використанням електронних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань.

г) Небезпеки, що пов'язані з випробуваннями механічних властивостей.

д) Небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань.

е) Невідповідність вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення» [14] що призводить до зниження працездатності.

є) Небезпеки які пов'язані з умовами праці у надзвичайних ситуаціях, а саме:

- при можливому загорянні;
- при порушенні процедури евакуації персоналу при надзвичайній ситуації.

5.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» [13] передбачено:

- вимоги до облаштування робочих зон передбачають справний робочий стан устаткування і захисних пристроїв, сприяння безпечних умов для усунення виявлених несправностей, які можуть негативно вплинути на безпеку і здоров'я працівників, можливість регулярного контролю і перевірок здатності функціонування захисних засобів і пристроїв, призначених для запобігання небезпеці або їх усунення.

Шляхи пересування в робочій зоні, включаючи сходи, стаціонарні переходи, аварійні виходи повинні бути позначені відповідними знаками, мати дороговкази, бути так розташовані і мати такі розміри, щоб прохід або проїзд був легким і безпечним. Наприклад: підлоги приміщень не повинні мати нерівностей, отворів або небезпечних ухилів, двері аварійних виходів повинні відкриватись назовні і замикатись, так, щоб у випадку необхідності будь-яка особа могла легко і швидко їх відкрити без застосування додаткових засобів, захищеність робочих зон, шляхів пересування, аварійних виходів категорично забороняється.

виробниче приміщення повинні мати достатню площу і висоту, для раціонального планування робочих місць відповідно до СНиП 2.09.04 – 87 «Административные и бытовые здания» [15] та СНиП 2.09.02 – 85 «Производственные здания»[16].

Конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень.

б) Згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97«Правила безпечної експлуатації електроустановок» [17] для безпечного проведення робіт необхідно виконати наступні організаційні заходи :

- призначити працівників, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- видати наряд або розпорядження;
- видати дозвіл на підготовку робочих місць і на допуск;
- підготувати робочі місця та забезпечити допуск до роботи;
- забезпечити нагляд при виконанні робіт;
- при необхідності, організувати переведення на інше робоче місце;
- забезпечити оформлення перерв у роботі та порядок її закінчення.

До основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустановки, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;

- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Захисне заземлення може бути ефективним тільки в тому випадку, якщо струм замикання на землю не збільшується зі зменшенням опору заземлення. Це можливо в мережах з ізольованою нейтраллю, де при глухому замиканні на землю або на заземлений корпус струм не залежить від провідності (або опору) заземлення, а також у мережах, напругою вище 1000 В з заземленою нейтраллю. В останньому випадку замикання на землю є коротким замиканням, при цьому спрацьовує максимальний струмовий захист.

У мережі із заземленою нейтраллю напругою до 1000 В заземлення неефективне, тому що навіть при глухому замиканні на землю струм залежить від опору заземлення та зі зменшенням останнього струм зростає.

в) Заходи безпеки при безпосередньому виконанні дослідницьких робіт.

Заходи безпеки при виплавленні дослідних плавок:

- верхня частина агрегатів (печей, міксерів тощо) для плавлення і рафінування магнію та приготування сплавів має виступати над рівнем підлоги або робочого майданчика не менше ніж на 200 мм;

- агрегати для плавлення і рафінування магнію та приготування магнієвих сплавів мають бути обладнані системами місцевого видалення газів;

- усі металеві шихтові матеріали, що завантажуються у плавильні й рафінувальні агрегати з розплавленим металом, мають бути прогріті до температури понад 100 °С;

- роботи з приготування розчину біхромату калію мають проводити працівники у протигазах і захисних гумових рукавицях;

- роботи, пов'язані з відбором проб і приготуванням парафіно-вазелинової суміші, необхідно виконувати у захисних гумових рукавицях і окулярах;

- ємності з технологічними розчинами і парафіно-вазеліноюю сумішшю має бути обладнано системою місцевого видалення газів;

- під час виконання операцій з технологічними розплавами мають застосовуватися захисні окуляри. Під час загортання гарячих чушок у папір працівники повинні використовувати захисні рукавиці.

Заходи безпеки при виготовленні зразків для визначення структури та властивостей:

- для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

Заходи безпеки при роботі на шліфувальних і заточувальних верстатах: установка абразивних кіл на верстатах повинна проводитися тільки спеціально проінструктованими наладчиками; використання абразивних кіл з дефектами заборонено; абразивні кола повинні мати штамп або наклейку про випробування порядковий номер кола і підпис особи, відповідальної за випробування; біля кожного верстата необхідно вивісити табличку із зазначенням допустимої роботи колової швидкості використовуваних кіл і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину; при обертанні абразивного кола, виступаючі кінці шпинделя і кріпильні деталі захистити захисними кожухами; підручники повинні мати достатній за величиною майданчик для стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм; заборонено працювати без підручника, захисного екрана або окулярів, якщо верстат не заземлений і не обладнаний установкою для відсмоктування

абразивного пилю. ГОСТ 12.3.028–82 «Процесс обработки абразивными и эльборовым инструментом»[18].

