

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)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему Розробка присадного матеріалу для заварювання дефектів авіаційних
виливоків із сплаву МЛ10

Виконав(ла): студент(ка) курсу, групи ІФ-612м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ШАРІЙ Олександр Юрійович

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ШАЛОМЄЄВ Вадим Анатолійович

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний
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 «Фізичне матеріалознавство»

Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ШАРІЙ Олександр Юрійович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка присадного матеріалу для заварювання дефектів авіаційних виливків із сплаву МЛ10

керівник проєкту (роботи) д.т.н., професор 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) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) значення технологічних властивостей сплаву МЛ10, його хімічний склад, проблематика при зварюванні магнієвих сплавів.

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

1. Літературний огляд;
2. Матеріали та методики досліджень;
3. Експериментальний розділ;
4. Охорона праці;
5. Економічний розділ.

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

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ШАЛОМЄСВ В.А., д.т.н., професор		
5	КРУГЛІКОВА В.М.		
6	НЕСТЕРОВ О.В., к.т.н., доцент		
н/к	ФАСОЛЬ Є.О., ст. викладач		

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Ознайомлення із темою дипломного проєкту. Вивчення відповідної літератури	06.10.2023	
2	Розробка вступу та розділу «Літературний огляд»	13.10.2023	
3	Розробка розділу «Матеріали та методики досліджень»	20.10.2023	
4	Розробка розділу «Експериментальний розділ»	27.10.2023	
5	Розробка розділу «Охорона праці»	03.11.2023	
6	Розробка розділу «Економічний розділ»	10.11.2023	
7	Написання висновків та переліку посилань	17.11.2023	

Студент(ка)

_____ (підпис) Олександр ШАРІЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Вадим ШАЛОМЄСВ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 70 с., 17 табл., 21 рис., дод., 39 джерел.

МАГНІЄВИЙ СПЛАВ, МЛ10, АВІАЦІЯ, АВІАБУДУВАННЯ, ЗВАРЮВАННЯ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ, АВІАДВИГУНИ, ВИЛИВКИ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

Об'єкт розробки – присадковий матеріал для зварювання дефектів на деталях з магнієвого сплаву МЛ10.

Мета роботи – дослідження впливу добавок скандію до присадного матеріалу зі сплаву МЛ10 для проведення процесу наплавлення. Така технологія дозволить проводити ремонт деталей авіаційних двигунів, корпусних та елементів конструкцій літаків та вертольотів, які виготовлені зі сплаву МЛ10.

Результати роботи – Використання розробленого присадкового матеріалу зі сплаву Мл10 з додаванням 0,05%Sc і розробленої технології наплавлення при ремонті поверхневих дефектів дозволяє збільшити строк експлуатації деталей двигунів та конструкцій, а також підвищити їх надійність, внаслідок вдосконалення комплексу механічних властивостей.

ЗМІСТ

	C.
Вступ.....	7
1 Огляд літературних джерел.....	8
1.1 Застосування магнієвих сплавів в авіації.....	8
1.2 Магнієві сплави, що застосовуються в авіації, їх склад, структура, властивості, призначення.....	10
1.3 Сплав МЛ10, діаграми стану Mg-Nd та Mg-Zr та вплив цих легувальних елементів на структуру та властивості.....	12
1.4 Дефекти лиття магнієвих сплавів та методи їх усунення.....	18
2 Матеріали та методика дослідження.....	24
2.1 Проведення дослідних плавок, термічної обробки та визначення хімічного складу металу.....	24
2.2 Якісні та кількісні методи оцінки структурних складових лиття...	25
2.3 Фізико-механічні властивості та технологічні випробування.....	25
2.4 Визначення дефектів лиття та їх виправлення.....	26
3 Розробка складу магнієвих сплавів системи Mg-Zr-Nd для заварки тріщин у виливках.....	28
3.1 Аналіз чинної технології заварювання литих деталей зі сплаву МЛ10	28
3.2 Розробка складу присадного матеріалу для заварювання тріщин..	31
3.3 Випробування розробленого присадкового матеріалу	36
3.4 Промислове випробування технології заварювання корпусного лиття авіаційного двигуна Д-36.....	38
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	43
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	43
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	44
4.3 Заходи з виробничої санітарії.....	47
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	49

	6
4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	50
5 Економіко-організаційна частина.....	55
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	55
5.2 Послідовний аналіз.....	56
Висновки.....	65
Перелік джерел посилань.....	66
Додаток А	
Додаток Б	
Додаток В.	
Додаток Г	

ВСТУП

Розвиток сучасного авіабудування приділяє все більше уваги зменшенню ваги поряд із традиційними вимогами до конструкцій, що мають працювати при високих температурах. Ці вимоги приводять до зростання інтересу у застосуванні легких матеріалів на основі магнію, які мають значні перспективи. Багаті сировинні ресурси України та висококваліфікована робоча сила дають міцну основу для оптимістичного прогнозу щодо розвитку виробництва виливків з магнієвих сплавів, призначених для застосування в автомобільній, авіаційній, приладобудівній та хімічній галузях [1].

Використання виливків з магнієвих сплавів дозволяє значно зменшити вагу компонентів деталей та конструкцій, що призводить до підвищення ефективності, швидкості, вантажопідйомності, дальності польоту та зменшення споживання палива. Постійно зростаючі вимоги до експлуатаційної надійності та довговічності авіаційної техніки регламентують необхідність постійного покращення властивостей виливків з магнієвих сплавів [2].

Одним з важливих напрямків розвитку сучасного авіаційного двигунобудування є можливість багаторазового використання литих деталей під час планових ремонтів, що дозволяє знизити витрати на виробництво нових виливків і підвищити конкурентоздатність авіаційної техніки.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Застосування магнієвих сплавів в авіації

Авіаційна техніка постійно розвивається, і її функціонування включає в себе використання нових матеріалів, виробів та робочих речовин. Сучасна реактивна техніка пересувається з дуже великими швидкостями і на великі відстані, працює в умовах високого тиску, екстремальних температур, і деякі в глибокому космічному вакуумі. Це вимагає створення нових металічних сплавів, включаючи жароміцні, які мають потужний комплекс фізико-механічних властивостей, необхідних для сучасного експлуатування цієї техніки.

При виборі матеріалів для створення деталей авіаційних двигунів необхідно враховувати усі висунуті вимоги щодо умов експлуатації, робочого середовища, температурного режиму та ін., які в свою чергу регламентують вимоги до їх механічних, фізичних і хімічних властивостей. Наприклад, крило літака повинне бути легким і міцним, витримувати високий тиск, різку зміну температур, а також вплив навколишнього середовища, вали і підшипники повинні мати великий строк служби зі збереженням вихідних характеристик, лопатки турбін – зберігати форму та розміри під дією високих температур та дії робочого середовища, а також відцентрових зусиль [1].

Важливою характеристикою матеріалу при його застосуванні в літакобудуванні є його густина, яка є показником для оцінки придатності матеріалу для польоту. Чим менша густина матеріалів, використаних в конструкції літака, тим більше пасажирів та вантажу можна перевезти на ньому, не збільшуючи використання палива.

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

пружності. Тому при виготовленні деталей перевага надається матеріалу, що має більшу міцність.

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

Із ливарних сплавів виготовляють кронштейни, елементи кріплення, відсіки корпусу ракети, пілони, елерони, деталі хвостового оперення, деталі управління стабілізатора та ін. Деформівні сплави застосовують для виготовлення обшивки корпусів, поверхонь управління та ребер, перегородок, шпангоутів, всмоктуючих клапанів та каналів для підведення повітря до двигуна. Листи використовують 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 тормозів, хвилеводів, зовнішніх антенних обтічників, стрингерів поверхні управління та інших деталей [1] (рис.1.1).

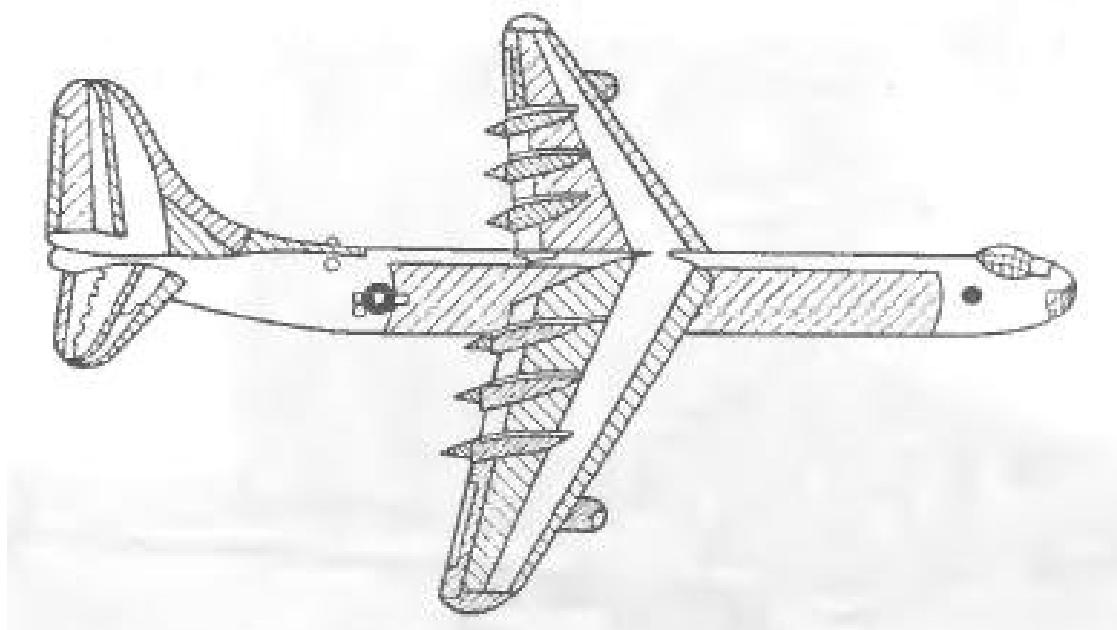


Рисунок 1.1 – Деталі літака, виготовлені з магнієвих сплавів (заштриховані)

1.2 Магнієві сплави, що застосовуються в авіації, їх склад, структура, властивості, призначення

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. Характерною особливістю магнію є мала густина ($1,74 \text{ г/см}^3$). Температура плавлення – 650°C . 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.

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].

Деформівні магнієві сплави призначені для виготовлення прутків, смуг, профілю та інших напівфабрикатів для виготовлення деталей літаків та

авіаційних двигунів. За основними легувальними елементами деформівні сплави магнію поділяють на п'ять основних груп:

– Сплави системи $Mg-Mn$. Сплави не зміцнюються термообробкою. Основною метою легування є підвищення корозійної стійкості та зварюваності. Марганець очищує розплав від заліза. Представник групи – сплав МА1. Подвійні сплави майже не застосовуються, більше використання має сплав МА8, що містить 1,3%Mn, 0,2%Ce. Сплав не зміцнюється термічною обробкою, структура представлена твердим розчином Mn в Mg, кристалами Mn, сполукою $Mg_{12}Ce$. Церій утворює дисперсні частинки, подрібнює зерно, внаслідок чого зростає міцність, пластичність. МА8 має високу технологічну пластичність, середню міцність ($\sigma_B = 240 \dots 260 \text{ МПа}$, $\delta = 7 \dots 12\%$).

– Сплави системи $Mg-Al-Zn-Mn$. Сплави мають міцність $\sigma_B = 260 \dots 280 \text{ МПа}$, яка вище за міцність сплаву МА8. Зміцнення сплавів пов'язано з утворенням таких сполук як γ -фаза ($Mg_{17}Al_{12}$) та T -фаза (Mg_3Zn_3Al). Сплави достатньо технологічні при деформуванні, добре зварюються, їх недоліком – схильність до корозійного розтріскування. До цієї групи належать сплави МА2-1, МА2-1пч (підвищеної чистоти).

– Сплави системи $Mg-Zn-Zr$. Представники групи – сплави МА14, МА15, МА19, МА20. Сплави мають високу міцність, що зумовлено впливом цирконію, який сприяє очищенню металу від заліза, подрібнює зерно, стримує ріст зерен при рекристалізації, підвищує опір корозії. Сплав МА19, що додатково легований неодимом та кадмієм, має найвищу міцність ($\sigma_B = 380 \dots 400 \text{ МПа}$).

