МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

__бакалавра__
(ступінь вищої освіти)

на тему Підвищення фізико-механічних властивостей дротів повітряних ліній електропостачання

Виконала: студентка 4 курсу, групи БАД–212

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

МІТЯЄВА З.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник _к.т.н., доц. АКІМОВ І.В._____
(прізвище та ініціали)

Рецензент _к.т.н., доц. КАПУСТЯН О.Є.____
(прізвище та ініціали)

2026

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувач кафедри
Іван АКІМОВ
«20» квітня 2026 року

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

МІТЯЄВОЇ Зінаїди Анатоліївни
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Підвищення фізико-механічних властивостей дротів повітряних ліній електропостачання».
керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. АКІМОВ Іван Васильович,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» 04 20 26 року №173
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20.05.2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) алюмінієві сплави для виготовлення дротів, що потребують підвищення механічних властивостей.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Області застосування та умови експлуатації дротів повітряних ліній електропостачання. Вимоги до алюмінієвих сплавів з яких виготовляють дроти. Методи підвищення фізико-механічних властивостей дротів. Технологічні рекомендації щодо рафінувально-модифікувального оброблення.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)
Презентація на 27 слайдах

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	**АКІМОВ І.В., в.о. зав. каф., доц.**	20.04.2026	28.04.2026
2	**АКІМОВ І.В., в.о. зав. каф., доц.**	28.04.2026	05.05.2026
3	**АКІМОВ І.В., в.о. зав. каф., доц.**	05.05.2026	15.05.2026
Нормоконтроль	**ПЕТРУША Ю.Ю. доцент**	20.05.2026	20.05.2026

7. Дата видачі завдання «__20_____» ___квітня_____2026_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	**Вступ**	**22.04.2026**	виконан.
2	**Розділ 1**	**28.04.2026**	виконан.
3	**Розділ 2**	**05.05.2026**	виконан.
4	**Розділ 3**	**15.05.2026**	виконан.
5	**Попередній захист**	**22.05.2026**	виконан.

Студент(ка) _____ **Зінаїда МІТЯЄВА**
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ **Іван АКІМОВ**
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: 47 с., 4 табл., 9 рис., 20 джерел.

ВИСОКОВОЛЬТНІ ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ, ДРОТИ, АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, РАФІНУВАЛЬНО–МОДИФІКУВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС, ВЛАСТИВОСТІ.

Об’єкт досліджень – процеси забезпечення підвищеного комплексу властивостей алюмінієвих матеріалів, що призначені для виготовлення дротів високовольтних повітряних ліній електропостачання.

Предмет дослідження – технологія рафінувально-модифікувального оброблення електротехнічного алюмінієвого сплаву, що призначена забезпечити отримання кінцевого виробу підвищеної якості.

Мета роботи – вирішення матеріалознавчої задачі підвищення фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів, що призначені для виготовлення дротів високовольтних повітряних ліній електропостачання.

Сутність дипломної роботи полягає в розробленні нових підходів та отриманні нових даних щодо забезпечення підвищеного рівня фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей експериментальних сплавів на підставі вивчення та визначення механізмів впливу на ці властивості. Це дозволить розширити їхні області застосування з гарантованою економічною ефективністю.

Виконана дипломна робота містить наступні складові: огляд технічної літератури за темою дипломної роботи; опис основних технологічних етапів, що пов’язані з забезпеченням високої якості вихідних матеріалів для виготовлення дротів високовольтних повітряних ліній електропостачання; оброблення та аналіз експериментальних даних; висновки.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних познак, одиниць і термінів.....6
Вступ.....7
1 Загальна характеристика електричних мереж та вимог до їх складових……10
1.1 Роль та систематизація електричних мереж ……..…….....10
1.2 Основні складові електричних мереж ……..……14
1.3 Вимоги до основних складових електричних мереж……17
1.4 Постановка мети та задач дослідження…… ……27
2 Матеріали і методика досліджень……..……28
2.1 Матеріали дослідження……..…….28
2.2 Визначення хімічного складу..……...28
2.3 Механічні випробування……..……...29
2.4 Визначення корозійної стійкості…..…….……29
2.5 Металографічні дослідження…..…..……31
2.6 Аналіз електротехнічних показників……..…….....31
2.7 Оцінка похибки експериментів……..…….....31
3 Підвищення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей дротів повітряних ліній електропостачання……32
3.1 Підвищення механічних властивостей алюмінієвих дротів……..……..32
3.2 Розробка рафінувально-модифікувального комплексу……33
3.3 Технологія виготовлення експериментального сплаву системи $Al - Zr$…38
Висновки.....44
Перелік джерел посилань.....46

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ВДЕ – відновлювальні джерела електроенергії;

ВПЛ – високовольтні повітряні лінії;

ЕМ – електрична мережа;

ЛЕП – лінія електропередавання;

МЕК – міжнародна електротехнічна комісія;

ПЛ – повітряна лінія;

ПС – електрична підстанція;

ПЛЕП – повітряна лінія електропередавання;

РМК – рафінувально-модифікувальний комплекс;

ВСТУП

У розвитку як світової, так і вітчизняної електроенергетики одну з найважливіших ролей відіграють високовольтні повітряні лінії (ВПЛ) електропостачання. Саме від їхнього стану залежать показники ефективності, надійності, якості, терміну експлуатації енергосистеми в цілому.

З урахуванням даних [1, 2] фактичні та прогнозовані об’єми споживання електроенергії в Україні за різними групами споживачів мають стійку тенденцію до зростання (див. табл.).

Одним із найбільш актуальних викликів сучасної енергетичної галузі є забезпечення стабільної роботи електростанцій, мереж та супутньої інфраструктури. Статистичні дані свідчать про високу аварійність у деяких енергосистемах, де кількість інцидентів вимірюється десятками на рік. Це призводить до значного недовідпуску ресурсу, обсяги якого можуть сягати мільйонів кіловат-годин щорічно, що негативно впливає на кінцевих споживачів.

До переліку фундаментальних проблем, що стоять перед українською енергетикою, належать:

– глибока фізична та моральна застарілість технічного парку;

– пошкодження енергетичних об'єктів внаслідок бойових дій;

– обмежена пропускна здатність мереж для приєднання генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ);

– високий коефіцієнт втрат енергії під час транспортування;

– дефіцит сучасних автоматизованих рішень у системі управління.

Обслуговування цієї розгалуженої системи потребує колосальних витрат. Станом на 2022 рік у структурі профільного міністерства функціонувало 554 підрозділи, що забезпечували роботу розподільних мереж напругою 0,4…150 кВ. Штат цих організацій перевищував 25 тисяч співробітників, які опікувалися експлуатацією повітряних ліній загальною протяжністю майже 375 тис. км.