г) Для попередження шкідливої дії іонізуючих випромінювань необхідно усувати всяку можливість опромінювання організму дозами, які перевищують гранично допустимі. Ступінь ураження радіоактивними речовинами організму людини залежить від ряду чинників: виду випромінювання (альфа-, бета-, гамма-промені і т. ін.); кількості ізотопу (активності); його властивостей (енергії частинок в період піврозпаду та ін.); шляхів попадання в організм людини та його індивідуальної чутливості. Для захисту від зовнішнього опромінювання, яке має місце при роботі із закритими джерелами випромінювання, основні зусилля необхідно направити на попередження переопромінення персоналу шляхом:

- збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною (захист відстанню);
- скорочення тривалості роботи в зоні випромінювання (захист часом);
- екранування джерела випромінювання (захист екранами).

г) Для запобігання травмуванню при випробуванні механічних властивостей потрібно слідкувати за станом випробувальних машин, та при необхідності замінювати їх на більш сучасні та досконалі моделі.

д) Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [19].

Режим праці та відпочинку повинен організовуватися від виду категорії трудової діяльності яка поділяється на 3 групи:

- робота зі зчитувальною інформацією за попереднім запитом по сумарному числу опрацьованих знаків. Гранична кількість 60 тисяч знаків.
- сумарна кількість набору знаків при безперервній роботі не більше 20 тисяч знаків. При роботі з регламентованими перервами (15 хв/год) не більше 40 тисяч знаків.

- сумарний час безпосередньої роботи з комп'ютером в режимі діалогу при безперервній роботі не більше 4 годин, а при роботі з перервами не більше 6 годин.

5.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

е) Освітлення в приміщенні повинно відповідати вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення»[20]:

Освітленість від системи загального освітлення повинна складати не менше 200 лк при розрядних лампах і 100 лк при лампах розжарювання. Створювати освітленість більше 750 лк при розрядних лампах і 300 лк при лампах розжарювання дозволяється тільки за наявності обґрунтування;

Освітленість від світильників загального освітлення в системі комбінованого підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості.

При суміщеному освітленні для приміщень громадських будинків з боковим освітленням при розрахунковому значенні КПО (коефіцієнт природного освітлення), яке дорівнює або менше 80 % від нормованого значення, освітленість від загального штучного освітлення слід підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості.

Штучне освітлення може бути двох систем - загальне та комбіноване. Робоче освітлення слід передбачати для всіх приміщень будинків, а також ділянок відкритих просторів, призначених для роботи, проходу людей та руху транспорту. Для приміщень, які мають зони з різними умовами природного освітлення та різними режимами роботи, повинно передбачатись окреме керування освітленням таких зон. За необхідності частина світильників робочого або аварійного освітлення може бути використана для чергового освітлення. Нормовані характеристики освітлення в приміщеннях і зовні будинків може забезпечуватись як світильниками робочого освітлення, так і

спільним з ним освітленням світильниками безпеки і (або) евакуаційного освітлення .

Для освітлення приміщень слід використовувати, як правило, найбільш економічні розрядні лампи. Використання ламп розжарювання для загального освітлення допускається тільки у випадках неможливості або техніко економічної недоцільності використання розрядних ламп. Для місцевого освітлення, крім розрядних джерел світла, рекомендується використовувати лампи розжарювання, в тому числі галогенні. Застосування ксенонових ламп у приміщеннях не дозволяється.

Освітленість робочої поверхні, створена світильниками загального освітлення в системі комбінованого, повинна складати не менше 10 % нормованої для комбінованого освітлення при таких джерелах світла, які застосовуються для місцевого освітлення. При цьому освітленість повинна бути не менше 200 лк при розрядних лампах, не менше 75 лк - при лампах розжарювання. Створювати освітленість від загального освітлення в системі комбінованого більше 500 лк при розрядних лампах і більше 150 лк при лампах розжарювання допускається тільки за наявності обґрунтувань .

5.4 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки визначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»[21].

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою»[22] і СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания»[16].

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки та вимогами ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги»[26]. Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания»[16].

Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від відповідності ступеня захисту їх оболонок (ІР) класу пожежанебезпечної зони (П-I, П-II, П-IIa и П-III) визначених згідно НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [24]. Засоби виявлення займань та пожеж передбачаються згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» [25].

5.5 Заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій

Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [26]. Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания»[16].

Проведення організованої евакуації з виробничих та інших приміщень і будівель, запобігання проявам паніки і недопущення загибелі людей забезпечується шляхом:

- планування евакуації людей (складання плану евакуації з приміщення з розробленням схеми евакуаційних шляхів та виходів);

- визначення зон, придатних для розміщення евакуйованих з потенційно небезпечних зон;

- організації управління евакуацією;

- навчання населення діям під час проведення евакуації.

