

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему Вибір режимів термічної обробки для підвищення міцності та пластичності магнієвого сплаву МЛ19

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи ІФ-210
Спеціальності 132 «Матеріалознавство»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

СЕРГАЧ Р.А.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник АЙКІН М.Д.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ШИРОКОБОКОВ В.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний
Кафедра Фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри «Фізичне матеріалознавство»

Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

СЕРГАЧ Руслан Антонович

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вибір режимів термічної обробки для підвищення міцності та пластичності магнієвого сплаву МЛ19

керівник проєкту (роботи) ст.викладач АЙКІН Микита Дмитрович,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « _____ » _____ 20__ року № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 12 червня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) хімічний склад і властивості сплаву МЛ19

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

1. Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалу.
2. Номенклатура виробів і маршрутна технологія їх виготовлення.
3. Характеристика матеріалів виробів.
4. Розробка режимів і технологій термічної обробки.
5. Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів.
6. Спеціальна частина.

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

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-6	АЙКІН М.Д., ст. викладач		
н/к	ДЖУС А.В., асистент		

7. Дата видачі завдання « _____ » _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Застосування магнієвих сплавів в авіації	28 березня – 12 квітня	
2	Взаємозв'язок хімічного складу, структури та властивостей магнієвих сплавів	13 квітня – 20 квітня	
3	Методики досліджень	21 квітня – 08 травня	
4	Дослідження режиму термічної обробки сплаву МЛ19	09 травня – 17 травня	
5	Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів	18 травня – 30 травня	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	31 травня – 13 червня	

Студент(ка)

_____ Руслан СЕРГАЧ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Микита АЙКІН

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи: с., 6 табл., 15 рис., дод., 41 джерел.

МЛ19, МАГНІЙ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ГАРТУВАННЯ, СТАРІННЯ,
ЗМІЦНЮВАЛЬНА ФАЗА, Mg_2Si , АВІАЦІЙНІ ДВИГУНИ,
МІРОСТРУКТУРА

Об'єкт розробки – магнієвий сплав МЛ19.

Мета роботи – Дослідити магнієвий сплав МЛ19 для виготовлення деталей авіаційних двигунів, що працюють при температурах експлуатації 300 – 350 °С, проаналізувати умови роботи та навантаження. Розробити технологію термічної обробки сплаву МЛ19 для підвищення характеристик міцності та пластичності порівняно зі стандартною технологією. Визначити можливі дефекти, що можуть виникнути у виливку та при проведенні операцій термічної обробки, а також можливі заходи по їх попередженню та усуненню. Проаналізувати небезпеки, що можуть виникнути при проведенні технологічних операцій термічної обробки виробів із магнієвого сплаву МЛ19.

ЗМІСТ

	С.
Вступ	6
1 Застосування магнієвих сплавів в авіації.....	7
2 Взаємозв'язок хімічного складу, структури та властивостей магнієвих сплавів.....	10
2.1 Магній та його властивості.....	10
2.2 Аналіз промислових литих магнієвих сплавів.....	12
2.3 Особливості сплавів системи Mg-PZM-Zr	17
2.4 Характеристика сплаву МЛ19.....	20
3 Методики досліджень.....	21
4 Дослідження режиму термічної обробки сплаву МЛ19.....	22
4.1 Мікроструктура сплаву МЛ19.....	23
4.2 Вибір режиму термічної обробки сплаву МЛ19.....	25
4.3 Вплив режиму термічної обробки на механічні властивості сплаву МЛ19.....	27
5 Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів.....	31
6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	34
6.1 Аналіз потенційних небезпек.....	35
6.2 Заходи забезпечення безпеки.....	36
6.3 Заходи з виробничої санітарії.....	40
6.4 Заходи з пожежної безпеки.....	41
6.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	43
Висновки.....	48
Перелік джерел посилань.....	49
Додаток А	54

ВСТУП

Магнієві сплави набувають все більшого поширення в різноманітних галузях промисловості завдяки їхній високій питомій міцності та легкості. Сплав МЛ19 (Mg-10,5Al-1Zn-0,5Mn), який є об'єктом дослідження даної роботи, широко використовується в авіабудуванні, автомобільній промисловості та космічній техніці. Проте, як і більшість магнієвих сплавів, він характеризується відносно низькою міцністю та пластичністю в литому стані. Для підвищення функціональних властивостей МЛ19 застосовують різноманітні режими термічної обробки, зокрема, гартування та старіння.

Запропонована робота присвячена дослідженню впливу варіативних параметрів термічної обробки на структурні перетворення та механічні властивості сплаву МЛ19. Основною метою є визначення оптимальних режимів гартування та штучного старіння, які забезпечать найбільш сприятливе поєднання міцності та пластичності сплаву для подальшого його впровадження у високонавантажених деталях сучасних транспортних засобів.

У роботі здійснено детальний аналіз мікроструктури та фазового складу сплаву після різноманітних термічних обробок із залученням новітніх методів електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. Проведено всебічні механічні випробування для оцінки властивостей міцності, пластичності, втомної міцності. На основі отриманих результатів встановлено взаємозв'язки між параметрами термічної обробки, структурним станом та функціональними властивостями сплаву МЛ19.

1 ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ В АВІАЦІЇ

Авіаційна галузь постійно розвивається, що передбачає використання новітніх матеріалів, виробів та робочих речовин. Сучасна реактивна техніка пересувається з надзвичайно високими швидкостями на значні відстані, працюючи в умовах високого тиску, екстремальних температур, а деякі навіть у глибокому космічному вакуумі. Це вимагає створення нових металевих сплавів, зокрема жароміцних, які мають потужний комплекс фізико-механічних властивостей, необхідних для сучасної експлуатації такої техніки.

При виборі матеріалів для виготовлення деталей авіаційних двигунів необхідно враховувати всі вимоги щодо умов експлуатації, робочого середовища, температурного режиму тощо, які, у свою чергу, регламентують вимоги до їхніх механічних, фізичних і хімічних властивостей. Наприклад, крило літака має бути легким і міцним, витримувати високий тиск, різкі зміни температур, а також вплив навколишнього середовища; вали та підшипники повинні мати тривалий строк служби зі збереженням вихідних характеристик; лопатки турбін – зберігати форму та розміри під дією високих температур, робочого середовища та відцентрових зусиль [1].

Важливою характеристикою матеріалів для застосування в літакобудуванні є їхня густина, яка є показником придатності для польотів. Чим менша густина матеріалів, використаних у конструкції літака, тим більше пасажирів та вантажу можна перевезти на ньому без збільшення витрат палива.

Основним напрямком у створенні авіаційних матеріалів є отримання композицій, здатних надійно працювати в умовах високих температур (1200-1800 °C). Внаслідок цього, критерієм оцінки та вибору металів часто слугує зміна питомої міцності при підвищенні температури, а також враховуються показники жароміцності. Вагоме значення при виборі матеріалу мають характеристики міцності – границя міцності, границя текучості, границя втоми, модуль

нормальної пружності. Тому при виготовленні деталей перевага надається матеріалу з вищою міцністю.

Найширше застосування в цій галузі отримали такі метали, як титан, берилій, алюміній, магній, реній, тантал і ніобій, а також різноманітні металеві сплави на їхній основі. Використання магнієвих сплавів в авіа- та ракетобудуванні дозволило значно покращити аеродинамічні властивості літальних апаратів та полегшити їхню конструкцію [1].

Із ливарних сплавів виготовляють кронштейни, елементи кріплення, відсіки корпусу ракети, пілони, елерони, деталі хвостового оперення, деталі управління стабілізатора тощо. Деформівні сплави застосовують для виробництва обшивки корпусів, поверхонь управління та ребер, перегородок, шпангоутів, всмоктуючих клапанів та каналів для підведення повітря до двигуна. Листи використовуються в конструкції головної частини капотів, зовнішніх обтічників, дверей, антен радіолокаторів, відсіків, у конструкціях, призначених для монтажу електронного обладнання, балонів пневматичної системи. Листи та пресовані напівфабрикати застосовують для корпусів, стрингерів, лонжеронів, опорних конструкцій гальм, хвилеводів, зовнішніх антенних обтічників, стрингерів поверхонь управління та інших деталей [1] (рис. 1.1).

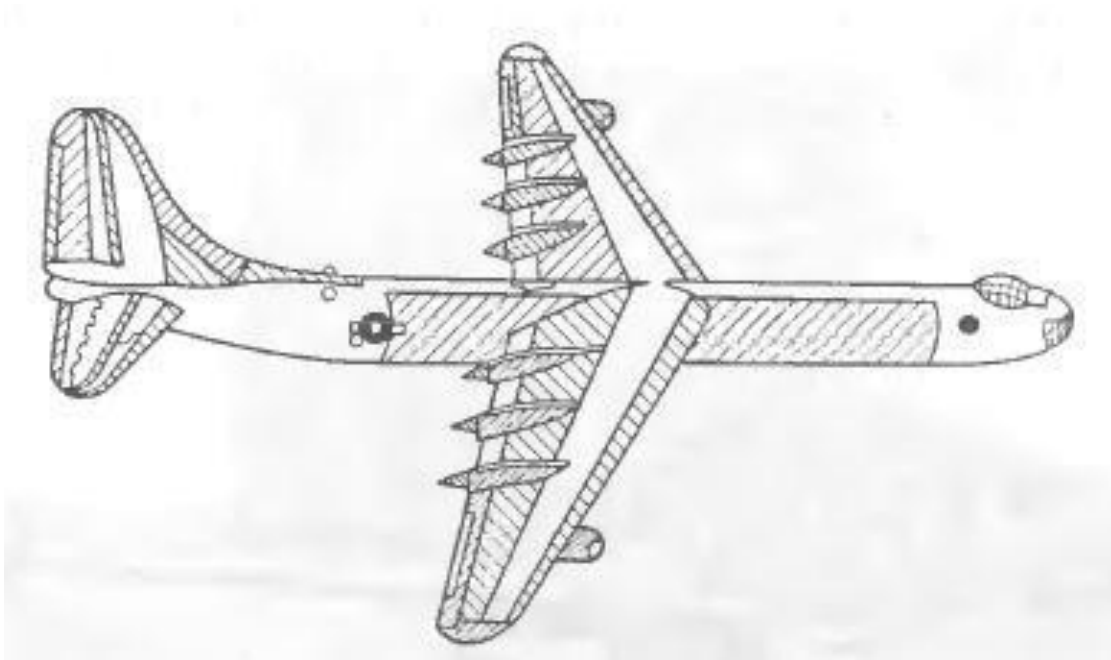


Рисунок 1.1 – Деталі літака, виготовлені з магнієвих сплавів (заштриховані)