Таблиця – Орієнтовні об’єми споживання електроенергії в Україні [1, 2]

Групи споживачів	Об’єм спожитої електроенергії, млн. кВт·год			
	2016 р.	2018 р.	2020 р.	2022 р.
Відпуск електричної енергії споживачам	101868	115539	125938	132235
(+) Збільшення (–) Зменшення від минулого року	–1,6	0,7	0,9	0,5
Промисловість за основними галузями:				
Паливна	4031,8	4113,2	4208,3	4280,1
Металургійна	27978	27116	27524	27085
Хімічна та нафтохімічна	1282	1454	1584	1664
Машинобудівна	2853	3235	3527	3703
Будівельних матеріалів	2048,8	2047,5	2055,7	2022,8
Харчова та переробна	4078,4	4315,9	4428,8	4477,6
Сільськогосподарська	2298	2606	2841	2983
Транспортна	6684,4	6535,0	6561,1	6359,0
Будівництво	749,1	766,8	773,7	767,5
Комунально-побутові споживачі	14830	15565	16004	16228
Інші непромислові споживачі	5770,3	5513,5	5574,2	5353,4
Населення	31552	35787	39008	40958

Сучасний стан розподільних електричних мереж напругою 6…10 кВ характеризується критичним дефіцитом пропускної спроможності та незадовільним рівнем впровадження засобів автоматизації [3].

Високовольтні лінії електропередач є важливою складовою енергетичної інфраструктури, яка забезпечує перенос електроенергії від виробників до споживачів. Проте, більшість існуючих високовольтних ліній були побудовані десятки років тому і зараз потребують модернізації та підвищення ефективності.

Однією з проблем застарілих високовольтних ліній електропередач є високі втрати енергії через опір проводів, що призводить до зменшення

ефективності енергетичної системи та збільшення витрат енергоресурсів. Крім того, існуючі матеріали для провідників та ізоляції можуть бути недостатньо ефективними при високих напругах та температурах, що призводить до зниження надійності та безпеки електромережі.

Згідно зі звітом Національної енергетичної компанії України «Національна звітність про функціонування електричної системи України в 2021 році», станом на кінець 2021 року в Україні було в експлуатації 374978 км високовольтних ліній електропередач, з яких 54,5 % мають вік понад 20 років. Також, згідно зі звітом, більшість високовольтних ліній електропередач в Україні використовують провід зі сталі, який має недоліки у порівнянні з сучасними матеріалами, такими як алюміній і композитні матеріали [2].

Тому на сьогодні невідкладного вирішення в Україні потребують дві найбільш актуальні задачі:

– оновлення функціонуючих високовольтних повітряних ліній, у зв’язку з їхнім зносом або руйнуванням унаслідок військових дій;

– збільшення пропускної здатності ВПЛ при використанні вже встановлених опор.

Вирішення цих задач потребує значної кількості дротів з алюмінієвих сплавів, з чого постає нова, не менш актуальна задача – розробка нових провідникових сплавів на алюмінієвій основі з підвищеним рівнем таких експлуатаційних властивостей, як термоміцність і термостійкість. Одночасне забезпечення даних властивостей у поєднанні з невисокою вагою дротів дозволить:

– збільшити пропускну потужність ВПЛ за рахунок підвищення номінальної напруги мережі та допущення більш високої робочої температури;

– допускати більшу за протяжністю відстань між опорами при монтажі нових ВПЛ, що в обох випадках дозволить мати позитивну економічну складову.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА ВИМОГ ДО ЇХ СКЛАДОВИХ

1.1 Роль та систематизація електричних мереж

Фундаментальна функція електричних мереж полягає у забезпеченні транзиту та розподілу електроенергії від генеруючих потужностей до кінцевих споживачів. Окрім безпосереднього постачання, мережева інфраструктура дозволяє передавати енергію на значні відстані, сполучаючи віддалені райони споживання з центрами генерації.

Важливою задачею мереж є інтеграція окремих електростанцій та споживачів у єдину енергосистему для синхронної роботи. Таке об’єднання критично важливе для стабілізації параметрів мережі, підвищення економічної ефективності та гарантування безперебійного живлення.

Створення інтегрованих енергетичних об’єднань надає низку стратегічних переваг:

1. Гарантована надійність. Завдяки дублюванню шляхів передачі енергії створюється резерв, що дозволяє підтримувати живлення об’єктів навіть у разі виходу з ладу окремих ліній чи джерел.

2. Оптимізація сумарного навантаження. Завдяки розбіжності пікових періодів споживання у різних групах абонентів, загальний максимум навантаження системи знижується. У цьому контексті виокремлюють два специфічні чинники:

2.1. Географічна довгота (часовий ефект). Різниця у часових поясах призводить до того, що піки споживання в енергосистемах, віддалених по горизонталі, не збігаються. Це дозволяє здійснювати добові перетоки потужності між східними та західними регіонами.

2.2. Географічна широта (сезонний ефект). Різниця у тривалості світлового дня та кліматичних умовах зумовлює сезонні коливання попиту. Це

створює умови для перерозподілу енергії між північними та південними територіями залежно від пори року.

3. Мінімізація резервних потужностей. Створення загальносистемного аварійного та оперативного резерву дозволяє зменшити кількість необхідного обладнання на кожній окремій станції, оскільки ресурси розподіляються між усіма учасниками об’єднання.

4. Економічна доцільність. Концентрація потужностей на великих об’єктах із використанням високоефективних агрегатів дозволяє знизити витрати палива на одиницю виробленої енергії, що суттєво зменшує її собівартість.

5. Ефективний енергомікс. Комбінована робота різних типів генерації (АЕС, ТЕС, ГЕС, ВДЕ) дозволяє пріоритетно використовувати найбільш дешеві або відновлювані джерела палива.

6. Кооперація при нерівномірній генерації. Енергосистеми можуть надавати взаємну підтримку у періоди сезонних коливань виробництва (наприклад, під час паводків на ГЕС або змінної активності вітру/сонця).

7. Технологічна гнучкість. Можливість зміни конфігурації схем та вибору оптимальних джерел живлення робить систему більш маневреною та адаптивною до експлуатаційних потреб. Зменшення сумарного максимум навантаження електричної системи через незбіг максимумів навантажень різних споживачів. Тут особливої уваги заслуговують ефекти довготи та широти.

8. Ефект довготи полягає у зменшенні сумарного максимуму навантаження енергооб’єднання через незбіг у часі максимумів навантажень окремих електричних систем, віддалених по довготі. Тут характерні добові перетікання електричної енергії зі сходу на захід або з заходу на схід відповідно до часу доби [3].