Працівники охорони в разі виявлення пожежі, спрацювання засобів пожежної сигналізації та автоматичного пожежогасіння повинні діяти за заздалегідь розробленою інструкцією, в якій визначаються їхні обов'язки з контролю за додержанням протипожежного режиму. Заступаючи на чергування, вони зобов'язані пересвідчитися в тому, що шляхи евакуації не захащено, а двері евакуаційних виходів у разі потреби без перешкод відчиняються. На підприємстві має бути встановлено порядок оповіщення людей про пожежу, з яким необхідно ознайомити всіх працівників. Після оповіщення про пожежу до початку евакуації проходить певна затримка залежно від того, яку із систем оповіщення було використано для повідомлення про надзвичайну ситуацію.

Як евакуаційні виходи можуть використовуватись дверні отвори, якщо вони ведуть з приміщень:

- безпосередньо назовні;

- на сходовий майданчик з виходом назовні безпосередньо або через вестибюль;

- у прохід або коридор з безпосереднім виходом назовні або на сходову майданчик;

- у сусідні приміщення того ж поверху з вогнестійкістю не нижче III ступеня, що не містять виробництв, які належать за вибухопожежною та пожежною безпекою до категорій А, Б і В і мають безпосередній вихід назовні або на сходовий майданчик.

Для безпечної евакуації шляхи та виходи мають відповідати таким вимогам:

- евакуаційні шляхи і виходи повинні утримуватися вільними, не зашарашуватися та у разі потреби забезпечувати евакуацію всіх людей, які перебувають у приміщеннях;

- кількість та розміри евакуаційних виходів, їх конструктивні рішення, умови освітленості, забезпечення незадимленості, протяжність шляхів евакуації, їх оздоблення повинні відповідати протипожежним вимогам будівельних норм.

ВИСНОВКИ

1. Використання програми для симуляції ливарних процесів ProCast дозволило встановити можливість регулювання структурних параметрів зразків з нового магнієвого сплаву Mg-Zr-Nd шляхом зміни швидкості охолодження.

2. Аналіз мікроструктур зразків після термообробки показав, що підвищення швидкості кристалізації впливало на розмір мікрозерна, розподіл, щільність та об'єм скупчень зміцнювальної фази в бік їх зменшення.

3. Встановлено математичні залежності, що описують вплив швидкості кристалізації при литті на розмір мікрозерна, границю міцності та відносне видовження дослідного сплаву. Розмір зерна рівномірно зменшується при підвищенні швидкості охолодження. Найбільший вплив на границю міцності спостерігається при швидкостях охолодження < 15 °C/c та > 40 °C/c. Пластичність сильніше зростає при швидкостях охолодження > 30 °C/c.

4. За отриманими результатами виведено емпіричні рівняння, що дозволяють спрогнозувати механічні властивості дослідного сплаву Mg-Zr-Nd за середнім розміром мікрозерна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Кузін О.А., Яцюк Р.А., *Металознавство та термічна обробка металів*. Л.: Афіша, 2002, 304 с.
2. Грешта В. Л, Климов О. В., Лисиця О. В., Степанова Л. П. *Кольорові метали і сплави.*: ЗНТУ, 2015, 336 с.
3. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. М.: МИСиС, 2005, 432 с.
4. *Advances in Wrought Magnesium Alloys Fundamentals of Processing, Properties and Applications. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. 2012, P. 346-375
5. Lehnert W., Chabbi L. *Besonderheiten beim Umformen von Magnesiumwerkstoffen, MEFORM 99, Freiberg, 24. und 25. März, 1999.*
6. Girshov V.L., Rudskoy A.I., Tsemenko V.N. *Pererabotka metallicheskoj struzhki sposobami poroshkovoy metallurgii i plasticheskoy deformatsii. Trudy SPbGPU. № 510. Materialy i khimicheskiye tekhnologii*. 2009. S. 18–27.
7. Rudskoy A.I., Rybin Yu.I., Tsemenko V.N. *Teoriya i modelirovaniye protsessov deformirovaniya poroshkovykh i poristykh materialov*. SPb.: Nauka. 2012, 416 p.
8. Hadzima B, Janecek M, Estrin Y. *Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained interstitial free steel. Materials Science and Engineering*. 2007, P. 243 – 247.
9. Dobatkin, S. *Ultrafine-grained low carbon steels by severe plastic deformation. Metalurgija (Metallurgy)*. 2008, P. 181 – 186.
10. Ahmadkhaniha D. *Corrosion Behavior of Severely Plastic Deformed Magnesium Based Alloys. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017, P. 439 – 448.

11. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. Санкт-Петербург : Эко Вектор. 2017, 479 с.
12. Альтман М.Б, Белов В.И. Магниевые сплавы. М. : Металлургия. 1978, 528 с
13. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. НПАОП 0.00-7.11-12. К. : МНС України, 2012. 116 с.
14. Природне і штучне освітлення. ДБН В.2.5-28-2018. К. : Мінрегіон України. 2018, 133 с.
15. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. ДБН В.2.2-28:2010. К. : Мінрегіонбуд України. 2011, 31 с.
16. Правила безпечної експлуатації електроустановок. НПАОП 40.1-1.01-97. К. : Держнагляд охорони праці. 1997, 97 с.
17. ГОСТ 12.3.028-82. Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. [Чинний від 1983.01.01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001
18. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. ДСанПіН 3.3.2.007-98.К. : МОЗ України, 1998.
URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>.
19. Природне і штучне освітлення. ДБН В.2.5-28-2018. К. : Мінрегіон України. 2018, 133 с.
20. Правила пожежної безпеки в Україні. НАПБ А.01.001-14. К. : МВС України. 2014, 47 с
22. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. ДСТУ Б В.1.1-36:2016.К. : Мінрегіонбуд України. 2016, 66 с.
23. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. ДБН В.1.1-7:2016. К. : Мінрегіон України. 2017, 47 с.

24. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. НПАОП 40.1-1.32-01. К. : Мінпраці України, 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01/card2#Card>

25. Системи протипожежного захисту. ДБН В.2.5-56:2014. К. : Мінрегіон України. 2014, 191 с.

26. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. ДБН В.1.1-7:2016. К. : Мінрегіон України. 2017, 47 с.

ДОДАТОК А

Криві охолодження

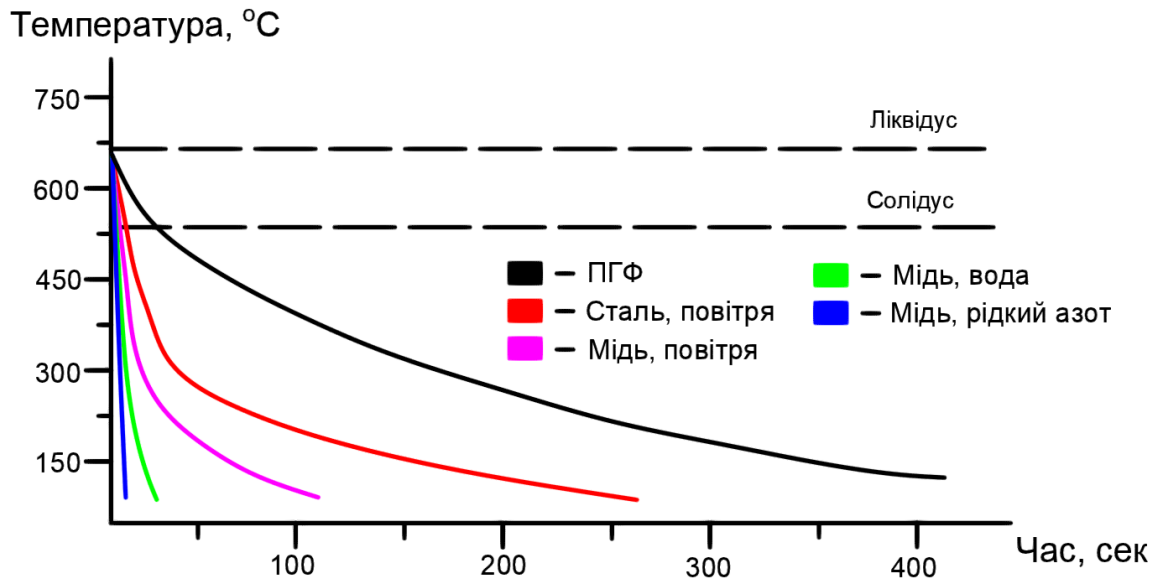


Рисунок А.1 - Криві охолодження для різних технологій лиття

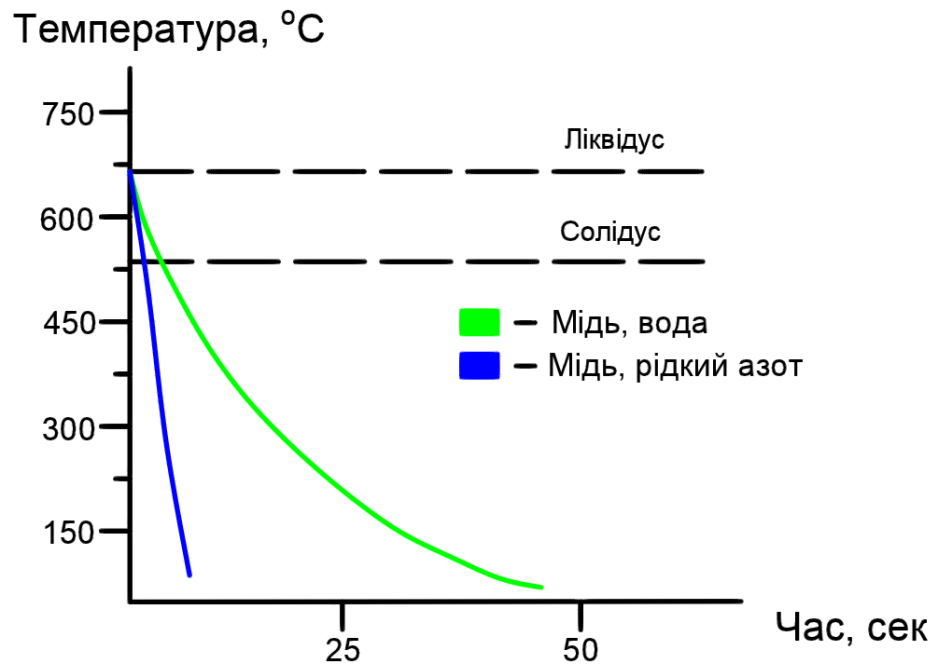
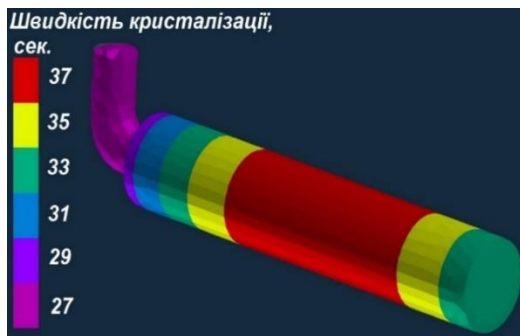


