

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри )

**Пояснювальна записка**

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Вплив морфології та топології інтерметалідної фази на комплекс властивостей

сплаву МЛ5

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ232м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

Сусіденко С.С

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ШАЛОМЄЄВ В.А

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет

Кафедра Фізичне матеріалознавство

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 132 Матеріалознавство  
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ року

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

СУСІДЕНКО Сергій Сергійович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вплив морфології та топології інтерметалідної фази на комплекс властивостей сплаву МЛ5

керівник проєкту (роботи) професор, д.т.н ШАЛОМЄЄВ Вадим Анатолійович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 18.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) сплав на основі магнію системи Mg-Zr-Nd

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Літературний огляд, матеріали та методика досліджень, експериментальна частина, охорона праці, економіко-організаційна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

| Розділ | ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                           |
|--------|-------------------------------------------|----------------|---------------------------|
|        |                                           | завдання видав | прийняв виконане завдання |
| 1      | ШАЛОМЄЄВ В.А професор, д.т.н              |                |                           |
| 2      | ШАЛОМЄЄВ В.А професор, д.т.н              |                |                           |
| 3      | ШАЛОМЄЄВ В.А професор, д.т.н              |                |                           |
| 4      | КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н             |                |                           |
| 5      | НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н              |                |                           |
| НК     |                                           |                |                           |
|        |                                           |                |                           |

7. Дата видачі завдання « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проєкту (роботи)          | Строк виконання етапів проєкту (роботи) | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1     | Літературний огляд                                |                                         |          |
| 2     | Матеріали та методика досліджень                  |                                         |          |
| 3     | Експериментальна частина                          |                                         |          |
| 4     | Економіко-організаційна частина                   |                                         |          |
| 5     | Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |
|       |                                                   |                                         |          |

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ Сергій СУСІДЕНКО  
 ( підпис ) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_ Вадим ШАЛОМЄЄВ  
 ( підпис ) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 91 с., 19 табл., 21 рис., 6 додатків, 56 джерел.

МАГНІЙ, РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ, МІКРОЛЕГУВАННЯ,  
ІНТЕРМЕТАЛІДНА ФАЗА, МІКРОСТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ  
ВЛАСТИВОСТІ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ, ОХОРОНА ПРАЦІ

Об'єкт дослідження: Магнієвий сплав МЛ5 мікролегований рідкісноземельними елементами.

Мета дослідження полягає у вивченні впливу морфології та топології інтерметалідної фази на комплекс властивостей сплаву МЛ5. Основна мета - розкриття взаємозв'язку між структурою інтерметалідних фаз і механічними, хімічними та фізичними характеристиками цього сплаву.

Дослідження включає аналіз морфології, розмірів, розташування та інших параметрів інтерметалідних фаз у сплаві МЛ5. Проводяться детальні мікроструктурні аналізи, використання методів скануючої електронної мікроскопії, рентгенівської дифракції та інших технік для вивчення і характеристики цих фаз.

Метою є також встановлення оптимальної структури інтерметалідних фаз, яка максимально підвищить механічні властивості сплаву МЛ5, зокрема міцність, пластичність, стійкість до корозії та інші параметри, що важливі для його подальшого використання в медичних індустріях.

## ЗМІСТ

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                    | 6  |
| 1 Аналіз літературних джерел .....                                                            | 7  |
| 1.1 Аналіз промислових ливарних магнієвих сплавів.....                                        | 7  |
| 1.2 Модифікування магнієвих сплавів.....                                                      | 15 |
| 1.3 Легування магнієвих сплавів .....                                                         | 18 |
| 2 Матеріали та методика досліджень .....                                                      | 27 |
| 2.1 Проведення дослідних плавок, термічної обробки та визначення хімічного складу металу..... | 27 |
| 2.2. Методи якісної та кількісної оцінки структурних елементів .....                          | 28 |
| 2.3 Визначення механічних властивостей .....                                                  | 29 |
| 3 Експериментальна частина .....                                                              | 31 |
| 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....                                      | 47 |
| 4.1 Аналіз потенційних небезпек .....                                                         | 47 |
| 4.2 Заходи забезпечення безпеки.....                                                          | 49 |
| 4.3 Заходи з виробничої санітарії .....                                                       | 55 |
| 4.4 Заходи з пожежної безпеки .....                                                           | 57 |
| 4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....                                                           | 59 |
| 5 Економіко-організаційна частина.....                                                        | 64 |
| 5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу .....                                              | 64 |
| 5.2 Послідовний аналіз .....                                                                  | 65 |
| 5.3 Розрахунок економічного ефекту при впровадженні результатів НДР .....                     | 74 |
| Висновки .....                                                                                | 79 |
| Перелік джерел посилань .....                                                                 | 80 |

## ВСТУП

Розвиток авіаційного двигунобудування на сьогоднішній день, де крім традиційних вимог до високотемпературних конструкцій, існує потреба у зменшенні маси, робить використання легких магнієвих матеріалів надзвичайно обнадійливим.

Використання лиття з магнієвих сплавів дозволяє значно знизити вагу компонентів, що підсилює ефективність їх роботи, збільшує швидкість, корисне навантаження, дальність польоту та знижує споживання палива.

Зростаючі стандарти надійності та довговічності авіаційної техніки вимагають покращення характеристик литв з магнієвих сплавів. Вже відомі магнієві сплави системи Mg-Al-Zn (МЛ5), які ефективно функціонують до 150 °С, однак вони слабшають при вищих температурах.

Так, дослідження з впливу металургійних та технологічних факторів на фізико-механічні та експлуатаційні властивості магнієвих литв відіграють важливу роль у розвитку цієї галузі. Магнієві сплави мають велике значення у легкій промисловості, авіабудуванні, автомобілебудуванні та інших сферах через свою легкість та механічні властивості.

Дослідження, спрямовані на встановлення природи впливу різних факторів на властивості магнієвих сплавів, можуть включати аналіз впливу хімічного складу сплаву, термічної обробки, методів лиття, термінів випробування та умов експлуатації на їхню міцність, текучість, стійкість до корозії та інші властивості. Таким чином, розробка нових та удосконалення існуючих магнієвих сплавів з вищим набором властивостей, заснованих на атомно-електронних взаємодіях їх компонентів, а також підвищення якості литва за рахунок контролю за їх структурними параметрами, є важливою задачею, яка сприятиме прогресу в машинобудівній галузі.

# 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

## 1.1 Аналіз промислових ливарних магнієвих сплавів

Магній - легкий ( $\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$ ) і доволі крихкий метал, має гранецентровану кубічну кристалічну ґратку, його атомний радіус 0,160 нм, іонний радіус 0,104 нм,  $T_{\text{пл}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{кип}} = 1090^\circ\text{C}$ . Механічні властивості чистого магнію: границя плинності 38 МН/м<sup>2</sup>; відносне подовження 50 %; твердість за Бринелем 200...300 МН/м<sup>2</sup>) [1], тому як конструкційний матеріал він практично не застосовується. У машинобудуванні широко застосовують ливарні сплави на основі магнію, що містять алюміній, цинк, марганець, цирконій, неодим та інші легувальні добавки. За рівнем міцності та низкою інших основних властивостей (жароміцності, густини тощо) магнієві ливарні сплави поділяють на три групи (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1- Класифікація магнієвих ливарних сплавів за міцністю [2]

| Класифікація          | Марки сплавів різних країн           |                        |                                    |                      |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|
|                       | Україна,<br>ГОСТ 2856                | США,<br>ASTM B80       | Великобританія,<br>BS 2970         | Японія,<br>JIS H5203 |
| Середньої<br>міцності | МЛЗ                                  | -                      | -                                  | -                    |
| Високої<br>міцності   | МЛ4, МЛ5,<br>МЛ6, МЛ8,<br>МЛ12, МЛ15 | AZ63A, AZ81A,<br>ZK51A | MAG1, MAG2,<br>MAG3, MAG4,<br>MAG7 | MC1,<br>MC2, MC7     |
| Жароміцні             | МЛ9, МЛ10,<br>МЛ11, МЛ19             | EZ33A, K1A,<br>QE21A   | MAG5, MAG6,<br>MAG8, MAG9          | MC8                  |

За властивостями жаростійкості їх можна поділити на сплави для роботи до 150 °С, 200 °С і 250 °С (таблиця 1.2) [2].

Таблиця 1.2 - Робочі температури експлуатації та порівняльні властивості магнієвих сплавів після загартування і старіння [2]

| Марка сплаву | Механічні властивості,<br>не менше |              | Температури експлуатації |
|--------------|------------------------------------|--------------|--------------------------|
|              | $\sigma_B$ , МПа                   | $\delta$ , % |                          |
| МЛ4, МЛ5     | 226,0                              | 2,0          | 150                      |
| МЛ11         | 137,0                              | 2,0          | 200                      |
| МЛ10         | 226,0                              | 3,0          | 250                      |
| МЛ19         | 216,0                              | 3,0          | 250                      |

За своїм хімічним складом ливарні магнієві сплави можуть бути віднесені до трьох основних груп (таблиця. 1.3) [3]:

- сплави системи Mg-Al-Zn: МЛ4, МЛ5, МЛ6;
- сплави системи Mg-Zn-Zr: МЛ8, МЛ11, МЛ15;
- сплави системи Mg-Zr-Nd: МЛ9, МЛ10, МЛ19;

Таблиця 1.5- Хімічний склад промислових магнієвих сплавів

| Група<br>сплавів | Хімічний склад, мас. % *) |           |           |           |           |
|------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | Al                        | Zn        | Mn        | Zr        | Nd        |
| Mg-Al-Zn         | 2,5...10,2                | 0,2...3,5 | 0,1...0,5 | --        | --        |
| Mg-Zn-Zr         | --                        | 0,2...5,0 | --        | 0,4...1,1 | --        |
| Mg-Zr-Nd         | --                        | --        | --        | 0,4...1,0 | 1,6...2,8 |

У сплавах системи Mg-Al-Zn основним зміцнювачем є алюміній. Діапазон концентрацій алюмінію в промислових магнієвих сплавах становить 1...10 %, усі вони є неевтектичними за рівноважною діаграмою [4]. Їх можна розділити на три категорії:

- сплави, що містять 1...3 % Al, характеризуються високими характеристиками міцності та пластичними властивостями, але мають низьку рідинну плинність і високу гарячеламкість;

- сплави, що містять 4...7 % Al, мають хороші механічні властивості і задовільну технологічність;

- сплави, що містять 8...10 % Al, належать до найбільш технологічних сплавів, але мають невисоку пластичність;

Алюміній утворює з магнієм твердий розчин з обмеженою розчинністю та інтерметаліди  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{Mg}_3$  і  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  (рисунок 1.1). Дані щодо розчинності Al у Mg помітно різняться, а прийняті в роботі, становлять 11,6 ат. % за 438 °C і 1,3 ат. % за 100 °C [5].

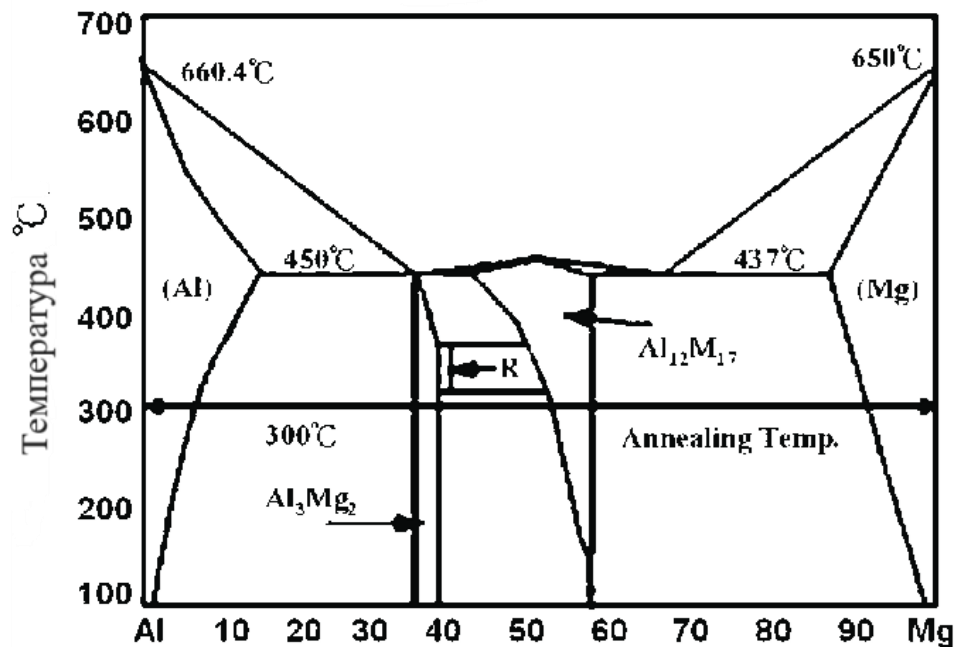


Рисунок 1.1 – Діаграма стану Mg-Al

Промислові сплави магнію з алюмінієм належать до тих, що старіють, що дає змогу термічною обробкою поліпшити їхні властивості. При нагріванні до 420 °C майже весь алюміній переходить у твердий розчин. Під час повторного нагрівання сплаву протягом кількох годин за температури 150...250 °C виділяється  $\gamma$ -фаза, що забезпечує зміцнення сплаву. Виходячи з діаграми стану (рисунок 1.1), можна очікувати, що ефект старіння буде спостерігатися у всіх сплавах, що містять понад 2 % Al. На практиці помітне

збільшення міцності в результаті старіння досягається в сплавах, що містять понад 4...6 % Al, оскільки швидкість утворення нової фази залежить від температури старіння і від ступеня пересиченості твердого розчину за цієї температури. Наразі підтверджено наявність тісного зв'язку між процесом виділення  $\gamma$ -фази під час старіння і зміцненням сплаву. При цьому,  $\gamma$ -фаза виділяється спочатку по межах зерен, а потім всередині самих зерен, збіднюючи твердий розчин алюмінієм. Максимальна твердість сплавів магнію з алюмінієм досягається ще до повного виділення цієї фази з твердого розчину. При цьому, саме  $\gamma$ -фаза, що розташовується по межах зерен, безпосередньо відповідальна за зміцнення цих сплавів [5].

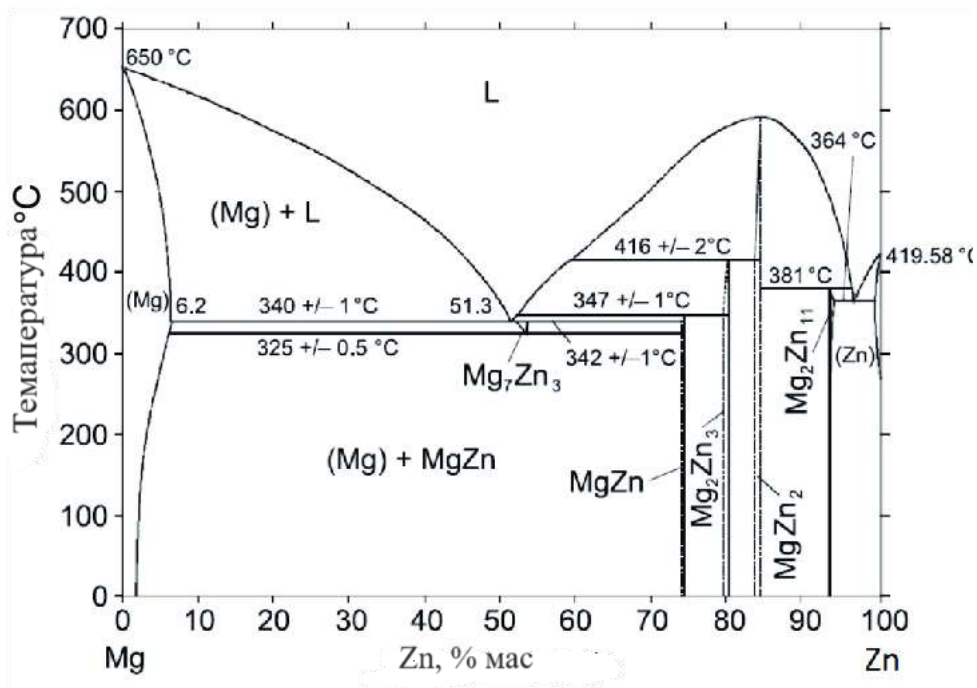


Рисунок 1.2 – Діаграма стану Mg-Zn

При дослідженні впливі алюмінію на механічні властивості магнію, зазначаються, що границі міцності та плинності сплаву зростають зі збільшенням вмісту алюмінію, однак, відносне видовження досягає максимуму при 3 % Al. При цьому, старіння помітно впливає на механічні властивості при вмісті в сплаві алюмінію від 4 % і більше.

Марочний вміст цинку впливає меншою мірою на механічні властивості сплаву. Він утворює з магнієм твердий розчин (рис. 1.1), а також інтерметаліди  $Mg_{51}Zn_{20}$ ,  $MgZn$ ,  $Mg_2Zn_3$ ,  $MgZn_2$ ,  $Mg_2Zn_{11}$ , що мають незначні області гомогенності [5].

Кристалічна структура фази  $MgZn_2$  була вивчена Лавесом і належить до так званих «фаз Лавеса», у яких найкраще заповнення простору досягається за співвідношення  $a_a : a_b = 1,225$ . Аналіз відомих фаз Лавеса показав, що атоми, які значно відрізняються за розмірами, кристалізуються в щільноупаковану структуру.

При введенні в магній 7,5 % Zn, границя міцності сплаву помітно збільшується. Пластичність сплаву підвищується при вмісті близько 3 % Zn. Зазначено, що сплави, які містять 2 % Zn і більше, можуть зміцнюватися під час старіння [5], проте зміцнювальна дія цинку зберігається лише до температури 150...200 °C [6]. При вмісті цинку в магнієвих сплавах у межах 0,1...2 % підвищується гарячеламкість [7], а при збільшенні його до 4 % забезпечується хороша рідинна текучість і низька гарячеламкість. Інші дослідники також відзначають, що при додаванні в магнієвий сплав цинку по границях зерен утворюється фаза з низькою температурою плавлення, що збільшує схильність до утворення гарячих тріщин.