Експлуатаційні та конструктивні параметри електромереж мають гарантувати:

– стабільність живлення: високий рівень відмовостійкості та мінімізацію аварійних відключень;

– стандартизацію: відповідність параметрів енергії чинним нормативам;

– експлуатаційну безпеку: зручність та захищеність персоналу під час роботи з обладнанням;

– фінансову доцільність: оптимізацію витрат у межах всієї енергосистеми;

– модернізаційний потенціал: можливість розширення мережі у майбутньому без її повної перебудови.

Через значну складність сучасних електроенергетичних комплексів як багатокомпонентних інженерних структур, єдиної універсальної методики їхньої систематизації не існує. На практиці розрізняють наступні ключові ознаки класифікації електричних мереж:

I. Тип електричного струму:
- мережі постійного струму;
- мережі змінного струму:
    а) стандартної промислової частоти (50 Гц або 60 Гц залежно від регіону);
    б) спеціалізованої частоти (наприклад, авіаційні або морські системи, що використовують 400 Гц);
- імпульсні системи.

II. Спосіб організації електроживлення:
- однофазні системи;
- трифазні системи:
    а) трипровідні (без нейтралі);
    б) чотирипровідні (з нейтраллю);
- багатофазні системи.

III. Класифікація за рівнем номінальної напруги:
- низьковольтні мережі: до 1 кВ включно;
- високовольтні: понад 1 кВ:
    а) низька напруга (у сегменті високих): до 10 кВ;
    б) середня напруга: 35 кВ.;

в) висока напруга: від 110 до 220 кВ;

г) надвисока напруга: 330 кВ та вище.

IV. Режим заземлення нейтралі:

– мережі з глухозаземленою нейтраллю;

– системи з ізольованою нейтраллю;

– мережі з компенсованою нейтраллю (через дугогасні реактори).

V. Функціональне призначення та масштаб:

– локальні (місцеві) мережі: обслуговують промислові об'єкти, населені пункти або сільську місцевість. Діють у радіусі до 20 км з напругою переважно до 35 кВ;

– районні мережі: забезпечують електроенергією великі географічні зони, працюючи на напрузі 110…220 кВ (іноді 330 кВ);

– системоутворюючі (магістральні) мережі: формують основу енергооб’єднань, зв’язуючи районні системи для паралельної роботи. Використовують лінії 330 кВ і вище.

VI. Категорії споживачів:

– мережі житлового (міського) сектора;

– промислові енергосистеми;

– сільськогосподарські мережі.

VII. Топологія (конфігурація) мережі:

– розімкнені:

а) радіальні (живлення від одного центру);

б) магістральні (послідовне підключення);

– замкнені (кільцеві або складні мережі): забезпечують живлення споживачів з кількох сторін.

VIII. Режим експлуатації:

– автономні системи: працюють незалежно від загальної енергомережі;

– інтегровані (об’єднані): функціонують у складі глобальних енергосистем.

IX. Спосіб конструктивного виконання:

– повітряні лінії (ПЛ): передача через неізольовані або ізольовані проводи по опорах;

– кабельні лінії (КЛ): прокладання ліній у землі, тунелях або по спорудах.;

– внутрішня проводка: електричні комунікації всередині будівель та виробничих приміщень [3].

1.2 Основні складові електричних мереж

Структура будь-якої енергетичної системи базується на інтеграції електростанцій, магістральних та районних електромереж для транспортування ресурсу, а також вузлових підстанцій, що виконують функції трансформації та розподілу енергії між мережевими рівнями. Принципова схема такої взаємодії наведена на рисунку 1.1. Кінцевою ланкою системи є розподільчі мережі, що безпосередньо забезпечують живлення споживачів. Задля оптимізації техніко-економічних показників, усі регіональні енергоджерела об’єднуються в єдиний комплекс для синхронної роботи на спільне навантаження через систему ліній електропередачі відповідних класів напруги (див. рис. 1.2).

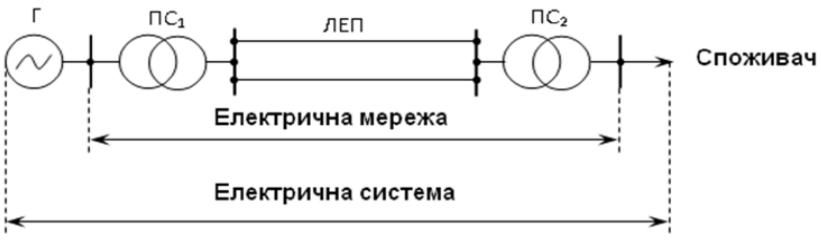


Рисунок 1.1 – Взаємодія основних вузлів енергосистеми [3]

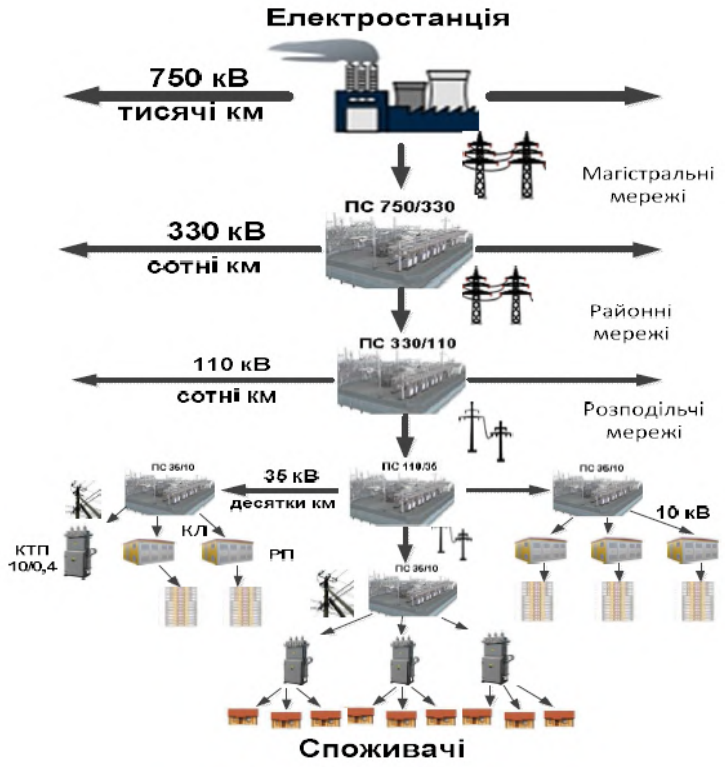


Рисунок 1.2 – Загальна структура електричної системи [3]

Електрична мережа (ЕМ) – це територіально розподілений комплекс спеціалізованих установок, що забезпечує транзит та постачання електроенергії. До її складу входять ЛЕП (повітряні та кабельні), системи трубопроводів, трансформаторні підстанції та комутаційні вузли, що функціонують як єдиний інфраструктурний об'єкт.