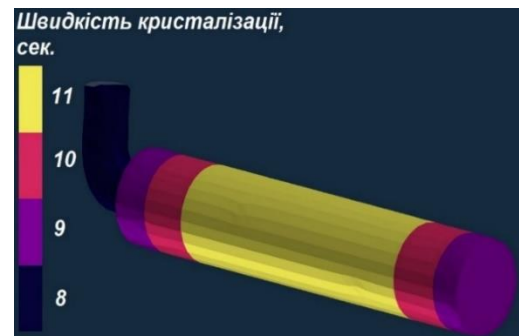
Рисунок А.2 - Криві охолодження для лиття в мідній кокіль, що охолоджується водою і рідким азотом

ДОДАТОК Б

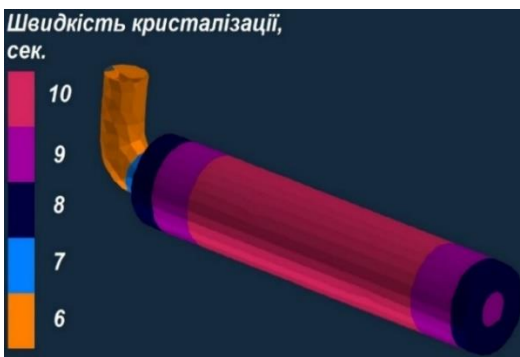
Моделювання швидкості охолодження для різних технологій



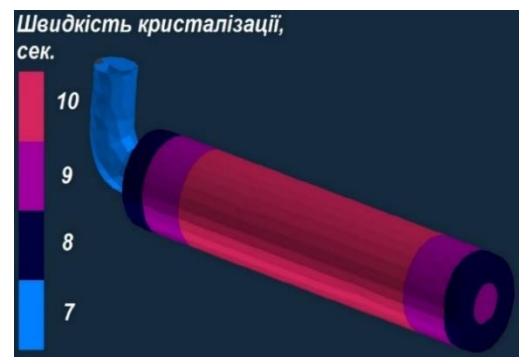
а



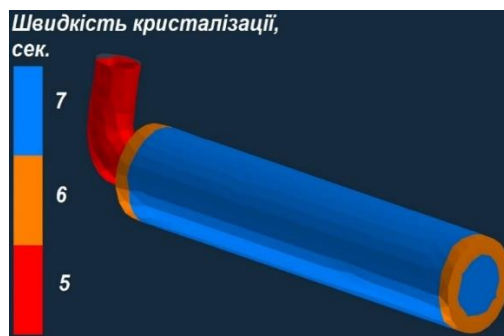
б



в



г



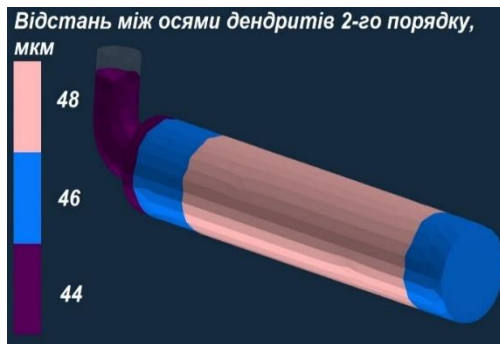
д

а - лиття в ПГФ; б - лиття в сталевий кокіль, охолодження повітрям;
 в - лиття в мідний кокіль, охолодження повітрям; г - лиття в мідний кокіль,
 охолодження водою; д - лиття в мідний кокіль, охолодження рідким азотом

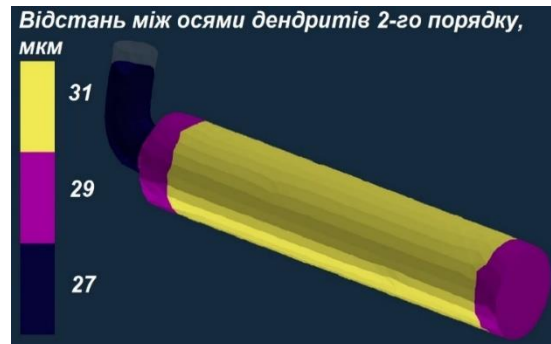
Рисунок Б.3 - Моделювання швидкості кристалізації виливків при використанні різних технологій лиття