Магній хімічно дуже активний метал. З магнієвих сплавів вже виготовляють велику кількість деталей сучасних літаків, в тому числі і деталі двигунів [2]. Такий значний інтерес до магнію цілком очевидний: магній в 1,5 рази легший за алюміній в 2,5 рази за титан, в 4,5 за сталь. Питома міцність магнієвих сплавів вища, ніж алюмінієвих сплавів і сталей. Деталі з таких сплавів можна отримувати методом лиття, яке є високоточним і відливки майже не потребують наступної механічної обробки. Внаслідок цього ці деталі дешевші, ніж з алюмінію, хоча сам магній дорожчий. Теплопровідність магнію значно менша в порівнянні з алюмінієм, а коефіцієнт лінійного розширення практично однаковий. Але одним із суттєвих недоліків цього металу є його низька корозійна стійкість на повітрі (особливо вологому), а також у воді.

Магній та сплави з ним проявляють високу ефективність у поглинанні механічної вібрації, мають властивість високої стійкості до ударних навантажень, володіють значною питомою жорсткістю при згині та крутінні, легко піддаються обробці методами різання, шліфування і різними техніками зварювання [3].

До недоліків магнію та його сплавів слід віднести: порівняно з алюмінієм, особливо при температурах близьких до кімнатної та нижчих, більш низьку пластичність та технологічність; невисокий модуль пружності (в 2 рази менший ніж у Al та в 5 разів ніж у сталі); низьку швидкість дифузійних процесів, що ускладнює термічну обробку; гіршу корозійну стійкість порівняно з Al та його сплавами; здатність при підвищених температурах до самозаймання внаслідок активної взаємодії з киснем [4].

2 ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ХІМІЧНОГО СКЛАДУ, СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

2.1 Магній та його властивості

Магній, характерний елемент земної мантії, зустрічається переважно в основних породах на рівні близько 4,5%. Цей метал сріблясто-білого кольору не зазнає поліморфних перетворень та в усьому температурному діапазоні нижче точки плавлення має гексагональну щільнопаковану ґратку з параметрами $a = 0,32029$ нм, $c = 0,52000$ нм та співвідношенням c/a , наближеним до теоретичного значення 1,633. Входячи до II групи періодичної системи з атомною масою 24,32, магній належить до лужноземельних металів.

Температура плавлення магнію становить 651°C , а температура кипіння сягає 1103°C . Його теплопровідність при 20°C дорівнює $156 \text{ Вт}\cdot\text{м}\cdot\text{K}$, а густина, що складає $1,74 \text{ г}/\text{см}^3$, робить його одним з найлегших конструкційних металів. Питома теплоємність магнію близька до алюмінієвої, проте його температура плавлення вдвічі нижча. Магній має теплопровідність, яка на 1,5 рази менша за алюмінієву, але вища за сталеву. Його коефіцієнт лінійного розширення подібний до алюмінію. Виявляючи парамагнітні властивості, магній має електроопір майже вдвічі більший, ніж алюміній.

Чистий магній характеризується низькими механічними показниками (границя текучості 38 МПа , границя міцності 60 МПа , відносне видовження 50% , твердість за Брінеллем $200\text{-}300 \text{ МПа}$), що майже унеможлиблює його застосування як конструкційного матеріалу. Водночас магній мають високу здатність поглинати механічні вібрації та ударні навантаження, а також відзначається високою питомою міцністю на згин і кручення. Крім того, він добре підлягає різанню, шліфуванню та зварюванню різними методами.

Хімічні властивості магнію свідчать про його активність. Сріблясто-білий колір цього металу змінюється при взаємодії з повітрям через швидке окислення з утворенням темного оксиду MgO . При низьких температурах оксидна плівка є аморфною, але вище 200°C набуває кристалічної структури. До температури

450°C ця плівка захищає метал від окислення, проте при більш високих температурах швидкість окислення стрімко зростає. При нагріванні на повітрі до температур вище 623°C магній займається та горить з яскравим білим світлом [4].

Попри низку корисних властивостей, таких як здатність ефективно поглинати механічні вібрації та ударні навантаження, висока питома міцність при згинанні й крутінні, а також придатність до різних видів обробки різанням, шліфування та зварювання, магній характеризується певними недоліками. Порівняно з алюмінієм, особливо при температурах, наближених до кімнатної та нижчих, магній має меншу пластичність та технологічність формування. Цей метал демонструє низький модуль пружності, що вдвічі менший за алюмінієвий та у п'ять разів нижчий від сталевого. Повільні дифузійні процеси ускладнюють його термічну обробку. Крім того, магній мають гіршу корозійну стійкість порівняно з алюмінієм та його сплавами, а також схильність до самозаймання при підвищених температурах внаслідок активної взаємодії з киснем. При атмосферному тиску на повітрі та в кисневому середовищі масивні магнієві вироби самозаймаються при 623°C, тоді як порошки й дрібна стружка цього металу можуть загоратися вже при 360°C. Легування вісмутом та проведення плавки й розливки магнію і його сплавів під покривним шаром флюсу, що містить солі NaCl та KCl, знижує схильність до самозаймання. Швидкість окислення магнію та його сплавів на повітрі за підвищених температур зростає у присутності таких елементів, як Cu, Ni, Sn, Zn, Al (особливо Cu та Ni), тоді як Pb, Ag, Cd та Tl мало впливають на цей процес. Додавання присадок рідкісноземельних металів – церію та лантану – сприяє сповільненню окислення магнію та його сплавів [5].

2.2 Аналіз промислових литих магнієвих сплавів

У машинобудуванні широко застосовуються ливарні сплави на основі магнію, до складу яких входять алюміній, цинк, марганець, цирконій, неодим та інші легувальні елементи. За рівнем міцності та низкою інших основних властивостей (жароміцністю, густиною тощо) магнієві ливарні сплави поділяють на три групи (табл. 2.1). За показником жароміцності їх можна класифікувати на сплави для експлуатації до 150°C, 200°C і 250°C (табл. 1.2) [6].

Розподіл ливарних магнієвих сплавів здійснюється з урахуванням їхніх міцнісних характеристик та комплексу інших властивостей, таких як жароміцність і густина. Три основні групи сплавів систематизовано в табл. 2.2, де наведено дані про їхні межі міцності та інші показники. Окрім цього, класифікація ливарних магнієвих сплавів може проводитися згідно з їхньою здатністю витримувати підвищені температури експлуатації, як показано в табл. 1.3, де сплави розподілено на групи за можливістю застосування до 150°C, 200°C і 250°C [6].

Таблиця 2.1 – Класифікація магнієвих ливарних сплавів за міцністю [6]

Класифікація сплавів	Марки сплавів виробництва різних країн			
	Україна, ДСТУ ISO 16220:2008	США, ASTM B80	Велика Британія, BS 2970	Японія, JIS H5203
Середньої міцності	МЛ3	-	-	-
Високої міцності	МЛ4, МЛ5, МЛ6, МЛ8, МЛ12, МЛ15	AZ63A, AZ81A, ZK51A	MAG1, MAG2, MAG3, MAG4, MAG7	MC1, MC2, MC7
Жароміцні	МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19	EZ33A, K1A, QE21A	MAG5, MAG6, MAG8, MAG9	MC8

Таблиця 2.2 – Робочі температури експлуатації та порівняльні властивості магнієвих сплавів після гартування і старіння [7]

Марка сплаву	Механічні властивості, не менше ніж		Робочі температури експлуатації, °С
	σ_b , МПа	δ , %	
МЛ4, МЛ5	226,0	2,0	150
МЛ11	137,0	2,0	200
МЛ10	226,0	3,0	250
МЛ19	220,0	3,0	250

За своїм хімічним складом ливарні магнієві сплави можуть бути віднесені до трьох основних груп (табл. 2.3) [7]:

1. Сплави системи Mg-Al-Zn: МЛ4, МЛ5, МЛ6.
2. Сплави системи Mg-Zn-Zr: МЛ8, МЛ11, МЛ15.
3. Сплави системи Mg-Zr-Nd: МЛ9, МЛ10, МЛ19.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад промислових магнієвих сплавів [7]

Група 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

Примітка: магній – решта.

У сплавах системи Mg-Al-Zn основним зміцнювальним елементом виступає алюміній. Діапазон концентрацій алюмінію в промислових магнієвих сплавах становить 1...10%, і всі вони є неевтектичними згідно з рівноважною діаграмою [8]. Їх можна розділити на три категорії:

1 – Сплави, що містять 1...3% Al, характеризуються високими показниками міцності та пластичності, проте мають низьку рідкотекучість і високу гарячекрихкість.

2 – Сплави з вмістом 4...7% Al мають добрі механічні властивості та задовільну технологічність.

3 – Сплави, що містять 8...10% Al, належать до найбільш технологічних, але відзначаються невисокою пластичністю.