– Сплави системи $Mg-Nd$. Представники групи – сплави МА11, МА12. Основним легувальним елементом є неодим (2,5...3,5%). Неодим забезпечує високу жароміцність внаслідок стабільності твердого розчину та низької швидкості коагуляції фази $Mg_{41}Nd_5$. Додатково сплави легують марганцем та нікелем (МА11), цирконієм (МА12). Марганець та нікель підвищують опір повзучості, тривалу міцність. Недоліком є те, що нікель зменшує опір корозії. Цирконій сприяє подрібненню зерна, поліпшує технологічну пластичність. Сплави цієї групи зміцнюють термообробкою.

– Сплави системи *Mg–Li*. Легування магнію літієм ($\rho_{Li}=0,53 \text{ г/см}^3$) дозволяє отримувати сплави, густина яких менша за чистий магній. Сплави мають високу пластичність, технологічні при обробці тиском, але підвищення вмісту літію призводить до зниження показників міцності. Для збереження певного рівня міцності сплави додатково легують алюмінієм, цинком, кадмієм, рідкоземельними металами (РЗМ). До цієї групи належать сплави МА18, МА21 [4].

1.3 Сплав МЛ10, діаграми стану Mg-Nd та Mg-Zr та вплив цих легувальних елементів на структуру та властивості

Представники сплавів системи Mg–РЗМ–Zr це сплави МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19 які мають високу жароміцність. Тривала експлуатація сплавів є можливою при температурах 250...350°C, короткочасна – при температурах до 400°C. Тому, використання цих сплавів заміняючи алюмінієві та титанові сплави, можна значно полегшити деталі різних виробів, а також значно збільшити надійність та ресурс роботи деталей із жароміцних магнієвих сплавів. Хімічний склад сплаву МЛ 10 наведено у таблиці 1.1.

Таблица 1.1 – Хімічний склад сплаву МЛ 10 (магній – основа), мас. % [5]

Nd	Zr	Zn	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Be	Інші домішки
			не більше						
2,2-2,8	0,4-1,0	0,1-0,7	0,02	0,03	0,01	0,005	0,03	0,001	0,12

Основним легувальним елементом в МЛ9, МЛ10, МЛ19 є неодим, в МЛ11 – церій. Всі сплави містять цирконій, він вводиться з метою рафінування розплаву та сприяє подрібненню зерна. Завдяки легуванню цирконієм відливки із жароміцних магнієвих сплавів мають однорідну дрібнозеренну структуру, яка

мало залежить від товщини перерізу, і внаслідок цього має високий рівень та однорідність механічних властивостей. Рідкоземельні метали знижують окиснюваність магнієвих сплавів в рідкому та твердому станах [4].

Основний механізм створення ливарних магнієвих сплавів високої жароміцності концентрується в наступному:

1. Створення складнолегованого термічно стабільного твердого розчину. У підвищенні термічної стабільності твердого розчину значну роль відіграє збільшення електронної концентрації при введенні в магній тривалентних елементів РЗМ та ітрію, а отже, підвищення сил міжатомного зв'язку. Судячи з низьких значень коефіцієнта термічного розширення для самих РЗМ і особливо для ітрію, характерні великі сили міжатомного зв'язку.

2. Зміцнення дисперсними частинками, що випадають з твердого розчину в процесі старіння і відіграють роль перешкод, що гальмують рух і переповзання дислокацій в умовах повзучості. Висока жароміцність досягається при створенні гетерофазної дрібнодисперсної тонкої структури.

3. Підвищення термічної стабільності і температури коагуляції зміцнювальних фаз. Гальмуванню дифузійних процесів (масопереносу) на межі розділу твердий розчин – зміцнювальна фаза сприяє зменшення у складі фаз вмісту основи сплаву – магнію.

4. Зміцнення меж зерен виділеннями термічно стабільних фаз. Значення цього фактора зростає з підвищенням температури, за якої експлуатується сплав [4].

Основні легувальні елементи сплаву МЛ 10 це неодим, цирконій та цинк.

Цирконій має обмежену розчинність в магнії і його максимальна розчинність становить 0,731 % (рис. 1.2) [6].

Цирконій сприяє подрібненню зерна магнієвого сплаву. Такий ефект пов'язаний з утворенням при охолодженні розплаву значної кількості зародків кристалів цирконію. Вони є додатковими центрами кристалізації. Автори роботи [7] зазначили, що додавання цирконію в магнієвий сплав кількістю до 2% значно подрібнює зерно.

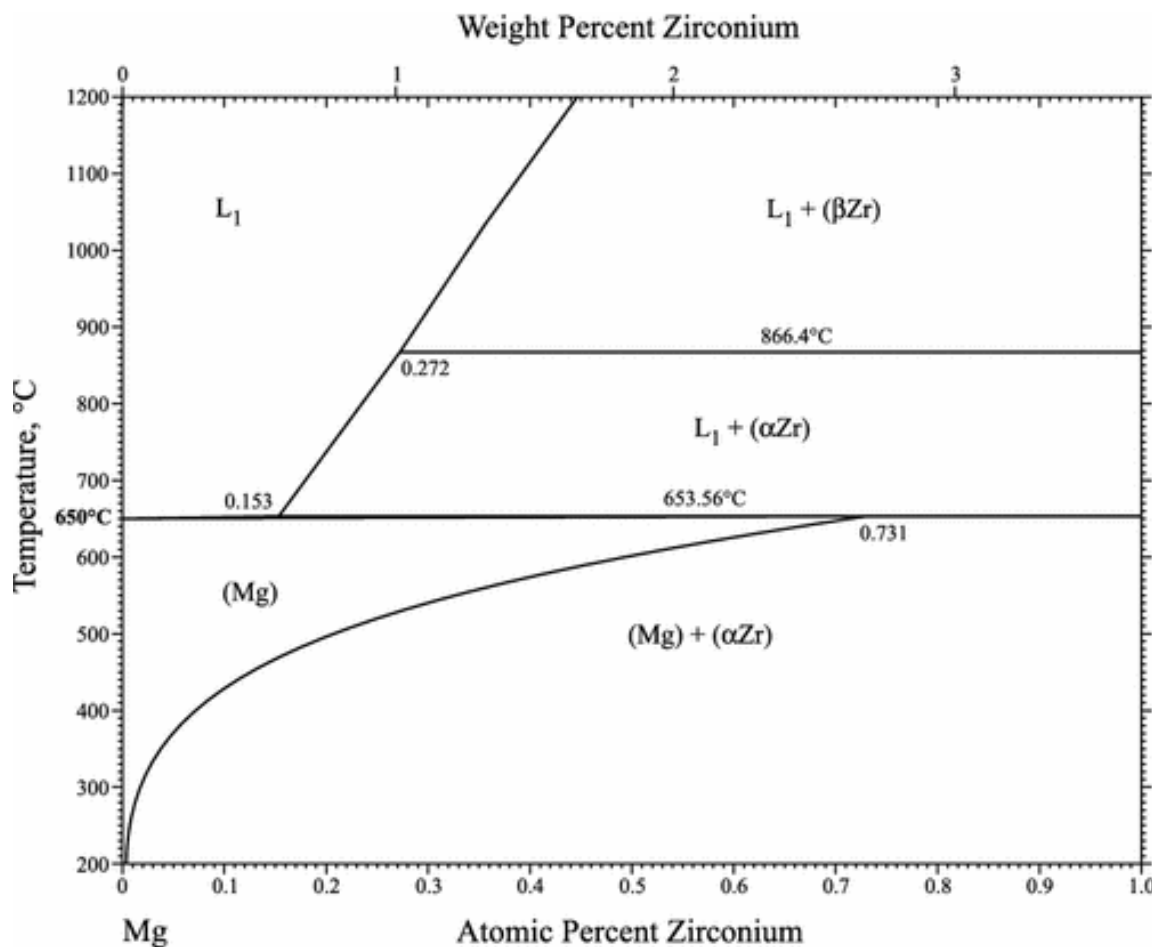


Рисунок 1.2 – Діагнома стану Mg-Zr [6]

Цирконій високо хімічно активний елемент щодо легувальних елементів магнієвих сплавів, домішок і газів. Ця властивість сприяє утворенню виливків з високою щільністю та знижує вірогідність утворення газових пор. Разом з тим, здатність цирконію до дегазації залежить від вмісту цинку в магнії. При вмісті в сплаві 4,5 % цинку знижується здатність до утворення гідридної σ -фази, тому виникають інтерметаліди Zn_2Zr_3 [8].

При виплавленні магнієвих сплавів в сталевих тиглях, додавання присадки цирконію сприяє очищенню розплаву від заліза, що потрапляє у розплав зі стінок тигля, утворенню і подальшому видаленню фази Fe_2Zr . Проте, негативним наслідком указанного ефекту є зниження вмісту цирконію в розплаві.

Цирконій зменшує розчинність вуглецю в магнієвому розплаві, утворюючи власні карбіди. В цьому випадку, ефект впливу вуглецю в сплавах, що містять цирконій, помітно знижується [2].

Вплив *неодиму* на структуру і властивості магнієвих сплавів дещо інший. Так, в сплавах системи Mg-Nd [9] (рис. 1.3) можуть утворюватися значна кількість інтерметалідних сполук: Mg_{12}Nd , $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$, Mg_3Nd , Mg_{12}Nd , Mg_2Nd , MgNd [8]. У сплавах з невисоким вмістом неодиму спостерігається утворення евтектики при температурі 552 °С, в якій концентрація неодиму складає 7,4 ат. %.

Інтерметалід Mg_{12}Nd є фазою конгруентного плавлення і розпадається за евтектоїдною реакцією на Mg і $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$. Температура евтектоїдного розпаду сполуки Mg_{12}Nd близько 530 °С, розчинність Nd в Mg складає 0,31...0,34 ат. % [9].

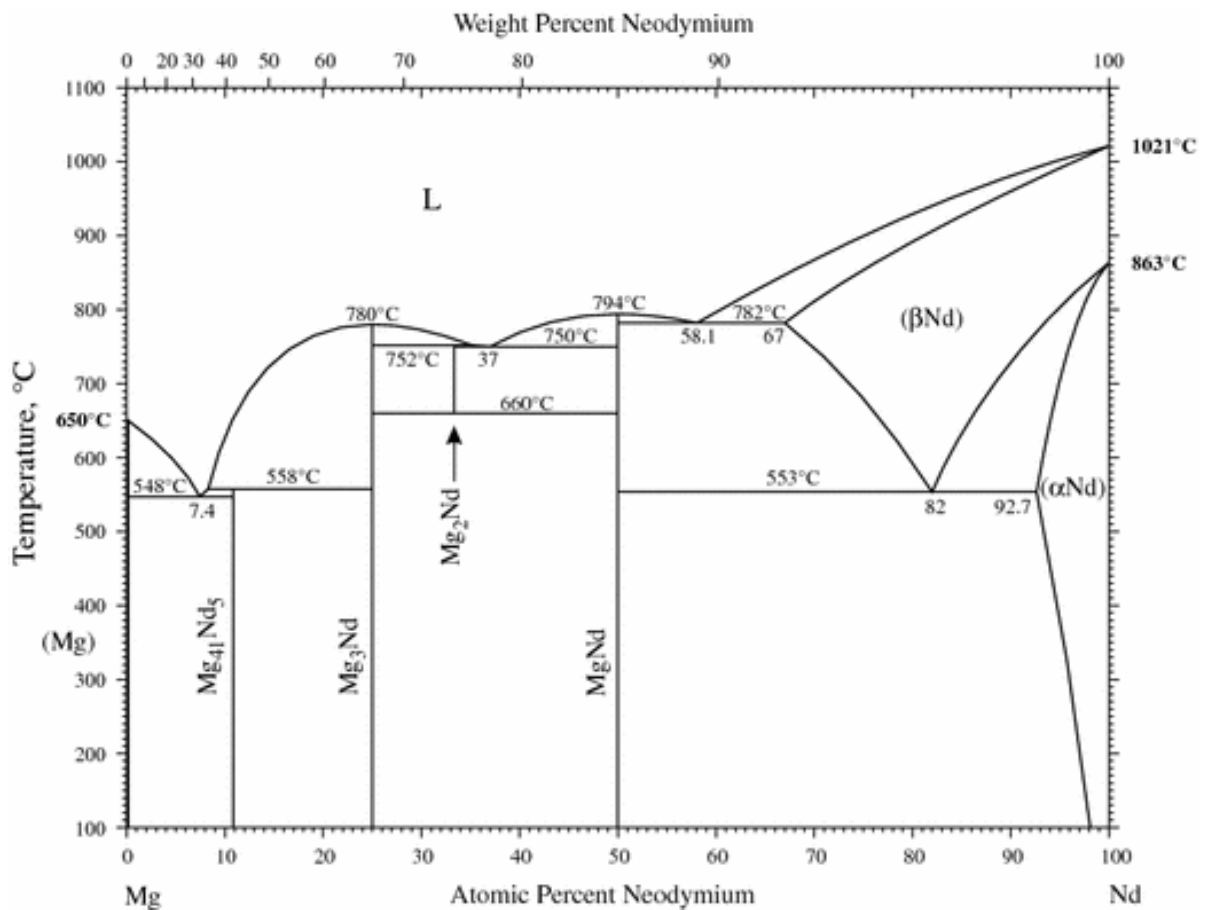


Рисунок 1.3 – Діаграма стану Mg-Nd [9]

Також слід визначити позитивну роль неодиму в утворенні інтерметалідів, що є зміцнювальними фазами, які сприяють підвищенню термічної стабільності сплаву, оскільки температура плавлення цих інтерметалідів складає 1480°C. Отже, оптимальна присадка неодиму (2,5 %) забезпечує високий комплекс механічних властивостей сплаву [8].