Електрична підстанція (ПС) являє собою вузлову електроустановку, функціонал якої полягає в отриманні, трансформації (зміні параметрів) та подальшому перерозподілі енергії. Конструктивно вона об’єднує силові трансформатори, системи керування, розподільчі вузли та допоміжні системи захисту й моніторингу.

Розподільчий пристрій (РП) – це спеціалізований технічний вузол, призначений для оперування потоками енергії в межах одного рівня напруги. Він оснащується комутаційним обладнанням, збірними шинами, а також засобами автоматики та релейного захисту.

Лінія електропередавання (ЛЕП) – це інженерна споруда, що виконує функцію транспортування енергії між територіально рознесеними точками енергосистеми. Конструктивну основу ЛЕП складають провідники (проводи або кабелі), ізоляційні елементи та системи опорних конструкцій.

Повітряна лінія (ПЛ) – це різновид ЛЕП, де передача струму здійснюється через неізольовані або ізольовані проводи, підвішені у відкритому просторі. Фіксація провідників виконується за допомогою ізоляторів та спеціальної арматури до опорних споруд або елементів інженерних об’єктів [5].

Основними конструктивними складниками повітряної ЛЕП є:

– струмопровідні жили (проводи), що забезпечують безпосередній транзит електричної енергії;

– грозозахисні троси, призначені для запобігання пошкодженню лінії атмосферними розрядами; їх встановлюють на найвищих точках опор над фазними проводами;

– опори, які фіксують провідники та троси на проектній висоті;

– ізолятори, що запобігають протіканню струму на тіло опори через контакт із проводами;

– арматура, яка виступає сполучною ланкою між проводами, ізоляцією та несучою конструкцією.

За конструктивним виконанням поділяють на одноланцюгові та дволанцюгові. У цьому контексті під «ланцюгом» мається на увазі сукупність трьох фазних проводів однієї трифазної системи. Технічні параметри ПЛ визначаються конфігурацією фаз, розмірами прольотів, габаритами лінії, а також типами опор та ізолювальних підвісок.

За функціональним призначенням та способом кріплення проводів виділяють два основні типи опор:

– проміжні: провідники на них утримуються за допомогою підтримувальних гірлянд ізоляторів;

– анкерні: забезпечують жорстку фіксацію проводів, які натягуються з певним зусиллям за допомогою натяжних ізолювальних конструкцій [5].

1.3 Вимоги до основних складових електричних мереж

Будова повітряних ліній базується на кількох ключових компонентах, кожен з яких виконує специфічну функцію:

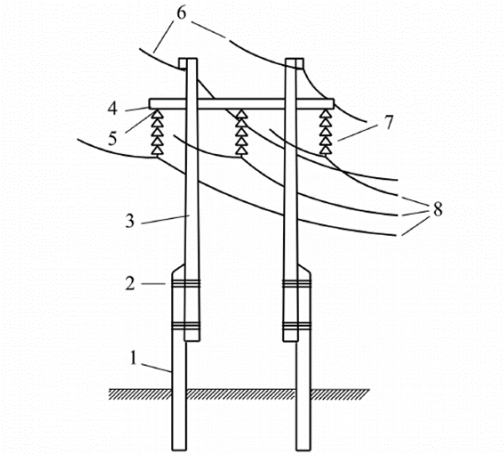
– струмопровідні жили (проводи): основний елемент, що забезпечує безпосереднє транспортування електричної енергії;

– грозозахисні троси: встановлюються у найвищих точках конструкції для запобігання пошкодженню лінії внаслідок ударів блискавки та атмосферних розрядів;

– опорні конструкції: призначені для утримання проводів і тросів на безпечній та регламентованій відстані від поверхні землі або водних об’єктів;

– ізоляційні елементи (ізолятори): створюють необхідний діелектричний бар'єр між проводами під напругою та корпусом опори;

– лінійна арматура: набір спеціальних кріплень, що дозволяють надійно зафіксувати проводи на ізоляторах, а самі ізолятори – безпосередньо на опорах (рис. 1.3).



1 – пасинок; 2 – бандаж; 3 – стояк опори; 4 – траверси; 5 – арматура; 6 – грозозахисний трос; 7 – гірлянда ізоляторів; 8 – проводи

Рисунок 1.3 – Елемент повітряної одноколової лінії – дерев’яна проміжна опора з грозозахисними тросами [3]

Основними просторовими параметрами, що визначають положення проводів у просторі, є: довжина прогону l (горизонтальна дистанція між сусідніми опорами) та стріла провисання f (найбільша вертикальна відстань від уявної прямої між точками кріплення до проводу, що виникає під дією його власної ваги). Якщо точки підвісу на різних рівнях, виділяють дві стріли провисання (f_1 та f_2) – від кожної точки кріплення до найнижчої точки проводу (див. рис. 1.4).

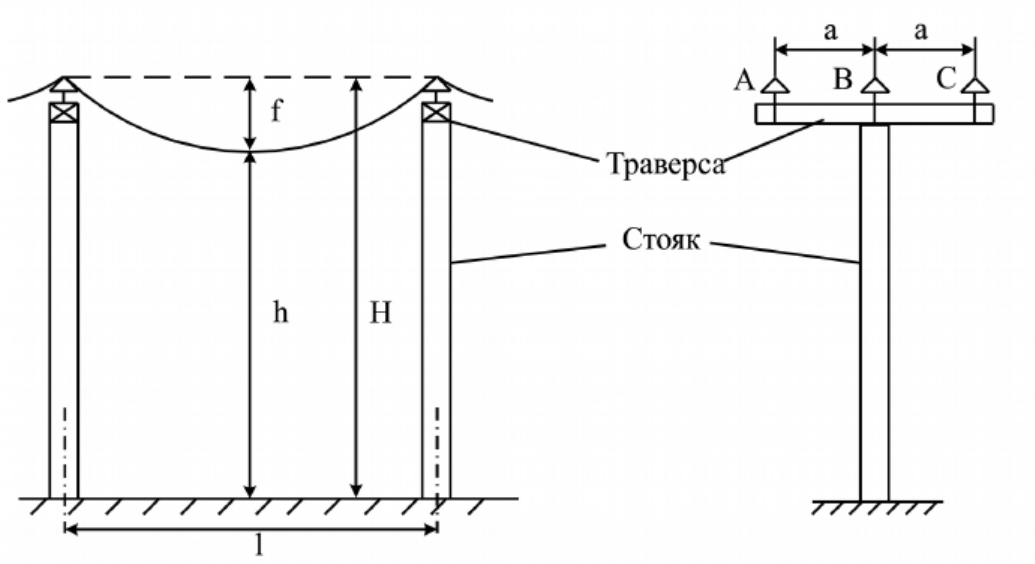


Рисунок 1.4 – Прогин лінії на опорах зі штировими ізоляторами [3]

Одним із ключових параметрів безпеки повітряних ліній є вертикальний габарит до землі (h). Це мінімально допустимий проміжок між поверхнею ґрунту та найнижчою точкою проводу в прольоті. Даний показник регламентується з метою запобігання травматизму людей та пошкодженню великогабаритного транспорту. Величина габариту визначається класом напруги ПЛ та специфікою території:

– у межах забудованих територій (населених пунктів) h становить 6…8 м;

– на відкритій місцевості (поза населеними пунктами) цей показник дорівнює 5…7 м.