Структура ливарних сплавів системи Mg-Al-Zn складається з твердого розчину алюмінію і цинку в магнії з включеннями інтерметалідів  $Mg_{17}Al_{12}$ . Зі збільшенням вмісту алюмінію в сплаві кількість інтерметалідної фази підвищується. Зі зростанням вмісту цинку в сплаві може утворюватися потрібна фаза  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ . Сплави системи Mg-Al-Zn мають хороші ливарні властивості, достатню міцність і пластичність, проте їхні жароміцні показники є низькими [7]. Сплави системи Mg-Zn-Zr порівняно зі сплавами системи Mg-Al-Zn мають вищий рівень механічних властивостей, що зумовлено подрібненням зерна магнієвих сплавів цирконієм.

Цирконій має обмежену розчинність у магнії і його гранична розчинність становить 0,985 % (рисунок 1.3).

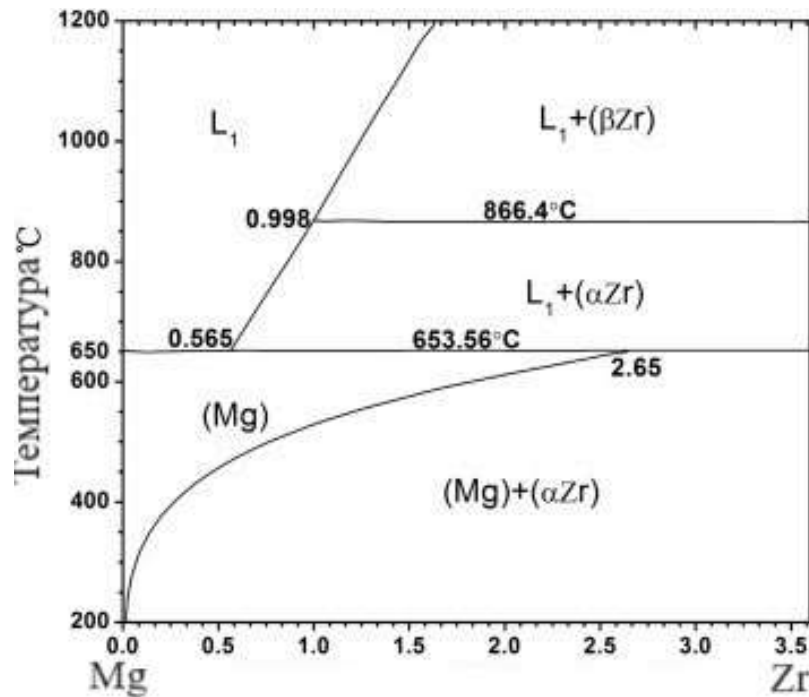


Рисунок 1.3 – Діаграма стану Mg-Zr

Здатність цирконію подрібнювати зерно магнієвого сплаву пов'язана з утворенням під час охолодження розплаву великої кількості дрібних кристалів цирконію, які слугують додатковими центрами кристалізації. У роботі [8] показано, що цирконій у кількості до 2 % у магнієвому сплаві значно подрібнює зерно.

Цирконій характеризується високою хімічною активністю щодо легуючих компонентів магнієвих сплавів, домішок і газів. Він сприяє отриманню щільних виливків і перешкоджає виникненню газових пор. Водночас дегазувальна здатність цирконію залежить від вмісту в магнії цинку. При вмісті в сплаві 4,5 % Zn утворення гідридної  $\sigma$ -фази пригнічується і виникають інтерметаліди  $Zn_2Zr_3$ .

Під час плавки магнієвих сплавів у сталевих тиглях присадка цирконію очищає розплав від заліза завдяки утворенню і подальшому видаленню фази  $Fe_2Zr$ . У свою чергу, поглинання магнієвим розплавом заліза зі стінок тигля знижує вміст цирконію в розплаві.

Цирконій зменшує розчинність вуглецю в магнієвому розплаві, утворюючи власні карбіди. У цьому випадку, ефект впливу вуглецю в сплавах, що містять цирконій, помітно знижується.

Структура литих сплавів системи Mg-Zn-Zr складається з твердого розчину цинку і цирконію в магнії та інтерметалідної фази, кількість якої зростає зі збільшенням вмісту легуючих елементів. Після термічної обробки структура сплаву складається з  $\alpha$  - твердого розчину з присутністю цирконідів цинку або елементарного цирконію. Сплави системи Mg-Zn-Zr володіють хорошими технологічними властивостями, підвищеним рівнем механічних властивостей і жароміцністю [9].

Сплави системи Mg-Zr-Nd належать до категорії жароміцних і значно перевершують за цим показником сплави інших систем [10]. Механізм підвищеної жароміцності сплавів цієї системи зводиться до такого:

- створення складнолегованого термічно стабільного розчину;
- утворення дрібнодисперсної структури;
- підвищення термічної стабільності зміцнювальних фаз.

Дія цирконію в цих сплавах, як і в сплавах системи Mg-Zn-Zr, зводиться до отримання дрібнозернистої структури виливків, що забезпечує їхні високі механічні властивості.

Дія неодиму на структуру і властивості магнієвих сплавів має дещо інший характер. Так, у сплавах системи Mg-Nd (рисунок. 1.4) можуть утворюватися сполуки:  $Mg_{12}Nd$ ,  $Mg_{41}Nd_5$ ,  $Mg_3Nd$ ,  $Mg_{12}Nd$ ,  $Mg_2Nd$ ,  $MgNd$ . З боку магнію в сплавах спостерігається утворення евтектики при температурі 552 °C, в якій концентрація неодиму становить 7,6 ат. %.

Інтерметалід  $Mg_{12}Nd$  плавиться конгруентно і розпадається за евтектоїдною реакцією на Mg і  $Mg_{41}Nd_5$ . Температура евтектоїдного розпаду сполуки  $Mg_{12}Nd$  близько 530°C, розчинність Nd у Mg становить 0,31...0,34 %.

У роботі [11] відзначено позитивну роль неодиму в утворенні інтерметалідів, які зміцнюють сплав і сприяють підвищенню його термічної стабільності, оскільки температура плавлення цих інтерметалідів становить

1480°C. Автори дослідження [11] дійшли висновку, що оптимальна присадка неодиму (2,5 %) забезпечує високий комплекс механічних властивостей сплаву.

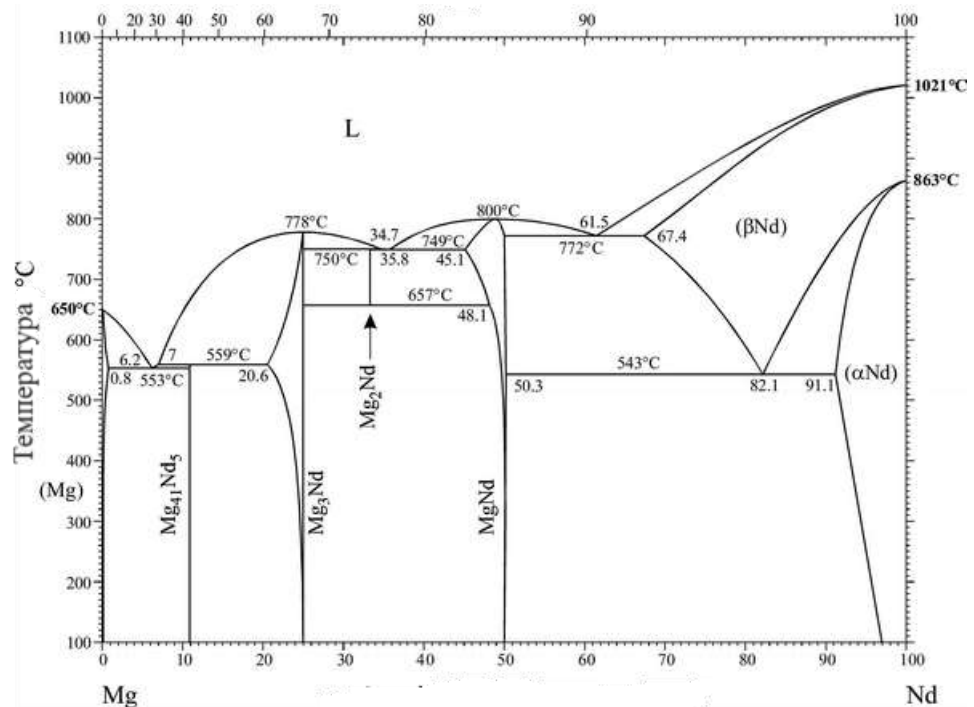


Рисунок 1.4 – Діаграма стану Mg-Nd

Системи магній - рідкоземельні метали (РЗМ) утворюють окрему групу сплавів, що характеризуються однотипними фазами, які мають однакові кристалічні структури. Сплави магнію з рідкоземельними металами становлять значний практичний інтерес, тому що механічні властивості магнію та його сплавів за підвищених температур поліпшуються при введенні невеликих кількостей рідкоземельних елементів [12, 13, 14]. Добавки РЗМ у магнієві сплави підвищують їхню температуру займання [15], яка помітно вища за температуру плавлення.

У магнієвих сплавах, що містять РЗМ в інтервалі концентрацій 0,5...1,5 мас. %, утворюється стійка інтерметалідна фаза  $Mg_3Al_4Zn_2Re$ , що подрібнює зерно з 120...130 до 40...50 мкм і підвищує мікротвердість сплаву [16]. В іншій роботі [17] вказується, що РЗМ практично не впливає на механічні властивості магнієвого сплаву за кімнатної температури, але значно покращує їх за 150 °С.

Перспективним напрямком підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей виливків із магнієвих сплавів є розробка їхніх нових складів.

## 1.2 Модифікування магнієвих сплавів

У формуванні структури і властивостей сплавів процеси модифікування відіграють винятково велику роль. Поєднуючись з виплавною і рафінуванням, модифікування визначає характер кристалізації, ступінь гранулярності та комплекс властивостей сплаву [18].

На початку кристалізації сплави являють собою суспензію з розплаву і зародків кристалів. Зі зниженням температури розміри зародків збільшуються і вони зростаються в полікристал. Розмір, форма й умови зрощення окремих кристалів визначають фізико-хімічні та фізико-механічні властивості сплавів [19]. Модифікатори поділяються на дві групи [20] :

- I роду - поверхнево-активні речовини, дія яких зводиться до вибіркової абсорбції на гранях кристалів, що утворюються;
- II роду - тугоплавкі тверді частинки, які є готовими центрами кристалізації.

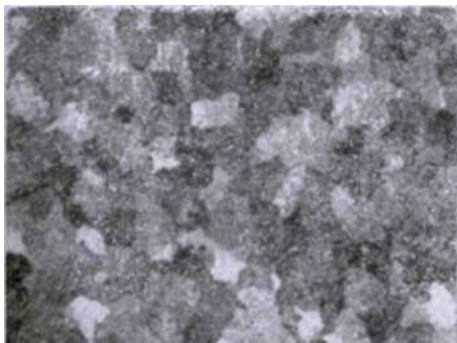
Як модифікатор II роду для магнієвих сплавів використовують вуглецевмісні матеріали, що утворюють карбіди [21]. Якщо введення вуглецю в сплави магнію з марганцем і цинком не дає необхідного ефекту, то в сплавах з алюмінієм і цинком під впливом вуглецю подрібнюється зерно. Серед дослідників немає чіткої думки щодо механізму впливу вуглецю на подрібнення зерна магнієвих сплавів. В деяких джерелах вважається, що частинки вуглецю самі можуть бути центрами кристалізації, інші - вуглець може утворювати сполуки з хімічними елементами сплаву: карбід магнію або карбід алюмінію [22]. Модифікування магнієвих сплавів вуглецевими

сполуками набуло широкого застосування в промисловості, завдяки отриманню дрібного зерна, зменшенню чаду металу і зниженню витрати тиглів. З вуглецевих матеріалів для модифікування магнієвих сплавів можуть застосовуватися магнезит, кам'яне вугілля, кокс, сажа.

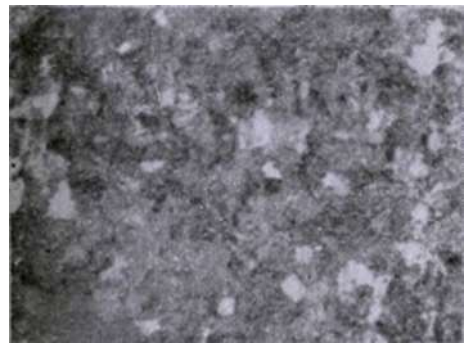
Зазначається [22] позитивний вплив обробки сплаву МЛ5 магнезитом, який дисоціює під час взаємодії з розплавом. Вважається, що під час модифікування магнієвих сплавів магнезитом, відбувається його розкладання з утворенням вуглецю, що виконує роль модифікатора. В інших дослідженнях [23] стверджується, що введення в магнієвий розплав речовин, що містять вуглець (крейда, магнезит), призводить до утворення частинок карбіду алюмінію  $Al_4C_3$  або карбідів магнію ( $Mg_2C_3$  і  $MgC_2$ ), які можуть зазнавати поліморфних перетворень за температур, близьких до температури плавлення магнієвих сплавів. Позитивний вплив вуглецю під час заливання магнієвого сплаву у форму з вуглецево-кремнеземної суміші відзначено в роботі [24], коли на поверхні виливків утворюється більш щільна захисна плівка, що містить певну кількість вуглецю. Деякі дослідники пропонують використовувати флюс, що містить диспергований вуглець, забезпечуючи при цьому подрібнення зерна і поліпшення механічних властивостей магнієвих сплавів [25]. Продування розплаву на основі електролітичного магнію вуглецевмісними газами дало змогу так само отримати дрібнозернисту структуру. На підставі цього стверджується, що частинки карбіду магнію можуть служити зародками центрів кристалізації. Подальші дослідження показали, що помітне подрібнення зерна спостерігалось в сплавах, що містять алюміній. Це вказує на те, що в сплавах магнію з алюмінієм може утворюватися карбід алюмінію, проте металографічно ця фаза виявлена не була [26]. Допускається можливість утворення складної сполуки магнію з алюмінієм і вуглецем, стабільної за високих температур і такої, що розпадається за низьких, із виділенням субмікроскопічних частинок вуглецю, що діють як центри кристалізації сплаву. Встановлено, що перегрівом розплаву складно подрібнити зерна дуже чистих сплавів Mg-Al, для яких

введення невеликих кількостей заліза і марганцю вирішує проблему зерна [27]. Таким чином, до теперішнього часу регулювання розмірів зерна магнієвих сплавів під час кристалізації повністю не виявлено.

Відомі фізичні методи подрібнення структури магнієвих сплавів, пов'язані з динамічними впливами на розплав у процесі його кристалізації [28]. Ультразвукові коливання розплаву, що твердне, здатні збільшити швидкість утворення зародків і помітно подрібнити макрозерно (рисунок 1.5).



а



б

а – без обробки; б – із обробкою ультразвуком

Рисунок 1.5 – Макроструктура магнієвого сплаву МА2

При цьому досягається рівномірне подрібнення зерна по всьому перерізу зливки і повна відсутність стовпчастих кристалів. Аналогічно впливають електричні та електромагнітні поля Перевагою фізичних методів впливу є можливість їх застосування в процесі лиття без додаткових витрат матеріалів. Водночас застосування дорогих механічних, електромагнітних та ультразвукових пристроїв не завжди буває економічно виправданим.

В основі застосовуваних промислових магнієвих сплавів лежать системи Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr і Mg-Zr-Nd, кожна з яких характеризується певною структурою. Тому, до сплавів кожної з систем необхідно застосовувати свої способи подрібнення зерна, що визначаються взаємодією домішок з легуючими компонентами сплаву [29].

Подальше поліпшення якісних характеристик виливків з магнієвих сплавів може бути досягнуто за рахунок модифікування наявних уже сплавів, а так само розроблення нових.

### 1.3 Легування магнієвих сплавів

Поліпшення механічних і жароміцних властивостей литих магнієвих сплавів може здійснюватися дисперсними частинками, складнолегованим твердим розчином і оптимальною структурою після термічної обробки [30].

Зміцнення магнієвих сплавів дисперсійними частинками досягається здебільшого в результаті старіння, що ґрунтується на розпаді пересиченого твердого розчину з виділенням частинок, які блокують ковзання дислокацій і підвищують механічні властивості. Тому під час вибору легуючих елементів для магнієвих сплавів важливим фактором є здатність їх утворювати тверді розчини з магнієм.

Розчинність елементів у магнії визначається близькістю їхніх атомних діаметрів (рисунок 1.6), які, згідно з Юм-Розері, повинні відрізнятися не більше ніж на 15 %.

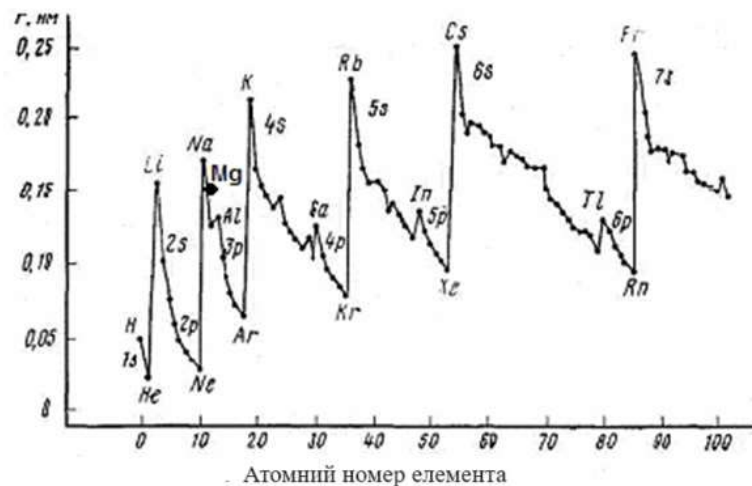


Рисунок 1.6 – Атомні радіуси елементів

При порушенні цього співвідношення відбувається зниження енергії зв'язку атомів розчинника і легуючих елементів і внаслідок спотворення кристалічної ґратки розчинність зменшується. Однак, існують чинники, що призводять до обмеження утворення твердих розчинів навіть у разі, коли відношення атомних діаметрів сприятливе. До них належать - валентність та електронегативність.