Алюміній утворює з магнієм твердий розчин з обмеженою розчинністю та інтерметалідні сполуки Al_3Mg_4 , Al_2Mg_3 і $Al_{12}Mg_{17}$ (рис. 2.4). Дані щодо розчинності Al у Mg помітно відрізняються, а прийняті в роботі значення становлять 11,6 ат.% за $438^\circ C$ і 1,3 ат.% за $100^\circ C$ [9].

Промислові магнієві сплави з алюмінієм належать до сплавів, що зміцнюються старінням, що дає змогу покращити їхні властивості термічною обробкою. При нагріванні до $420^\circ C$ майже весь алюміній переходить у твердий розчин. Під час повторного нагрівання сплаву протягом декількох годин за температури $150...250^\circ C$ відбувається виділення γ -фази, що забезпечує зміцнення сплаву. Виходячи з діаграми стану (рис. 2.4), можна очікувати, що ефект старіння спостерігатиметься у всіх сплавах, які містять понад 2% Al. На практиці помітне збільшення міцності внаслідок старіння досягається в сплавах з вмістом понад 4...6% Al, оскільки швидкість утворення нової фази залежить від температури старіння та ступеня пересиченості твердого розчину за цієї температури. Наразі підтверджено існування тісного зв'язку між процесом виділення γ -фази під час старіння і зміцненням сплаву. При цьому γ -фаза спочатку виділяється по границях зерен, а потім усередині самих зерен, збіднюючи твердий розчин алюмінієм. Максимальна твердість магнієвих сплавів з алюмінієм досягається ще до повного виділення цієї фази з твердого розчину. Саме γ -фаза, що розташована по границях зерен, безпосередньо відповідає за зміцнення цих сплавів [9].

Вплив алюмінію на механічні характеристики магнію був досліджений Рейнором Г.В. [10]. Він відзначав, що зі збільшенням вмісту алюмінію границі

міцності та текучості сплаву зростають, проте відносне видовження досягає максимального значення при вмісті 3% Al. При цьому, старіння помітно впливає на механічні властивості за концентрації алюмінію в сплаві від 4% і вище.

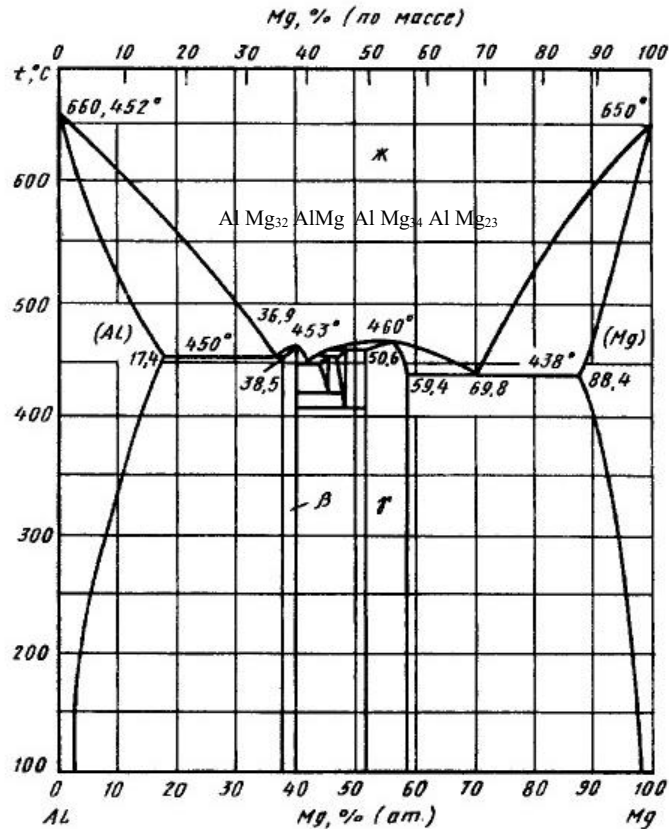


Рисунок 2.4 – Діаграма стану Mg-Al [9]

Легувальний вплив цинку впливає на механічні властивості сплаву в меншій мірі. Цинк утворює з магнієм твердий розчин (рис. 2.5), а також інтерметалідні сполуки $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$, MgZn , Mg_2Zn_3 , MgZn_2 , $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ з незначними областями гомогенності [9].

Кристалічна структура фази MgZn_2 була вивчена Лавесом і належить до так званих "фаз Лавеса", у яких оптимальне заповнення простору досягається за співвідношенням $d_a:d_b=1,225$. Аналіз відомих фаз Лавеса показав, що атоми, які значно різняться за розмірами, кристалізуються в щільнопакованій структурі [11].

При введенні в магній 7,5% Zn границя міцності сплаву помітно підвищується. Пластичність сплаву збільшується за вмісту близько 3% Zn. Зазначається, що сплави, які містять 2% Zn і більше, здатні зміцнюватися в процесі старіння [10], проте зміцнювальний ефект цинку зберігається лише до температур 150...200°C [12].

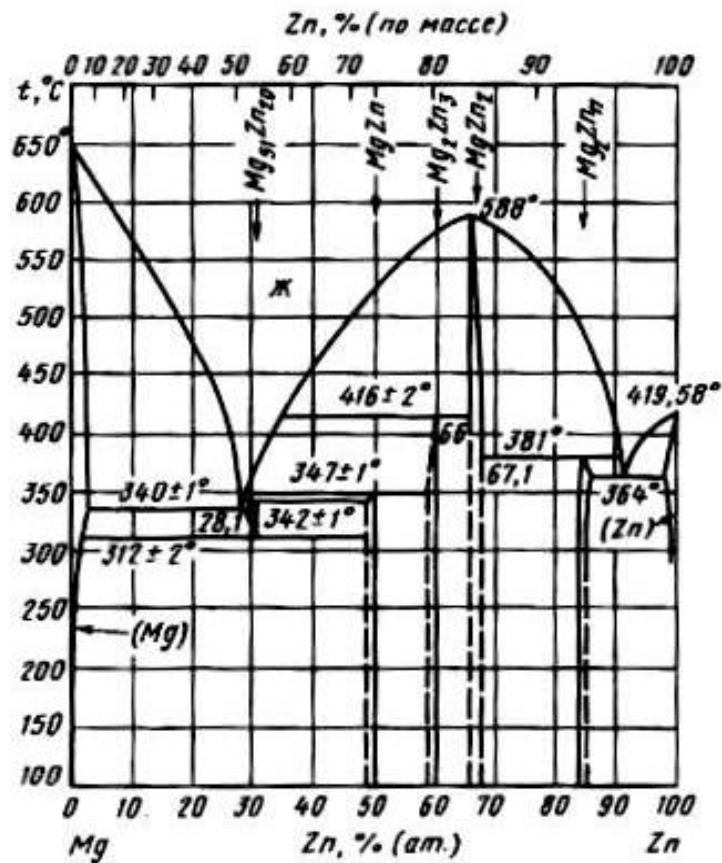


Рисунок 2.5 – Діаграма стану Mg-Zn [9]

У магнієвих сплавах за вмісту цинку в межах 0,1...2% спостерігається підвищення гарячекрихкості, тоді як збільшення його концентрації до 4% забезпечує добру рідкотекучість і низьку гарячу крихкість. Також зазначається, що при додаванні цинку до магнієвого сплаву по границях зерен утворюється фаза з низькою температурою плавлення, що підвищує схильність до утворення гарячих тріщин.

Структура литих сплавів системи Mg-Al-Zn складається з твердого розчину алюмінію та цинку в магнії з включеннями інтерметалідної фази

$Mg_{17}Al_{12}$. Зі збільшенням вмісту алюмінію в сплаві кількість інтерметалідних часток зростає. При підвищенні концентрації цинку в сплаві може утворюватися потрійна фаза $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$. Сплави системи Mg-Al-Zn мають добрі ливарні властивості, достатні показники міцності та пластичності, проте їхня жароміцність є низькою [13].

2.3 Особливості сплавів системи Mg-РЗМ-Zr

Сплави системи Mg-РЗМ-Zr (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19) характеризуються високою жароміцністю та можуть ефективно експлуатуватися за високих температур. Головними легувальними елементами в цих сплавах є неодим у МЛ9 (рис. 2.6), МЛ10, МЛ19 та церій у МЛ11. У структурі сплаву МЛ9 помітні виділення евтектики ($\alpha+Mg_9Nd$) по границях зерен α -твердого розчину. Крім того, в структурі присутні включення частинок α -Zr та Mg_9Nd , які утворюються внаслідок розпаду α -твердого розчину. Жароміцність сплавів пояснюється низькою схильністю зміцнювальних фаз до коагуляції в інтервалі робочих температур. Сплави можуть зміцнюватися термічною обробкою.

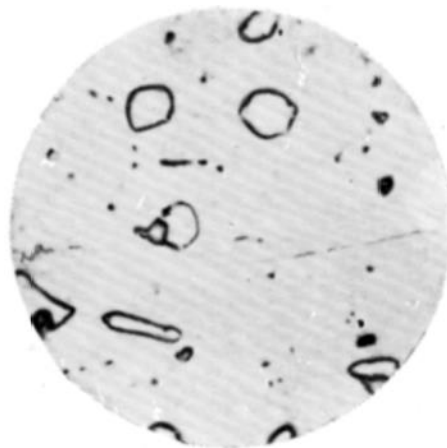


Рисунок 2.6 – Мікроструктура сплаву МЛ9 (литий стан), $\times 250$

Легування магнію РЗМ і цирконієм дало змогу підвищити робочі температури на 150-200 °С порівняно з високоміцними ливарними магнієвими сплавами. Жароміцні ливарні магнієві сплави придатні для тривалої експлуатації за температур 250-350 °С і короткочасної – до 400 °С. Вплив цих легувальних елементів на фазовий склад сплавів, що містять РЗМ [14], забезпечує:

1. створення складнолегованого термічно стабільного твердого розчину; оскільки саме введення тривалентних РЗМ і ітрію призводить до підвищення сил міжатомного зв'язку в Mg;
2. створення гетерогенної дисперсної структури в процесі старіння завдяки виділенню фази Mg₉Nd;
3. підвищення термічної стабільності та температури коагуляції зміцнювальних фаз;
4. зміцнення границь зерен, що досягається утворенням тонкого каркаса часток фаз, які блокують границі зерен.