Сплави зміцнюються термообробкою (істинне гартування та старіння), яка маркується Т6. Гартування проводять при температурі 540 ± 5 °С, витримка тривалістю 8-12 год., далі охолодження обдувкою стисненим повітрям. Після цього проводять старіння при 205 ± 5 °С впродовж 12-18 год. із охолодженням на повітрі. Вплив тривалості витримки при старінні показано на рис. 1.4. Механічні властивості сплаву МЛ 10 при розтязі, стисненні та крутінні після проведеної термічної обробки наведено у табл. 1.2 [10].

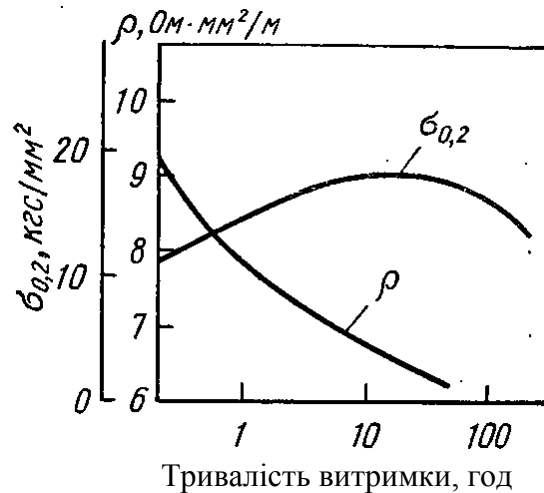


Рисунок 1.4 – Криві старіння сплаву МЛ 10 при 205°C [10]

Таблиця 1.2 – Механічні властивості жароміцного сплаву МЛ 10 при розтязі та стисненні після термічної обробки Т6 [10]

При розтягненні				При стисненні			При крутінні	КСУ
$\sigma_{\text{ПЦ}}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{В}}$	δ	E	$\sigma_{\text{ПЦ}}$	$\sigma_{0,2}$	$\tau_{\text{ср}}$	
МПа			%	МПа			МПа	Н/см ²
100	150	250	5	42000	100	140	180	500

Стабільність структури та механічних властивостей – одна з основних вимог, що пред'являють сплавам, що довготривало працюють при підвищених температурах. В таблиці 1.3 наведено механічні властивості сплаву МЛ 10 залежно від температури випробувань та кількості годин експлуатації.

Тривалі нагрівання не спричиняють істотних змін показників міцності та пластичності сплавів за кімнатної температури (не більше 20%). За криогенних температур межа міцності магнієвих сплавів збільшується, а відносне видовження знижується. Різкого падіння ударної в'язкості, характерного для малолегованих сталей, у магнієвих сплавів не спостерігається.

Тривалі нагрівання перед випробуваннями за 125 і 150° С практично не змінюють характеристик міцності сплаву МЛ10 за цих температур. Підвищення температури попереднього нагріву і відповідно температури випробування до 200, 250 і 300°С для сплаву МЛ10 призводить до зниження межі плинності і дещо більшого зниження межі міцності сплаву. Пластичність сплаву зростає [10].

1.4 Дефекти лиття магнієвих сплавів та методи їх усунення

На експлуатаційну стійкість і довговічність роботи литих деталей з магнієвих сплавів значно впливають дефекти, що утворюються під час виготовлення виливків та їх експлуатації [11]. До них належать: тріщини, раковини, неметалеві включення, пористість тощо.

Тріщини у виливках можуть бути гарячі та холодні. Гарячі тріщини зазвичай виникають у місцях сполучення протяжних стінок із ребрами жорсткості, з елементами, що виступають, і часто біля теплових вузлів виливки [12]. Методи запобігання утворенню таких тріщин поділяють на конструкторські та металургійні. Конструкторські заходи передбачають раціональне проектування конфігурації виливки. До металургійних методів належать температурні режими плавки, розливання металу, форми, раціональний вибір складу сплаву та очищення його від домішок. Якісне рафінування розплаву і зменшення окислення його в процесі розливання зменшують можливість утворення гарячих тріщин. До гарячих тріщин також відносять і "заліковані" тріщини (рис. 1.5), заповнені евтектикою, які виявляють методом рентгенівського просвічування [13, 14]. Холодні тріщини виникають

здебільшого під час лиття в металеві форми і пов'язані з нульовою податливістю самої форми [15].

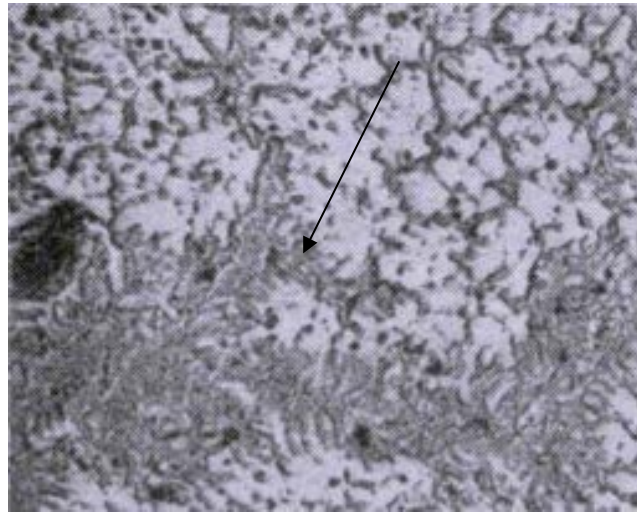


Рисунок 1.5 – «Залікована» тріщина у відливку зі сплаву МЛ10, х70 [13].

Рихлоти у виливках бувають шаруваті, пластівчасті, концентровані та з наявністю евтектики. Шаруваті рихлоти розташовуються паралельно фронту кристалізації та характеризуються наявністю ділянок виливки, що перемежуються, з малою і нормальною щільністю. Концентровані рихлоти відрізняються від шаруватих більш рівномірним зниженням щільності сплаву в місцях їх розташування. Ділянки рихлот подібних до пластівців є різновидом концентрованих і розділені значними ділянками з нормальною густиною. Рихлоти з евтектикою (рис. 1.6) характеризуються тим, що в місцях їхнього розташування чергуються ділянки металу зі зниженою і підвищеною густиною [13, 15].

Ліквація в магнієвих сплавах може бути внутрішньокристалічною і зональною. Зерна за внутрішньокристалічної ліквації мають нерівномірний хімічний склад, а прикордонні ділянки збагачені легувальними елементами. Так, внутрішньозерниста ліквація магнієвих сплавів із цирконієм викликана особливостями кристалізації цього сплаву. Зональна ліквація, на відміну від внутрішньокристалічної, проявляється за наявності турбулентних потоків розплаву в порожнині виливки. При цьому, відбувається збіднення або збагачення легувальними елементами окремих об'ємів виливки [13, 16].

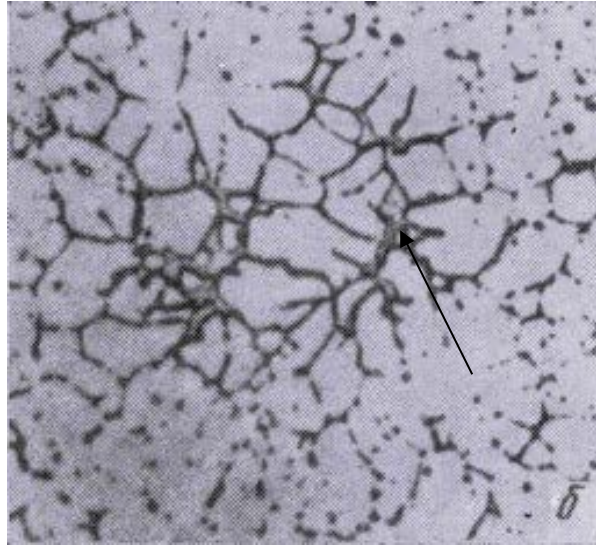


Рисунок 1.6 – Рихлоти з евтектикою у зразку магнієвого сплаву, x50 [13]

Неметалеві включення, що уявляють оксидні плівки, флюсові включення і засмічення, можуть бути концентраторами напружень, знижуючи механічні властивості виливки. До заходів боротьби з ними належать: збільшення часу відстоювання сплаву під час рафінування, застосування фільтрації під час розливання сплаву, захист магнієвого розплаву від окислення інертними газами.

На руйнування виливків у процесі експлуатації вирішальний вплив має їхня пористість (рис. 1.7), шляхи усунення якої вивчені мало [13]. Одним із перспективних напрямів зменшення пористості виливків відповідального призначення є гаряче ізостатичне пресування (ГІП), що дає змогу підвищити їхні фізико-механічні властивості [17]. Під час використання цієї технології відбувається зварювання (захлопування) стінок мікропор у результаті високотемпературної повзучості та дифузії металу. При цьому в роботі [18] зазначено, що ГІП сприяло подрібненню структурних складових сплаву і більш рівномірному їхньому розподілу в матриці, а також підвищенню відносного видовження на 20 % і жароміцності на 43 %.

Для сучасної авіаційної техніки характерна тривала експлуатація, що передбачає можливість багаторазових ремонтів агрегатів [3]. Заварювання дефектів виливків, що з'являються під час експлуатації, є важливою технологічною операцією, що забезпечує отримання деталей з необхідними

фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками, і їх подальше використання [19].

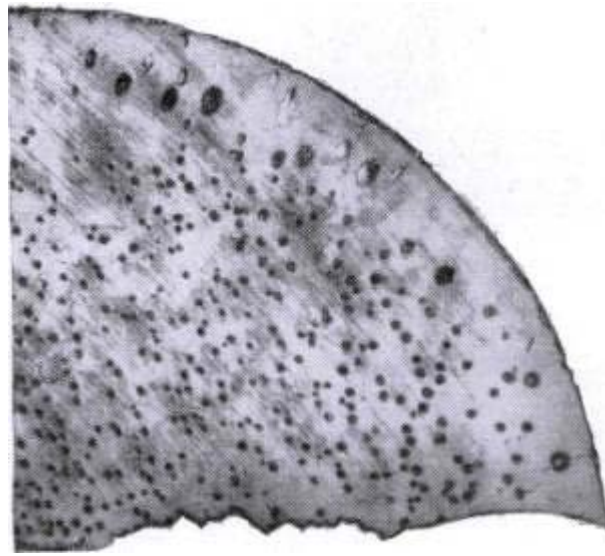


Рисунок 1.7 – Пористість в магнієвому сплаві, x2 [13]

Поширеним способом заварювання виливків із магнієвих сплавів є дугове зварювання в середовищі захисних газів. Досить часто застосовують контактне, газове та плазмове заварювання. Зварюваність магнієвих сплавів вивчена недостатньо порівняно з іншими кольоровими сплавами. Під час розроблення магнієвих сплавів основна увага дослідників приділяється отриманню необхідних експлуатаційних фізико-механічних характеристик металу. Легування, що застосовується для поліпшення властивостей сплавів, не завжди забезпечує їх задовільну зварюваність. Тому багато магнієвих сплавів мають недостатню зварюваність.