Дослідження великої кількості систем сплавів показало, що метал з більшою валентністю краще розчиняється в металі з меншою валентністю, ніж навпаки. При цьому, збільшення валентності розчиненого елемента призводить до зменшення області твердих розчинів.

Іншою важливою умовою розчинності елемента в металі-основі, згідно з дослідженнями Даркена, Гуррі [31], а також Гшнейднера [32] і Воббера [33], є відмінність електронегативності елементів, яка не повинна перевищувати 0,2...0,4. З аналізу електронегативності елементів (рисунк 1.7) видно, що утворення сплавів на основі магнію ускладнюється внаслідок його низької електронегативності [30].

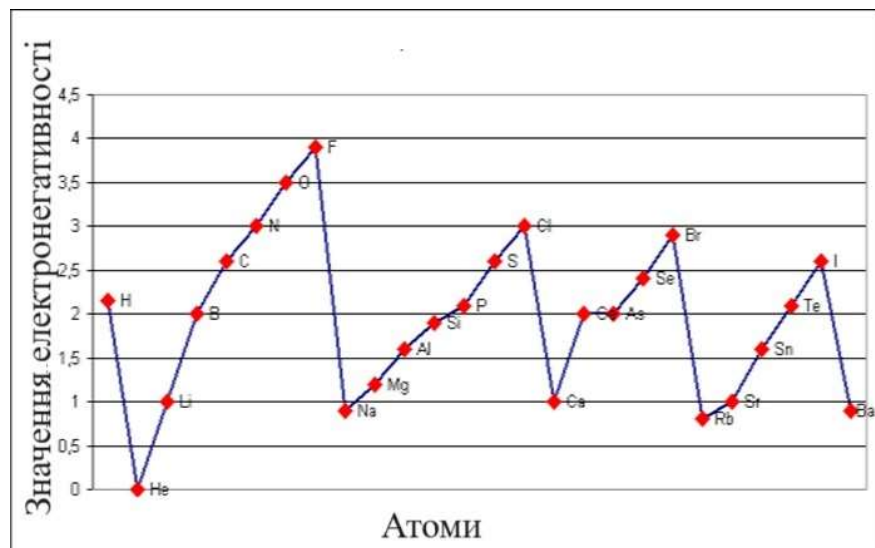


Рисунок 1.7 - Електронегативність хімічних елементів

Для визначення доцільності введення того чи іншого компонента в сплав необхідно використовувати дані діаграм стану досліджуваних систем,

властивості зміцнювальних фаз, характер структури сплаву та її стійкість під час нагрівання.

Серед елементів першої групи періодичної системи елементів тільки срібло має сприятливі фактори по відношенню до магнію і має обмежену розчинність у магнії, як у рідкому, так і в твердому стані. Згідно з діаграмою стану Mg-Ag [34] можливе утворення сполук  $\text{Ag}_3\text{Mg}$ ,  $\text{AgMg}$  і  $\text{AgMg}_3$ . Фаза  $\text{AgMg}$ , що є електронною сполукою, не вступає в рівновагу з твердим розчином на основі магнію, тоді як фаза  $\text{AgMg}_3$ , що має гексагональну ґратку, може перебувати в рівновазі з твердим розчином.

Срібло помітно покращує механічні властивості магнію. Межа міцності і плинності його поступово зростають зі збільшенням вмісту срібла, при цьому, зростає і його пластичність. Показано [35], що присадки срібла можуть підвищувати жароміцність магнієвих сплавів до 300 °С.

Серед елементів II групи Періодичної системи елементів цинк має сприятливий фактор до магнію, а несприятливий - кальцій і барій. Однак у літературі є розрізнені та суперечливі відомості про позитивний вплив цих елементів на властивості магнієвих сплавів. Кальцій у магнії розчиняється в дуже малих кількостях: за кімнатної температури - 0,018 %, за температури плавлення евтектики - 1,8 %. У сплавах цієї системи утворюється одна сполука  $\text{Mg}_2\text{Ca}$ , що конгруентно плавиться за температури 715°C, яка уявляє собою «фазу Лавеса» і має гексагональну кристалічну ґратку [36]. Кальцій подрібнює зерно ливарних сплавів. Сплави, що містять кальцій, мають хорошу рідинну плинність і вищу температуру займання. Причому, крім поліпшення опору корозії, кальцій помітно підвищує межу міцності магнієвих сплавів за температур до 200 °С.

При вмісті кальцію 0,1 % різко збільшується пластичність магнієвих сплавів. Ця тенденція зберігається до 0,3 % Ca, коли зі збільшенням пластичності відбувається зміцнення сплаву. У роботі Рохліна Л.Л. і Нікітіної Н.І. [37] зазначається, що добавка в подвійні сплави магнію з алюмінієм до

0,6 % Ca сприяє зміцненню сплавів, особливо за підвищених температур, і знижує їхню активність щодо кисню.

Відзначається позитивний вплив кальцію на магнієві сплави системи Mg-Al-Zn-Si, коли присадки кальцію змінювали топологію інтерметалідів, подрібнювали зерно і підвищували механічні властивості сплаву [38]. Думки дослідників щодо визначення оптимальної присадки кальцію різні. Одні з них [38] вважають, що оптимальною є присадка в межах 0,15...0,2 % Ca, що забезпечує подрібнення мікроструктури та підвищення опору повзучості за високих температур. Інші [39] - стверджують, що при вмісті кальцію 0,9...2,0% утворюється нова фаза  $Al_2Ca$  у вигляді пластинчастих або дрібнокристалічних виділень, як на границях зерен, так і всередині зерна, що забезпечує підвищення межі плинності за кімнатної та підвищених температур за деякого зниження пластичності.

Барій, як і кальцій, має дуже малу розчинність у магнії. У системі Mg-Ba утворюється три типи інтерметалідів:  $Mg_{17}Ba_2$ ,  $Mg_2Ba$  і  $Mg_{23}Ba_6$ . Літературні дані щодо впливу барію на фізико-механічні властивості магнієвих сплавів практично відсутні. Під час вивчення впливу різних добавок барію на механічні властивості магнієвого сплаву, що містить 18 % Al і 1 % Zn, зазначається, що барій незначно підвищує його межу повзучості.

Елементи III групи Періодичної системи елементів - Al, Sc, Y, La - мають сприятливий фактор щодо магнію. Згідно з діаграмою Mg-Sc розчинність Sc у Mg становить 15,9 %. Скандій є перспективним матеріалом для створення легких сплавів із підвищеними властивостями і може подрібнювати лите зерно в алюмінієвих сплавах. Однак скандій не утворює хімічних сполук з магнієм і його доцільно вводити в магнієві сплави, що містять алюміній.

Вплив скандію на структуру і властивості виливків з магнієвих сплавів практично не вивчався. Відзначається позитивний вплив скандійвмісного модифікатора на підвищення механічних властивостей сплаву МЛ5[40] .

Для сплавів системи Mg-Y характерне утворення сполук  $Mg_{17}Y_3$ ,  $Mg_5Y_2$  і  $Mg_3Y$ . З боку магнію діаграма стану належить до евтектичного типу, де

утворюється евтектика при температурі 565 °С і концентрації 9% Y. Відомі роботи, присвячені вивченню характеру взаємодії елементів у системі Mg-Y, розчинності ітрію в твердому розчині, а також дослідженню складу і структури фаз, що утворюються в ній. Розчинність ітрію при температурі евтектики на думку різних авторів різна: від 9,5 до 12,6 %. При цьому встановлено, що зі зниженням температури розчинність ітрію в твердому магнії значно знижується. Дослідники, які вивчали вплив ітрію на властивості магнієвих сплавів, доходять висновку, що його позитивний вплив на магній зумовлений утворенням тугоплавкої фази  $Mg_{24}Y_5$ , що дає змогу підвищити жароміцність сплавів до 300°C [40,41]. Додатки ітрію в магнієвий сплав підвищують його жароміцність за рахунок дисперсних частинок оксидів ітрію. Ці результати підтверджують й інші дослідники.

Рациональний вміст ітрію в магнієвих сплавах ще потребує уточнень. Низка дослідників вважають, що оптимальна присадка ітрію становить 1,5...1,6 %, інші - до 5,2 %. Водночас їхні висновки однозначні в тому, що інтерметаліди  $Mg_{24}Y_5$ , які утворюються, подрібнюють мікроструктуру, підвищують міцність і жароміцність за умови зниження відносного подовження і звуження магнієвих сплавів.

З рідкоземельними металами (La, Ce, Nd), що мають близькі атомні діаметри, магній утворює велику кількість сполук. Відношення розмірів атомів рідкоземельних металів до розмірів атомів магнію наближається до величини, що характерна для утворення фаз Лавеса. Тому їхні сполуки мають кристалічну структуру, ізоморфну зі структурою  $MgCu_2$  [42].

Практично всі елементи IV групи Періодичної системи мають сприятливий фактор щодо магнію. Дані щодо впливу елементів IV а підгрупи Періодичної системи Д.І. Менделєєва на властивості магнієвих сплавів мають суперечливий характер і мало вивчені. Хоча атомний фактор титану, цирконію, гафнію і торію перебувають у межах сприятливої зони щодо магнію, але їхня розчинність у твердому стані в усіх випадках обмежена. Метали підгрупи IVa рідко утворюють широку область твердих розчинів, за

винятком інших елементів цієї підгрупи з аналогічними електронними структурами [43].

Автори роботи встановили, що температура кристалізації магнію не змінюється при введенні в його розплав титану. Металографічні дослідження злитків магнію з титаном показали, що частинки титану механічно включені в магній, утворюючи області сегрегації. Таким чином, весь титан, що міститься в рідкому магнії, виділяється з розплаву під час його затвердіння. Інші автори вважають, що титан у кількості 0,2...0,4 % зміцнює магнієвий сплав і підвищує його пластичність за рахунок утворення інтерметалідних фаз. Відомо дуже мало даних про вплив титану на механічні властивості магнію та його сплавів. Нині титан практично не використовується як легувальна добавка до магнію.

З елементів IV групи Періодичної системи, гафній є дорогим і найменш поширеним елементом. Мабуть, із цим пов'язана відсутність досліджень впливу гафнію на механічні властивості магнію та його сплавів. Низка дослідників також стверджують, що ці метали не сплавляються навіть після тривалої витримки за високих температур [43,44,45].

Для сплавів системи Mg-Y характерне утворення сполук  $Mg_{17}Y_3$ ,  $Mg_5Y_2$  і  $Mg_3Y$ . З боку магнію діаграма стану належить до евтектичного типу, де утворюється евтектика при температурі 565 °C і концентрації 9% Y. Відомі роботи, присвячені вивченню характеру взаємодії елементів у системі Mg-Y, розчинності ітрію в твердому розчині, а також дослідженню складу і структури фаз, що утворюються в ній. Розчинність ітрію при температурі евтектики на думку різних авторів різна: від 9,5 до 12,6 % [46]. При цьому встановлено, що зі зниженням температури розчинність ітрію в твердому магнії значно знижується. Дослідники, які вивчали вплив ітрію на властивості магнієвих сплавів, доходять висновку, що його позитивний вплив на магній зумовлений утворенням тугоплавкої фази  $Mg_{24}Y_5$ , що дає змогу підвищити жароміцність сплавів до 300°C. Добавки ітрію в магнієвий сплав підвищують його жароміцність за рахунок дисперсних частинок оксидів ітрію. Ці результати підтверджують й інші дослідники.

Раціональний вміст ітрію в магнієвих сплавах ще потребує уточнень. Низка дослідників вважають, що оптимальна присадка ітрію становить 1,5...1,6 %, інші - до 5,2 %. Водночас їхні висновки однозначні в тому, що інтерметаліди  $Mg_{24}Y_5$ , які утворюються, подрібнюють мікроструктуру, підвищують міцність і жароміцність за умови зниження відносного подовження і звуження магнієвих сплавів.

З рідкоземельними металами (La, Ce, Nd), що мають близькі атомні діаметри, магній утворює велику кількість сполук. Відношення розмірів атомів рідкоземельних металів до розмірів атомів магнію наближається до величини, що характерна для утворення фаз Лавеса. Тому їхні сполуки мають кристалічну структуру, ізоморфну зі структурою  $MgCu_2$ .

Практично всі елементи IV групи Періодичної системи мають сприятливий фактор щодо магнію. Дані щодо впливу елементів IV а підгрупи Періодичної системи Д.І. Менделєєва на властивості магнієвих сплавів мають суперечливий характер і мало вивчені. Хоча атомний фактор титану, цирконію, гафнію і торію перебувають у межах сприятливої зони щодо магнію, але їхня розчинність у твердому стані в усіх випадках обмежена. Метали підгрупи IVa рідко утворюють широку область твердих розчинів, за винятком інших елементів цієї підгрупи з аналогічними електронними структурами [47].

Автори роботи встановили, що температура кристалізації магнію не змінюється при введенні в його розплав титану. Металографічні дослідження злитків магнію з титаном показали, що частинки титану механічно включені в магній, утворюючи області сегрегації. Таким чином, весь титан, що міститься в рідкому магнії, виділяється з розплаву під час його затвердіння. Інші автори вважають, що титан у кількості 0,2...0,4 % зміцнює магнієвий сплав і підвищує його пластичність за рахунок утворення інтерметалідних фаз. Відомо дуже мало даних про вплив титану на механічні властивості магнію та його сплавів. Нині титан практично не використовується як легувальна добавка до магнію.

З елементів IV групи Періодичної системи, гафній є дорогим і найменш поширеним елементом. Мабуть, із цим пов'язана відсутність досліджень впливу гафнію на механічні властивості магнію та його сплавів.

Електропозитивний характер елементів IVб підгрупи (кремнію, германію, олова і свинцю) підвищується зі збільшенням атомного номера, і стійкіші сполуки утворюватимуться між магнієм і кремнієм, а менш стійкі - між магнієм і свинцем. Зазначені вище елементи утворюють з магнієм сполуки  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Ge$ ,  $Mg_2Sn$  і  $Mg_2Pb$ . При цьому відбувається поступове зниження температури плавлення сполук у міру збільшення атомного номера розчиненого елемента. Виділення сполук  $Mg_2Si$  і  $Mg_2Ge$  обмежує утворення твердого розчину кремнію і германію, і розчинність їх у магнії незначна (близько 0,003% кожного). Максимальна розчинність олова (3,35%) нижча за розчинність свинцю (7,75%) [48].

Кремній погано розчиняється в магнії за кімнатної температури. Незначна кількість його в магнії значно збільшує пластичність сплаву, практично не впливаючи на межу міцності. Зі зростанням вмісту кремнію підвищується твердість і міцність сплаву внаслідок утворення сполуки  $Mg_2Si$ . Максимальна міцність досягається при введенні 1 % Si, тоді як при більшому вмісті кремнію властивості сплавів погіршуються. Наявність кремнію в магнієвих сплавах сприяє утворенню евтектичної складової, що підвищує рідинну плинність і знижує гарячеламкість, тому він особливо ефективний під час одержання виливків литтям під тиском. В іншій роботі зазначається, що в системі Mg – Al – Si добавки кремнію підвищують міцнісні властивості без зміни пластичності аж до вмісту кремнію 1,2 %. У сплавах з 8,5 % Al при підвищенні вмісту кремнію до 0,8 % пластичність змінюється несуттєво, але при введенні 1,2 % Si помітно падає. Утворені при цьому інтерметаліди  $Mg_2Si$  підвищують жароміцність сплаву. Під час виготовлення фасонного лиття в шихту можуть потрапляти частинки кремнезему, які під час взаємодії з магнієм відновлюються до кремнію, що взаємодіє із залізом і утворює інтерметалідні фази.

Олово знижує межу міцності і опір корозії магнієвих сплавів, проте деяке поліпшення їхніх властивостей може бути досягнуто за допомогою старіння попередньо загартованих сплавів за рахунок виділення з пересиченого твердого розчину фази  $Mg_2Sn$ . В інших роботах вказується, що олово значно зміцнює магній, трохи знижуючи при цьому пластичність. При цьому, сплави, що містять 4 % Sn і більше, при старінні зміцнюються.

Дані щодо впливу свинцю на властивості магнієвих сплавів мають обмежений характер. В роботі зазначається, що зі збільшенням вмісту свинцю міцність сплавів дещо зростає, а пластичність незначно знижується. Низка дослідників вивчали виділення фази  $Mg_2Pb$  під час старіння магнієвих сплавів і дійшли висновку, що вона виділяється по межах зерен, зміцнюючи метал. Вплив германію на механічні властивості магнієвих сплавів не вивчали [49].

Велику роль у формуванні властивостей сплавів відіграє стан меж зерен, де можуть ліквідовувати домішки і виділятися евтектики та перитектики. Якщо домішка утворює евтектику і при цьому розчиняється в металі, то її негативний вплив при малих вмістах, буде проявлятися слабо. В іншому випадку, евтектика може розташовуватися по межах зерен, знижуючи механічні властивості сплаву, а в області підвищених температур, утворюючи рідку фазу, різко знижує жароміцність сплаву. До шкідливих домішок у магнієвих сплавах належать Fe, Ni і Cu. Державні стандарти обмежують їх вміст для різних магнієвих сплавів: 0,007...0,06 % Fe, 0,001...0,01 % Ni і 0,03...0,25 % Cu. Є дані про позитивний вплив деяких із них на властивості магнієвих сплавів. Так, нікель може збільшувати тривалу міцність магнієвих сплавів; залізо підвищує міцність, значно знижуючи при цьому пластичність. Проте, усі ці елементи істотно знижують корозійну стійкість магнієвих сплавів, тому вміст їх обмежують [50].

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Проведення дослідних плавів, термічної обробки та визначення хімічного складу металу

Сплав був отриманий у тигельній індукційній печі моделі ІПМ-500 з типовим об'ємом 0,5 тони, потужністю 140 кіловат та виробничою спроможністю 230 кілограмів на годину. Для процесу також застосовувалася газова розподільна піч із стандартним вмістом 150 кг.