Висота опори H при горизонтальному розташуванні проводів і кріплень їх на штирових ізоляторах визначається розміром h і максимальною стрілою

провисання проводу f. При кріпленні проводів на гірляндах із підвісних ізоляторів висота опори збільшується ще на величину довжини гірлянди ізоляторів λ.

Довжину прогину лінії звичайно визначають за економічними міркуваннями. Із збільшенням довжини прогину різко зростає стріла провисання, а отже, і висота опор, що збільшує їх вартість. Разом з тим із збільшенням довжини прогину зменшується вартість ізоляції лінії (менше опор, ізоляторів і арматури для кріплення проводів).

У лініях напругою до 1000 В відстань між проводами мала, ізоляція лінії відносно дешева, опори прості і недорогі. Тому для таких ліній економічно доцільні порівняно невеликі довжини прогинів – десь 40…50 м при висоті опор 8…9 м.

У лініях напругою вище 1000 В економічно доцільні великі прогини, оскільки деяке подорожчання опор окупається подешевшанням ізоляції ліній. Наприклад, у лініях 110 кВ на дерев'яних опорах довжина прогину звичайно складає 150…200 м при стрілі провисання проводів 4…5 м і висоті опор з горизонтальним розташуванням проводів 13…14 м. При переходах повітряних ліній через судноплавні річки довжини прогинів досягають 1 км і більше. При цьому різко зростає висота опор, досягаючи в окремих випадках декількох десятків метрів.

Залежно від особливостей конструкції, системи транспортування енергії класифікують на повітряні (ПЛ) та кабельні лінії (КЛ), а також електропроводки та струмопроводи. Останнім часом у сегменті розподільних електричних мереж спостерігається активне впровадження самонесучих ізольованих проводів (СІП). Дана технологія є проміжним (гібридним) рішенням, що поєднує в собі експлуатаційні переваги як традиційних ПЛ, так і кабельних ліній [4].

Проектування та монтаж будь-яких типів ЛЕП мають здійснюватися з суворим дотриманням державних стандартів, відповідати наступним вимогам та забезпечувати:

– необхідну пропускну здатність лінії;

– необхідну ізоляцію струмоведучих елементів лінії;

– безпеку експлуатації лінії;

– нормативну надійність експлуатації лінії;

– теплову стійкість елементів лінії;

– корозійну стійкість елементів лінії;

– економічність будівництва та експлуатації лінії [3].

Для облаштування повітряних ліній використовують голі (неізольовані) проводи та троси. Оскільки вони експлуатуються у відкритому середовищі, до них висуваються особливі технічні вимоги. Провідники повинні не лише мати низький електричний опір, а й успішно протистояти корозійним процесам та витримувати значні механічні навантаження (вітер, ожеледь). Основні конструкційні матеріали: мідь та алюміній, сталь та спеціальні сплави.

Питома провідність міді $\approx 53 \cdot 10^{-3}$ $см \cdot км/мм^2$. Характеризується відмінною провідністю та високою механічною міцністю. Природна оксидна плівка забезпечує надійний захист від атмосферної корозії, а контактні з'єднання залишаються стабільними протягом усього терміну експлуатації

Питома провідність алюмінію $\approx 31{,}7 \cdot 10^{-3}$ $см \cdot км/мм^2$ має меншу провідність порівняно з міддю та нижчу механічну стійкість, що змушує скорочувати відстань між опорами. Хоча оксидний шар Al_2O_3 захищає метал, він чутливий до хімічних впливів, а його накопичення може призвести до погіршення електричного контакту.

Сталь попри низьку провідність, є еталоном механічної міцності. Головними недоліками є схильність до корозії та залежність активного опору від величини струму, що протікає.

Для ліній електропередач часто використовують комбіновані проводи, що складаються зі сталевого осердя та алюмінієвої оболонки. Таке поєднання дозволяє сталі забезпечувати необхідну механічну стійкість, а алюмінію – ефективно проводити струм.

Система маркування базується на типі матеріалу та площі поперечного перерізу (у мм²):

– М – мідні;

– А – алюмінієві;

– ПС / ПСО – сталеві;

– АС – сталевоалюмінієві.

У маркуванні проводів типу АС перше число позначає переріз алюмінієвої частини, а друге – сталевої (наприклад, АС-120/19). Змінюючи співвідношення цих металів, виробники створюють різні типи конструкцій: від полегшених до особливо посилених. Для подовження терміну служби в несприятливих умовах такі проводи додатково захищають від корозії спеціальними сумішами.

Залежно від умов експлуатації та конструктивних особливостей, проводи класифікують за типом захисту та внутрішньою будовою:

1. Антикорозійний захист у маркуванні:

– АСКС та АСКП: стійкі до корозії сталеалюмінієві проводи. У моделях АСКС захисним мастилом заповнюють лише сталеве осереддя, тоді як в АСКП змащують весь провід повністю;

– АСК: провід, де сталевий осердя додатково захищене шаром поліетиленової плівки.

2. Класифікація за конструкцією:

– монолітні (однодротові): складаються з однієї суцільної жили;

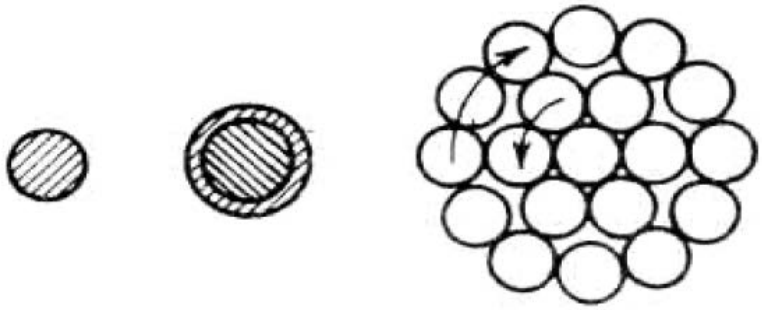
– однорідні багатодротові: виготовляються з одного металу. Кількість дротів у них завжди непарна (зазвичай від 7 до 61 штуки), залежно від загальної площі перерізу;

– комбіновані багатодротові: виготовляються з використанням двох різних металів (наприклад, сталі та алюмінію).