За зварюваністю магнієві сплави значно поступаються сплавам інших легких металів [20]. Особливістю зварювання магнієвих сплавів є те, що в період перебування металу в зварювальній ванні він енергійно реагує з повітрям, утворюючи оксидні плівки і насичуючись газами [21]. У розплавлений метал зварювальної ванни потрапляють частинки оксидної плівки, що погіршують фізико-механічні властивості та герметичність шва. Окислення розплаву зварювальної ванни знижують шляхом додаткового легування присадкового матеріалу. Так, підвищення вмісту алюмінію в магнії збільшує швидкість його

окислення. Кальцій і нікель прискорюють окислення, а РЗМ – знижують. Ефективним захистом поверхні зварювальної ванни від окислення є застосування флюсу або захисної атмосфери. Однак під час заварювання виливків із магнієвих сплавів флюс може затікати в щілини і зазори і бути причиною флюсової корозії. Більш виправданий захист зварювальної ванни аргоном, де зварювальна дуга може руйнувати оксидну плівку. Заварювання виливків із магнієвих сплавів супроводжується зміною їхньої структури в перехідній зоні від основного металу до зварного шва. Магнієві сплави під час зварювання зазнають значних структурних змін у зоні термічного впливу. Заварка загартованого металу супроводжується розпадом твердого розчину і зниженням міцності навколошовної зони до 70 % міцності основного металу [13]. Поширеним дефектом під час заварювання виливків із магнієвих сплавів є гарячі тріщини. Наявність евтектики посилює схильність магнієвих сплавів до тріщиноутворення [20].

Схильність сплавів до утворення гарячих тріщин визначається співвідношенням між пластичністю зварного шва й основного металу в температурному інтервалі крихкості під час охолодження, а міцність зварного шва пов'язана з величиною інтервалу кристалізації та коефіцієнта лінійної усадки сплаву [20].

Для більшості магнієвих сплавів збільшення вмісту легувальних елементів розширює інтервал кристалізації та підвищує схильність до утворення кристалізаційних тріщин, небезпека виникнення яких збільшується в разі зменшення товщини стінки в місцях зі складною усадкою металу. Швидке охолодження деталей після заварки посилює тріщиноутворення. Найважливішою проблемою під час зварювання магнієвих сплавів є запобігання утворенню гарячих тріщин, що утворюються переважно в наплавленому металі, а іноді й у перехідній (навколошовній) зоні (рис. 1.8). При цьому, застосовуються технологічні заходи, що полягають у введенні малих добавок елементів у присадний матеріал, однак, вплив їх може бути різним [22]. Так, вміст алюмінію в системі Mg - Al у межах 1,5...9 % сильно підвищує схильність сплаву до утворення кристалізаційних тріщин за рахунок утворення плівкових

інтерметалідів. Присадки церію призводять до утворення дисперсних інтерметалідів CeAl_2 , розташованих у середині зерна, і тріщиностійкість сплаву підвищується [2].

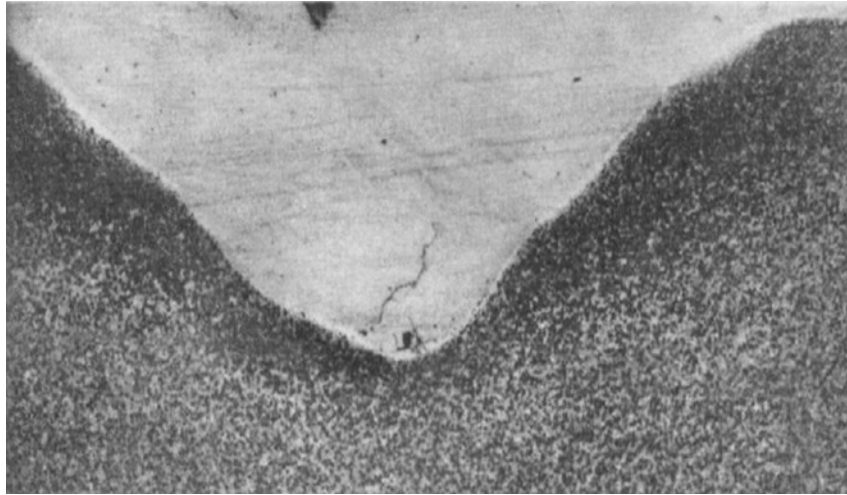


Рисунок 1.8 – Гаряча тріщина в наплавленому металі магнієвої деталі, x3 [2]

В інших роботах зазначено, що РЗМ різко знижують температуру солідуса магнієвих сплавів і розширюють інтервал кристалізації, сприяючи утворенню в шві кристалізаційних тріщин. Однак у присутності цирконію невеликі добавки РЗМ можуть позитивно впливати на зварюваність магнієвих сплавів [22].

Цинк і кальцій негативно впливають на зварюваність магнієвих сплавів, різко збільшуючи їхню схильність до утворення тріщин. Неодим помітно знижує тріщиностійкість магнієвих сплавів під час зварювання, тому сплави, що містять неодим, належать до тих, що погано зварюються. Відомий позитивний вплив скандію на зварюваність алюмінієвих сплавів [23]. З огляду на те, що кристалічна ґратка скандію практично повністю сполучена з кристалічною ґраткою алюмінію, можна припустити його позитивний вплив на алюмінійвмісні магнієві сплави.

Таким чином, цілком перспективними можуть бути дослідження з розроблення раціонального складу присадкового матеріалу для заварювання виливків із магнієвих сплавів, що забезпечує високу тріщиностійкість зварного шва.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

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

Для цих досліджень було обрано промисловий сплав МЛ10 (ДСТУ ISO 16220:2008 [5], див. табл. 1.1), який виплавляли в тигельній індукційній печі типу ИПМ-500 номінальною місткістю 0,5 т, потужністю 140 кВт і продуктивністю 230 кг/год, а також у газовій роздатковій печі номінальною місткістю 150 кг.

Шихтою досліджуваних сплавів були такі матеріали: магній первинний чушковий Мг 90, Мг 95, Мг 96 (ДСТУ 2187-93) [24], цинк чушковий Ц2 (ГОСТ 3640-94) [25], лігатура Mg-Nd, лігатура Mg-Sc, лігатура Mg-Zr Л2, лігатура Al-Mn. Легувальні елементи вводили з відповідними лігатурами. Розплав рафінували флюсом ВІ-2.

У тигельну піч ИПМ-500 завантажували попередньо нагріті шихтові матеріали і після розплавлення переливали у виїмні тиглі за температури 650...730 °С. Виїмні тиглі встановлювали в роздавальні печі, в яких доводили сплав за хімічним складом і рафінували флюсом ВІ-2 за температури 740...760 °С. Після цього в розплав вводили присадки лігатур відповідних елементів, підігрівали, витримували розплав і за 730 °С заливали литі зразки і виливки для механічних випробувань і металографічного контролю.

Дослідження металу проводили до і після термічної обробки за режимом: нагрівання (до 540 ± 5 °С), витримка 15 годин, охолодження на повітрі та старіння за 200 ± 5 °С, витримка 8 годин.

Термічну обробку виливків проводили в термічній шахтній печі типу Бельв'ю, потужністю 112 кВт і продуктивністю 95 кг/год, а також термічній печі типу ПАП-4М, продуктивністю 50 кг/год.

2.2 Якісні та кількісні методи оцінки структурних складових лиття

Макро- і мікроструктуру досліджуваного сплаву вивчали методами світлової мікроскопії ("Neophot 32", "OLYMPUS IX 70"). Шліфи для аналізу мікроструктури досліджували до і після термічної обробки, які пройшли травлення реактивом, що складається з 1 % азотної кислоти, 20 % оцтової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколю.

Фрактографічний аналіз зламів зразків проводили на електронному скануючому мікроскопі "JSM-6360LA".

Фазовий аналіз структурних складових магнієвих сплавів вивчали на електронному мікроскопі-мікроаналізаторі з енергодисперсійною приставкою РЕММА 202М і РЕМ 16І. У кожному аналізованому мікрооб'ємі записували енергодисперсійні спектри, які кількісно обробляли за спеціальною програмою на ПЕОМ. Обробленням даних спектрів визначали інтенсивності аналітичних ліній хімічних елементів, присутніх у спектрі.

2.3 Фізико-механічні властивості та технологічні випробування

Механічні властивості зразків із магнієвих сплавів визначали на розривній машині "INSTRON" 2801 за ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 [26]. Зразки випробовували до і після термічної обробки. Мікротвердість структурних складових сплавів вивчали мікротвердоміром фірми "Buehler" і LM-700AT за навантаження 0,1 Н.

Тривалу міцність за підвищених температур визначали за ДСТУ ISO 6892-2:2020 [26] на зразках для високотемпературних випробувань.

Зразки встановлювали в нагрівальний пристрій машини "INSTRON" з подовженими штангами для кріплення зразків, після досягнення потрібної

температури 250 °С давали навантаження ($\sigma = 80$ МПа) і фіксували час до повного руйнування.

2.4 Визначення дефектів лиття та їх виправлення

У виливках з магнієвих сплавів можуть бути присутніми такі дефекти: тріщини, газові раковини, неметалеві включення, макро- і мікропористість. У литих виробках, що вже були в експлуатації, спостерігалися відколи й тріщини.

Якість виливків із магнієвих сплавів у промислових умовах визначали неруйнівними методами контролю: візуальним, рентгенівським, люмінісцентним і кольоровим. Візуальний контроль виливків на наявність дефектів здійснювали після попереднього їх просочення гасом.

Рентгенівський контроль зварних з'єднань у виливках із магнієвих сплавів здійснювали за допомогою апаратів РАП-150/300, РУП 150/300, РУП 400-5 і МІРА-2Д і реєстрували отримані дані на рентгенівські плівки РМ-1, РТ-1, РТ-2 та ін. Товщина просвічуваного матеріалу була в межах 11...116 мм.

Люмінісцентний контроль виливків проводили методами ЛЮМ-17-П і ЛЮМ-К, використовуючи капілярне проникнення люмінісцентної рідини в порожнину дефекту виробу. На попередньо очищену поверхню наносили шар індикаторного пенетранта, що складається з гасу або реактивного палива 85 ± 5 % і масла трансформаторного або МК-8 15 ± 5 %. Після промивання виробу в технічній воді та просушування, на контрольовану поверхню наносили проявник у вигляді оксиду магнію. Наявність дефектів встановлювали за світінням в ультрафіолетовому світлі, яке створював опромінювач КДЗ-3Л.

Для дефектоскопії виробів кольоровим методом ЦМ15-В, на попередньо очищену поверхню виробу наносили шар індикаторної рідини. Після витримки, в результаті якої рідина заповнювала поверхневі дефекти, поверхню обробляли рідиною ОЖ-2 і видаляли сумішшю 70 % трансформаторного масла або МС-8П і 30 % палива ТС-1 або РТ. Для фіксації дефекту використовували проявник.

Основним способом виправлення дефектів магнієвого лиття є його заварка. Тому зварюваність матеріалів є важливою характеристикою, що дає змогу отримувати якісні вироби, які відповідають вимогам нормативно-технічної документації.

Зварюваність металу вивчали на термооброблених пластинах розміром 200x100x10 мм, які зварювали литими електродами Ø 8 x 200 мм. Зварювання проводили аргоно-дуговим способом з використанням невитратного вольфрамового електрода. Зварні шви випробовували за ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 [26] на пропорційних циліндричних зразках Ø 5 мм з початковою розрахунковою довжиною зразка $l_0=5d_0$.

3 РОЗРОБКА СКЛАДУ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Mg-Zr-Nd ДЛЯ ЗАВАРКИ ТРІЩИН У ВИЛИВКАХ

Одним із перспективних напрямів розвитку сучасного авіадвигунобудування є можливість багаторазового використання литих деталей агрегатів під час їхніх планових ремонтів, що дає змогу знизити витрати на виробництво нового литва і підвищити конкурентоспроможність авіаційної техніки.

3.1 Аналіз чинної технології заварювання литих деталей зі сплаву МЛ10

Авіаційні двигуни після гарантійних термінів експлуатації проходять профілактичні огляди, під час яких на окремих елементах, що виготовляються з магнієвих сплавів, у деяких випадках виявляють поверхневі тріщини (рис. 3.1).