Хімічний склад сплаву наведений в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Хімічний склад зразків магнієвого сплаву МЛ5

| Сплав | Хімічний елемент |      |     |           |      |      |     |       |       |
|-------|------------------|------|-----|-----------|------|------|-----|-------|-------|
|       | Al               | Zn   | Mn  | Si        | Ni   | Fe   | Cu  | Zr    | Mg    |
| МЛ5   | 7,9              | 0,47 | 0,4 | Не більше |      |      |     |       | Решта |
|       |                  |      |     | 0,25      | 0,01 | 0,06 | 0,1 | 0,002 |       |

До індукційної тигельної печі ІПМ-500 завантажували прогріті до високої температури компоненти шихти, а після їх плавлення розплав переливали в ковші при температурі між 650 і 730°C. Ковші розташовували в печах для розподілу, де сплав доводили до необхідного хімічного складу і очищали флюсом ВІ-2 при температурі від 740 до 760°C. Далі до розплаву додавали лігатурні добавки відповідних елементів у зростаючих пропорціях (0; 0,05; 0,1; 1,0 % за обчисленнями), потім підігрівали, витримували температуру розплаву, і при 730°C здійснювали лиття проб і заготовок для проведення механічних тестів та металографічного аналізу.

Аналіз металу відбувався після теплової обробки, яка включала наступні етапи: підігрів до  $415 \pm 5$  °C та витримування протягом 15 годин, повітряне охолодження, а також старіння при температурі  $200 \pm 5$ °C з витримкою 8 годин у повітряному середовищі та подальше зниження температури. Таку обробку

реалізовували в умовах захисного середовища, створеного за допомогою інертного газу аргону.

Термічну обробку відливків здійснювали в шахтній печі марки «Бельв'ю» з потужністю 112 кВт та продуктивністю 95 кг/год, а також у печі моделі ПАП-4М з продуктивністю 50 кг/год.

Визначення якості литих зразків та заготовок з магнієвих сплавів на заводських об'єктах виконувалось за допомогою рентгенографічного методу на апаратах РАП-150/300, РУП 150/300, РУП 400-5, МІРА-2Д. Здобуті результати були задокументовані на рентгенівських плівках типів РМ-1, РТ-1, РТ-2.

## 2.2. Методи якісної та кількісної оцінки структурних елементів

Для аналізу мікроструктури зерен після термообробки використовували етчинговий розчин, який включав:

- 1% розведеної азотної кислоти;
- 20% оцтової кислоти;
- 19% дистильованої води;
- 60% етиленгліколю.

Фрактографічний аналіз зразків після їх ломлення виконувався за допомогою сканувального електронного мікроскопа JSM-6360LA.

Фазовий аналіз структурних компонентів магнієвих сплавів здійснювався на електронному мікроскопі з модулем енергодисперсійного аналізу, зокрема на апаратах РЕММА 202М та РЕМ 16І. Енергодисперсійні спектри отримували з кожної досліджуваної мікрообласті та проводили їх кількісний аналіз використовуючи відповідне програмне забезпечення на ПК. Цей аналіз дозволяв визначити інтенсивність характеристичних ліній різних хімічних елементів, виявлених у спектрі.

Якість зразків у виробничих умовах оцінювалася візуально та за допомогою рентгенографічного методу. Візуальний огляд дозволяв ідентифікувати поверхневі недоліки, пошкодження, а також визначати наявність та розміри стиснутих тріщин. Внутрішні дефекти, наявність пор та залишки флюсу виявлялися за допомогою рентгенівського дослідження.

### 2.3 Визначення механічних властивостей

Випробування на міцність зразків з легких магнієвих сплавів здійснювались за допомогою універсальної випробувальної машини «INSTRON» серії 2801, відповідаючи вимогам ДСТУ ISO 6892-1:2019 та ДСТУ 2551-94. Показники, такі як межа тягучості ( $\sigma_B$ ) та показник відносного подовження ( $\delta$ ), фіксували на стандартних циліндричних пробах з магнієвого сплаву номер 1, відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019 (див. рисунок 2.1).

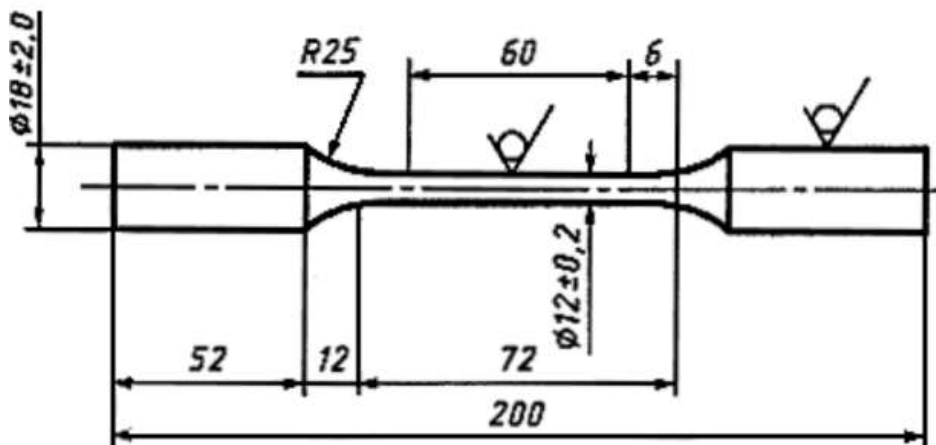


Рисунок 2.1 — Типові зразки для механічних випробувань згідно (ДСТУ ISO 6892-1:2019)

Мікротвердість елементів сплаву вимірювали за допомогою мікротвердоміра «Buehler» та LM-700AT під навантаженням у 0,1 Н

відповідно до ГОСТ 9450-76. Оцінка мікротвердості проводилася методом індентування з використанням техніки репліки, що відповідає стандарту ГОСТ 9450-76. Процедура включала створення інденторного відбитка на поверхні об'єкта дослідження під стабільним навантаженням, яке здійснюється за допомогою алмазного накінецьника протягом заданого періоду часу.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Застосування сплавів з низькою питомою вагою представляє великий практичний інтерес для вітчизняного машинобудування, де крім певних вимог до конструкцій і агрегатів, висувуються особливі вимоги щодо зменшення маси деталей. З цього погляду великий інтерес становлять сплави на основі магнію - одного з широко поширених у природі елементів. За запасами в земній корі він посідає третє місце серед металів, поступаючись тільки алюмінію і залізу. Він міститься в низці мінералів, але особливо його багато в доломіті та магнезиті. У воді морів і океанів міститься близько  $6 \times 10^{16}$  тонн магнію, що робить його перспективним матеріалом, який є основою для розробки великої кількості сплавів.

Ливарні магнієві сплави - один із найлегших конструкційних матеріалів, що дає змогу їх використовувати в авіакосмічній техніці, різних типах ракет і агрегатів, під час виробництва оптичних приладів, у радіоелектроніці тощо. З огляду на те, що магнієві сплави в 1,5 рази легші за алюмінієві сплави, в 4 рази легші за чавун і сталь, їхнє застосування, особливо у фасонному литті, дає зниження вагових характеристик виробу на 25...30%

Нині розроблено велику кількість магнієвих сплавів із легуванням різними металами і опубліковано порівняно велику кількість праць, у яких розглядаються механічні, фізичні та корозійні властивості магнієвих сплавів, призначених для різних умов експлуатації. Однак кількість робіт, присвячених систематизації та з'ясуванню ролі легувальних елементів у сплавах на основі магнію, вкрай обмежена. Це пов'язано з тим, що експерименти з підготовки та випробувань нових сплавів дуже тривалі й дорогі, а кількість можливих компонентів сплаву і варіантів складів сплавів - велика. Тому раціональний вибір компонентів для розроблення нових магнієвих сплавів із заданими властивостями є актуальним завданням.

Для визначення корисності введення того чи іншого компонента в магнієвий

сплав необхідно враховувати діаграму стану даної системи, властивості зміцнювальних фаз, характер структури сплаву та її стабільність під час нагрівання, а також характер дифузійних процесів, що розвиваються в сплавах зі зміною складу, температури та ін. /4/. Багато з цих чинників ще недостатньо вивчені (діаграма стану Mg-Hf до теперішнього часу не побудована), що ускладнює розробку загальної теорії легування магнієвих сплавів.

Аналіз та узагальнення діаграм стану подвійних систем елементів з магнієм дає змогу виокремити такі закономірності:

- магній утворює безперервний ряд твердих розчинів тільки з кадмієм;
- дванадцять тугоплавких металів (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Tc, Hf, Ta, W, Re) утворюють з магнієм перетектики інші елементи (Al, Nd, Y, Sn, Pb, Ge, Si, Ca, Ba тощо) утворюють з магнієм евтектики або монотектики;
- чим ближче до магнію розташований елемент у періодичній системі, то більшою є його розчинність у твердій та рідкій фазах, і ближчим до одиниці є коефіцієнт розподілу (відношення розчинності у твердій фазі до розчинності в рідкій фазі).

Розчинність легувального елемента в рідкому і твердому магнії є необхідною умовою зміцнення магнієвих сплавів.

Отримання високої міцності у литих сплавах при збереженні достатньої в'язкості досягається шляхами:

- утворення складнолегованих твердих розчинів;
- зміцнення сплавів дисперсними частинками;
- створення оптимальної структури термічним обробленням.

Для забезпечення кращого поєднання механічних і жароміцних властивостей ливарних магнієвих сплавів використовуються всі три шляхи.

Розчинність елементів у магнії визначається близькістю їхніх атомних діаметрів ( $A_{\text{Mg}}$  та  $A_{\text{ел}}$ ), які, згідно з Юм-Розері, повинні відрізнятися не більше ніж на 15%. В іншому разі відбувається зниження енергії зв'язку атомів розчинника і легуючих елементів, а внаслідок спотворення кристалічної решітки розчинність легувального елемента зменшується, на рисунку 3.1

представлено атомні діаметри розчинених у магнії елементів.

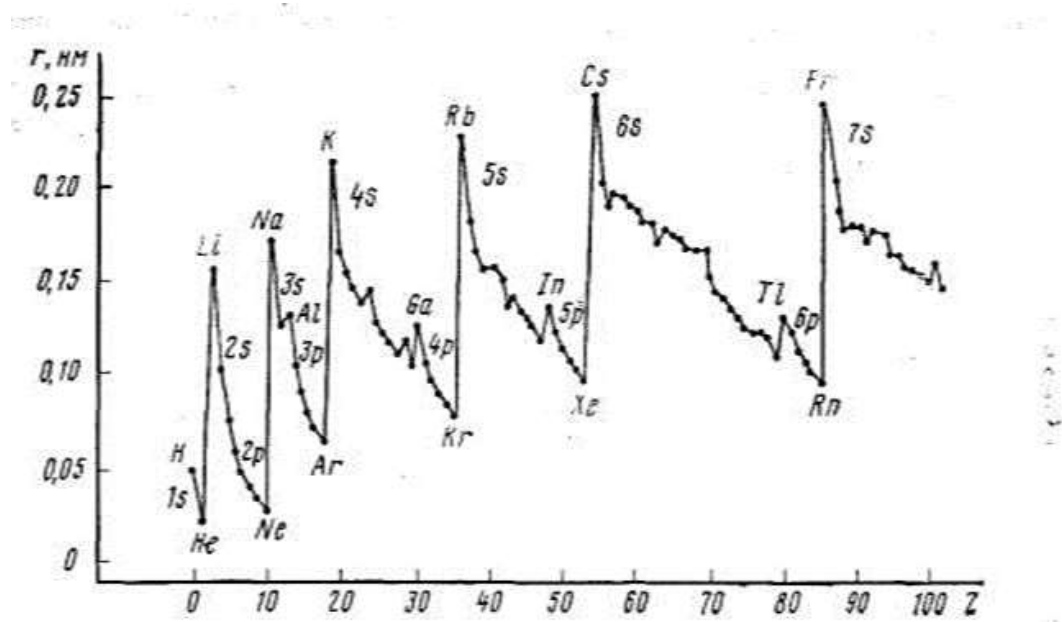


Рисунок 3.1 - Міжатомні відстані елементів

Існують чинники, що обмежують утворення твердих розчинів навіть у разі, коли відношення атомних діаметрів сприятливе. До них належать - валентність та електронегативність.

Дослідження великої кількості систем сплавів [8] показало, що метал із вищою валентністю краще розчиняється в металі з низькою валентністю, ніж навпаки. При цьому, збільшення валентності розчиненого елемента призводить до зменшення області первинних твердих розчинів.

Іншою важливою умовою розчинності елемента в металі-основі, за даними Даркена- Гуррі, а також Гшнейднера і Уоббера, є невелика різниця електронегативності ( $E/O_{Mg}$  і  $E/O_{el}$ ), що не повинна перевищувати 0,2...0,4. Фактично перехід атомів легуючих елементів у металічний розчин визначається не електронегативністю, тобто здатністю захоплювати електрони та утворювати іонні сполуки, а навпаки - здатністю віддавати електрони в колективізований стан та перетворюватися на металічний іон. На рисунку 3.2 подано значення електронегативності хімічних елементів.

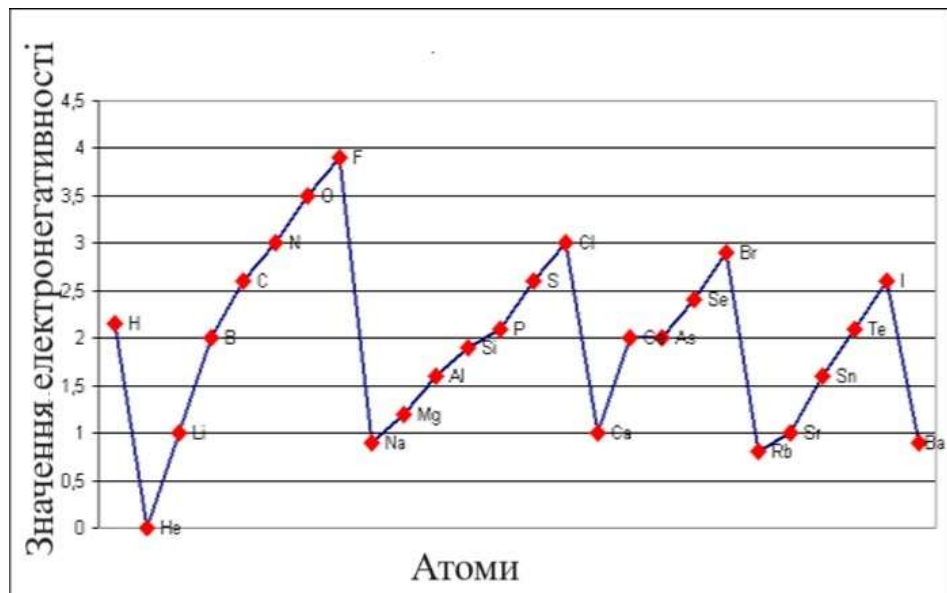


Рисунок 3.2 - Електронегативність хімічних елементів

З наведеного аналізу поведінки магнію під час взаємодії з великою кількістю елементів видно, що утворення сплавів на основі магнію ускладнюється дією валентності й особливо утворенням металічних сполук унаслідок електропозитивної природи магнію

Таким чином, з усього різноманіття елементів Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва, лише деякі задовольняють описані вище критерії та мають сприятливий фактор за співвідношенням атомного діаметра  $((Ar_{Mg} - Ar_{ел}) / Ar_{Mg} \leq 15\%)$  та електронегативності  $((E/O_{Mg} - E/O_{ел} \leq 0,4)$  для легування ними сплавів на основі магнію.

Таблиця 3.1 - Атомні радіуси, електронегативність і співвідношення цих чинників щодо магнію

| Елемент | $Ar_{ел}, \text{ пм}$ | $(Ar_{Mg} - Ar_{ел}) / Ar_{Mg}, \%$ | $E/O_{ел.}$ | $E/O_{Mg} - E/O_{ел.}$ |
|---------|-----------------------|-------------------------------------|-------------|------------------------|
| 1       | 2                     | 3                                   | 4           | 5                      |
| Mg      | 160                   | -                                   | 0,56        | -                      |
| Li      | 155                   | 3,1                                 | 0,40        | 0,16                   |
| Al      | 143                   | 10,6                                | 0,70        | - 0,14                 |

Продовження таблиці 3.1

| 1  | 2   | 3     | 4    | 5     |
|----|-----|-------|------|-------|
| Si | 136 | 15,0  | 0,83 | -0,27 |
| Sc | 164 | 1,2   | 0,53 | 0,03  |
| Ti | 146 | 8,8   | 0,61 | -0,04 |
| Zn | 139 | 13,1  | 0,66 | -0,10 |
| Ga | 139 | 13,1  | 0,75 | -0,19 |
| Ge | 139 | 13,1  | 0,84 | -0,28 |
| Y  | 181 | -13,1 | 0,48 | 0,08  |
| Zr | 160 | 0     | 0,57 | -0,01 |
| Ag | 144 | 10,0  | 0,56 | 0     |
| Cd | 156 | 2,5   | 0,62 | -0,06 |
| Y  | 166 | -3,8  | 0,69 | -0,13 |
| Sn | 158 | 1,3   | 0,75 | -0,19 |
| Nd | 182 | -13,8 | 0,95 | -0,39 |
| Hf | 159 | 0,6   | 0,50 | 0,06  |
| Pb | 175 | -9,4  | 0,78 | -0,22 |

Для підбору легувальних компонентів жароміцних магнієвих сплавів потрібні додаткові обмеження, зумовлені впливом на них високих температур. Жароміцність литих магнієвих сплавів забезпечується двома факторами:

- легуванням основного компонента елементами, що входять у твердий розчин. При цьому, легуючі компоненти повинні мати температуру плавлення вищу, ніж основний;

- введенням у сплав легувальних елементів, що утворюють під час кристалізації та перекристалізації тугоплавкі тверді фази у вигляді сітчастих виділень або у формі міцного каркаса між гілками дендритів;

Тому ще одним фактором, що обмежує вибір легуючих елементів магнієвих сплавів, нами було обрано температуру плавлення металів, що перевищує температуру плавлення магнію (650°C). На підставі цього, з відібраних

компонентів для легування жаростійких магнієвих сплавів, найбільш придатними будуть: Ge ( $T_{\text{пл}} = 937^{\circ}\text{C}$ ), Nd ( $T_{\text{пл}} = 1010^{\circ}\text{C}$ ), Si ( $T_{\text{пл}} = 1410^{\circ}\text{C}$ ), Y ( $T_{\text{пл}} = 1523^{\circ}\text{C}$ ), Sc ( $T_{\text{пл}} = 1539^{\circ}\text{C}$ ), Ti ( $T_{\text{пл}} = 1660^{\circ}\text{C}$ ), Zr ( $T_{\text{пл}} = 1852^{\circ}\text{C}$ ), Hf ( $T_{\text{пл}} = 2150^{\circ}\text{C}$ ).