Конструкція сталевого осердя передбачає використання непарної кількості дротів (традиційно 1, 7 або 19), тоді як зовнішній струмопровідний шар формується з парного числа елементів [5].

Для виготовлення однодротових провідників зазвичай використовують мідь або сталь. При цьому встановлено мінімальні межі площі їхнього перерізу: від 4 мм² для мідних виробів та від 10 мм² для сталевих (рис. 1.5, а). Конструкція

біметалевих проводів базується на сталевому осерді, поверх якого наноситься захисний та струмопровідний шар із міді чи алюмінію (рис. 1.5, б).



а б в

а – однодротовий; б – однодротовий біметалічний; в – багатодротовий

Рисунок 1.5 – Будова неізольованих проводів [5]

Процес виготовлення багатодротових проводів передбачає послідовне скручування окремих жил. Навколо центрального дроту формуються концентричні шари (повиви) з елементів однакового діаметра. Для стабілізації структури та запобігання мимовільному розкручуванню напрямок звивання кожного наступного ряду чергується відносно попереднього (рис. 1.5, в).

Переваги над однодротовими аналогами: висока надійність (випадковий обрив окремої жили суттєво не впливає на загальну механічну міцність усієї конструкції), технологічність монтажу (завдяки кращій гнучкості такі проводи значно легше прокладати та фіксувати) та вібростійкість (багатодротова структура ефективніше поглинає механічні коливання та протистоїть втомі металу) [6].

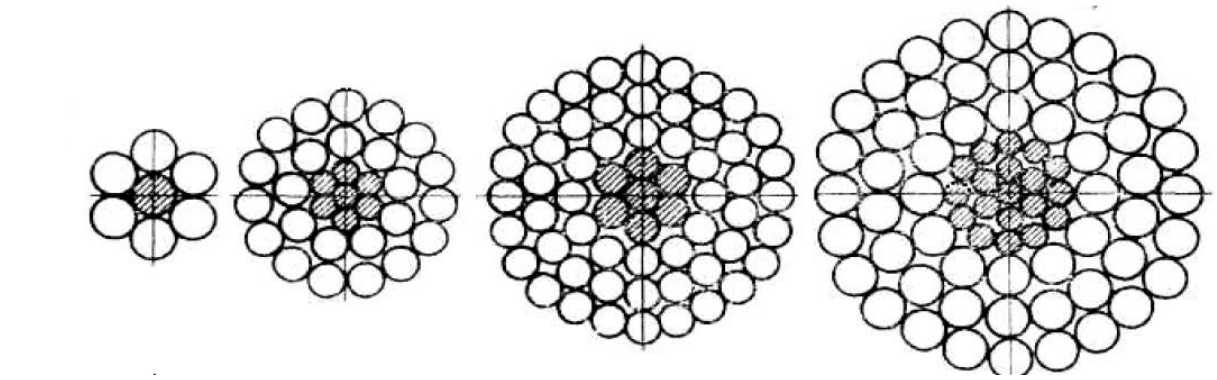
Згідно з нормативами МЕК, для виробництва багатодротових провідників застосовують твердотягнутий алюміній (діаметр дротів 1…5 мм). При температурі 20 °С їхній питомий опір не має перевищувати $0{,}0283$ Ом $\cdot$ мм^2/м. Кількість жил у проводі безпосередньо залежить від площі його перерізу: 7 дротів – для перерізів 16…95 мм²; 19 дротів – для 120…240 мм²; 37 дротів – для 300…500 мм²; 61 дріт – для 600 мм².

Геометрія виробу формується шляхом концентричного накладання шарів у протилежних напрямках. При цьому крок скручування зовнішнього шару завжди менший або рівний кроку прилеглого внутрішнього. Зокрема, для внутрішніх шарів цей показник не перевищує 18D, а для зовнішнього – 15D (де D – діаметр). Щоб забезпечити стабільність проводу під навантаженням у підвішеному стані, крайній шар обов'язково виконують із правим напрямком звивання.

Щоб збільшити механічну міцність проводів, замість твердотягнутого алюмінію часто застосовують алюмінієві сплави з додаванням магнію та кремнію. Одним із таких матеріалів є альдрей, до складу якого входить 0,2…0,6 % магнію, 0,3…0,5 % кремнію, 0,2…0,3 % заліза, а решту становить алюміній. Завдяки такому складу сплав характеризується майже удвічі вищою межею міцності порівняно з твердотягнутим алюмінієм – до 350 МПа, при відносному подовженні 5…8 %. Разом із тим його питомий електричний опір дещо більший і становить $31{,}7\ \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$.

Покращеними механічними властивостями також відзначаються сталеалюмінієві проводи. Їх конструкція включає внутрішній несучий сердечник, виготовлений зі сталевих оцинкованих дротів, навколо якого розміщуються струмопровідні дроти з твердотягнутого алюмінію (див. рис. 1.6).

Сталеалюмінієві проводи класифікують за співвідношенням площі перерізу сталевих та алюмінієвих дротів. Відповідно до цієї характеристики розрізняють кілька основних марок: АС – стандартні сталеалюмінієві, АСО – полегшені, АСУ – з підвищеною міцністю, АСК – антикорозійного виконання, а також АСУС – спеціальні посилені проводи.



а б в г

а – 6 алюмінієвих + 1 сталевий дріт; б – 24 алюмінієвих + 7 сталевих дротів; в – 54 алюмінієвих + 7 сталевих дротів; г – 54 алюмінієвих + 19 сталевих дротів

Рисунок 1.6 – Будова неізольованих сталеалюмінієвих проводів [6]

Проводи марки АС виготовляють із площею перерізу в межах 10…400 мм². Для більшості таких проводів співвідношення площі перерізу алюмінієвих дротів до сталевого сердечника становить 5,45…6,55. Виняток становлять вироби з перерізом 10 мм² і 16 мм², де цей показник збільшується до 9…10.

Конструкція проводів також залежить від їхнього перерізу. Так, моделі з перерізом 10…95 мм² мають один сталевий дріт у сердечнику та шість алюмінієвих зовні. Для проводів 120…300 мм² використовують сердечник із семи сталевих дротів і зовнішню частину з чотирьох алюмінієвих. У проводах з перерізом 400 мм² сердечник складається з 19 сталевих дротів, а струмопровідна частина формується з 54 алюмінієвих.