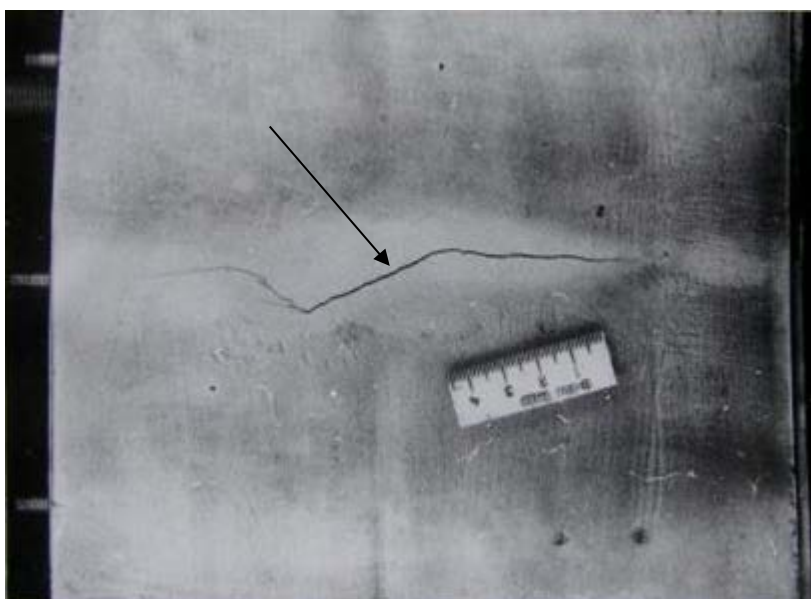
За технічними умовами після оброблення тріщин допускається їхнє заварювання, яке є досить коштовним і не завжди ефективним, оскільки на місці заварювання можуть знову утворюватися тріщини.

Магнієві сплави мають різну зварюваність. Для заварки застосовують той самий матеріал, що й основа сплаву. Так, якщо під час заварювання дефектів на деталях зі сплаву МЛ5 не виникає труднощів, то деталі зі сплаву МЛ10 заварюються погано – часто в місцях заварювання утворюються тріщини, які потребують повторного проведення заварювання (рис. 3.2). Після кількох невдалих заварок коштовний виріб бракують.

Металографічний аналіз металу зварного шва і навколошовної зони виливків зі сплаву МЛ10, заварених за стандартною технологією, засвідчив наявність у їхніх структурах різнозернистості, а також наявність мікропустот і мікропор (рис. 3.3). Ці дефекти були концентраторами напружень, що виникають під час охолодження заварених виливків, і сприяли утворенню нових тріщин.



а



б

а - ребра жорсткості, $\times 0,25$; б - зовнішня поверхня корпусу, $\times 2$

Рисунок 3.1 – Поверхневі тріщини на корпусі компресора низького тиску



Рисунок 3.2 – Тріщина в місці заварки корпусного виливка, $\times 0,3$

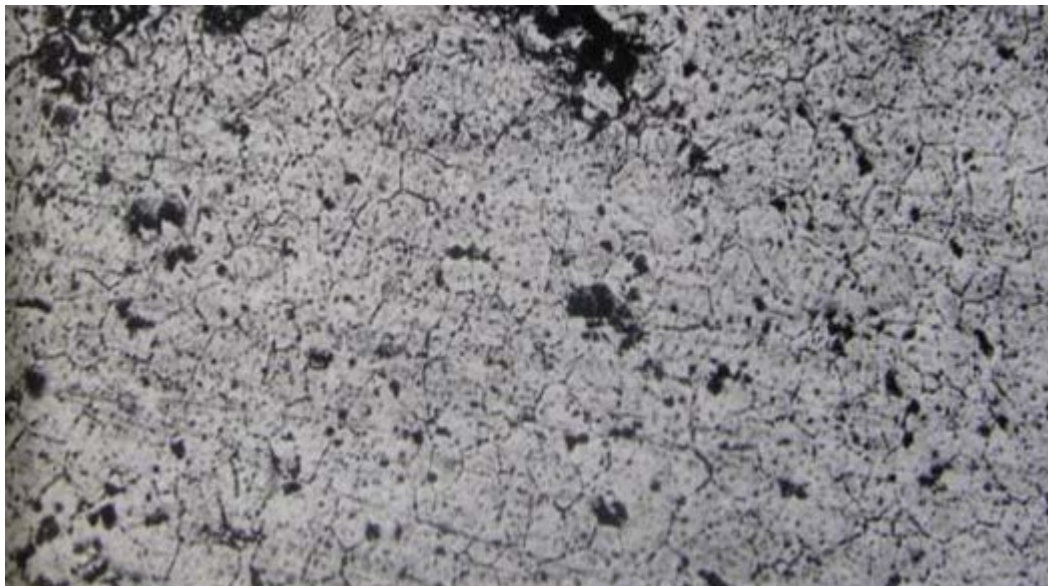


Рисунок 3.3 – Мікроструктура металу зварного шва корпусного лиття зі сплаву МЛ10, отриманого за чинною технологією, $\times 100$

Тому розробка нових присадних матеріалів для заварювання поверхневих тріщин литих деталей зі сплаву МЛ10, що забезпечують необхідну їхню якість, є гострою виробничою необхідністю.

3.2 Розробка складу присадного матеріалу для зварювання тріщин

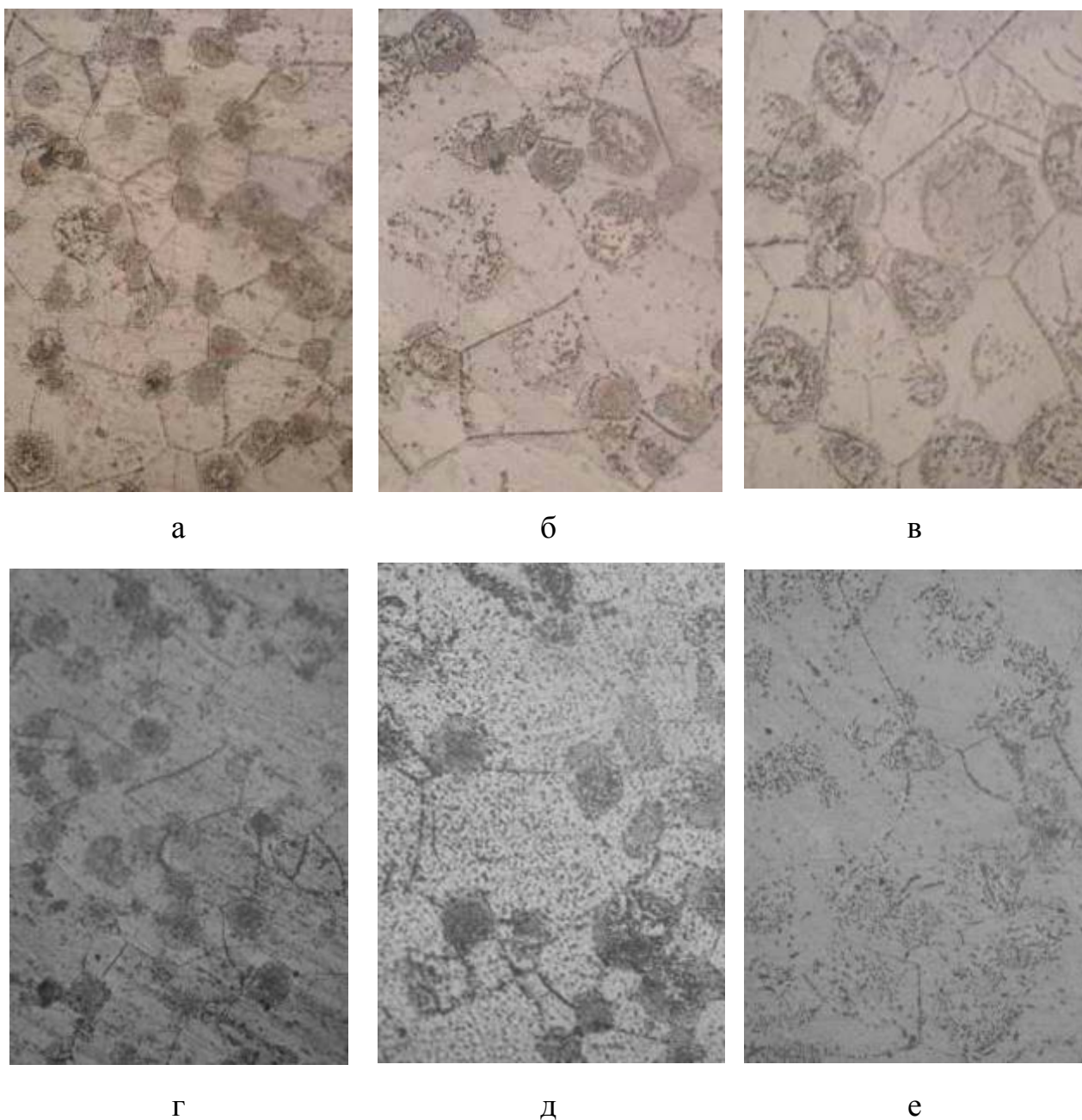
Проводили дослідження магній-скандієвої лігатури, що містить 10 % Sc, для виробництва зварювальних електродів зі сплаву МЛ10. Зростаючі присадки лігатури вводили в розплав і вивчали вплив скандію в межах 0...1,0 % на структуроутворення, механічні властивості та жароміцність магнієвого сплаву МЛ10.

Мікроструктура термообробленого сплаву МЛ10 складалася з δ -твердого розчину з наявністю евтектики сферичної форми. З підвищенням концентрації скандію в сплаві збільшувалися розміри такої евтектики (рис. 3.4, а-в). Так, при введенні в розплав понад 0,07 % Sc розмір евтектичних областей збільшувався приблизно в 3 рази, порівняно зі стандартним сплавом, тоді як розмір зерна матриці перебував приблизно на одному рівні (рис. 3.5). Мікротвердість структурних складових сплаву МЛ10 зі збільшенням вмісту скандію підвищувалася, як до, так і після термообробки. Причому після проведення термообробки спостерігалось збільшення мікротвердості матриці та зниження значень твердості евтектики (табл. 5.1).

Мікрорентгеноспектральний аналіз, проведений на електронному мікроскопі "JSM-6360LA", показав, що евтектика збагачена переважно цирконієм, неодимом і скандієм (рис. 3.6). У сплаві зі скандієм у сферичній евтектиці було в $\sim 1,5...2,0$ рази більше скандію, ніж у δ -твердому розчині.

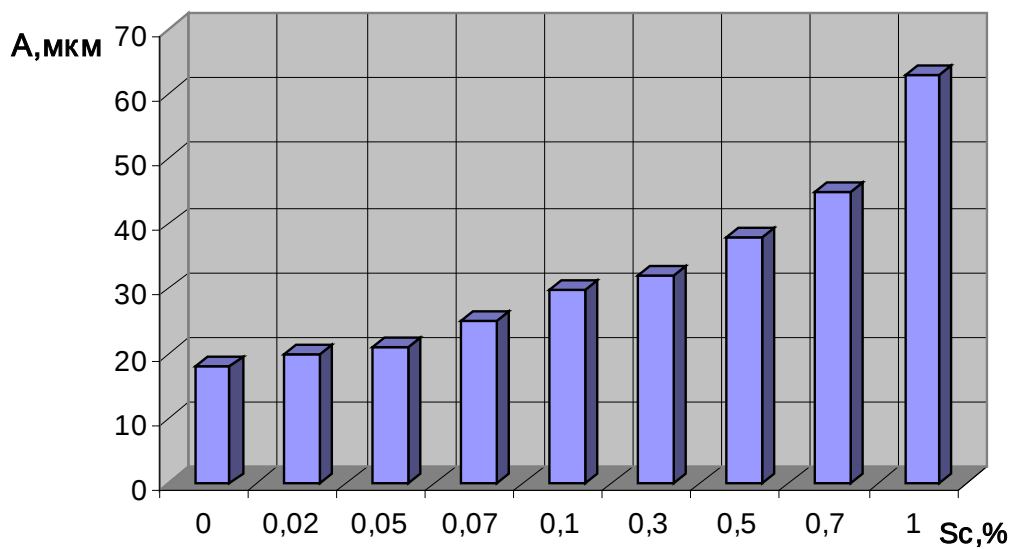
При підвищенні концентрації скандію в сплаві до 0,1 % зерна подрібнювалися. Подальше збільшення вмісту скандію до 1,0 % призводило до зростання розміру мікрозерен.

У зразках, що пройшли випробування на жароміцність, спостерігався розпад евтектики (рис. 3.4 г – е). У процесі впливу температури і прикладеного навантаження водночас із розпадом евтектики відбувалося і її розчинення в матриці з подальшим нерівномірним виділенням дрібнодисперсної фази (рис. 3.7), яка мала смугасту структуру з підвищеною мікротвердістю.