Одним зі шляхів поліпшення якості виливків і підвищення їхніх механічних властивостей є модифікування розплаву перед заливанням у форму або в процесі кристалізації.

В основі розроблених магнієвих сплавів лежать певні системи, кожна з яких характеризується величиною зерна, структурою і має різну здатність до модифікування. Тому, до кожної з систем повинні застосовуватися свої раціональні способи подрібнення зерна, що визначаються природою сплавів, характером взаємодії легувальних компонентів сплаву та їхніх домішок з модифікаторами.

Досліджували вплив Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti, Hf, на структуроутворення, механічні властивості та тривалу міцність за підвищених температур виливків із магнієвого сплаву МЛ5. Хімічний склад сплаву різних варіантів мікролегування задовольняв вимогам ДСТУ і за вмістом основних елементів перебував приблизно на одному рівні (8,6% Al; 0,28% Mn; 0,35% Zn; 0,02% Fe; 0,005% Cu; 0,04% Si).

Макрофрактографічне дослідження зламів досліджуваних литих сплавів показало, що з підвищенням концентрації елементів, що вводяться в сплав, структура його подрібнювалася (рисунок 3.3), характер її змінюється від крупнокристалічної до матової дрібнокристалічної.

Мікроструктура сплаву МЛ5 являла собою  $\delta$ -твердий розчин із наявністю евтектики типу  $\delta + \gamma$  ( $\text{Mg}_4\text{Al}_3$ ) та інтерметалідів  $\gamma$  ( $\text{Mg}_4\text{Al}_3$ ) (рисунок 3.3, а).

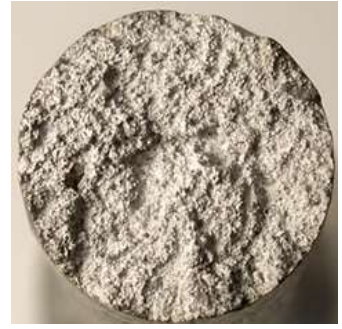
Введення присадок досліджуваних елементів від 0,05% до 1,0% у всіх випадках сприяло зменшенню розмірів структурних складових і дробленню евтектики (рисунок 3.3, б - г).



а



б



в



г



д



е



ж



з



і

а – вихідна структура; б – Ge; в – Zr; г – Nd; д – Sc; е – Si;  
ж – Y; з – Ti; і – Hf

Рисунок 3.3 - Вплив елементів (мас.частка 0,1%) на макроструктуру сплаву  
МЛ5

Металографічний аналіз вихідного сплаву МЛ5 показав, що інтерметаліди розташовувалися як усередині зерен, так і на границях, причому більша частина з них розташовувалася всередині зерен. Присадки легувальних елементів сприяли збільшенню індексу інтерметалідів зі збереженням тенденції переважання їх в середині зерна. Середній розмір інтерметалідів

практично не залежить від виду легувального елемента і зростає зі збільшенням кількості кожної з присадок. Легування магнієвого сплаву М5Л досліджуваними елементами призводило до істотного подрібнення зерна металу. При цьому спостерігалася пряма залежність розміру зерна від кількості інтерметалідів: зі збільшенням індексу інтерметалідів розмір зерна зменшувався (рис 3.4), при цьому отримано лінійні рівняння, які описують вплив розміру зерна ( $d_{cp}$ ) від індексу інтерметалідів у магнієвих сплавах із вмістом легувальних елементів 0,05 % (1); 0,1 % (2); 1,0 % (3):

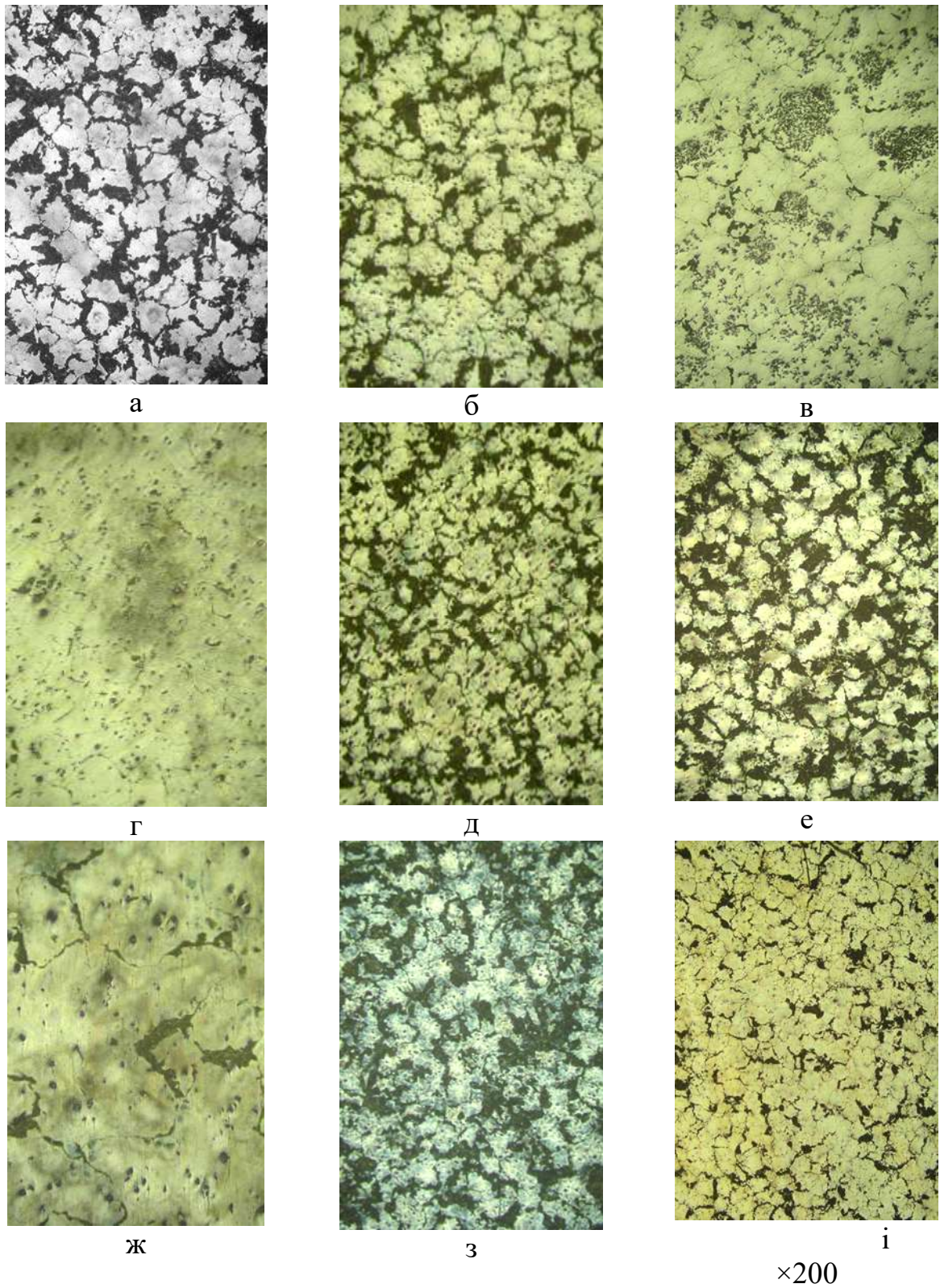
$$[d_{cp}] = 22 + 0,49 \cdot [I], \text{ мкм} \quad r = 0,60 \pm 0,05 \quad (3.1)$$

$$[d_{cp}] = 14 + 0,70 \cdot [I], \text{ мкм} \quad r = 0,69 \pm 0,04 \quad (3.2)$$

$$[d_{cp}] = 42 + 0,84 \cdot [I], \text{ мкм} \quad r = 0,71 \pm 0,03 \quad (3.3)$$

Кількісний металографічний аналіз досліджуваних сплавів показав, що за вмісту в сплаві МЛ5 елементів у кількості 0,05...0,1% інтенсивно збільшувався об'ємний відсоток сферичних інтерметалідів і незначно - пластинчастих. З підвищенням вмісту елементів у сплаві до 1,0% незначно збільшувався об'ємний відсоток сферичних включень, що перебувають усередині зерна, та інтенсивно - пластинчастих. Такий перерозподіл інтерметалідів сприяв деякому підвищенню пластичності досліджуваних сплавів за рахунок подрібнення зерна. Зі зростанням загальної кількості інтерметалідів підвищувалася міцність металу.

Аналіз розподілу інтерметалідів за розмірними групами показав, що у вихідному сплаві МЛ5 переважали пластинчасті інтерметаліди, більшість з яких перебували в розмірній групі 4...15 мкм. Сферичні інтерметаліди в основному представлені розмірною групою 2,0...7,9 мкм.



а – вихідна структура; б – Ge; в – Zr; г – Nd; д – Sc; е – Si; ж – Y; з – Ti; и – Hf

Рисунок 3.4 - Вплив елементів (мас. частка 0,1%) на мікроструктуру сплаву  
МЛ5

У магнієвому сплаві досліджувані легувальні елементи подрібнювали інтерметалідну фазу, а її розподіл зміщувався в сторону менших розмірних груп (до 2,0...11,5 мкм - для сферичних і < 2,0...7,9 мкм - для пластинчастих). При цьому підвищення вмісту елементів у сплаві збільшувало об'ємний відсоток інтерметалідів із розмірами менше 2 мкм і зменшувало об'ємну частку великих інтерметалідів, більших за 11,6 мкм (рисунок 3.5)

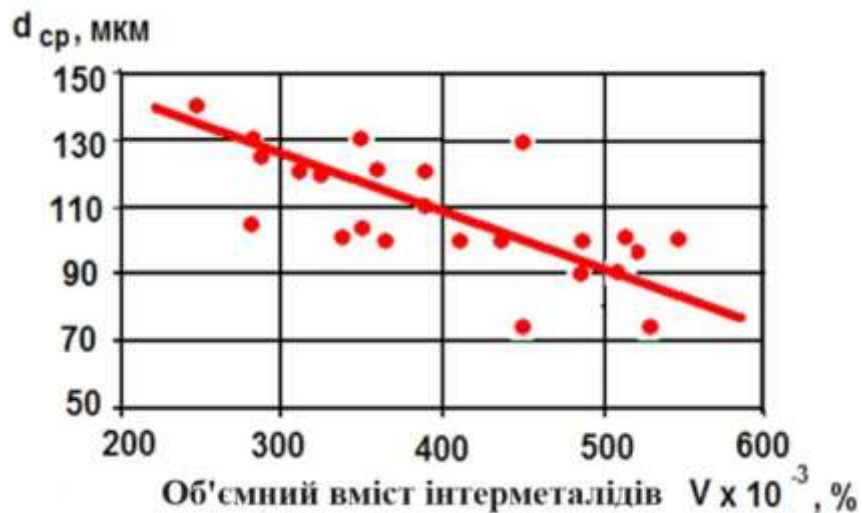


Рисунок 3.5 - Вплив об'ємного відсотка інтерметалідів (V) на розмір мікродзерна ( $d_{cp}$ ) у сплаві МЛ5

Встановлено чітку залежність (3.2), коли зі збільшенням об'ємного відсотка інтерметалідів при підвищенні вмісту елементів у сплаві МЛ5 помітно подрібнювалося мікрозерно:

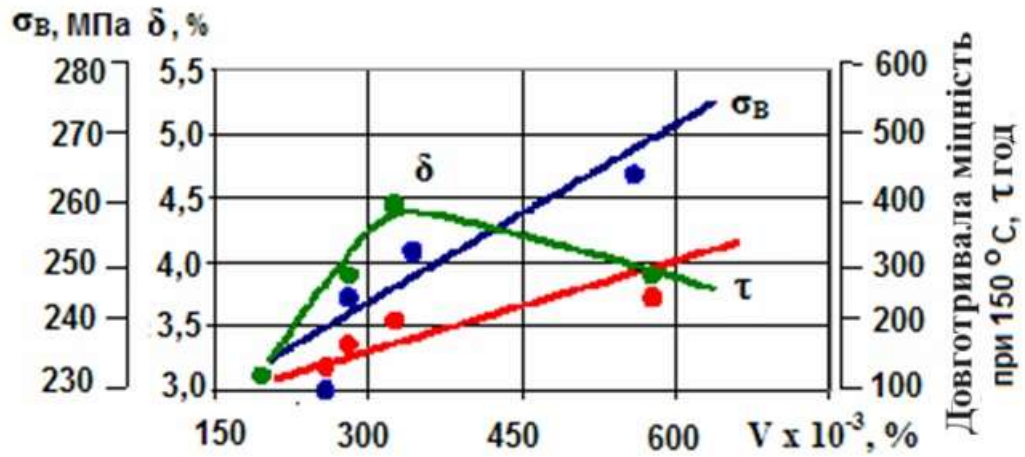
$$d_{cp} = 180,52 - 0,18 \cdot V, \quad r = - 0,82, \quad (3.2)$$

де  $d_{cp}$  - середній діаметр мікрозерна, мкм;

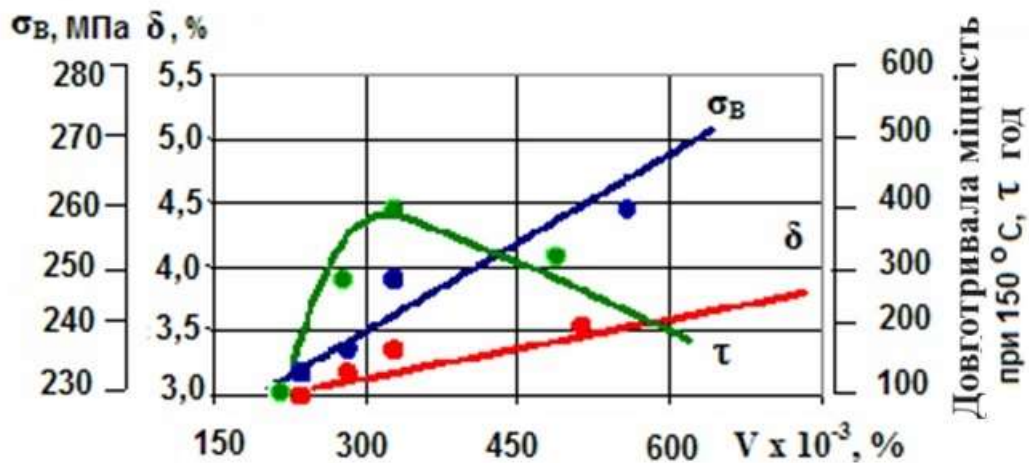
V - об'ємний відсоток інтерметалідів у сплаві, %

Зі збільшенням об'ємного відсотка інтерметалідів підвищилися міцність і жароміцність легованого магнієвого сплаву МЛ5 (рисунок 3.6).

Інтерметаліди, які розташовуються як у центрі зерна, так і на його границях, зміцнюють сплав і підвищують його жароміцність. Пластичність сплаву в залежності від кількості інтерметалідів має нелінійну залежність.



а

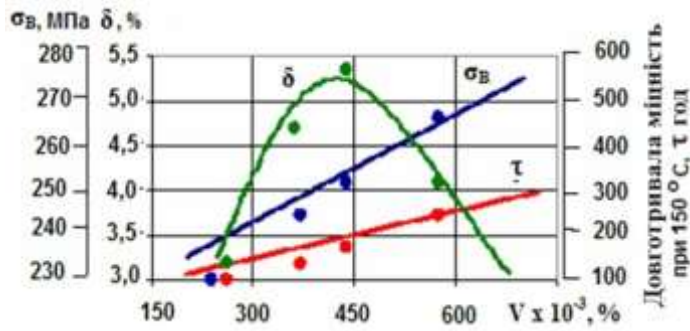


б

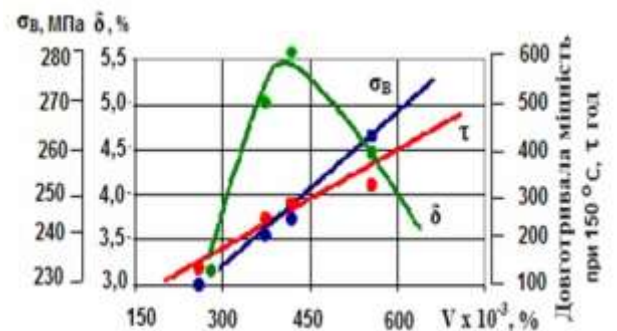
а – Si; б – Ge;

Рисунок 3.7 – Вплив об'ємного відсотка інтерметалідів на властивості легованого сплаву ML5

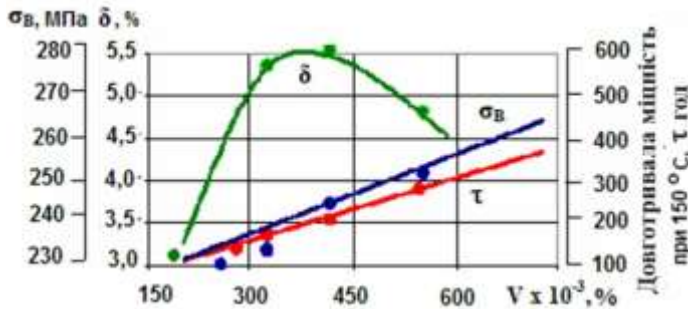
На властивості магнієвого сплаву впливає не тільки кількість інтерметалідної фази, що виділилася, а й її морфологія і топологія (рис. 3.8).