ДОДАТОК В

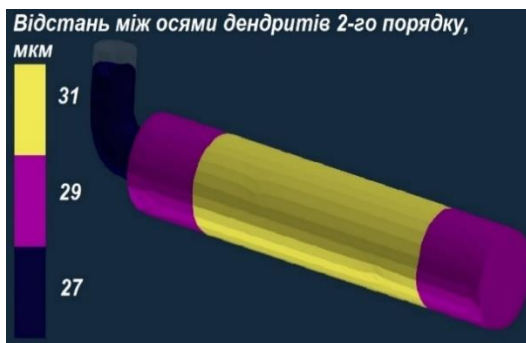
Модель впливу швидкості охолодження кристалізації на відстань між осями дендритів 2-го порядку



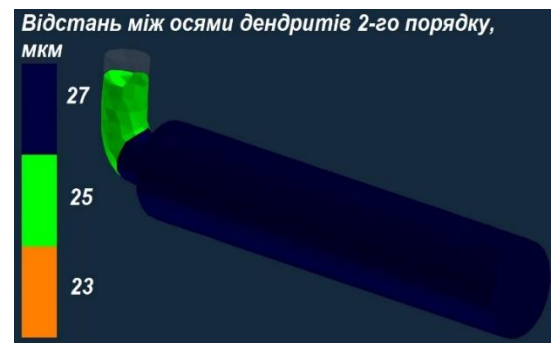
а



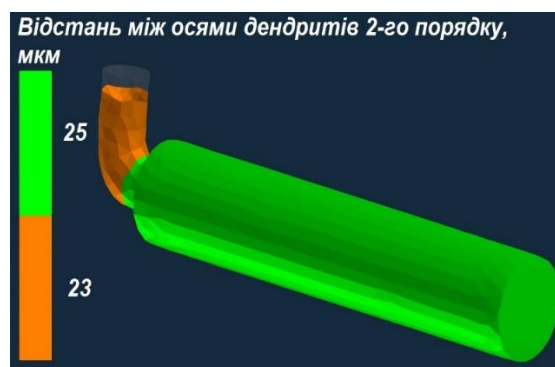
б



в



г



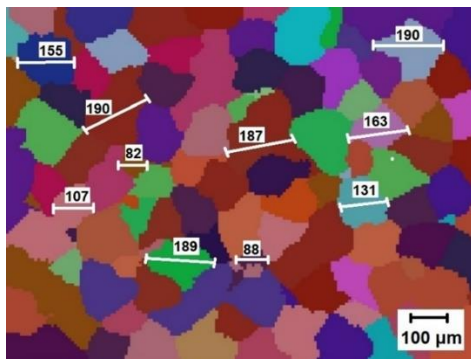
д

а - $-2^{\circ}\text{C}/\text{c}$; б - $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$; в - $15^{\circ}\text{C}/\text{c}$; г - $25^{\circ}\text{C}/\text{c}$; д - $60^{\circ}\text{C}/\text{c}$

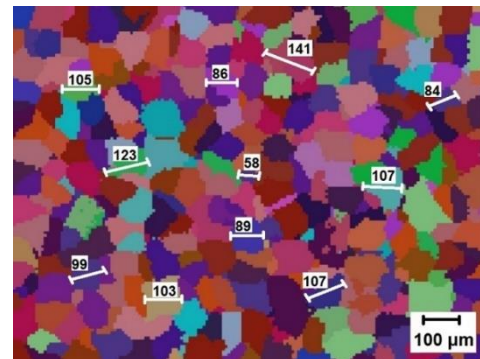
Рисунок В.1 - Модель впливу швидкості кристалізації на відстань між осями дендритів 2-го порядку

ДОДАТОК Г

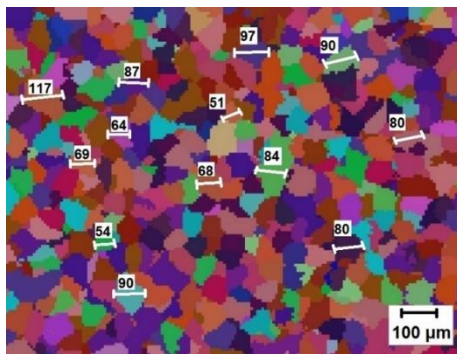
Модель впливу швидкості кристалізації на мікроструктуру сплаву