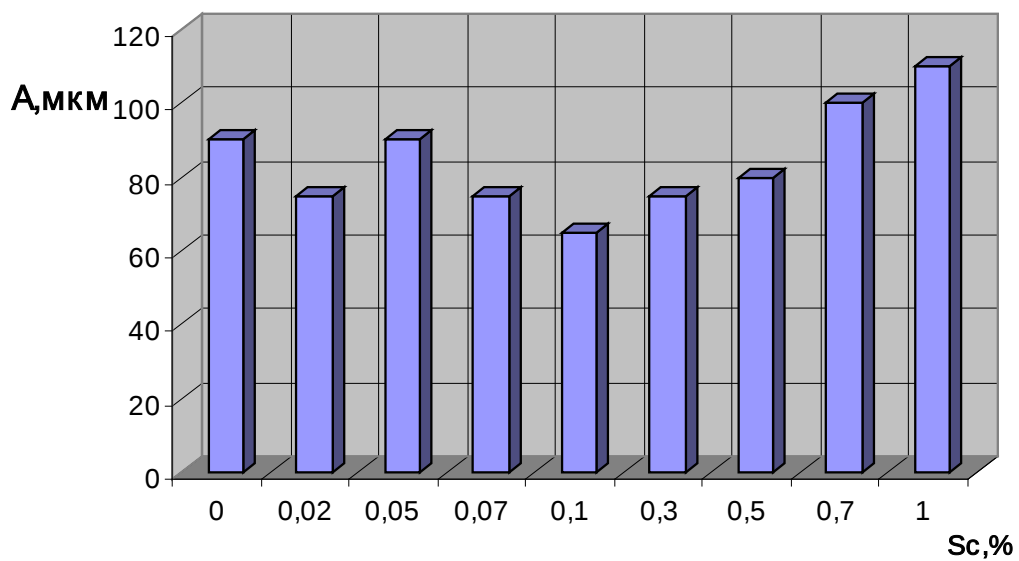


а, г - без Sc; б, д - 0,05 % Sc; в, е - 1,0 % Sc.

Рисунок 3.4 – Мікроструктура термообробленого сплаву МЛ10 до- (а, б, в) і після випробувань (г, д, е) на жароміцність, х500



а



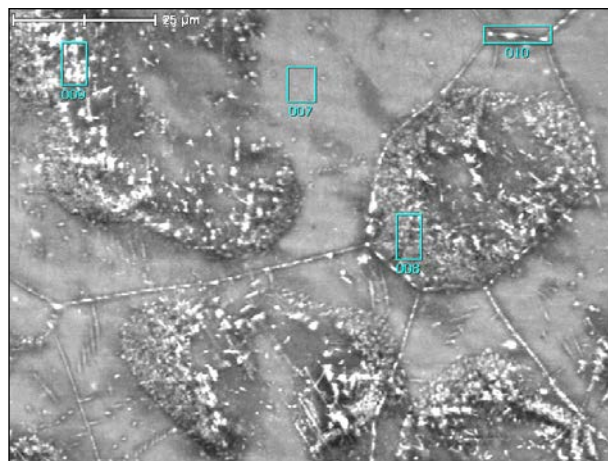
б

а - $\delta+\gamma$ - фаза; б - δ - фаза

Рисунок 3.5 – Середні розміри структурних складових (А) сплаву МЛ10 з різним вмістом скандію

Таблиця 3.1 – Мікротвердість зразків зі сплаву МЛ10 легованого Sc

Присадка Sc, мас. %	Мікротвердість HV, МПа			
	до термообробки		після термообробки	
	матриця	евтектика	матриця	евтектика
-	662,5	1916,6	1065,7	1320,4
0,02	770,0	2089,3	1078,8	1480,6
0,05	781,0	2094,9	1098,8	1504,7
0,07	827,1	2125,7	1114,4	1735,6
0,10	835,0	2158,7	1154,5	1891,6
0,30	846,5	2211,8	1187,4	1930,6
0,50	871,5	2285,9	1235,5	1985,7
0,70	904,3	2348,3	1288,4	2130,6
1,00	942,8	2450,7	1320,5	2211,6
Примітка: у таблиці наведено середні значення.				



№ точки	Вміст елементів, % *)				
	Mg	Si	Sc	Zr	Nd
007	97,76	0,1	0,02	0,1	2,02
008	93,52	0,08	0,57	1,83	4,0
009	92,36	0,17	0,54	4,03	2,9
010	96,1	0,17	0,24	0,53	2,96

Рисунок 3.6 – МРСА структурних складових сплаву МЛ10 з присадкою 0,5 % Sc

Зростання вмісту скандію в сплаві МЛ10 до 0,05 % сприяло деякому підвищенню рівня як механічних, так і жароміцних властивостей. Подальше збільшення концентрації скандію в металі знижувало фізико-механічні характеристики матеріалу (табл. 3.2).

Підвищення температури під час випробування на тривалу міцність до 270° С зменшило час до руйнування в ~ 6 разів. Зразки, що містять 1,0 % Sc, зруйнувалися при їх навантаженні вже за температури 250° С. При цьому спостерігалось огрубіння структури внаслідок інтенсивного виділення інтерметалідів по межах зерен.



Рисунок 3.7 – Мікроструктура сплаву МЛ10 після тривалої витримки (1252 години) і напруженні ($\sigma = 80$ МПа) при температурі 150 °С, $\times 750$

У структурі зразків, що містять понад 0,07 % Sc, спостерігалися грубі прикордонні включення, які призводили до швидкого руйнування зразків під час їхнього випробування.

Виходячи з вищенаведеного, присадка скандію в кількості 0,05 % у сплав МЛ10 є оптимальною і може бути рекомендованою для виготовлення присадкового матеріалу з покращеними властивостями.

Таблиця 3.2 – Середні механічні властивості та тривала міцність сплаву МЛ10 зі Sc

Вміст Sc, мас. %	Механічні властивості		Тривала міцність за $\sigma = 80$ МПа, година		
	σ_B , МПа	δ , %	$T_{\text{досл.}}^{*}=150/250^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{досл.}}=270^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{досл.}}=300^{\circ}\text{C}$
0	235,0	3,6	1252,0/26,2	47,5	9,0
0,02	253,0	4,6	1252,0/56,0	53,1	11,1
0,05	245,0	6,3	1252,0/48,7	71,5	16,0
0,07	240,0	4,0	1252,0/64,0	61,6	12,4
0,10	232,0	3,5	1252,0/48,0	36,5	13,4
0,50	235,0	4,0	1251,0/34,1	24,0	6,7
1,00	169,0	3,3	1252,0/8,0	-	-
Примітка: *) - випробування зразків на тривалу міцність проводили ступінчастим методом: при 150°C (чисельник), потім за 250°C (знаменник).					

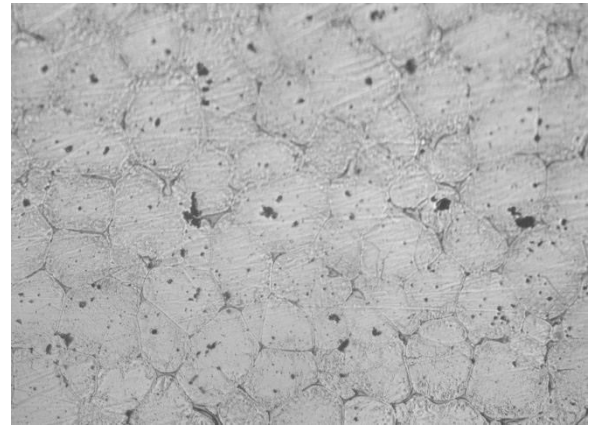
3.3 Випробування розробленого присадкового матеріалу

Проведено дослідження впливу якості заварки виливків зі сплаву МЛ10 присадним матеріалом із цього ж сплаву із вмістом скандію 0,05%. Мікроструктура відливок, що були в експлуатації, характерна для термообробленого стану сплаву МЛ10. У структурі зварного шва спостерігали δ -твердий розчин і γ -фазу, розташовану по межах зерен у вигляді світло-сірих виділень, характерну для литого металу (рис. 3.8).

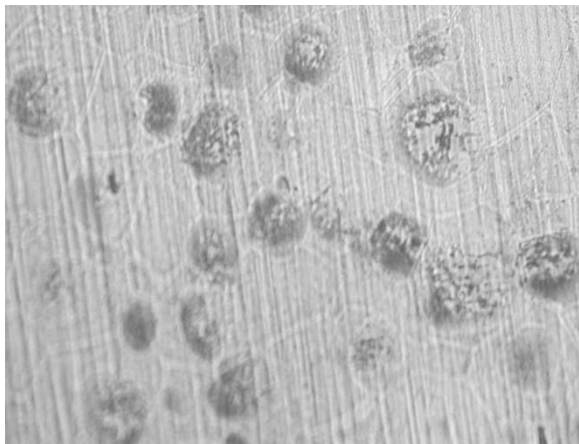
Структурні складові в зварному шві порівняно з основним металом були помітно меншими (табл. 3.3). Мікротвердість зварного шва була дещо вищою порівняно з основним металом.



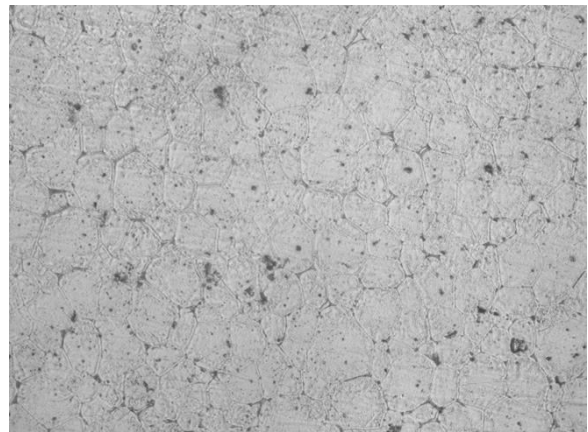
а



б



в



г

а, в - основний метал; б, г - зварний шов

а, б – без скандію; в, г – зі скандієм

Рисунок 3.8 – Мікроструктура виливки і зони зварювання, x500

У зв'язку з тим, що механічні властивості металу зразків, що містять скандій, вищі, ніж у сплаву МЛ10 без скандію, то руйнування зварних зразків під час випробувань відбувалося не за зварним швом, а за основним металом.

Промислове випробування присадного матеріалу сплаву МЛ10 зі скандієм під час заварювання корпусів авіадвигунів зі сплаву МЛ10 дало позитивний результат. Рентгенівський аналіз не виявив наявності несучільностей у заварених зонах. За рівнем механічних властивостей матеріал зварного шва задовольняв вимогам ДСТУ ISO 16220:2008 [5].

Таблиця 3.3 – Середній розмір структурних складових, мікротвердість і механічні властивості зварних зразків зі сплаву МЛ10

Вміст Sc, мас. %	Розмір структурних складових, мкм		Мікротвердість HV _{0,05} , МПа	Механічні властивості	
	матриця	евтектика		σ_B , МПа	δ , %
0	70/34	40/30	910,0/930,0	235/239	3,6/3,2
0,05...0,06	60/25	45/35	980,8/1020,4	245/253	5,6/6,0
Примітка: чисельник – основний метал, знаменник – зварний шов.					

Отже, встановлено, що модифікування сплаву МЛ10 скандієм у кількості до 0,05 % дає змогу отримати дрібнозеренну структуру, підвищений рівень механічних властивостей та довготривалої міцності при 250 °С внаслідок утворення комплексних інтерметалідних фаз і мікролегування δ -твердого розчину.

На підставі експериментальних даних показано можливість виправлення дефектів у литих деталях зі сплаву МЛ10, що дає можливість багаторазового використання дорогих литих деталей авіадвигунів для продовження ресурсу їхньої роботи. Заварювання поверхневих тріщин у деталях зі сплаву МЛ10 скандійвмісним присадним матеріалом дає змогу отримати щільну однорідну зону сплавлення з підвищеними механічними властивостями і забезпечити хорошу зварюваність з основним металом.

3.4 Промислове випробування технології заварювання корпусного лиття авіаційного двигуна Д-36

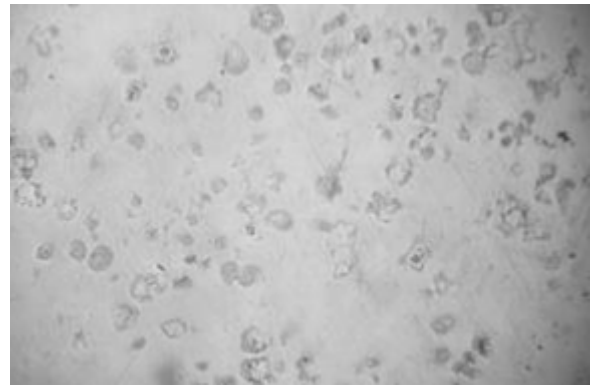
Виготовлення присадного скандійвмісного матеріалу для заварки лиття зі сплаву МЛ10. Було проведено дослідно-промислові плавки сплаву МЛ10 з

виготовлення присадного скандійвмісного матеріалу для заварки тріщин у виливках.