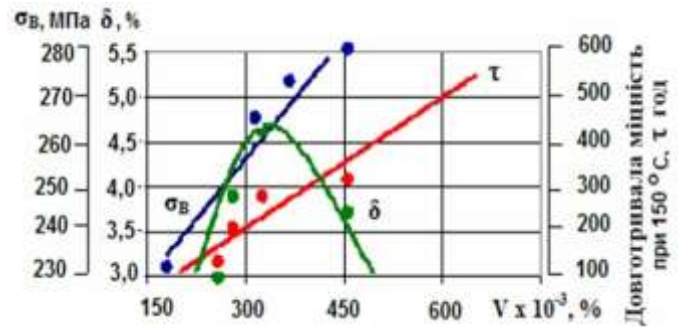
а



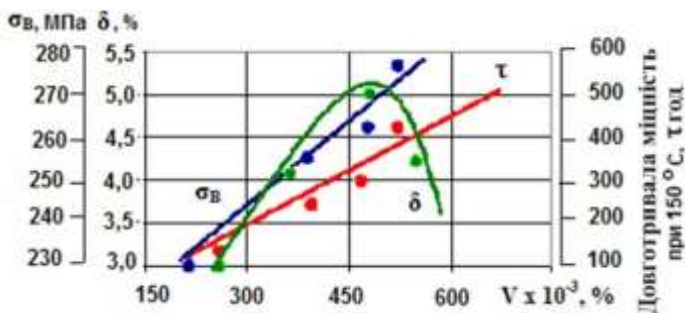
б



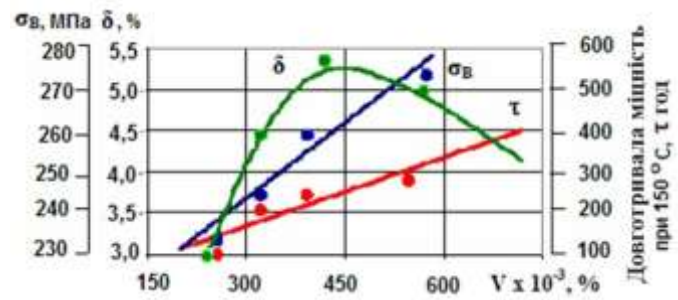
в



г



д

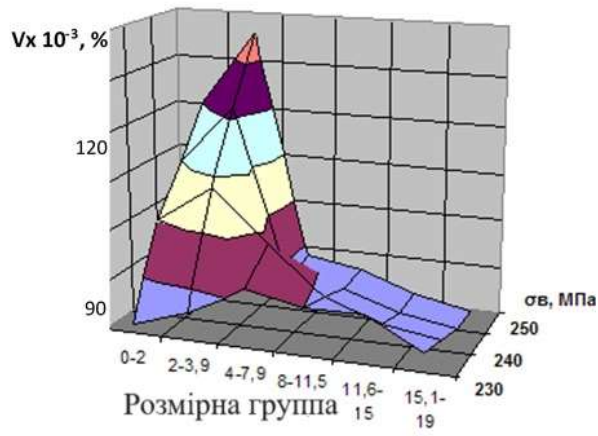


е

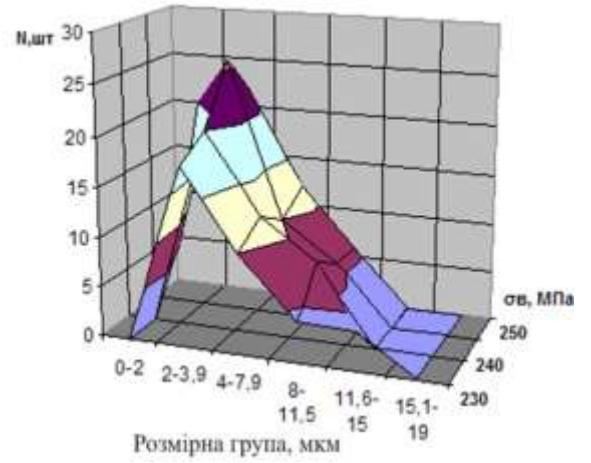
а – б – Ti; в – Y; г – Zr; д – Hf; е – Sc

Рисунок 3.8 - Вплив об'ємного відсотка інтерметалідів на властивості легованого сплаву МЛ15

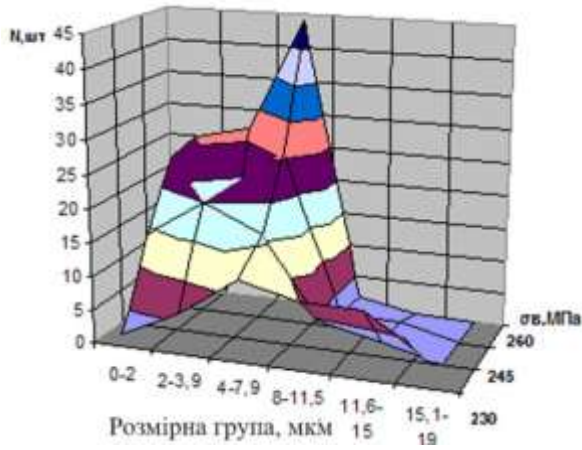
Пластинчасті інтерметаліди розміром до 8,0 мкм позитивно впливали на властивості сплаву, сферичні - тільки до розміру 11,6 мкм. Отже, сферична форма інтерметалідів є кращою для підвищення властивостей сплаву. Встановлено, що на зміцнення сплаву більше впливають сферичні інтерметаліди менших розмірних груп (рисунок 3.9).



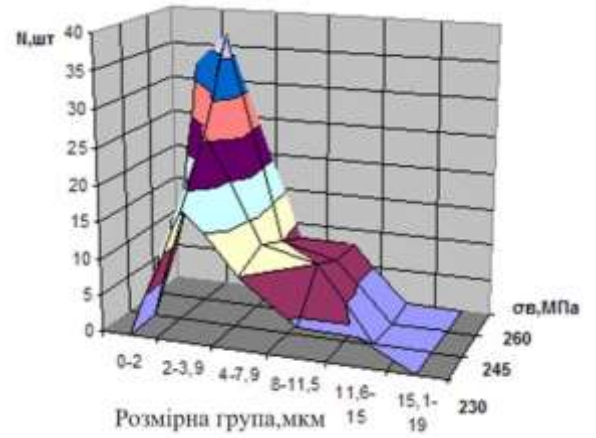
а



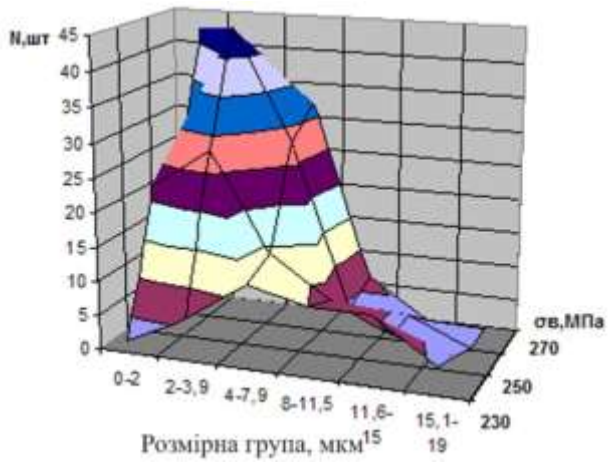
б



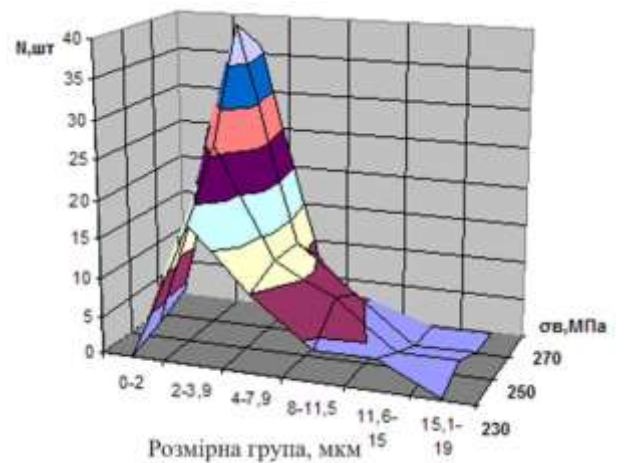
в



г



д

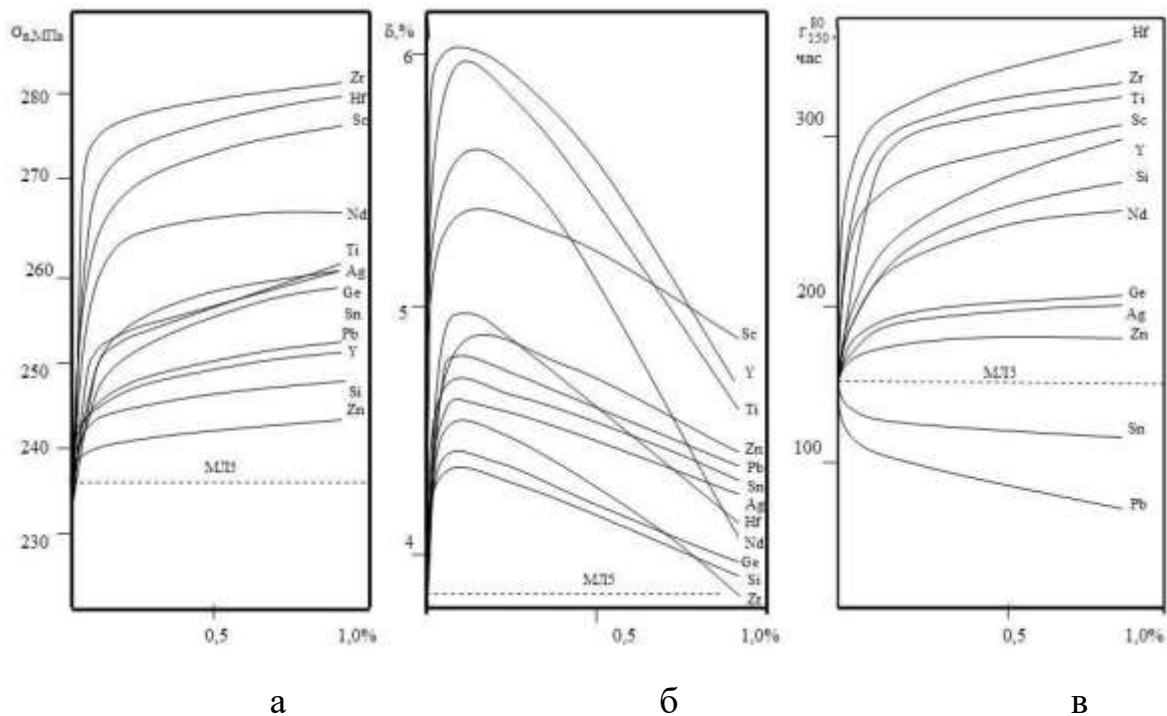


е

а – пластинчасті Ti; б – сферичні Ti, в – пластинчасті Sc; г – сферичні Sc, д – пластинчасті Hf; е – сферичні Hf

Рисунок 3.9 - Взаємозв'язок морфології, топології інтерметалідів і міцності сплаву

Вплив легування на властивості сплаву МЛ5 наведено на рисунку 3.10



а - міцність; б - пластичність; в – жароміцність

Рисунок 3.10 - Вплив легування на властивості сплаву МЛ5

Підвищення пластичності сплаву спостерігається тільки при введенні досліджуваних елементів у кількості 0,05...0,1 %, коли збільшувалася частка сферичних інтерметалідів і подрібнювалося зерно. За подальшого збільшення вмісту елементів у сплаві (до 1,0 %) одночасно з подрібненням мікрозерна відбувалося істотне зростання об'ємного відсотка інтерметалідів, що призводило до крихкості металу і зниження відносного подовження.

Таким чином, більше зміцнення сплаву МЛ5 досягалось при легуванні його невеликою кількістю (0,05...0,1 %). При цьому, досліджені елементи за силою впливу розподілялися в такий ряд (від максимального до мінімального): Zr, Hf, Sc, Nd, Si, Ge, Ti, Ag, Sn, Pb, Y, Zn (рис. 3.10 а).

Такі самі вмісти елементів, що вводяться, підвищували і пластичність сплаву. Однак збільшення кількості цих елементів (до 1,0 %) знижувало пластичність

(рис. 3.10 б). Помітно підвищували пластичність сплаву МЛ5 Y, Ti, Sc, Nd, Hf, слабкіше впливали Si, Zn, Ge, Ag, Sn.

Жароміцність сплаву МЛ5 з досліджуваними елементами змінювалася залежно від їхньої температури плавлення (рис. 3.10 в) і мала нелінійну залежність (3.2, 3.3, 3.4):

$$\tau_{0,05\%} = 128,72 + 0,015 \cdot T_{\text{пл}} + 1,65 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пл}}^2, \quad r = 0,92; \quad (3.2)$$

$$\tau_{0,10\%} = 113,43 + 0,033 \cdot T_{\text{пл}} + 2,34 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пл}}^2, \quad r = 0,93; \quad (3.3)$$

$$\tau_{1,0\%} = 62,96 + 0,117 \cdot T_{\text{пл}} + 1,59 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пл}}^2, \quad r = 0,98, \quad (3.4)$$

де  $\tau$  - жароміцність сплаву за певної концентрації легувального елемента;

$T_{\text{пл}}$  - температура плавлення легувального елемента.

На рисунку 3.11 наведено вплив легування на властивості жароміцності сплаву МЛ5

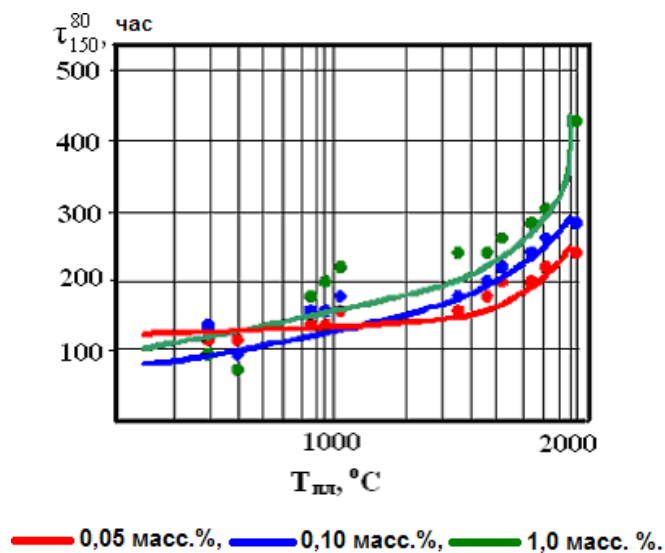


Рисунок 3.11 - Вплив температури плавлення легувальних елементів сплаву МЛ5 на його жароміцність

Як випливає із наведених графічних залежностей, гафній ( $T = 2230_{\text{пл}}^{\circ} \text{C}$ ), цирконій ( $T = 1850_{\text{пл}}^{\circ} \text{C}$ ), титан ( $T = 1660_{\text{пл}}^{\circ} \text{C}$ ) і скандій ( $T = 1540_{\text{пл}}^{\circ} \text{C}$ ) значно

підвищували жароміцність сплаву МЛ5, а олово ( $T_{\text{пл}} = 232^{\circ} \text{C}$ ) і свинець ( $T_{\text{пл}} = 324^{\circ} \text{C}$ ), що мають температуру плавлення нижчу, ніж основи сплаву ( $650^{\circ} \text{C}$ ), знижували її

Таким чином, досліджувані легувальні елементи з температурою плавлення, вищою за основу сплаву, підвищують не тільки властивості міцності та пластичні сплаву МЛ5, а й його жароміцність

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженні морфології

### 4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати відповідно до СНиП 2.09.04 – 87 «Административные и бытовые здания» та СНиП 2.09.02 – 85 «Производственные здания» [51], нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) 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;

в) небезпеки які пов'язані з можливістю 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;

г) небезпеки які пов'язані з можливістю отримання механічних травм при виготовленні дослідницьких зразків методом пресування, та подальшої обробки для дослідження. Наявність в робочій зоні таких фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів як машини та механізми,

вироби, заготовки та матеріали, що обертаються та переміщуються, при недостатній професійній підготовці фахівців, обумовлену недоліком знань технологічної та експлуатаційної документації, можуть призвести до аварійних ситуацій та травм різного ступеню важкості або летального наслідку. Також присутні такі фактори, як недосконалість конструктивних рішень кріплення штампів на технологічному обладнанні, зокрема, ненадійність кріплення штампів та їх вузлів до пресу; недосконалість конструкцій штампів, зокрема, відсутність зазорів безпеки між рухомими та нерухомими частинами штампів; відсутність технологічних отворів або інших конструктивних елементів для безпечного розміщення заготовок у штампі та безпечного вилучення деталей із них; відсутність атестації штампів та їх маркування за ступенем безпеки; відсутність надійних огорожень зони деформування; відсутність захисних пристроїв запобігання аварійних ситуацій; порушення правил з охорони праці при виконанні операцій формозмінювання; можливість отримання механічних травм внаслідок гострих кромek, заусенців на отриманих деталях або розсипання стосу заготовок.;

Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом (НПАОП 28.0-1.30-12) зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм [52].

д) небезпеки які пов'язані з дослідженням структури зразків методом електронної та оптичної мікроскопії з використанням електронних та оптичних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань;

е) небезпеки які виникають в наслідок невідповідності вимогам ДБН В.2.5-28-2006 [53] «Природне і штучне освітлення» освітлення робочих зон

дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) небезпеки які виникають в наслідок незадовільних параметрів мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [54] «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

з) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, які зазначені в НАПБ А.01.001-2014 [55] «Правила пожежної безпеки в Україні», а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

и) небезпеки які пов'язані з виконанням певних дій в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема при пожежах.