Усі жароміцні магнієві сплави розроблені на основі систем з обмеженою і змінною розчинністю елементів у твердому стані залежно від температури. Тому литі деталі з розглянутих сплавів обробляють у термічно твердому стані, оскільки вони значно зміцнюються за допомогою гартування і старіння. У сплав МЛ10 разом із Zr і Nb введено добавку Zn (до 0,7 %) для підвищення ефективності термічної обробки. У результаті істотно збільшуються границя плинності та опір повзучості сплаву. Сплав МЛ10 застосовують у стані Т6 (гартування з 540 °С на повітрі і старіння при 200 °С, 12-18 год). Сплав має хороші ливарні властивості, високу механічну стабільність, а також хорошу корозійну стійкість. З нього отримують виливки навантажених деталей двигунів літаків, різних корпусних деталей. Робочі температури до 250 °С, за короткочасної експлуатації - до 350 °С. Сплав МЛ9 додатково легований 0,5 % In, який самостійної фази не утворює і перебуває у твердому розчині на основі магнію, що сприяє його додатковій стабілізації під час тривалих витримок до 300 °С. Сплав МЛ9, так само як і сплав МЛ10, має хороші ливарні та механічні властивості. Він має найбільшу жароміцність серед сплавів цієї групи і

придатний для тривалої експлуатації за температур до 300 °С. На рис. 2.7, 2.8 наведено приклади використання жароміцних ливарних магнієвих сплавів.

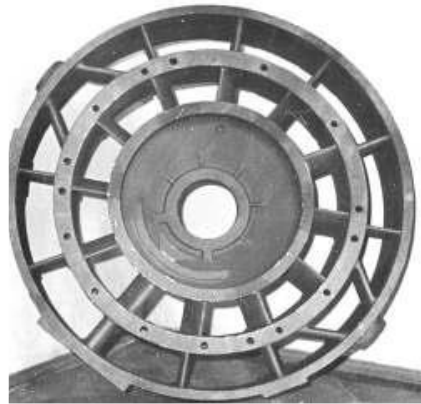
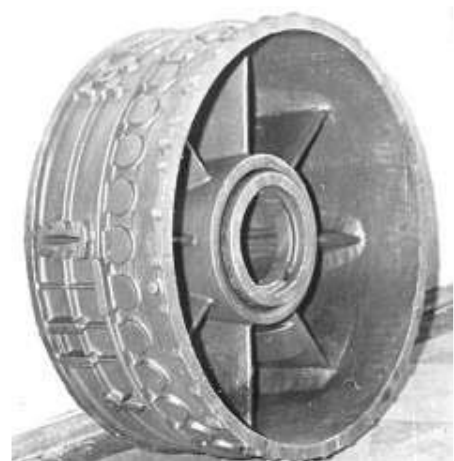


Рисунок 2.7 – Корпус передньої опори зі сплаву МЛ9



а)



б)

а – МЛ10, б – МЛ19

Рисунок 2.8 – Кришки з магнієвих сплавів

Тому для виготовлення деталей авіаційних двигунів, які працюють при температурі 250-300°С необхідно обрати магнієвий сплав, який матиме високі показники жароміцності для забезпечення експлуатаційних властивостей високого рівня.

2.4 Характеристика сплаву МЛ19

Для виготовлення деталей, що тривалий час працюють при температурах 250-300°C було обрано сплав МЛ19. Хімічний склад та механічні, фізичні властивості сплаву наведено у табл. 2.4 та 2.5 відповідно [5].

Таблиця 2.4 – Хімічний склад сплаву МЛ19, мас. % [5]

Fe	Si	Ni	Al	Cu	Zr	Be	Mg	Zn	Nd	Y	Домішки
до 0,01	до 0,03	до 0,005	до 0,03	до 0,03	0,4 – 1,0	до 0,001	94,41 – 96,5	0,1 – 0,6	1,6 – 2,3	1,4 – 2,2	інші 0,14; всього 0,25

Таблиця 2.5 – Механічні та фізичні властивості сплаву МЛ19 в литому стані [5]

σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	λ , Вт/(м·°C)	ρ , кг/м ³
220	120	3	87,9	1790

Цей сплав застосовується для виготовлення фасонних виливків деталей двигунів і приладів, які тривалий час працюють при температурах до +300 °C і короткочасно – до 400 °C.

Найбільш жароміцний промисловий магнієвий сплав системи Mg-PЗМ-Zr. Для легування сплаву з рідкоземельних металів використовують неодим. Сплав містить також добавки ітрію, цинку і цирконію.

Сплав поєднує досить хороші механічні властивості при кімнатній температурі з високою жароміцністю, хорошими ливарними і технологічними властивостями, що дають змогу одержувати щільні виливки з однорідними механічними властивостями в перерізах різної товщини.

3 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Якісні та кількісні методи оцінки структурних складових лиття.

Методи дослідження макро- та мікроструктури досліджуваного сплаву включали світлову мікроскопію ("Neophot 32", "OLYMPUS IX 70"). Шліфи для аналізу мікроструктури вивчались до і після термічної обробки, при цьому було проведено травлення реактивом, який складався з 1% азотної кислоти, 20% оцтової кислоти, 19% дистильованої води та 60% етиленгліколю.

Для фрактографічного аналізу зламів зразків було використано електронний скануючий мікроскоп "JSM-6360LA".

Фазовий аналіз структурних складових магнієвих сплавів здійснювався на електронному мікроскопі-мікроаналізаторі з енергодисперсійною приставкою РЕММА 202М і РЕМ 16І. У кожному аналізованому мікрооб'ємі записувалися енергодисперсійні спектри, які піддавалися кількісній обробці за спеціальною програмою на ПЕОМ. Обробка даних спектрів дозволила визначити інтенсивності аналітичних ліній присутніх у спектрі хімічних елементів.

Фізико-механічні властивості та технологічні випробування.

Визначення механічних властивостей зразків із магнієвих сплавів здійснювалось на розривній машині "INSTRUN" 2801 відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 [14]. Зразки випробовувались до і після термічної обробки. Мікротвердість структурних складових сплавів вивчалась з використанням мікротвердомірів фірми "Buehler" та LM-700AT за навантаження 0,1 Н.

Оцінка тривалої міцності за підвищених температур проводилась згідно з ДСТУ ISO 6892-2:2020 [14] на зразках для високотемпературних випробувань. Зразки встановлювались у нагрівальній пристрій машини "INSTRUN" з подовженими штангами для кріплення зразків. Після досягнення температури 250 °С прикладалось навантаження ($\sigma = 80$ МПа), при цьому фіксувався час до повного руйнування зразка.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СПЛАВУ МЛ19

Сплав МЛ19 належить до системи Mg–Zr–Nd, що є одним із найбільш розповсюдженим у промисловості. Неодим є одним із найефективніших зміцнювачів магнію серед РЗМ церієвої групи [16, 17]. Ці матеріали добре зміцнюються під час термічної обробки [18]. Зміцнення відбувається завдяки високій розчинності ітрію і неодиму в твердому розчині на основі магнію за температури, близької до солідуса, яка сильно зменшується при зниженні температури сплаву [16, 19, 20]. Тому основний напрямок використання таких матеріалів – це виготовлення виливків, що працюють за підвищених температур. Завдяки присутності цирконію в сплавах системи Mg-Zr-РЗМ виливки з них мають однорідну, дрібнозернисту структуру [21, 22]. Найрозповсюженіший режим термічної обробки такого сплаву – Т6. Режим зміцнення Т6 полягає у високотемпературному відпалі протягом 8 год за 525 °С з охолодженням у воді та подальше старіння протягом 16 год за 250 °С [23]. Механізм зміцнення сплавів магнію з ітрієм і неодимом пов'язаний з утворенням із твердого розчину на основі магнію (Mg) метастабільних фаз, що мають форму пластинок і сфероїдів [24, 25]. Деякі автори стверджують, що для досягнення максимального зміцнення при кімнатній температурі необхідно знизити температуру старіння з 250 до 210 °С, що призведе до утворення більшої кількості дисперсних виділень зміцнювальних метастабільних фаз [26, 27].

Наявність цинку позитивно позначається на міцності сплаву МЛ19. Встановлено, що наявність Zn у сплавах з РЗМ, коли масове співвідношення Zn/РЗМ становить близько 1,7, дає змогу забезпечити під час старіння випадання високодисперсних частинок $MgZn_2$ і $Mg_{12}Nd$, що підвищує міцність сплаву [28]. Однак і невелика кількість Zn у сплавах Mg-Zr-РЗМ підвищує опір повзучості [29]. Крім того, присутність цинку також трохи збільшує міцність [29] і твердість матеріалу після старіння [17], тому його використання у складі сплаву дає змогу знизити вміст коштовного ітрію.

4.1 Мікроструктура сплаву МЛ19

Мікроструктура сплаву МЛ19 у литому стані наведено на рис. 4.1 Видно, що вона складається з дендритів твердого розчину на основі магнію (Mg), а також фаз білого кольору, які розташовуються по межах і в центрі дендритних комірок.

У центрі та по межах дендритних комірок зустрічаються частинки цирконію (Zr), найчастіше зв'язані з ітрієм. Крім того, фази з цирконієм зазвичай забруднені залізом, кремнієм, марганцем і рідше – іншими домішками.