У тигельну піч ПІМ-500 завантажували попередньо нагріті шихтові матеріали та після розплавлення переливали у виїзні тиглі за 650...730 °С. Виємні тиглі встановлювали в роздавальні печі, в яких доводили сплав за хімічним складом і рафінували флюсом ВІ-2 за 740...760 °С. Потім у розплав вводили магній-скандієву лігатуру (9% Sc) з розрахунку отримання 0,05...0,07 % залишкового вмісту скандію, підігрівали до 730 °С, витримували розплав протягом 15 хв. і заливали в кокіль для одержання литих стрижнів Ø 8 x 200 мм, призначених для заварювання виливків. Одночасно заливали комплексну пробу для контролю механічних і спеціальних властивостей магнієвих сплавів. Метал усіх дослідно-промислових плавок мав щільний дрібнодисперсний матовий злам (рис. 3.9, а). Мікроструктура сплаву МЛ10 зі Sc уявляє δ-твердий розчин з наявністю евтектики (δ + γ) сферичної форми і одиничних інтерметалідів (рис. 3.9, б). Механічні властивості металу задовольняли вимогам ДСТУ ISO 16220:2008 [5] і перебували в межах: $\sigma_b = 245...255$ МПа, $\delta = 4,0...5,0$ %.



а



б

а - макроструктура, x5; б – мікроструктура, x250

Рисунок 3.9 – Структура сплаву МЛ10 зі Sc (промислові плавки)

Заварювання тріщин корпусів авіадвигунів.

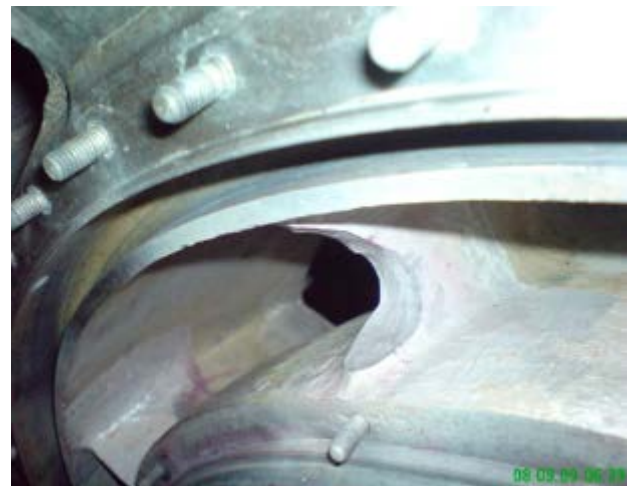
Корпуси авіадвигунів, що пройшли гарантоване напрацювання льотних годин і надійшли на плановий ремонт, проходили дефектування. Поверхневі тріщини на корпусах (рис. 3.10 а) зі сплаву МЛ10 виявляли візуальним,

кольоровим і люмінісцентним методами. Проводили оброблення виявлених тріщин до їх повного видалення (рис. 3.10 б).

Підготовлені вироби поміщали в термічну піч для нагрівання до 200 °С і витримували 6 годин, після чого їх витягали з печі та розпочинали заварювання. Заварювання проводили аргано-дуговим способом з використанням невитратного вольфрамового електрода із застосуванням зварювального трансформатора ТД-500, осцилятора ОСПІ-3 і баластного реостата РБ-35 за сили струму 140...220 А та витрати аргону 14...18 л/хв. Як присадний матеріал використовували стрижні Ø 8 x 200 мм зі сплаву МЛ10 зі скандієм. Після заварки деталі завантажували в термічну піч і охолоджували разом із піччю до температури не вище 120 °С. Заварені ділянки (рис. 3.11 а) контролювали і зачищали до отримання необхідних геометричних розмірів (рис. 3.11 б).



а



б

а - до оброблення, х0,1; б - після оброблення тріщини, х0,15

Рисунок 3.10 – Корпус авіадвигуна з тріщинами

Частину відновлених корпусів було розрізано для металографічного контролю та виготовлення зразків для механічних випробувань. Металографічний контроль заварених елементів корпусу показав, що метал зварного шва та основи деталі мав щільну однорідну структуру без будь-яких

дефектів. Мікроструктура основного металу характерна для термообробленого стану сплаву МЛ10, зварний шов складався з δ -твердого розчину та інтерметалідної фази. При цьому, розмір структурних складових у зварному шві значно менший, ніж в основному металі (рис. 3.12).



а



в

а - після заварки; б - після зачищення відновлених ділянок, $\times 0,1$

Рисунок 3.11 – Елемент корпусу Д-36

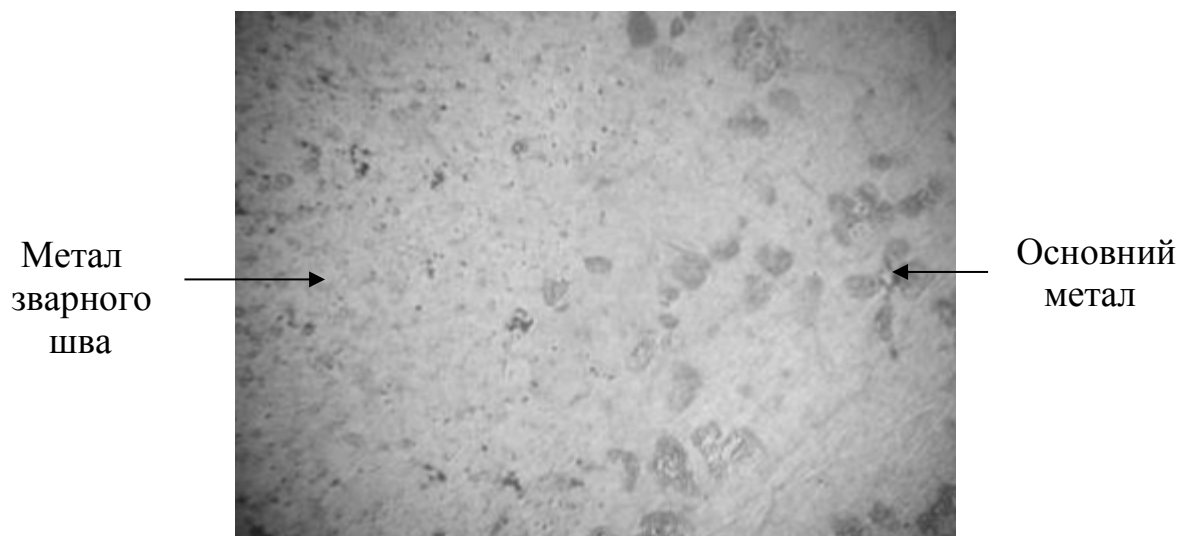


Рисунок 3.12 – Мікроструктура навколошовної зони звареного корпусу авіадвигуна Д-36, $\times 200$.

Зразки для механічних випробувань виготовляли так, щоб межа перехідної зони від зварного шва до основного металу знаходилася в середній частині зразків. Для визначення цієї межі зразки травили реактивом, що складається з 1 % азотної кислоти, 20 % оцтової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколю. Рентгенконтролем встановлено хорошу якість зварювання. За рівнем механічних властивостей ($\sigma_b = 230...235$ МПа, $\delta = 3,5...4,0$ %) досліджуваний метал задовольняв вимоги ДСТУ ISO 16220:2008 [5], причому руйнування зразків під час випробувань відбувалося не по зварному шву, а по основному металу.

Розроблена технологія заварювання поверхневих тріщин корпусів авіадвигунів Д-36, виготовлених зі сплаву МЛ10, скандійвмісним присадковим матеріалом дає змогу одержати литі деталі, які задовольняють вимогам нормативно-технічної документації та забезпечують гарантовані експлуатаційні терміни для відповідальних агрегатів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 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 [28]:

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) 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;

є) 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;

ж) 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;

з) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [29].

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) 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.

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 водопостачання постаратися 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 [30-32].

4.3 Заходи з виробничої санітарії

а) 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 % 45при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

б) 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 [33-35].

4.4 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 небезпеки, 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 [36-37].

4.5 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 типомodelей 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 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 напіваавтоматичні 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) [38-39].

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Розробка присадного матеріалу для заварювання дефектів авіаційних виливків із сплаву МЛ10 має велику актуальність в контексті інтеграції України в європейський та світовий бізнес-простір. З точки зору маркетингу, це представляє значущий потенціал для українських підприємств у сегменті авіаційної промисловості.

Споживчий попит включає в себе зростання потреби у сучасних матеріалах для авіаційних виливків визначається стрімким розвитком авіаційної галузі як національної, так і світової. Конкуренція на ринку авіаційних технологій створює попит на нові матеріали, які відповідають вимогам високих технічних стандартів.

З моменту інтеграції України в європейський бізнес-простір, підприємства повинні відповідати високим стандартам якості та безпеки, що є вимогою для взаємодії з європейськими партнерами. Розробка нового присадкового матеріалу може стати ключовим фактором для входження на міжнародний ринок та співпраці з міжнародними авіакомпаніями.

Співпраця з іншими підприємствами в рамках цілого ланцюга виробництва може забезпечити ефективність та конкурентоспроможність на ринку. Взаємодія з українськими та міжнародними стейкхолдерами в авіаційній галузі сприятиме створенню стратегічних партнерств.

Розробка нових процесів механічної обробки металів в контексті використання жароміцних сплавів є важливим кроком у напрямку технічного прогресу в авіаційній промисловості. Висока технічна якість нових матеріалів може визначити конкурентоспроможність українських виробників.

Розробка та впровадження нового присадкового матеріалу може стати вагомим аргументом у відносинах із стейкхолдерами, включаючи клієнтів та інвесторів. Системний підхід до взаємодії із стейкхолдерами сприяє сталому розвитку та позитивному іміджу підприємства.

Отже, розробка присадкового матеріалу для заварювання дефектів авіаційних виливків із сплаву МЛ10 відповідає вимогам сучасного ринку, забезпечуючи високу якість та відповідність міжнародним стандартам у сфері авіаційних технологій.

5.2 Послідовний аналіз

Виконаний аналіз напрямків застосування та вигоди для споживачів (табл. 5.1). Надано цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів. Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Створення сплавів, які використовують переваги нових та нестандартних технологічних процесів з урахуванням питань ресурсу та термінів експлуатації	Авіаційне будівництво в цілому, в тому числі й двигунобудування	Збільшення строку експлуатації внаслідок проведення ремонтних робіт у міжопераційному періоді.

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	1 Підприємства машинобудування України 2 Підприємства машинобудування Європи
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає

Кінець таблиці 5.2

Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потрібні великі інвестиції
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	1 Сертифікація обладнання 2 Вимоги авіаційних правил

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)
Присадкові матеріали для зварювання магнієвих сплавів	Підприємства машинобудування України та Європи	Робота з широкою номенклатурою деталей, відмінностей немає	Висока якість зварного шва, ресурс

Виконаний аналіз SWOT- аналіз середовища реалізації інноваційного проект. Результати аналізу приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
– технічна експертиза – стратегічні партнерства – інноваційні технології – стабільність виробництва	– високі витрати на дослідження та розробку – залежність від обмежених ресурсів – складність впровадження – можливість конфлікту
Можливості:	Загрози:
– розширення глобального ринку – створення кастомізованих рішень – співпраця з дослідницькими установами – зростання попиту на екологічно чисті матеріали	– конкуренція від гравців на ринку – політичні та економічні нестабільності – технологічні ризики – зміни в регулюючому середовищі

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
Авіакомпанії та виробники літаків	Потребують високоякісних матеріалів для конструкції та ремонту важких металевих деталей літаків	Значний попит	Висока	Низька. Вхід у сегмент для нових учасників важкий через високі витрати на дослідження та розробку, а також строгі вимоги до якості та безпеки
Виробники двигунів та компонентів	Потребують матеріали, які можуть витримувати екстремальні умови та допомагати у покращенні ефективності та надійності авіаційних двигунів.	Великий попит	Висока	Середня. Для входу нових гравців важливо мати високу технічну експертизу та здатність конкурувати за якість та інновації.