#### 4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680...800мм, а ширина і глибина – забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина – 800...1000мм). Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм,

завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) при роботі з ПК світлотехнічна специфіка обумовлена світлотехнічною різномірністю об'єктів зорової роботи користувача ПК: екрана, документації і клавіатури, розташованих у різних зонах спостереження, що вимагає багаторазового переміщення лінії зору від одного об'єкта до іншого.

Об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блмання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

в) Згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» 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 електроустаткування, 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.

Використання захисного заземлення:

– робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;

– заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;

– захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

г) Згідно аналізу потенційних небезпек найбільш ефективними заходами попередження механічних травм при використанні пристосувань для пресування є: Згідно ДСТУ 13121:2008 «Штампи для листові штамповки» кріплення штампів до пресу можливе за допомогою болтів, прихватних плит або хвостовиків. Кріплення повинно бути надійним. Кількість елементів для кріплення визначається масою штампу та зусиллям при його роботі. При кріпленні верхньої частини штампу через хвостовик, його розміри повинні відповідати отвору у повзуні пресу. Схід направляючих втулок з колонок неприпустимий. У конструкції штампів повинні бути передбачені зазори безпеки між рухомим елементом штампу та нерухомим. Величина зазорів неменше 25мм при нижньому положенні повзуна. Для безпечної подачі та видалення заготовки з штампу повинні бути передбачені технологічні отвори для зручного користування пінцетом або кліщами. При неможливості виконання цих вимог повинно бути передбачено використання захисних огорож. Функціями яких мають бути: виключення можливості потрапляння рук працюючого у небезпечну зону, виключення травмування працюючого самою захисною огорожею. Конструкція огорожі повинна давати можливість безпечного обслуговування штампу. При неможливості використання захисних пристроїв дворучне керування пресом є обов'язковим. Для

автоматичної зупинки роботи пресу у разі відхилення від нормального режиму (заклинювання пуансону, потрапляння в зону штампування сторонніх об'єктів, подвійний удар) передбачені запобіжні пристрої. До таких пристроїв належать: - обмежувачі ходу, упори, кінцеві вимикачі, гальмівні пристрої; - елементи конструкції обладнання типу «слабка ланка», зокрема, зрізні штифти, шпонки, фрікційні муфти, плавкі запобіжники; - блокуючі пристрої, які можуть бути механічними, електромеханічними, фотоелектричними; - сигналізуючі пристрої, які надають інформацію про виконання процесу або у разі прояву відхилень вказують на місце їх прояву. Такі пристрої зазвичай є частиною електричних схем ланцюгів управління обладнанням. Одними з розповсюджених випадків порушень є розміщення в матриці двох заготовок одночасно, спроба корегувати положення заготовки в матриці під час опускання пуансону, штучне блокування запобіжних пристроїв. Попереджувальними заходами можуть бути постійний контроль збоку керівників та представників профспілок, стимулювання бездоганного виконання правил з охорони праці. Заходами захисту мають бути: використання індивідуальних засобів захисту:

- спеціальний одяг;
- спеціальне взуття;
- спеціальні рукавиці;
- окуляри захисні;
- щитки наголовні.

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 пилу.

д) Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження. Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами ,пофарбованими головним чином по краю поля зору . Щоб погасити всі кольори ,в яких об'єкт не має корекції ,застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра ,жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках слід спочатку відключити високу напругу, піч диференційного

насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачання постаратися обмотати мокрими ганчірками піч диференційного насоса і включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не почне падати. після охолодження приступити до усунення несправності. При прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками.

#### 4.3 Заходи з виробничої санітарії

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці визначаються відповідно до вимог Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», зареєстрованих МЮ України 06.05.2014 р. за № 472/25249, з урахуванням виявлених, в процесі аналізу потенційних небезпек, небезпечних і шкідливих виробничих факторів [23].

Санітарний клас виробництва і розміри його санітарно-захисної зони визначаються з урахуванням наявних шкідливих виробничих факторів, згідно вимог ДСП 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів».

е) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 [24] «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої

зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.
- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;
- в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;
- в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;
- в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 % 45при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с [25].

Захист від шкідливих газів, паро- та пило-виділень передбачає обладнання місцевої витяжної вентиляції для відсосу отруйних речовин безпосередньо від місць їх утворення. Місцеві відсоси влаштовують конструктивно вбудованими та заблокованими з обладнанням так, що агрегат не можна запустити при виключеному відсосі.

- при роботі з отруйними і забруднюючими речовинами використовують спецодяг – комбінезони, халати і фартухи;
- для захисту від лугів і кислот – гумове взуття і рукавички;

- для захисту шкіри рук, обличчя та шиї застосовують захисні пасти: антитоксичні, маслостійкі та водостійкі;
- очі від можливих опіків і подразнень захищають окулярами з герметичною оправою, масками та шоломами;
- для захисту органів дихання використовують фільтруючі та ізолюючі прилади (протигази і респіратори).

ж) Виробниче освітлення організується і нормується згідно вимог ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення», залежно від:

- розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);
- виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

- природне (бокове або верхнє);
- штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове.

#### 4.4 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки зазначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»

з) 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» і СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания». 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».

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу – «PERCoPU01»

влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель PERCo-PU01 1-01, блок управління і індикації PERCo-AU02 1-01 та програмне забезпечення PERCo-S-20.

Панель PERCo-PU01 1-01 системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів, перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникненні з включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах PERCoPU01 дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та проникненні на блоці індикації;
- включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;
- передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

- інфрачервоні, що реагують на рух;
- магнітоконтатні, що реагують на розмикання дверей;
- акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – «PERCo-PU01» може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки PERCo-S-20 спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою

підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації і підключаються до PERCo-PU01 1-01.

#### 4.5 Заходи безпеки в умовах НС

и) Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов'язано із значними затратами, а по-друге, все ж неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв'язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об'єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об'єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсіпки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і тощо.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з'ємними і створюють запаси для заміни пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомоделей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфозфрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах,

які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з підвищеною ступеню стійкості до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерела, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові скважини (артезіанські скважини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини сіті.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Сіті зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузол заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв'язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв'язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного

комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогнебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об'єктів. Таке розосередження вибухових та вогнебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготувати склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об'єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об'єктів, розташованих в низинних ділянках місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідропоруд [26].

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг).

## 5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

### 5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Зв'язок між науковими дослідженнями і маркетинговими стратегіями може бути вирішальним для успіху продукту на ринку. Отже, дослідження впливу морфології та топології інтерметалідних фаз на комплекс властивостей сплаву МЛ5 може мати великий потенціал з точки зору розвитку маркетингової стратегії.

Покращення продукту та сприйняття споживачів: Відомості про те, що властивості сплаву МЛ5 можуть бути покращені через контроль морфології та топології інтерметалідних фаз, можуть вплинути на споживчу усвідомленість. Можна акцентувати на тому, що продукт став відповідати високим стандартам якості та новітнім технологіям.

Створення унікального продукту: Якщо дослідження вказує на можливість створення сплаву МЛ5 з унікальними характеристиками, це може слугувати основою для розвитку унікальної лінійки продуктів. Можливість пропонувати щось, що недосяжне для конкурентів, може дати перевагу на ринку.

Комунікація важливості наукових досліджень: Істотною частиною маркетингової стратегії може бути акцент на використанні передових наукових досліджень у розробці продукту. Інформація про те, що продукт створений на основі глибоких наукових знань може залучити увагу споживачів та підвищити довіру до бренду.

Створення інноваційних маркетингових стратегій: Результати дослідження можуть бути використані для створення нових маркетингових стратегій. Наприклад, проведення освітніх кампаній, відео презентацій, вебінарів або участі у виставках, де можна показати вплив морфології та топології інтерметалідних фаз на продукт.

Експансія на нові ринки: Якщо покращена версія сплаву може бути використана для нових застосувань або в нових галузях, це може відкрити

двері для зайняття нових ринків. Можливість проникнення на нові сегменти ринку може значно збільшити обсяги продажів.

Створення вибору для споживачів: Представлення продукту у різних варіаціях з різними характеристиками на основі досліджень може дати споживачам вибір. Це дозволить кожному клієнту знайти продукт, що відповідає їхнім потребам найкраще.

Отже, маркетингова стратегія, побудована на основі результатів досліджень впливу морфології та топології інтерметалідних фаз на сплав МЛ5, може бути ключовим фактором у підвищенні привабливості продукту, розвитку бренду та виходу на нові ринки.

## 5.2 Послідовний аналіз

Виконаний аналіз напрямків застосування та вигоди для споживачів (табл. 5.1). Надано цілісне уявлення про вміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Сплав МЛ5, як і багато інших сплавів, складається з інтерметалідних фаз, що є ключовими компонентами, визначаючими його властивості. Морфологія та топологія цих фаз можуть мати значення для комплексу властивостей сплаву, таких як міцність, жорсткість, стійкість до корозії, теплопровідність та інші характеристики.

Результати таких досліджень можуть бути використані для подальшого вдосконалення технологій виробництва, впровадження нових методів контролю якості продукції, а також розробки нових сплавів або матеріалів з покращеними характеристиками для різних галузей промисловості. Крім того, збільшення знань про вплив морфології та топології інтерметалідних фаз на властивості матеріалу може сприяти створенню більш ефективних та інноваційних продуктів, які відповідають вимогам ринку та споживачів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

| Вміст ідеї                                                                                           | Напрямки застосування                                            | Вигоди для споживачів<br>(користувачів)                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Дослідження впливу морфології та топології інтерметалідної фази на комплекс властивостей сплаву МЛ15 | Медицина, зокрема виробництво імплантатів.                       | Підвищення тривалості експлуатації медичних імплантатів, зниження ризику відторгнення. |
|                                                                                                      | Авіаційна промисловість для виготовлення деталей двигунів.       | Збільшення надійності та довговічності деталей двигунів.                               |
|                                                                                                      | Космічна галузь, використання в конструкціях космічних апаратів. | Підвищення стійкості до екстремальних температур та радіаційного навантаження.         |

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

| Показники стану ринку<br>(найменування) | Характеристика                                                                                         |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                       | 2                                                                                                      |
| Головні конкуренти                      | Pratt & Whitney, Rolls-Royce, Kyiv Titanium, «Арсенал»                                                 |
| Динаміка ринку (якісна оцінка)          | Стабільне зростання, пов'язане з підвищенням вимог до надійності авіаційного та космічного обладнання. |

Продовження таблиці 5.2

| 1                                                           | 2                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Наявність обмежень для входу<br>(вказати характер обмежень) | Високі вступні бар'єри через високі вимоги до сертифікації та великі інвестиції в дослідження.                                                        |
| Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації         | Відповідність стандартам ISO для авіаційної промисловості, сертифікація за міжнародними стандартами якості матеріалів, в тому числі ISO 9001, AS9100. |

Вивчені та визначені потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтований перелік вимог до товару для кожної групи табл.5.3.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

| Потреба, що формує ринок                                                        | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)             | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів                          | Вимоги споживачів (користувачів)                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Інноваційні медичні імплантати з покращеними експлуатаційними характеристиками. | Медичні заклади, приватні клініки, ортопедичні центри. | Вибір матеріалів базується на специфіці застосування, надійності, тривалості експлуатації. | Висока якість, довговічність, відповідність міжнародним стандартам, конкурентоспроможна ціна. |

Проведено оцінку SWOT-аналізу у контексті реалізації інноваційного проекту, а отримані результати наведені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

| Сильні сторони:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Слабкі сторони:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Збільшення експлуатаційних характеристик сплаву МЛ5.</p> <p>Потенційне зниження витрат на обслуговування та ремонт обладнання.</p> <p>Відкриття нових ринкових можливостей завдяки покращенню властивостей.</p> <p>Можливість використання у високотехнологічних галузях (авіація, медицина, космос).</p>                    | <p>Висока вартість досліджень та розробки нового сплаву.</p> <p>Потреба у високоспеціалізованих кадрах для роботи з матеріалом.</p> <p>Можливі технічні труднощі при впровадженні нових технологій виробництва.</p> <p>Обмеженість ринку через високу спеціалізацію продукту.</p> <p>Потреба у довготривалому тестуванні та сертифікації продукту</p>                              |
| Можливості:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Загрози:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>Відкриття нових ринків завдяки поліпшенню властивостей сплаву МЛ5.</p> <p>Перспектива використання у високотехнологічних секторах, таких як авіація, медицина та космічна промисловість.</p> <p>Потенційне зниження витрат на обслуговування та ремонт обладнання через покращення експлуатаційних характеристик сплаву.</p> | <p>Високі витрати на дослідження та розробку нового сплаву.</p> <p>Потреба у високоспеціалізованих кадрах для роботи з матеріалом.</p> <p>Можливі технічні труднощі при впровадженні нових технологій виробництва.</p> <p>Обмеженість ринку через високу спеціалізацію продукту.</p> <p>Потреба у довготривалому тестуванні та сертифікації продукту перед введенням на ринок.</p> |

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів                                               | Готовність споживачів сприйняти продукт                              | Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)                                                                                | Інтенсивність конкуренції в сегменті                                                     | Простота входу у сегмент                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Великі промислові підприємств стартапи у сфері високих технологій, науково-дослідні інститути. | Висока для технологічних інновацій, середня для традиційних галузей. | Для промислових підприємств: 5000 одиниць/рік; для стартапів: 1000 одиниць/рік; для науково-дослідних інститутів: 200 одиниць/рік. | Висока у сегменті промислових підприємств, помірною у сфері стартапів та наукової сфери. | Складна для промислових підприємств через високі вимоги до якості та технічні бар'єри, середня для стартапів, легка для науково-дослідних інститутів з огляду на інноваційність продукту. |



Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

| Посада                         | Кількість осіб | Посадовий оклад, грн | Преміальний фонд, грн | Сума премій, грн | Місячна заробітна плата | Річний фонд оплати праці, грн | ЄСВ, грн   |
|--------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|
| Науковий керівник              | 1              | 11689                | 20                    | 2337             | 14026,8                 | 168321,6                      | 37030,752  |
| Старший науковий співробітник  | 1              | 10982                | 20                    | 2196             | 13178,4                 | 316281,6                      | 69581,952  |
| Молодший науковий співробітник | 1              | 9633                 | 20                    | 1926             | 11559,6                 | 277430,4                      | 61034,688  |
| Лаборант                       | 2              | 6700                 | 20                    | 1340             | 8040                    | 289440                        | 63676,8    |
| Разом                          | 5              | 39004                | -                     | 7800             | 46804,8                 | 1051473,6                     | 231324,192 |

Розраховано вартість матеріалів для НДР. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення дослідних зразків (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

| Матеріальні витрати | Виробнича програма | Обсяг сировини | Ціна за одиницю, грн | Сума, грн |
|---------------------|--------------------|----------------|----------------------|-----------|
| 1                   | 2                  | 3              | 4                    | 5         |
| Папір               | –                  | 3              | 120                  | 360       |
| Ручка               | –                  | 20             | 15                   | 300       |
| Олівець             | –                  | 20             | 10                   | 200       |
| Зразки              |                    | 120            | 86                   | 10320     |

Продовження таблиці 5.7

| 1            | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Реактиви     | 18620 | 18620 | 18620 | 18620 |
| Змінні лінзи | 7560  | 7560  | 7560  | 7560  |
| Тара зразків | 1500  | 1500  | 1500  | 1500  |
| Разом        |       |       |       | 38860 |

Розраховано вартість спожитих послуг. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

| Вид послуг           | Виробнича програма, одиниць | Обсяг послуг     | Тарифи                  | Сума, грн |
|----------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|-----------|
| Електропостачання    | —                           | 650 кВт×год      | 1,18 грн/кВт×год        | 767       |
| Водопостачання       | —                           | 4 м <sup>3</sup> | 28,3 грн/м <sup>3</sup> | 113,2     |
| Теплопостачання      | —                           | 3 Гкал           | 3777 грн/Гкал           | 11331     |
| Охоронна система     | —                           | 1                | 1200 грн                | 1200      |
| Утилізація реактивів | 2                           | 3                | 150 грн                 | 450       |
| Разом                |                             |                  |                         | 10185     |

Амортизація - це процес поступового зменшення вартості основних засобів або необоротних активів на протязі їхнього корисного терміну використання. Це поняття використовується в обліку та фінансах для відображення зниження вартості активу внаслідок зношення, фізичного зносу, морального застаріння або втрати корисності активу з плином часу.

Амортизація є важливою складовою в управлінні фінансами підприємства. Вона дозволяє враховувати поступове знецінення активів у фінансовій звітності компанії протягом їхнього корисного терміну

використання. Річна сума амортизації списується з прибутку підприємства як витрати, що впливають на його фінансовий стан та звітність.

Цей процес необхідний не лише для визначення реальної вартості активів підприємства, а й для належного визначення податкових відрахувань і збереження прибутку, який може бути використаний для подальшого розвитку чи інвестування в підприємство.

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації

| Група основних засобів        | Кількість | Первісна вартість ОЗ | Вартість обладнання | Річні амортизаційні відрахування | Витрати на поточний ремонт у розмірі 2% |
|-------------------------------|-----------|----------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| Металографічний мікроскоп     | 2         | 98 287               | 196574              | 27520                            | 3931                                    |
| Електронний мікроскоп         | 1         | 1357110              | 1357110             | 189995                           | 27142                                   |
| Аналізатор металів та сплавів | 1         | 941240               | 941240              | 131773                           | 18824                                   |
| Комп'ютер                     | 4         | 26547                | 106188              | 14866                            | 2123                                    |
| Принтер                       | 1         | 14521                | 14521               | 2032                             | 290                                     |
| Разом                         | 9         | 2437705              | 2615633             | 366188                           | 52312                                   |

Розроблено кошторис витрат (табл. 5.10) при проведенні науково-дослідницької роботи на основі попередніх даних (табл. 5.6-5.9).

Метою розроблення кошторису витрат для проведення науково-дослідницької роботи на основі попередніх даних є планування та оцінка фінансових ресурсів, необхідних для виконання досліджень. Цей кошторис

визначає очікувані витрати, включаючи витрати на матеріали, обладнання, персонал, аналітичні методи, лабораторні витрати, витрати на адміністрування та будь-які інші витрати, що можуть виникнути під час дослідницької роботи.