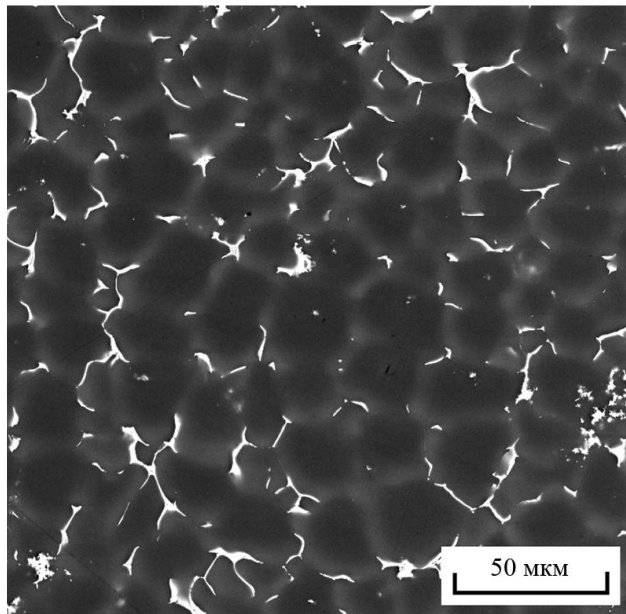
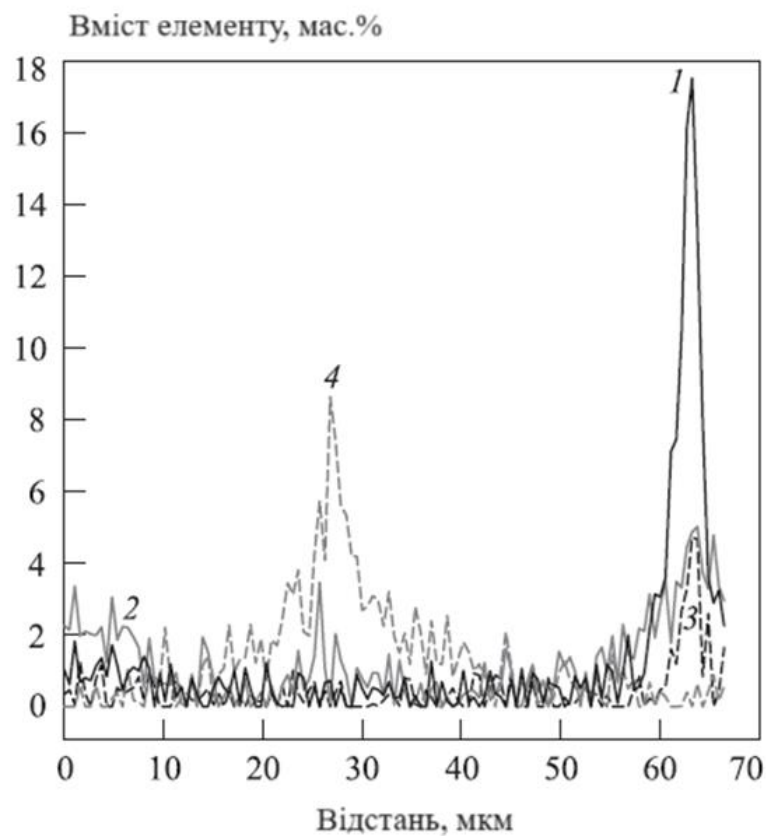
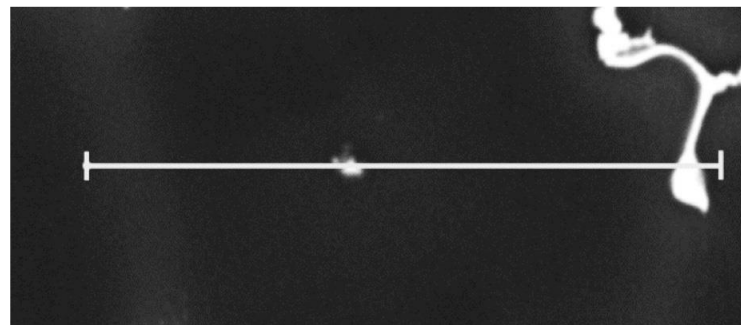


Рисунок 4.1 – Мікроструктура сплаву МЛ19 у литому стані

За результатами мікрорентгеноспектрального аналізу світла фаза, розташована по границях дендритних осередків у сплаві МЛ19, має середній склад, ат. %: Mg-4,9%Nd-0,9%Zn-1,0%Y. Тобто світла фаза по межах дендритних комірок уявляє евтектичну суміш із декількох інтерметалічних сполук, що містить Mg, Nd, Y і Zn. У літературі [26, 27] фази в сплавах типу WE43, аналогом якого є сплав МЛ19, ідентифікують як $Mg_{24}Y_5$ і $Mg_{14}Nd_2Y$, і їх присутність також можлива у сплаві МЛ19.

Розподіл легувальних компонентів за перетином дендритної комірки (Mg) представлено на рис. 4.2. Видно, що в центрі дендритної комірки є включення, що містить Zr і Y, на його границі (світла область зліва) спостерігаються підвищені концентрації Y і Nd, а праворуч, у фазі евтектичного походження, крім Nd і Y присутній Zn.



1 – Nd, 2 – Y, 3 – Zn, 4 – Zr

Рисунок 4.2 – Розподіл легувальних компонентів за перерізом дендритної комірки твердого розчину на основі магнію (Mg)

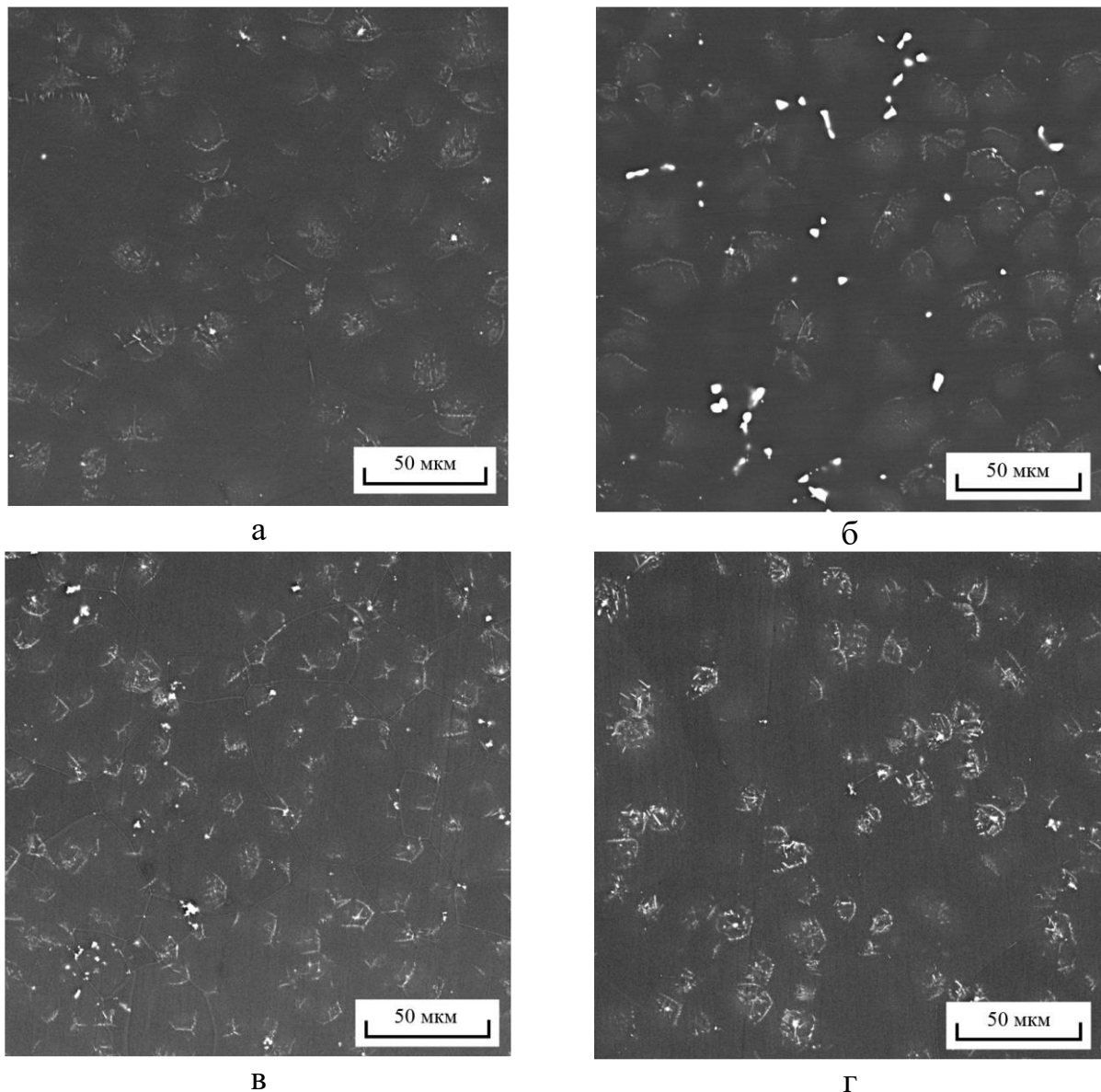
4.2 Вибір режиму термічної обробки сплаву МЛ19