Кінець таблиці 5.5

Ремонтні та технічні служби	Потребують ефективних матеріалів для локального виправлення дефектів та підтримки технічних операцій.	Помірний, але стабільний попит	Помірна	Середня. Ринок ремонтних та технічних послуг відкритий для нових учасників, які можуть надавати ефективні та інноваційні рішення.
Дослідницькі інститути та лабораторії	Потребують матеріалів для проведення експериментів, оцінки властивостей та вдосконалення технологій виробництва.	Високий попит	Висока	Висока. Нові дослідницькі групи можуть вносити свої доповіді та розробки в сегмент, але важливо мати дослідницький потенціал та ресурси.
Галузеві експерти та консультанти	Потребують інноваційних рішень та консультацій з використання нових матеріалів.	Помірний попит	Середня	Висока. Нові консультанти можуть вступити в галузь з високою експертизою та здатністю розрізняти себе на ринку.

Виконана ідентифікація стейкхолдерів, виконана їх пріоритизація та побудована Карта стейкхолдерів, яка дозволить візуалізувати картину взаємозв'язків стейкхолдерів. З метою відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на Kartі виокремлено три концентричних області, в яких розміщено всіх зацікавлених осіб інноваційного проекту за можливостями впливу на них ініціатора проекту. Область внутрішніх стейкхолдерів – область повноважень/відповідальності ініціатора. Внутрішні зацікавлені сторони

знаходяться в прямій підлеглості ініціатора, що дозволяє використовувати досить прості методи адміністрування проекту (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Визначили витрати на оплату праці з урахуванням балансу робочого часу одного працівника. Витрати за цією статтею складаються із планового фонду зарплати усіх категорій працівників, які задіяні у проведенні досліджень (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	22000	20	4400	26400	316800	69696
Старший науковий співробітник	2	18500	20	3700	22200	266400	58608

Кінець таблиці 5.6

Молодший науковий співробітник	2	15000	20	3000	18000	216000	47520
Лаборант	3	10000	20	2000	12000	144000	31680
Разом	8	97000	—	13100	78600	943200	207504

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення макетів та дослідних зразків (табл. 5.7)

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Папір	—	10 блоків	120	1200
Ручка	—	100 одиниць	15	1500
Олівець	—	100 одиниць	10	1000
Зразки	30	30 одиниць	450	13500
Реактиви	—	5 одиниць	900	4500
Змінні лінзи	—	10 одиниць	3200	32000
Тара зразків	—	30 одиниць	50	1500
Разом				55200

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Виробнича програма	Обсяг послуг	Тарифи	Сума, грн
Електропостачання	—	600 кВт	2,64 грн/ кВт	1584
Водопостачання	—	5 м ³	25 грн/м ³	125
Теплопостачання	—	3,42 Гкал	1380 грн/Гкал	4720
Охоронна система	—	1	1500	1500
Утилізація реактивів	5 одиниць	5	200 грн	1000
Разом				8929

Визначили річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації при терміні експлуатації у 5 років (табл. 5.9).

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	500000	1000000	200000	20000
Електронний мікроскоп	1	1000000	1000000	200000	20000
Прилад для контролю хімічного складу сплавів	1	1500000	1500000	300000	30000
Установка для контролю вмісту газів	1	100000	100000	20000	400
Комп'ютер	4	25000	100000	20000	400
Принтер	2	15000	30000	6000	120
Разом			3730000	746000	74600

Відображаємо кошторис витрат на основі даних, вказаних в табл. 5.6-5.9. В табл. 5.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати, грн
Фонд заробітної плати, рік	943200
ЄСВ, рік	207504
Матеріальні витрати, рік	55200
Вартість спожитих послуг, рік	8929
Амортизація обладнання, рік	746000
Поточний ремонт, рік	74600
Виробнича собівартість	2086564
Адміністративні витрати 50%	453600
Повна собівартість	4575597

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що використання стрижнів зі сплаву МЛ10 з додаванням Re дозволяє отримувати

більш якісний зварний шов з кращими показниками механічних властивостей, що дозволяє розширити номенклатуру деталей, які можна ремонтувати з використанням розробленої технології наплавлення, а також збільшити ресурс роботи деталей, відремонтованих з використанням цієї технології.

Таблиця 5.11 – Орієнтовна ціна матеріалів для виготовлення сплавів МЛ10 та МЛ10+Re

Назва матеріалу	Ціна, грн/кг	Вміст % МЛ10	Ціна 1 кг МЛ10	Вміст % МЛ10+ Sc	Ціна 1 кг МЛ10+ Sc
Магній Mg	750	96,2	721,5	96,16	721,2
Ніодим Nd	4000	2,6	104	2,6	104
Цирконій Zr	1990	0,7	13,93	0,7	13,93
Цинк Zn	260	0,41	1,07	0,4	1,07
Алюміній Al	600	0,02	0,12	0,02	0,12
Кремній Si	280	0,03	0,08	0,03	0,08
Залізо Fe	100	0,01	0,01	0,01	0,01
Мідь Cu	800	0,03	0,24	0,03	0,24
Скандій Sc	200	–	–	0,05	0,1
Разом	–	100%	840,95	100%	840,75

Економічна ефективність використання нового матеріалу визначається наступним чином:

$$E = (C_6 K_e - C_n) \cdot N, \text{ грн.},$$

де C_6 – собівартість базового виробу;

K_e – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу

C_n – собівартість нового виробу

$$E = (840,95 \cdot 1,5 - 840,75) \cdot 1 = 420,675 \text{ грн.}$$

Отже, економія на виготовленні 1 кг присадкового матеріалу для наплавлення деталей зі сплаву МЛ10 становить 420,675 грн при коефіцієнті експлуатаційного ресурсу 1,5. Це свідчить про те, що додавання невеликої кількості скандію до складу присадкового матеріалу дозволяє знизити його собівартість через зменшення кількості коштовного магнію та значного підвищення експлуатаційного терміну для деталей авіаційних двигунів та елементів конструкції, виготовлених із магнієвого сплаву МЛ10 та відремонтованих з розробленим матеріалом та технологією.

ВИСНОВКИ

В ході аналізу було визначено, що авіаційні двигуни після гарантійних термінів експлуатації проходять профілактичні огляди, під час яких на окремих елементах, що виготовляються з магнієвих сплавів, у деяких випадках виявляють поверхневі тріщини. Для ремонту таких дефектів застосовують технологію заварювання. Проте, існують деякі складнощі при отримання якісного наплавленого шва. Тому, актуальним є розроблення присадкового матеріалу для отримання якісного зварного шва. Для цього було проведено дослідження додавання різної кількості скандію у присадковий матеріал зі сплаву МЛ10. Встановлено, що оптимальним рівнем механічних та експлуатаційних властивостей володіє присадка МЛ10 + 0,05%Sc.

З'ясовано, що розроблена технологія заварювання поверхневих тріщин корпусів авіадвигунів Д-36, виготовлених зі сплаву МЛ10, скандійвмісним присадковим матеріалом дає змогу одержати литі деталі, які задовольняють вимогам нормативно-технічної документації та забезпечують гарантовані експлуатаційні терміни для відповідальних агрегатів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Авіаційно-космічні матеріали та технології / [В.А. Богуслаєв. [В.А. Богуслаєв, А.Я. Качан, Н.Є. Калініна та ін.]. – Запоріжжя : Вид-во ВАР "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. ДСТУ ISO 16220:2008. Магній і магнієві сплави. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови. – Чинний від 2010-01-01. – Вид. офіц. – Київ : УкрНДНЦ, 2009. – 21 с.
6. Okamoto H. Mg-Zr (Magnesium-Zirconium) // J. Phase Equilibria. – 2002. 23(2). – С. 198–199. <https://doi.org/10.1361/1054971023603991>
7. Yousuke, T. Crushing of grain of cast details from magnesium alloys / Tamura Yousuke // Chiba kogyo kenkyu – Rept Chiba Inst. Technol. 1999. 46. – P. 349 - 350.
8. Gill L. Microstructure/property relationships of three Mg-RE-Zn-Zr alloys / L.Gill, G.W. Lorimer, P. Lyon // Magnesium: Proceedings of the 6th international conference. 2005. C. 421 – 426
9. Okamoto H. Mg-Nd (Magnesium-Neodymium) // J. Phase Equilibria. 1991. 12(2). – 249-250. <https://doi.org/10.1007/BF02645728>
10. Magnesium alloys. In: Materials Handbook : 10th edn. / H.I. Burrier // – Vol. 1. ASM International. – Materials Park, OH, 1990. – 380 p.

11. Кондратюк С.Є. Структурутворення, спадковість та властивості литої сталі / С.Є. Кондратюк – К. : Наукова думка, 2010. – 176 с.
12. Mingxu Xia. Shrinkable defects in magnesian moulding under pressure / Xia Mingxu, Yuan Sen, Jiang Bailing [and oth.] // *Tezhong zhuzao ji youse hein: Spec.Cast. and Nonferrous Alloys*. – 2002. – № 6. – P. 23-25.
13. Магнієві сплави: довідник: у 2 ч. Ч. 2: Технологія виробництва і властивості виливків і деформованих напівфабрикатів / [Антонов Е.Г., Арбузов Б.А., Бабкін В.М. та ін.]; ред. І.І. Гур'єв, М.В. Чухров - М.: Металургія, 1978. - 294 с. [Російською].
14. Yeshuang Wang. Research of hot cracks of magnesian alloy AZ91 / Wang Yeshuang, Ding Wenjiang, Wang Qudong [and oth.] // *Jinshu xuebao: Acta met. sin.* – 2001. – 37, № 5. – P. 527-530.
15. Kazuhiro Kusukava. Features of origin of fatigue cracks and sensitivity a cut of magnesian alloy AZ92A / Kusukava Kazuhiro, Takao Kenichi // *Nikon kikai gakkai ronbunshu: Trans. Jap. Soc. Mech.Eng.A.* – 2002. – 68, N 671. – P. 1092-1097.
16. Lee Choong Do. Effect of microporosity on tensile propoities of as-cast AZ91D magnesium alloy / Do Lee Choong // *Metals and Mater. Int.* – 2002. – 8, N 3. – P. 283-288.
17. Burt H. The Effect of Hot Isostatic Pressing of the Greep and Fracture Behavior of the Cast Superallog Mar-M002 / H. Burt, J. P. Dennison, J. C. Elliot [and oth.] // *Materials Sciena and Engineering*, 1982. – № 53. – P. 245-250.
18. Ключихін В.В. Структура та властивості виливків з нікелевого сплаву після гарячого ізостатичного пресування / В.В. Ключихін, П.Д. Жеманюк, Е.І. Цивирко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2000. – № 2. – С. 20-23.
19. Сварка в самолетостроении / [Кривов Г.А., Рябов В.Р., Ищенко А.Я. и др]. – К. : Изд-во МИИВЦ. – 1998. – 695 с.
20. A review of laser welding techniques for magnesium alloys / X. Cao, M. Jahazi, J. Immarrigeon [and oth.] // *J. Mater. Process. Technol.* – 2006. – 171, N 2. – P. 188-204.

21. Dieter B. Innovations in casting alloys – aluminium and magnesium castings / Brungs Dieter, Mertz Andreas // Cast. Plant and Technol. Int. – 2000. – 16, N 4. – P. 8-12.
22. Їальченко Ю.В.; Петрушинець Л.В. Сучасні технологічні прийоми зварювання тиском магнієвих сплавів (Огляд). Automatic Welding/ Avtomaticheskaia Svarka. 2022. 6. – С. 36-48.
23. Klain P. The welding of Magnesium Alloys / P. Klain // Welding Journal. – 1957. – N 7. – P. 189-194.
24. ДСТУ 2187-93. Магній первинний у чушках. Технічні умови. – Чинний від 1994-01-01. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1993. – 26 с.
25. ГОСТ 3640-94. Цинк. Технічні умови. – Чинний від 1999-01-01. – Вид. офіц. – Москва : Стандартінформ, 1998. – 20 с.
26. 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.
27. ДСТУ ISO 6892-2:2020 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 2. Метод випробування за підвищених температур. Прийнято та надано чинності 2021-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 21 с.
28. 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).
29. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р.–К.:ВРУ України, 1998.– URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. – (Закон України).
30. 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).

31. 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).
32. 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).
33. 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).
34. 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).
35. 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).
36. 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).
37. 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).

38. 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).
39. 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.