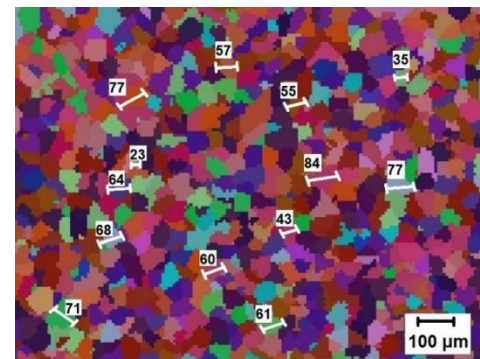
а



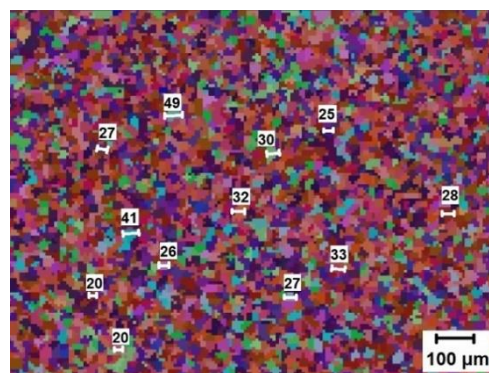
б



в



г



д

а – 2°C/c; б - 10 °C/c; в - 15°C/c; г –25 °C/c; д - 60 °C/c

Рисунок Г.1 - Модель впливу швидкості кристалізації на мікроструктуру сплаву

ДОДАТОК Д
Результати моделювання мікроструктури

Таблиця Д.1 - Результати моделювання параметрів мікроструктури

Швидкість кристалізації, °С/с	Охолодження до 20 °С, сек	Відстань між осями дендритів 2-го порядку, мкм	Середній розмір зерна, мкм	Стандартне відхилення, мкм
2 (ПГФ, повітря)	450	45 - 49	148,2	43,4
10 (Сталь, повітря)	260	28 - 32	100,2	21,7
15 (Мідь, повітря)	110	28 - 31	79,3	18,2
25 (Мідь, вода)	48	26 - 29	59,5	17,6
60 (Мідний, рідкий азот)	12	24 - 25	30,0	8,4

Таблиця Д.2 - Величина мікрозерна зразків, відлитих за різними технологіями

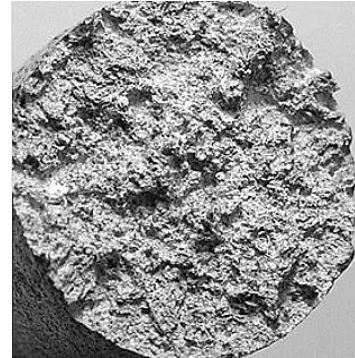
Швидкість кристалізації вилівка, °С/с	Номер мікроструктури за ГОСТ 21073.1-75	Середній діаметр зерна, мкм	Розмірна група, мкм	Стандартне відхилення, мкм
2,5	2	177	64 – 275	92,5
10	4	93,4	69 – 106	15,2
16	6	58,8	52 – 64	5,3
25	7	31	21 – 39	5,8
55	10	11	7 – 15	2,4

ДОДАТОК Е

Макрофрактограми зламів після випробування на розтяг



а



б



в



г



д

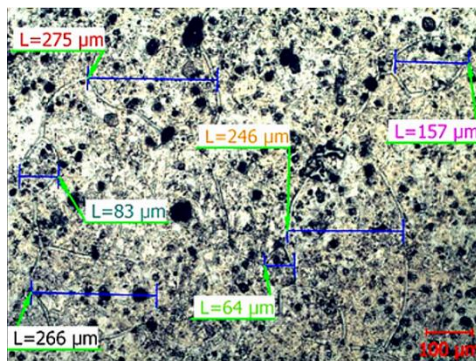
а – 2,5°C/с; б - 10 °C/с; в - 16°C/с; г - 25°C/с; д - 55°C/с

Рисунок Е.1 - Макрофрактограми зламів після випробування на розтяг,

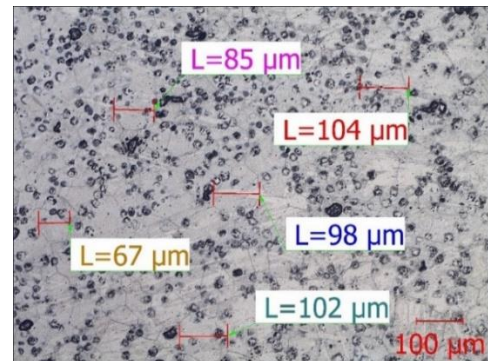
x5

ДОДАТОК Ж

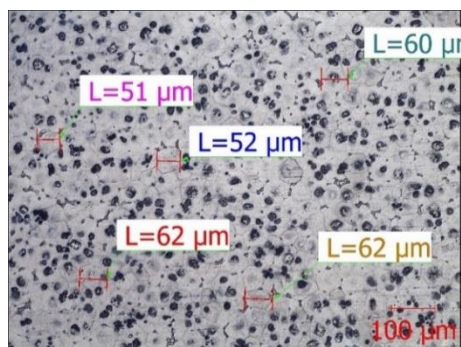
Мікроструктури дослідних зразків при різних швидкостях кристалізації