Як режим термообробки (ТО) для сплавів системи Mg-Zn-Zr-РЗМ традиційно використовують штучне старіння після попереднього гартування при підвищеній температурі (табл. 4.1). Попереднє гартування з подальшим старінням або без такого зазвичай проводять для максимального розчинення легувальних компонентів у твердому розчині магнію (Mg), щоб досягти його максимального зміцнення за рахунок більшої кількості частинок зміцнювальної фази, що виділилися при штучному старінні. Термічна обробка за режимом Т6 (табл. 4.1) збільшує механічні властивості литого сплаву в основному за рахунок розпаду пересиченого твердого розчину цинку, РЗМ і цирконію в магнії, що формується в результаті високотемпературної витримки виливки з подальшим швидким охолодженням. Виходячи з розглянутих особливостей рівноважної та нерівноважної кристалізації сплаву МЛ19, було досліджено кілька режимів ТО з метою оцінки їхнього впливу на структуру і властивості сплаву (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Експериментальні режими термічної обробки сплаву МЛ19

ТО	Рекомендовано для сплаву	Режим нагрівання для гартування	Гартівне середовище	Режим старіння	Середовище охолодження
ТО1	МЛ19	430 °С, 2 год. + 535 °С, 4 год.	Вода	205 °С, 12 ч	Повітря
ТО2	МЛ19	400 °С, 2 год. + 500 °С, 8 год.	Вода	200 °С, 16 ч	Повітря
ТО3	WE43	525 °С, 8 год.	Вода	250 °С, 16 ч	Повітря
ТО4	МЛ19	535 °С, 8 год.	Вода	205 °С, 16 ч	Повітря

Запропоновано альтернативний режим термічної обробки сплаву, спрямований на поступове розчинення нерівноважних фаз, що полягає у двоступеневому нагріванні сплаву під гартування і старіння (див. табл. 4.1, режим ТО2). Режими ТО1 [16], ТО3 [22] і ТО4 [5] рекомендуються в літературі для термічної обробки сплавів МЛ19. Оскільки їхні фазові склади і температури солідуса схожі, використання режимів ТО, рекомендованих для WE43, можливе і для МЛ19 [22].



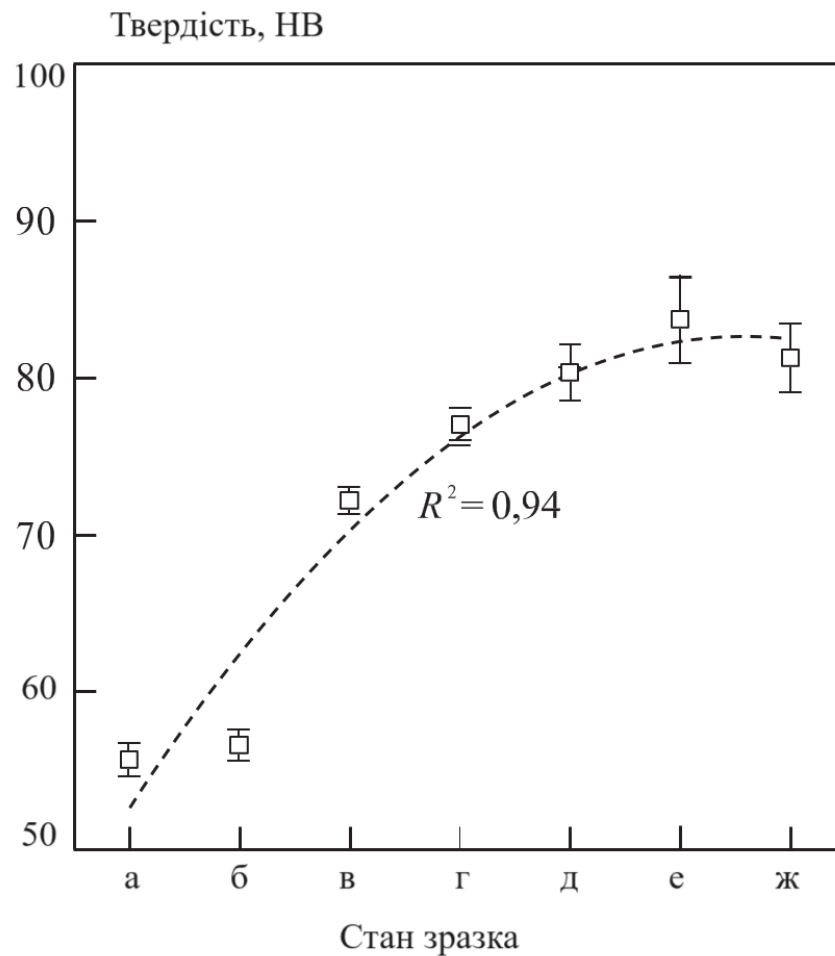
а – ТО1, б – ТО2, в – ТО3, г – ТО4

Рисунок 4.3 – Мікроструктура сплаву МЛ19 у термообробленому стані (табл. 4.1)

Мікроструктури сплавів після обробки за режимами ТО1-ТО4 (табл. 4.1) представлені на рис. 4.3. Видно, що всі зразки після ТО мають схожу структуру. Вона складається із зерен твердого розчину на основі магнію (Mg), усередині яких присутні частинки багатой цирконієм фази (Zr), а навколо неї, як ініціувального центру, сформувалися області фаз голчастої форми, що виділилися з твердого розчину. Виняток становить зразок, оброблений за режимом ТО2 (див. рис. 4.3, б), в якому спостерігаються не до кінця розчинені області інтерметалідів на границях зерен, що є наслідком більш низького ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$ порівняно з $525\text{-}535\text{ }^{\circ}\text{C}$) температури термічної обробки сплаву для гартування. Крім того, помітно, що в сплавах, зістарених за $t = 200\div 205\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.3, а, б, г), границі зерен виражені не так чітко, як у зразку, зістареному за $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.3, в).

4.3 Вплив режиму термічної обробки на механічні властивості сплаву МЛ19

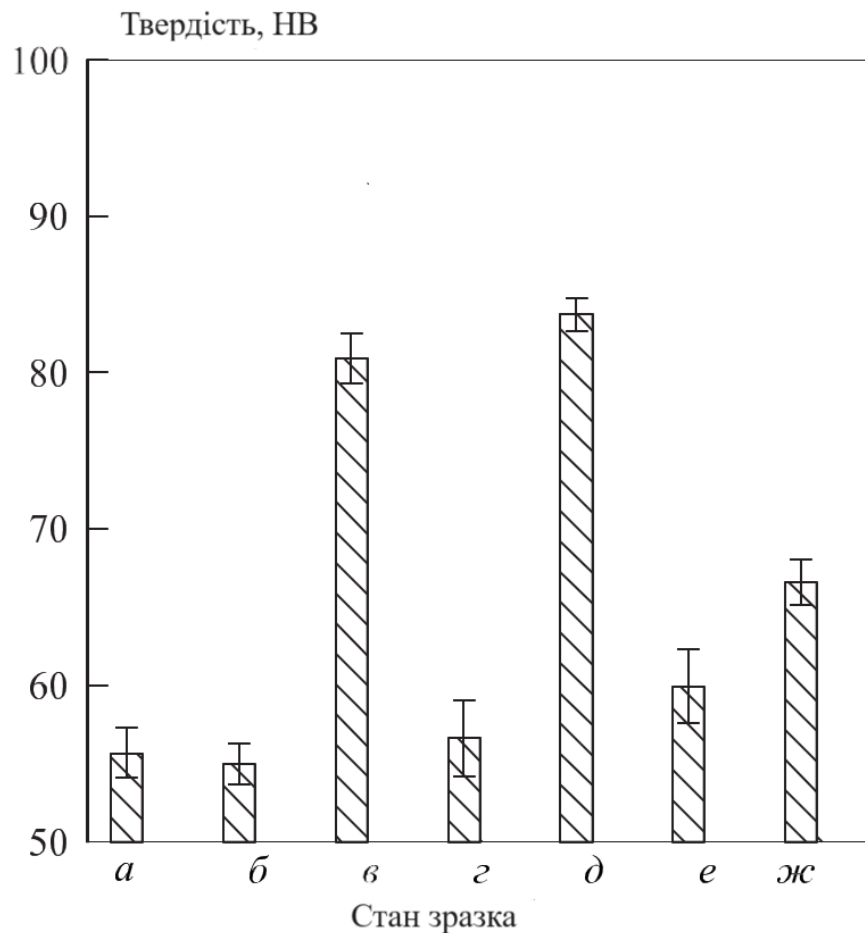
Оптимальний час старіння визначали на зразках зі сплаву МЛ19, підданих ізотермічній витримці з подальшим гартуванням у воді. Витримку проводили за температури $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 2 год (для розчинення нерівноважних фаз) і за $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 8 год. Після гартування зразки піддавали старінню за $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ із виміром їхньої твердості через рівні проміжки часу. Результати визначення НВ представлені на рис. 4.4. Видно, що максимальної твердості сплави досягають за тривалості старіння 16-20 год, яку і використовували при термообробці сплаву за режимом ТО2 (див. табл. 4.1). Твердість зразків, термооброблених за режимами ТО1, ТО2 і ТО3, представлена на рис. 4.5. Випробування для сплаву після ТО4 не проводили, оскільки цей режим схожий з ТО1 і, найімовірніше, зразки матимуть схожі значення НВ після термічної обробки.



а – литий стан; б – витримка 400 °С, 2 год + 500 °С, 8 год; з подальшим гартуванням у воді; в, г, д, е, ж – старіння протягом 4, 8, 12, 16 і 20 год відповідно

Рисунок 4.4 – Зміна твердості сплаву МЛ19 у процесі термообробки

Видно, що максимальну твердість сплаву МЛ19 можна спостерігати при використанні режиму ТО2, а мінімальну - після ТО3. Низька величина НВ зразків, оброблених за режимом ТО3, вказує на занадто високу температуру старіння. Ці дані збігаються з результатами, отриманими іншими авторами [26, 27], і пояснюються перетворенням метастабільних фаз, що виділяються під час старіння сплаву, на стабільні.