Цей кошторис служить важливим інструментом для ефективного управління фінансами під час проведення наукових досліджень. Він допомагає забезпечити адекватне фінансування проекту, уникнути несподіваних витрат і виявлення можливих джерел фінансування, які можуть бути необхідні для успішного завершення досліджень.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

| Калькуляційні статті              | Витрати |
|-----------------------------------|---------|
| Фонд заробітної плати, грн/рік    | 1051474 |
| ЄСВ, грн/рік                      | 231324  |
| Матеріальні витрати, грн/рік      | 38860   |
| Вартість спожитих послуг, грн/рік | 10186   |
| Амортизація обладнання, грн/рік   | 366189  |
| Поточний ремонт, грн/рік          | 52313   |
| Виробнича собівартість, грн/рік   | 1750345 |
| Адміністративні витрати, грн/рік  | 525737  |
| Повна собівартість, грн/рік       | 2276081 |

### 5.3 Розрахунок економічного ефекту при впровадженні результатів НДР

При використанні 20% лігатур Mg-Y, Mg-Nd, Mg-Sc, Mg-Hf та враховуючи вартість обробки (що становить 15% та до якої входять термічна обробка, механічна обробка, лиття, тощо) розраховано собівартість сплавів, що розглядаються (табл. 5.11):

- собівартість однієї тони ( $C_1$ ) промислового серійного технічно чистого магнію МЛ90 становить:  $C_1 = 379500$  грн/т;

- собівартість однієї тони ( $C_2$ ) розробленого сплаву МЛ5 додатково легованого РЗМ становить:  $C_2 = 403419$  грн/т.

Таблиця 5.11 - Сировинні витрати

| Назва | Ціна<br>грн/кг | Вміст,<br>%<br>МЛ90 | Ціна за 1 кг,<br>МЛ90 | Вміст, %<br>МЛ5+Zn+(Y+Sc<br>+Hf+Nd) | Ціна за 1 кг, %<br>МЛ5+Zn+(Y+Sc+<br>Hf+Nd) |
|-------|----------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| Mg    | 330            | Основ<br>а          | 330                   | Основа                              | 330                                        |
| Hf    | 3800           |                     |                       | 0,01                                | 1,9                                        |
| Y     | 2789           |                     |                       | 0,02                                | 2,789                                      |
| Nd    | 240            | -                   | -                     | 0,12                                | 1,44                                       |
| Sc    | 4025           |                     |                       | 0,03                                | 6,0375                                     |
| Zn    | 178            | -                   | -                     | 0,97                                | 8,633                                      |
| Разом |                | 100                 | 330                   | 100                                 | 350,7995                                   |

Збільшення собівартості ( $\Delta C$ ) розробленого сплаву МЛ5 додатково легований РЗМ в порівнянні з вартістю технічно чистого магнію становить:

$$\Delta C = (C_2 - C_1) / C_1 \quad (5.1)$$

$$\Delta C = (403419 - 379500) / 403419 = 0,059 = 6 \%$$

Таким чином, орієнтовне збільшення собівартості деталей з розробленого сплаву відносно технічно чистого магнію становить 20 %.

Річна потреба виробництва у деталях з розробленого сплаву складає 110000 деталей на рік, що складається з 10000 деталей вагою 1-3 кг, 50000 деталей вагою 0,5-2 кг та 50000 деталей 0,1-0,2 кг. Таким чином, необхідну кількість сплаву можна розрахувати як (5.2):

$$A = n_1 \times m_1 + n_2 \times m_2 + n_3 \times m_3 \dots n_n \times m_m, \quad (5.2)$$

де  $n_n$  – кількість деталей у річному замовленні відповідного типу;

$M_m$  – середня маса деталі відповідного типу.

Річна потреба виробництва у технічно чистому магнії була:

$$A_{\text{спл}} = 2000 \times 2 + 14000 \times 1,75 + 14000 \times 0,15 = 30600 \text{ кг} = 30,6 \text{ т}$$

При впровадженні розробленого сплаву, замовлення виробництва було збільшено, а отже потреба у сплаві стала:

$$A_{\text{спл}} = 10000 \times 2 + 50000 \times 1,75 + 50000 \times 0,15 = 115000 \text{ кг} = 115 \text{ т}$$

Відповідно, розраховано мінімальну ціну товару без врахування податку, при якій 100% реалізація 115 т продукції щорічно компенсує витрати на проведення НДР впродовж 5 років:

$$Ц = (C_{\text{ндр}} + C_2 \times A_{\text{спл}} + P + H) / A_{\text{спл}}, \quad (5.3)$$

де  $Ц$  – ціна товару;

$C_{\text{ндр}}$  – собівартість НДР згідно кошторису (табл. 5.10), грн;

$C_2$  – собівартість розробленого сплаву, грн/кг;

$P$  – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

$H$  – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

$A_{\text{спл}}$  – обсяг замовлення, кг.

$$\begin{aligned} \Pi &= (403,419425 + 403419 \times 115000 + 9278646,775 + 4639323,388) / 115000 = \\ &= 538 \text{ грн/кг} \end{aligned}$$

Ціна виробів з технічно чистого магнію до була встановлена на рівні 648 грн/кг. При річному замовленні виробництва у 30,6 т, прибуток за 5 років складав:

$$\Pi_{\text{чм}} = \Pi_{\text{чм}} \times (A_{\text{чм}} \times 5) - C_1 \times (A_{\text{чм}} \times 5) - P_{\text{чм}} - H_{\text{чм}} \quad (5.3)$$

де  $\Pi_{\text{чм}}$  – ціна виробів з технічно чистого магнію, грн/кг;

$C_1$  – собівартість технічно чистого магнію грн;

$P_{\text{чм}}$  – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

$H_{\text{чм}}$  – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

$A_{\text{чм}}$  – обсяг замовлення технічно чистого магнію, кг.

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{чм}} &= 538 \times (30600 \times 5) - 403,419425 \times (30600 \times 5) - 9278646,775 - \\ &4639323,388 = 33813000 \text{ грн} \end{aligned}$$

В результаті впровадження нового магнієвого сплаву у виробництво середня ціна за 1 кг товару збільшилась з 650 грн/кг до 825 грн/кг. При цьому, зважаючи на підвищену ефективність нового сплаву, об'єм замовлення було збільшено з 30,6 т до 115 т на рік. Таким чином, при впровадження нового сплаву прибуток виробництва за 5 років буде становити:

$$\Pi_{\text{чм}} = \Pi \times (A \times 5) - C_2 \times (A \times 5) - P - H \quad (5.4)$$

де  $\Pi$  – ціна виробів з розробленому сплавів, грн/кг;

$C_2$  – собівартість розробленого магнію грн;

$P$  – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

Н – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

А – обсяг замовлення розробленого сплаву, кг.

$$\Pi = 650 \times (115000 \times 5) - 624,028 \times (115000 \times 5) - 9278646,775 - 4639323,388 = 7938955 \text{ грн}$$

Отже, економічний ефект від впровадження нового сплаву склав:

$$E_k = \Pi - \Pi_{\text{чм}} = 33813000 - 636480 = 25874045 \text{ грн}$$

Таким чином, підвищення прибутку від провадження нового сплаву у 11 разів повністю компенсує підвищення собівартості матеріалу на 26 %, а також всі витрати на проведення науково-дослідної роботи впродовж 5 років.

## ВИСНОВКИ

У ході дипломного проєктування було узагальнено принципи відбору критеріїв для оцінки оптимальних факторів (переважання температури танення домішкових елементів над температурою магнію, близькість атомних радіусів (менше ніж 15%) та електронегативності (менше ніж 0,4)), що сприяють формуванню багатокомпонентних твердих розчинів у сплавах та створенню термічно стабільних структур, які поліпшують характеристики магнієвих сплавів. Відтак, за перспективні елементи для вдосконалення магнієвих сплавів визнано Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti та Hf.

Встановлено залежності впливу морфології та топології структурних складових магнієвих сплавів на їхні властивості. Отримано залежності впливу температури плавлення легуючих елементів і кількості інтерметалідних фаз, що утворюються, на жароміцність магнієвих сплавів.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Polmear I. Light alloys: metallurgy of the light metals /I Polmear, D. StJohn, J Nie // Butterworth-Heinemann - 2017. P.544
2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials ASM Handbook Committee 1990 – p 741
3. Kainer, Karl U., and Barry L. Mordike, eds. Magnesium alloys and their applications. Weinheim: Wiley-Vch, 2000. p 293.
- 4 Yufeng Zheng. Magnesium Alloys as Degradable Biomaterials - CRC Press – 2015 p 600.
- 5 Okamoto, Hiroaki, T. B. Massalski. «Binary alloy phase diagrams» ASM International, Materials Park, OH, USA 12 (1990). p533
6. Hot-tearing susceptibility of Mg -9Al -xZn alloy / Wang Yeshuang, Wang Qudong, Wu Guohua and oth. // Mater. Lett. - 2002. – 57, N 4. - P. 929-934.
7. Czerwinski, Frank. Magnesium Alloys: Properties in Solid and Liquid States. BoD–Books on Demand, 2014 p 352
8. Yousuke T. Crushing of grain of cast details from magnesian alloys / Tamura Yousuke // Chiba kogyo kenkyu=Rept Chiba Inst. Technol. - 1999. - 46. - P. 349-350.
9. Westengen, H. Magnesium: alloying. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (2001): 4739-4743.
10. Kainer, Karl U. Magnesium: proceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications. John Wiley & Sons, 2007.
11. Бляблин А.А. Влияние РЗМ на свойства сплавов на основе магния, применяемых при остеосинтезе / А.А. Бляблин, В.С. Бородкин, Л.А. Комиссарова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1988. - № 2. - С. 29-31

12. Рохлин Л.Л. Механические свойства сплавов магния с диспрозием / Л.Л. Рохлин, Н.И. Никитина // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1999. - № 6. - С. 37-39.
13. Дриц М.Е. Исследование свойств сплавов магний-гадолиний / М.Е. Дриц, З.А. Свицерская // Технология легких сплавов. - 1974. - № 5. - С. 12-17.
14. Строение и свойства тройных магниевых сплавов, содержащих два редкоземельных металла разных подгрупп / Л.Л. Рохлин, Т.Б. Добаткина, Н.И. Никитина // Технология легких сплавов. 2004. - № 5. - С. 4-7.
15. Бобрышев Б.Л. Воспламенение магния и его сплавов / Б.Л. Бобрышев, Ю.П. Александрова // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1988. - № 3. - С. 41-44.
16. Wang Y. Influence RE on a microstructure of alloys Mg-8Zn-4Al-0,3Mn / Y. Wang, S. Guan, J. Wang // Zhongguo yongyong jinshu xuebao: Chin. J. Nonferrous Metals. - 2003. - 13. - № 3. - P. 616-621
17. Wang Q. Effects of RE microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy/ Wang Qu-dong, Lu Yi-zhen, Zeng Xiao-qin // Trans. Nonferrous metals Soc. China. - 2000. - 10. - №2. - P. 235-239.
18. Шульте Ю.А. Производство отливок из стали / Шульте Ю.А. - К.: Донецк : Вища школа, 1983. - 184 с.
19. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья / Шульте Ю.А. - К.: Донецк : Вища школа, 1970. - 222 с.
20. Лунев В.В. Неметаллические включения в сталях, чугунах и ферросплавах / В.В. Лунев, В.П. Пирожкова, С.Г. Грищенко. - Запорожье: Днепровский металлург, 2006. - 384 с.
21. Олышанецкий В.Е. Об аномальной пограничной абсорбции крупноразмерных примесных атомов в однокомпонентной металлической матрице / В.Е. Олышанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2010. - №1. - С. 51-54.

22. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали / Шульте Ю.А. - М. : Металлургия, 1964. - 199 с.
23. Попов В.Е. Получение кристаллических тугоплавких карбидов из раствора в легкоплавких металлах / В.Е. Попов , В.Н. Гурин // Карбиды и сплавы на их основе. - К. : Наукова думка, 1976. - С. 21-26.
24. Попов В.Е. Получение кристаллических тугоплавких карбидов из раствора в легкоплавких металлах / В.Е. Попов , В.Н. Гурин // Карбиды и сплавы на их основе. - К. : Наукова думка, 1976. - С. 21-26.
25. Zhang S. Method of introduction of a carbonaceous flux for crushing grain in a magnesians alloy. / S. Zhang , W. Li , K. Yu // Tezhong zhuzao ji youse hejin: Nonferrous Alloys. - 2002. - № 4. - P. 18-19.
26. Влияние постоянного тока на качество магниевых сплавов / В.И. Якимов, В.И. Шпорт, В.И. Муравьев [и др.] // Литейное производство.- 1999. - № 12. - С. 10-12.
27. Кулинский А.И. Исследования по разработке высокоэффективной технологии модифицирования магниевых сплавов / А.И. Кулинский, Л.А. Щепин, А.А. Шумахер // Избр. науч. труды. каф. технол. литейн. пр-ва: сб. трудов. - Перм. гос. техн. ун-т., 2003. - № 12. - С. 207-212.
28. А. с. № 124126, МПК<sup>6</sup> В 22 D 11/115. Приспособление для измельчения при непрерывной отливке структуры слитков из алюминия, магния и их сплавов / [Б.Ф. Миляев, З.А. Орешников, А.И. Соколова и др.] - № 619921; заявл. 19.02.1959; опубл. 01.01.1959, Бюл. № 22. - 5 с.
29. Мальцев М.В. Модифицирование структуры цветных металлов и сплавов / Мальцев М.В. - М.: Металлургия, 1964. - 214 с.
30. Корнилов И.И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов / Корнилов И.И. - М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 516 с.
31. Даркен Л.С. Физическая химия металлов / Л.С. Даркен, Р.В. Гурри. – М. : Металлургиздат, 1960. – 582 с.
32. Гшнейднер К.А. Сплавы редкоземельных металлов / Гшнейднер К.А. - М. : Мир, 1965 – 428 с.

33. Уоббер Дж. Металлургия и металловедение плутония и его сплавов / Уоббер Дж. - М. : Госатомиздат, 1962. - 102 с.
34. Шульте Ю.А. Производство отливок из стали / Шульте Ю.А. - К.: Донецк: Вища школа, 1983. - 184 с.
35. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья / Шульте Ю.А. - М. : Metallurgia, 1970. - 222 с.
36. Лунев В.В. Неметаллические включения в сталях, чугунах и ферросплавах / В.В. Лунев, В.П. Пирожкова, С.Г. Грищенко. – Запорожье: Днепровский металлург, 2006. - 384 с.
37. Ольшанецкий В.Е. Об аномальной пограничной абсорбции крупноразмерных примесных атомов в однокомпонентной металлической матрице / В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2010. - №1. - С. 51-54.
38. Емлин Б.И. Справочник по электротермическим процессам / Б.И. Емлин, М.И. Гасик. - М. : Metallurgia, 1978. - 228 с.
39. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали / Шульте Ю.А. - М. : Metallurgia, 1964. - 199 с.
40. Металлургия легких металлов / [Москвитин В.И., Николаев И.В., Фомин Б.А. и др.] - М. : Интернет Инжиниринг, 2005. - 414 с.
41. Попов В.Е. Получение кристаллических тугоплавких карбидов из раствора в легкоплавких металлах / В.Е. Попов , В.Н. Гурин // Карбиды и сплавы на их основе. - К. : Наукова думка, 1976. - С. 21-26.
42. Комплексная обработка магниевого сплава Мл-5 магнием и ультразвуком / М.В. Чухров, М.П. Рыженкова, З.Н. Хрисанова [и др.]. - Литейное производство. - 1977. - № 10. - С. 15-16.
43. Колчев Б.А. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов / Б.А. Колчев, Е.А. Ливанов, В.И. Елагин. - М. : Metallurgia, 1972. – 480 с.
44. Магниеые сплавы: справочник: в 2 ч. Ч. 2: Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов / [Антонов Е.Г.,

Арбузов Б.А., Бабкин В.М. и др.]; ред. И.И. Гурьев, М.В. Чухров - М.: Металлургия, 1978. – 294 с.

45. Zhang S. Method of introduction of a carbonaceous flux for crushing grain in a magnesian alloy. / S. Zhang , W. Li , K. Yu // Tezhong zhuzao ji youse hejin: Nonferrous Alloys. - 2002. - № 4. - Р. 18-19.

46. Воронов С.М. Избранные труды по легким сплавам / Воронов С.М. - М. : Оборонгиз, 1957.- 595 с.

47. Чухров М.В. Модифицирование магниевых сплавов / Чухров М.В. - М. : Металлургия, 1972. - 176 с.

48. Эскин Г.И. Кристаллизация слитков магниевых сплавов с применением ультразвуковой обработки расплава / Г.И. Эскин. - Metallurg. - 2003. - № 7. - С. 47-50.

49. Новиков И.И. Исследование сплавов цветных металлов / Новиков И.И., Золоторевский В.С., Лисовская Т.Д. - М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 287 с.

50. Влияние постоянного тока на качество магниевого сплава / В.И. Якимов, В.И. Шпорт, В.И. Муравьев [и др.] // Литейное производство. - 1999. - № 12. - С. 10-12.

51. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. [На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16]. К. : МНС України, 2012. 37 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12#n16>

52. СНиП 2.09.02-85\*. Производственные здания. Зі змінами. [На заміну СНиП II-90-81 ; СНиП II-М.2-62 ; СН 317-65 ; СН 353-66 ; чинний від 1987-01-01]. К. : Госстрой СССР, 1988.

53. НПАОП 28.0-1.30-12. Правила охорони праці під час роботи з абразивним інструментом. [На заміну НПАОП 28.52-1.22-64 ; чинний від 2012-11-26]. К. : МНС України, 2012.

54. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. URL : <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>.

55. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. URL : [https://ledeffect.com.ua/images/\\_\\_\\_branding/dbn2018.pdf](https://ledeffect.com.ua/images/___branding/dbn2018.pdf).

56. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. К. : МВС України, 2014. 91 с. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#n14>.