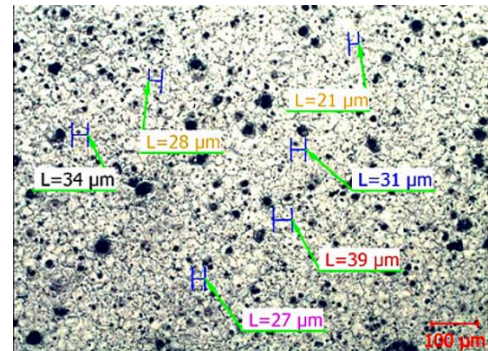
а



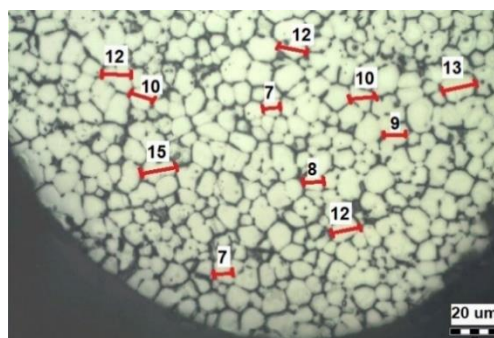
б



в



г

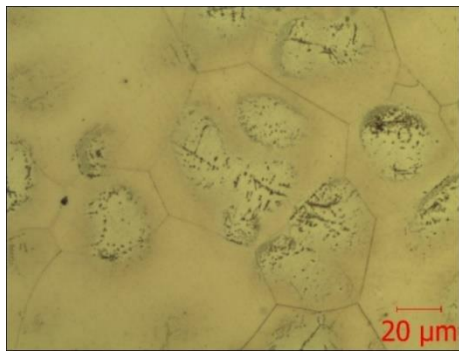


д

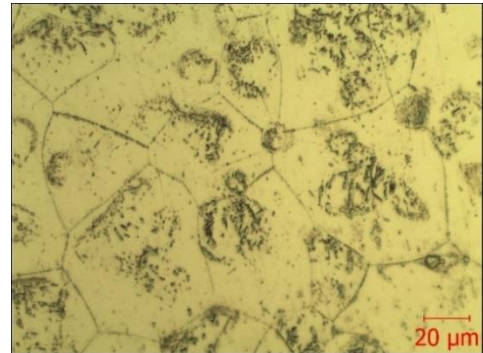
а – 2,5 °C/c; б - 10 °C/c; в - 16 °C/c; г - 25°C/c; д - 55 °C/c

Рисунок Ж.1 - Мікроструктури дослідних зразків з розробленого сплаву Mg-Zr-Nd при різних швидкостях кристалізації

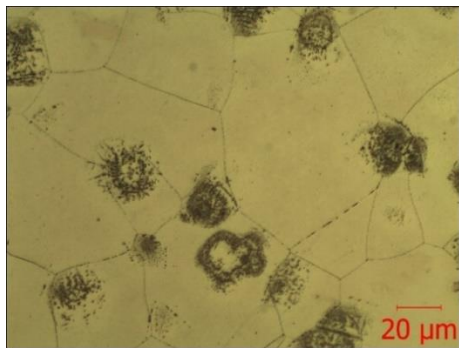
ДОДАТОК И
Мікроструктури зразків після термообробки



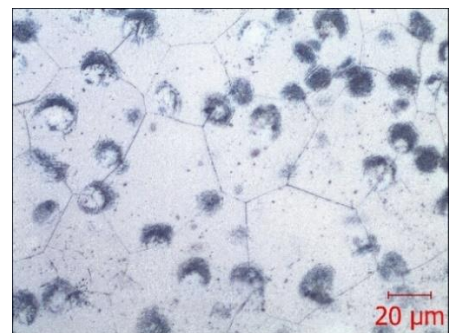
а



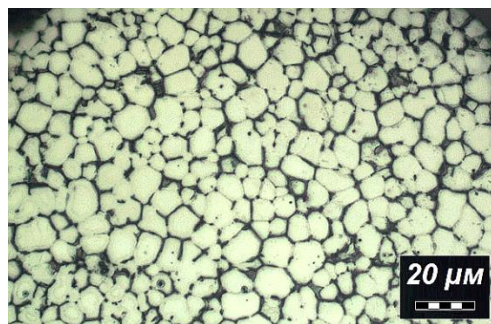
б



в



г



д

а – 2,5 °C/c; б - 10 °C/c; в - 16 °C/c; г - 25°C/c; д - 55 °C/c

Рисунок И.1 - Мікроструктури зразків після термообробки при використанні різних технологій лиття, x500

ДОДАТОК К
Результати механічних випробувань

Таблиця К.1 - Результати механічних випробувань дослідних зразків

Швидкість кристалізації випливка, °C/c	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %
2,5	261,1	4,4
10	271,7	6,4
16	282,4	6,9
25	287,6	7,8
55	322,5	17,0

$$\sigma_B = 0,0007 \cdot V_{ox}^3 - 0,0573 \cdot V_{ox}^2 + 2,3291 \cdot V_{ox} + 255,1865, \text{ МПа}$$

$$\delta = 0,0002 \cdot V_{ox}^3 - 0,0143 \cdot V_{ox}^2 + 0,3940 \cdot V_{ox} + 3,5363, \%$$

Таблиця К.2 - Розмір мікрозерна та механічні властивості зразків з розробленого сплаву Mg-Zr-Nd

Середній діаметр зерна, мкм	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %
177	261,1	4,4
93,4	271,7	6,4
58,8	282,4	6,9
31	287,6	7,8
11	322,5	17,0

$$\sigma_B = 379,4068 \cdot d_{сер}^{-0,0735}, \text{ МПа}$$

$$\delta = 44,7520 \cdot d_{сер}^{-0,4510}, \%$$