а – литий стан; б, г, е – гартування за режимами ТО1, ТО2 та ТО3; в, д, ж – старіння за режимами ТО1, ТО2 та ТО3 (див. табл. 4.1)

Рисунок 4.5 – Зміна твердості сплаву МЛ19 в процесі термічної обробки

Випробування на розрив зразків сплаву МЛ19 після ТО за різними режимами (рис. 4.6) показали, що найбільша міцність була досягнута при використанні ТО2 (див. табл. 4.1). Застосування для сплаву МЛ19 режиму ТО3, рекомендованого для WE43, призводить до зниження міцності матеріалу і збільшення його відносного видовження за кімнатної температури. Обробка за режимами ТО1 і ТО4 показала приблизно однаковий результат за дещо більшого відносного видовження, досягнутого за використання режиму ТО1.

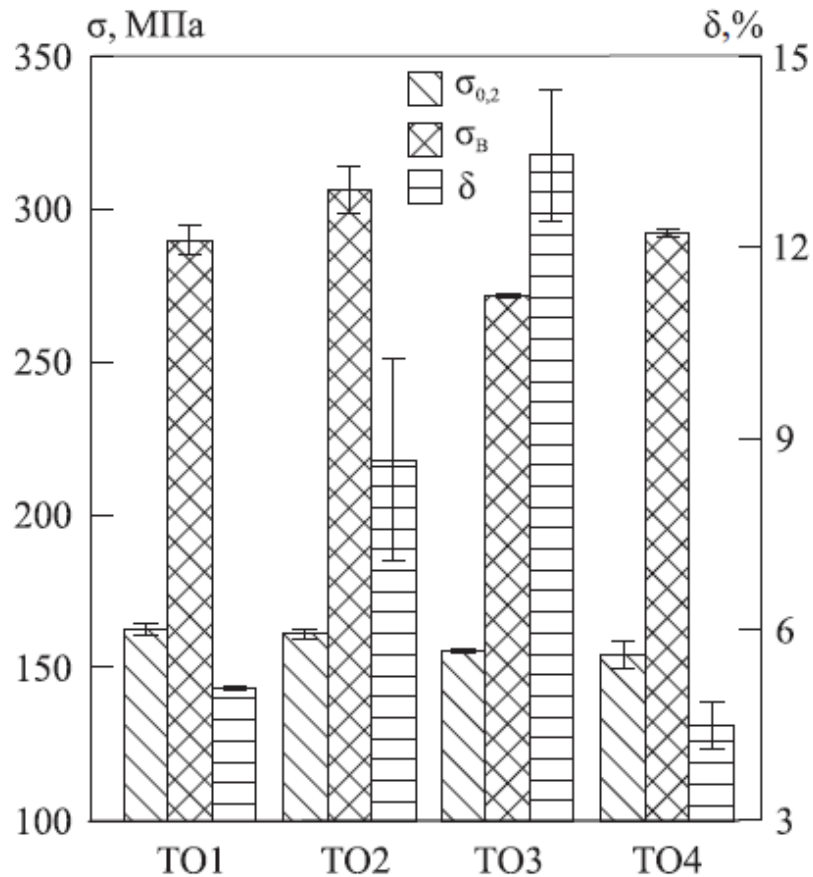


Рисунок 4.6 – Результати механічних випробувань на розрив сплаву MJ19, термообробленого за різними режимами (див. табл. 4.1)

Таким чином, збільшення температури старіння сплаву до 250 °C зменшує його міцність за кімнатної температури, але збільшує відносне видовження, що підтверджує висновки, зроблені для сплаву WE43 у роботах [26, 27]. Навіть у випадку, коли за рахунок зменшення температури відпалу сплаву до 500 °C не відбувається повного розчинення інтерметалідної фази, можливо досягти високих показників міцності та пластичності.

5 ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ

Підвищена окислюваність магнієвих сплавів за високих температур, відносно мала швидкість проходження дифузійних процесів у твердому стані, особливі вимоги безпеки під час механічного оброблення спричиняють технологічні складнощі отримання заданої якості виробів із магнієвих сплавів [2 – 4]. Це зумовлює необхідність розроблення системи забезпечення якості виробу, що запобігає утворенню дефектів, на всіх стадіях виробництва. У виробах із магнієвих сплавів найчастіше зустрічаються такі дефекти [6, 7, 10]:

- мікрорихлоти ("чорноти в злам", нещільна структура) - один із найпоширеніших дефектів у магнієвих сплавах. Причина утворення цього дефекту усадка матеріалу під час кристалізації виливки. Наявність мікрорихлоти призводить до зниження механічних властивостей деталі. Виявляється під час рентгенографічного контролю;

- газові раковини – дефект, який зумовлений впровадженням газів, що утворюються під час заливання рідким металом ливарної форми, у рідкий метал;

- спаї – дефект у вигляді поглиблення на поверхні, яке утворилося потоками, які не повністю злилися та які перервалися під час заливки, перерваного під час лиття або передчасно застигло у формі металу. Зовні це виражається в найрізноманітніших за розмірами і формою заглиблень, рубців або швів на поверхні виливки (спаїв);

- незлитини – дефект у вигляді отвору довільної форми в тонкій стінці виливки, що утворився внаслідок не злиття металу під час його заливання. Основні причини: низька температура металу, що заливається; низька швидкість заповнення форми металом; порушення технологічного процесу заливки;

- гарячі тріщини – дефект у вигляді розриву тіла виливки, що виникає за температур затвердіння виливки внаслідок усадки. Гарячі тріщини

розташовуються по межах кристалів, мають нерівну, розгалужену й окислену поверхню;

– холодні тріщини – виникають у тілі виливки, коли метал перебуває в області пружних деформацій. Причини утворення холодних тріщин: нерівномірне охолодження тонких і товстих частин виливки; низька піддатливість формувальних стрижневих сумішей; фазові перетворення, що протікають у твердому металі.

Крім ливарних дефектів у магнієвих сплавах спостерігаються дефекти, спричинені термічною обробкою. До найпоширеніших дефектів, пов'язаних із термічною обробкою ливарних магнієвих сплавів, відносяться неповне гартування, ріст зерна, окиснення поверхні, перепад і викривлення виливків. Поява їх у більшості випадків пояснюється порушенням режиму гартування [5].

Окрихчування та окиснення поверхні після гартування. Внаслідок високої хімічної активності магнію за підвищених температур на контакті з атмосферним повітрям відбувається інтенсивне окиснення поверхневих шарів виливка. Це призводить до утворення крихкої окалини та погіршення механічних властивостей матеріалу.

– Деформація, тріщини та розтріскування внаслідок внутрішніх напружень під час різких перепадів температур при гартуванні. Нерівномірний нагрів та охолодження створюють значні температурні градієнти в об'ємі виливка, що може зумовити утворення тріщин.

– Надлишкова окиснююча або відновлююча атмосфера термічних печей спричиняє окиснення чи відновлення компонентів сплаву, порушуючи заданий хімічний склад.

– Неконтрольоване зростання зерна під час перегріву перед гартуванням, що призводить до зниження міцності та погіршення оброблюваності матеріалу.

– Неповне розчинення інтерметалідних фаз у твердому розчині при гартуванні через невідповідні температурні режими.

– Нерівномірний розподіл структурних складових після старіння у результаті неоднорідного нагріву виливків.

Усунення цих дефектів можливе через ретельне регулювання параметрів термічної обробки, застосування захисних атмосфер, контроль стану обладнання та правильний вибір технологічних прийомів з урахуванням особливостей магнієвих сплавів [5 – 7].

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якого виробничого процесу, вкрай важливою для забезпечення безпечних умов праці та запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням працівників. Комплекс заходів з охорони праці набуває особливого значення при проведенні термічних операцій над металевими сплавами, зокрема магнієвими, оскільки задіяні високі температури та застосовуються агресивні хімічні речовини. Виготовлення магнієвого сплаву МЛ19 супроводжується низкою потенційних ризиків, пов'язаних з обробкою розплавів, проведенням гартування та штучного старіння, а також підготовкою шліфів для структурних досліджень.

Робота з розплавленим магнієм потребує відповідних заходів протипожежної безпеки через його високу реакційну здатність та можливість займання на повітрі. Необхідно забезпечити надійну протипожежну вентиляцію, наявність засобів пожежогасіння та індивідуальних захисних засобів для персоналу. Гартування та штучне старіння відбуваються у спеціальних термічних печах, що вимагає дотримання правил експлуатації обладнання, яке працює за високих температур. Приготування шліфів для металографічного аналізу передбачає роботу з хімічними травниками, такими як суміші кислот, тому слід вжити заходів індивідуального захисту та промислової безпеки при поводженні з токсичними речовинами.

Крім того, під час механічних випробувань зразків сплаву МЛ19 існує ризик їх руйнування з утворенням гострих крихких уламків, що потребує застосування захисних огорожень та інструментарію для безпечного транспортування і утилізації зруйнованих зразків.

6.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме [30]:

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, нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

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

в) небезпеки 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;

г) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до термічної обробки що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

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

е) небезпеки які пов'язані з дослідженням фазового складу структури металу з використанням рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрах типу ДРОН зокрема: негативний вплив іонізуючого випромінювання при порушенні методики досліджень або відсутності екрануючих пристроїв, нехтування захистом відстанню та часом, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань, негативний вплив теплового випромінювання при дериватографії з використанням дилатометрів.

є) незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

ж) невідповідність вимогам освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

з) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

и) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [31].

6.2 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) до основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустановки, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

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.

в) 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.

г) 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.

д) 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 диф.насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачанняпостаратися обмотати мокрими ганчірками піч диф. 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.