Проводи марки АСУ виробляють у діапазоні перерізів 120…400 мм². У виробах з перерізом 120…240 мм² сердечник формується із семи оцинкованих сталевих дротів, тоді як у проводах 300 мм² і 400 мм² застосовують сердечник із 19 дротів. Незалежно від розміру перерізу, струмопровідна частина таких проводів містить 30 твердотягнутих алюмінієвих дротів. Співвідношення площі перерізу провідної частини до сердечника для цієї марки знаходиться в межах 4,3…4,5.

Проводи типу АСО виготовляють у діапазоні перерізів від 150 мм^2 до 700 мм^2. Конструкція цих проводів забезпечує ефективне використання як сталевого осердя, так і алюмінієвої струмопровідної частини. Співвідношення площі перерізу осердя до площі перерізу провідної частини становить приблизно 7,6…8,4.

Для проводів із перерізом 150…400 мм^2 конструкція передбачає наявність сердечника, сформованого з 7 сталевих дротів, а також струмопровідної частини з 24 алюмінієвих дротів. У проводах перерізом 300 мм^2 і 400 мм^2 застосовують комбінацію з 7 сталевих та 54 алюмінієвих дротів. Для проводів із більшими перерізами – 500 мм^2, 600 мм^2 і 700 мм^2 – використовують сердечник із 19 сталевих дротів і зовнішню частину з 54 алюмінієвих дротів. Частка маси алюмінієвої струмопровідної частини становить близько 73…74 % від загальної маси проводу.

Проводи марки АСК конструктивно подібні до проводів АС, однак відрізняються тим, що проміжки між сталевими дротами сердечника заповнюють спеціальним компаундом. Для запобігання витіканню цього матеріалу під час нагрівання проводу сердечник додатково ізолюють лавсановою стрічкою. Такі проводи випускають із перерізом від 120 мм^2 до 400 мм^2 і застосовують переважно в умовах підвищеної хімічної агресивності навколишнього середовища.

Проводи марки АСУС застосовують на окремих ділянках повітряних ліній електропередачі, де прольоти між опорами перевищують стандартні значення, зокрема під час перетину річок або інших великих перешкод. Порівняно з іншими типами проводів, вони характеризуються найменшою часткою струмопровідної складової, маса якої становить приблизно 33,0…35,6 % від загальної маси проводу. Такі проводи випускають із номінальними перерізами 185 мм^2, 300 мм^2 та 500 мм^2. Відношення площі перерізу провідної частини до площі сталевого сердечника знаходиться в межах 1,55…1,60.

Мідні проводи марки «М», призначені для ліній електропередачі, виготовляють із твердотягнутих мідних дротів. Діапазон їх перерізів становить від 4 мм^2 до 400 мм^2 [6].

До дротів ставлять наступні технічні вимоги:

1. У проводі не повинно бути перехльостування, випирання, розривів та надломів окремих дротів. У місці закінчення сталевого осердя провід повинен бути розрізаний з накладенням бандажів.

2. Скрутка повивів повинна бути виготовлена в протилежні сторони, причому зовнішній повив повинен мати правий напрямок скручування.

3. Заповнення проводів мастилом та накладення мастила на сердечник дроту має бути зроблено без перепусток.

4. З'єднання дротів при скручуванні сталевого сердечника з числом дротів від 1 до 19 включно заборонена. У сталевому осерді дроти з числом дротів понад 19 допускається з’єднання дротів зварюванням, при цьому відстань між місцями зварювання одного і того ж або різних дротів має бути не менше 15 м. Місце з'єднання має бути оцинковане та покрите захисним матеріалом.

5. Алюмінієві дроти повинні відповідати ДСТУ 839–94 [7].

Широке розповсюдження отримали дроти із термостійкого алюмінієвого сплаву по типу АТ1, АТ2, АТ3, АТ4, де:

– АТ1 – дріт з термостійкого алюмінієвого сплаву з безперервно діючою максимально допустимою температурою нагрівання 150 ℃;

– АТ2 – дріт із надміцного термостійкого алюмінієвого сплаву з безперервно діючою максимально допустимою температурою нагрівання 150 ℃;

– АТ3 – дріт з алюмінієвого сплаву з підвищеною термостійкістю з діючою максимально допустимою температурою нагрівання 210 ℃;

– АТ4 – дріт із надтермостійкого алюмінієвого сплаву з безперервно діючою максимально допустимою температурою нагріву 230 ℃.

Дроти вказаних марок характеризуються наступними параметрами (див. табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Характеристика дротів окремих марок [7]

Параметр	Значення для			
	АТ1	АТ2	АТ3	АТ4
Густина при 20 ℃, г/см^3	2,703	2,703	2,703	2,703
Допустима безперервно діюча температура під час експлуатації протягом 40 років,℃	150	150	210	230
Допустима температура при експлуатації протягом 400 год, ℃	180	180	240	310
Коефіцієнт лінійного розширення, ℃$^{-1}$	$23\cdot10^{-6}$	$23\cdot10^{-6}$	$23\cdot10^{-6}$	$23\cdot10^{-6}$
Температурний коефіцієнт опору при постійній масі℃$^{-1}$	0,0040	0,0036	0,0040	0,0038

1.4 Постановка мети та задач дослідження

Головною метою дипломної роботи є вирішення матеріалознавчої задачі підвищення фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів, що призначені для виготовлення дротів високовольтних повітряних ліній електропостачання.

Задачею роботи є розробка високоефективного рафінувально-модифікувального комплексу (РМК), призначення якого – забезпечення визначеного рівня комплексу показників з метою отримання сплавів системи $Al - Zr$, котрі застосовують для подальшого виготовлення з них дротів ВПЛ, з заданою чистотою за домішками, визначеною мікро- та макроструктурами, необхідним рівнем механічних і експлуатаційних властивостей.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали дослідження

За предмет експериментальних досліджень було прийнято алюмінієвий сплав системи $Al - Zr$, котрий рекомендовано у науково-технічній літературі [12, 13] у якості перспективного матеріалу для виготовлення проводів сучасних повітряних ліній електропостачання.

Відомо, що найкращі електротехнічні властивості, має алюміній марки А000. Однак, використання для отримання сплавів чистого алюмінію марки А000 недоцільне через його дефіцит і високу вартість. У якості провідного матеріалу в електротехніці найчастіше застосовують технічний алюміній – марки А0 та А1. Тому, нами у даній роботі було розроблено технологічний процес отримання експериментального сплаву системи $Al - Zr$ та досліджено його властивості при використання у якості основного компоненту сплаву алюмінію марки А0. Хімічний склад вихідного матричного матеріалу (технічного алюмінію марки А0) наступний: 99,616 % Al; 0,28 % Fe; 0,1 % Si та 0,004 % інших домішок ($Cu + Ti + V$). За хімічним складом матричний матеріал повністю відповідає міжнародному стандарту EN 573–3–94 і марці 1100, зареєстрованим Американською алюмінієвою асоціацією.