е) Для безпеки роботи на дифрактометрі ДРОН-1 необхідно закрити місця можливого розсіяння рентгенівських променів захисними свинцевими екранами. При встановленні камер з люмінісцентними екранами для візуального спостереження за юстировкою зразка необхідно користуватися захисним просвинцованим склом. Для забезпечення захисту рук оператора від опромінення при юстировці гоніометра необхідно користуватися подовженими торцевими ключами. При використанні іонізаційного методу реєстрації гоніометр під час роботи має бути закритий ширмою або іншим захисним пристроєм, що забезпечує зменшення інтенсивності розсіяного випромінювання до припустимих величин. При випадковому попаданні в сферу дії іонізуючого випромінювання необхідно негайно відключити аварійну установку від електромережі та повідомити про це відповідального за радіаційну безпеку в університеті та керівника [32-34].

6.3 Заходи з виробничої санітарії

е) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають 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 % 45 при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

ж) Виробниче освітлення організується і нормується 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 [35-37].

6.4 Заходи з пожежної безпеки

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 категорії виробництва з пожежної безпеки, визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель, блок управління і індикації та програмне забезпечення.

Панель 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 дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та/або 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 – може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки 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 [38, 39].

6.5 Заходи безпеки в умовах НС

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 здійснюватись 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 т. д.

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 тепlopостачання, 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 ступенем 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 вододжерелах, 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 підготовляти 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 гідроспоруд.

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) [40, 41].

ВИСНОВКИ

Було визначено, що для виготовлення деталей авіаційних двигунів, що працюють при 250 – 300 °С можливе використання магнієвих сплавів, оскільки вони значно зменшують вагу всього вузла. Для цього доцільно використовувати жароміцні магнієві сплави системи Mg–Zr–Nd. До неї належить сплав МЛ19. Зазначено, що стандартним режимом термічної обробки згідно зі стандартом є технологія Т6, що включає у себе гартування з температур 525 °С, 8 год. та старіння 250°С, 16 год. Задля дослідження можливості підвищення експлуатаційних характеристик деталей зі сплаву МЛ19 було виконано порівняння декількох режимів термічної обробки.

Встановлено, що найкращі механічні властивості сплаву МЛ19 при кімнатній температурі були досягнуті при використанні термічної обробки, що полягала у двоступеневому нагріванні (400 °С, 2 год + 500 °С, 8 год) і гартуванні у воді з подальшим старінням за температури 200 °С протягом 16 год.

При цьому досягалися: міцність 306 ± 8 МПа, відносне видовження $8,7 \pm 1,6$ % і границя плинності 161 ± 1 МПа. Однак застосування цього режиму може призвести до утворення в структурі сплаву після ТО залишкових інтерметалідних фаз.

Використання для сплаву МЛ19 підвищеної температури старіння (250 °С) призводить до зниження міцності сплаву до 272 ± 1 МПа при збільшенні відносного видовження до 13 ± 1 %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Авіаційно-космічні матеріали та технології / [В.А. Богуслаєв. [В.А. Богуслаєв, А.Я. Качан, Н.С. Калініна та ін.]. – Запоріжжя : Вид-во ВАТ "Мотор Січ", 2009. – 351 с.
2. Annamalai S., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications // *Materials and Technologies*. – 2019. Vol. 53. No. 6. – P. 881–890. URL: https://www.researchgate.net/publication/338035359_Magnesium_alloys_a_review_of_applications
3. Маткова, А. В., & Матвійчук, С. М. (2010). Металеві сплави для виготовлення авіаційної техніки. *Наукові нотатки*, (29), 121-122.
4. Кольорові метали і сплави: Навчальний посібник /В.Л. Грешта, О.В. Климов, О.В. Лисиця, Л.П. Степанова. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – 336 с.
5. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys in *Materials Handbook* : 10th edn. // Vol. 1. ASM International: Materials Park, OH. – 1990. – 1063 p. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>
6. Колачев Б.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов , В.И. Елагин. - М.: *Металлургия*, 1981. - 414 с.
7. *Магниеые сплавы: справочник: в 2 ч. Ч. 1: *Металловедение магния и его сплавов. Области применения** / [Альтман М.Б., Антипова А.П., Блохина В.А. и др.]; отв. ред. М.Б. Альтман. - М.: *Металлургия*, 1978. - 231 с.
8. Никулин Л.В. *Расширение номенклатуры магниевых сплавов для литья под давлением* / Л.В. Никулин, Т.Н. Липчин // *Развитие и совершенствование литья под давлением*. – М. : МДНТП им. Дзержинского, 1975. - С. 114-118.
9. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. Т. 3, кн. 1/ под ред. Н.П. Лякишева*. - М. : *Машиностроение*, 1996. - 1024 с.

10. Рейнор Г.В. *Металловедение магния и его сплавов* / Рейнор Г.В. – М. : *Металлургия*, 1964. - 486 с.
11. Елагин В.И. *Структура и свойства сплавов системы Al-Zn-Mg* / В.И. Елагин, В.В. Захаров, А.М. Дриц. - М. : *Металлургия*, 1982. – 219 с.
12. Колачев Б.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. - М.: *Металлургия*, 1981. - 181 с.
13. 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.
14. Кондратюк С.Є. *Структуроутворення, спадковість та властивості литої сталі* / С.Є. Кондратюк – К. : *Наукова думка*, 2010. – 176 с.
15. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. *Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT)* [Текст]. Прийнято та надано чинності 2022-12-28. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 75 с.
16. Rokhlin L.L. *Magnesium alloys containing rare earth metals: structure and properties*. London: Taylor & Francis 2003.
17. Penghuai F., Liming P., Haiyan J., Jianwei C., Chunquan Z. Effects of heat treatments on the microstructures and mechanical properties of Mg – 3Nd – 0.2Zn – 0.4Zr (wt.%) alloy. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2008. Vol. 486. No. 1-2. P. 183 – 192.
18. Nie J. F., Muddle B. C. Characterisation of strengthening precipitate phases in a Mg—Y—Nd alloy. *Acta Mater.* 2000. Vol. 48. P. 1691 – 1703.
19. Zhao H.D., Qin G.W., Ren Y.P., Pei W.L., Chen D., Guo Y. The maximum solubility of Y in α -Mg and composition ranges of Mg₂₄Y_{5-x} and Mg₂Y_{1-x} intermetallic phases in Mg—Y binary system. *J. Alloys and Compnd.* 2011. Vol. 509. No. 3. P. 627 – 631.
20. Chia T.L., Easton M.A., Zhu S.M., Gibson M.A., Birbilis N., Nie J.F. The effect of alloy composition on the microstructure and tensile properties of binary Mg-rare earth alloys. *Intermetallics*. 2009. Vol. 17. No. 7. P. 481 – 490.

21. Vinotha D., Raghukandan K., Pillai U.T.S., Pai B.C. Grain refining mechanisms in magnesium alloys-An overview. *Trans. Indian Inst. of Metals*. 2009. Vol. 62. P. 521—532.
22. Changjiang S., Qingyou H., Qijie Z. Review of grain refinement methods for as-cast microstructure of magnesium alloy. *China Foundry*. 2009. Vol. 6. P. 93 – 103.
23. Chandler H. (Ed.) *Heat treater's guide: practices and procedures for nonferrous alloys*. Ohio: ASM International, 1996.
24. Nie J.F., Muddle B.C. Precipitation in magnesium alloy WE54 during isothermal ageing at 250 °C. *Scripta Mater*. 1999. Vol. 40. No. 10, P. 1089—1094.
25. Nie J.F. Effects of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in magnesium alloys. *Scripta Mater*. 2003. Vol. 48. No. 8. P. 1009—1015.
26. Mengucci P., Barucca G., Riontino G., Lussana D., Massazza M., Ferragut R., Hassan Aly E. Structure evolution of a WE43 Mg alloy submitted to different thermal treatments. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2008. Vol. 479. No. 1-2. P. 37—44.
27. Kumar N., Choudhuri D., Banerjee R., Mishra R.S. Strength and ductility optimization of Mg—Y—Nd—Zr alloy by microstructural design. *Int. J. Plasticity*. 2015. Vol. 68. P. 77—97.
28. Feng H., Liu H., Cao H., Yang Y., Xu Y., Guan J. Effect of precipitates on mechanical and damping properties of Mg—Zn—Y—Nd alloys. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2015. Vol. 639. P. 1—7.
29. Suzuki M., Kimura T., Koike J., Maruyama K. Effects of zinc on creep strength and deformation substructures in Mg—Y alloy. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2004. Vol. 387-389. P. 706—709.
30. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

31. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р.–К.:ВРУУкраїни,1998.– URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. – (Закон України).

32. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [Текст] : ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України).

33. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – 59 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

34. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.15-18. – На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18. – К. : Мінсоцполітики України, 2018. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

35. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин [Електронний ресурс] : ДСанПіН 3.3.2.007-98. – Чинний від 1998-12-10. – К. : МОЗ України, 1998. – URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. –(Державні санітарні правила та норми).

36. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. – (Державні санітарні норми).

37. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України).

38. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки).

39. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір [Текст] : ДСТУ ISO 6309:2007. – На заміну ГОСТ 12.4.026-76 в частині пунктів 1.1, 1.2, 1.4, 1.6 таблиці 5, пунктів 2.1, 2.2 таблиці 6, пунктів 4.1-4.11 таблиці 8; знаків 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 2.1, 2.2, 4.1-4.11 додатка 3 ; чинний від 2007-10-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с. – (Державний Стандарт України).

40. Планування і забудова територій [Текст] : ДБН Б.2.2-12:2018 – На заміну ДБН 360-92** ; ДБН Б.2.4-1-94 ; ДБН Б.2.4-3-95 ; ДБН Б.2.4-4-97 ; ДБН Б.1-2-95 ; СНиП II-89-80 ; чинний від 2018-09-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 179 с. – (Державні будівельні норми).

41. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум [Текст] : навчальний посібник / Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Піскун – 2-ге вид., стер. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 496 с.

ДОДАТОК А