2.2 Визначення хімічного складу

Контроль хімічного складу дослідних сплавів проводили за допомогою спектрального аналізу на іскровому спектрометрі «SPECTROLAB» (Німеччина), котрий дозволяє контролювати хімічний склад за 22 елементами таблиці Д.І. Менделєєва з точністю ±0,0001 мас.%.

2.3 Механічні випробування

Механічна міцність є однією з найважливіших характеристик повітряних ліній. Механічна міцність ПЛ – це здатність проводів, грозових тросів і опор витримувати механічні навантаження, що виникають через власну вагу, зледенінні утворення, зміни температури й інші фактори.

Визначення показників механічних властивостей виконували за стандартними методиками з дотриманням вимог ДСТУ 2824–94, ДСТУ 2825–94 [8, 9].

З дослідних сплавів виготовляли розривні зразки діаметром 5 мм та довжиною робочої частини 25 мм за ДСТУ ISO6892–1:2019 [10]. Випробування зразків проводили на розривній машині МР – 100 з фіксацією та записом діаграми розтягання.

2.4 Визначення корозійної стійкості

Явище корозії являє собою окислювально-відновлювальну реакцію між металом і компонентом-окиснювачем корозійного середовища. Виходячи з умов експлуатації визначення показників корозійної стійкості матеріалів дротів проводили за допомогою гравіметричного методу у середовищі водного розчину $3\%\ NaCl\ +\ 0{,}1\ \%\ H_2O_2$ впродовж 10 діб.

Гравіметричний аналіз – це метод кількісного хімічного дослідження, оснований на високоточному визначенні маси речовини, яку аналізують, або окремих її компонентів, попередньо виділених у чистому вигляді чи у формі сполук зі сталим і точно відомим складом.

Ваговий (гравіметричний) аналіз належить до основних методів кількісної хімії. Саме цей метод мав важливе значення у формуванні фундаментальних

хімічних законів, зокрема закону сталості складу, закону кратних відношень та періодичного закону хімічних елементів. Його широко використовують для встановлення хімічного складу різних природних і технічних матеріалів: руд, мінералів, гірських порід, металів, сплавів, силікатних матеріалів, а також багатьох органічних і неорганічних сполук.

В ході досліджень контролювали втрату маси зразків з дотриманням вимог ДСТУ 3830–98 [11]. Вагу зразків визначали на лабораторних електронних вагах PS 510.R2, що відповідають вимогам ДСТУ EN45501:2017. Точність вимірювання становила ± 0,0001г.

В процесі корозійних досліджень визначали швидкість корозії зразків (г/м^2·год) за формулою:

$$K = \frac{m_0 - m}{\tau \cdot S}, \qquad (2.1)$$

де m_0 – вихідна маса зразка, г;

m – маса зразка після випробувань та видалення продуктів корозії, г;

τ – час витримки зразка в корозійному середовищі, год;

S – площа зразка, м^2;

Гравіметричні методи аналізу відзначаються високою точністю результатів, тому й сьогодні залишаються важливими під час проведення арбітражних досліджень. Вони також широко застосовуються у науково-дослідній практиці для перевірки та зіставлення аналітичних результатів, отриманих різними методами. Точність визначень у гравіметричному аналізі може досягати 0,01…0,005 %, що є вищим показником порівняно з титриметричними методами [12].

2.5 Металографічні дослідження

Металографічне дослідження структури експериментальних сплавів здійснювали за допомогою оптичних мікроскопів МІМ–8 та «SIGETA ММ–700» при збільшенні у межах 100…400 разів. Аналіз виконували на підготовлених мікрошліфах, поверхню яких для кращого виявлення інтерметалідних фаз попередньо травили водним розчином кислотного складу: $0{,}5\ \%\ HF\ +\ 0{,}5\ \%\ HNO_3\ +\ 1{,}5\ \%\ HCl$ протягом 5…10 с.

2.6 Аналіз електротехнічних показників

При забезпеченні електротехнічних характеристик дротів керувались вимогами ГКД 341.004.002–94 «Норми технологічного проектування повітряних ліній електропередачі 0,38–750 кВ. Дроти ліній електропередачі 37–750 кВ».

2.7 Оцінка похибки експериментів

Під час виконання роботи необхідний рівень точності забезпечували завдяки застосуванню сучасних засобів контролю та вимірювальної апаратури. Експериментальні дані отримували на основі досліджень 5…10 зразків для кожного окремого режиму випробувань.

3 ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО–МЕХАНІЧНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДРОТІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Підвищення механічних властивостей алюмінієвих дротів

Підвищення механічних властивостей алюмінієвих дротів можна забезпечити шляхом легування провідникового алюмінію різними хімічними елементами. В той же час, окрім забезпечення комплексу механічних властивостей, нові матеріали на основі алюмінію повинні бути термічно стабільними до температур ~240℃ та мати високу електропровідність. Перспективними, з цієї точки зору, слід вважати провідникові алюмінієві сплави леговані незначною кількістю цирконію [13, 14]. Виходячи з комплексу необхідних властивостей, вміст цирконію в алюмінієвих сплавах не повинен перевищувати 0,35…0,45 мас.%.

Матеріалознавча задача забезпечення заданого комплексу властивостей полягає в отриманні нового, достатньо чистого за домішками, матеріалу з певною структурою. Структура нового матеріалу повинна характеризуватися достатньою стабільністю в інтервалі робочих температур і рівномірним розподілом у матриці сплаву компактних за формою і малих за розмірами включень інтерметалідної фази Al_3Zr, котра забезпечує підвищення показників міцності сплаву.

Чистота сплаву за домішками буде забезпечувати необхідний рівень електричного опору матеріалу, а також стабільність структури при підвищенні робочих температур. Питомий електроопір сплавів системи $Al - Zr$ закріплено в нормативних документах на дроти [15, 16].

З метою отримання сплавів системи $Al - Zr$, котрі застосовують для подальшого виготовлення з них дротів ВПЛ, з заданою чистотою за домішками, визначеною мікро– та макроструктурами, необхідним рівнем механічних і експлуатаційних властивостей, було проведено дослідні роботи з розробки

високоефективного рафінувально-модифікувального комплексу (РМК), призначення якого – забезпечення визначеного рівня комплексу показників. В процесі розробки РМК було враховано досвід і рекомендації, що надано у роботі [17].

3.2 Розробка рафінувально-модифікувального комплексу

Розроблений рафінувально-модифікувальний комплекс (РМК) призначений для використання у кольоровій металургії. Його основна функція полягає у покращенні структури та властивостей алюмінієвих сплавів (зокрема систем $Al - Si, Al - Cu$ тощо), особливо тих, що мають значну концентрацію небажаних домішок, таких як залізо (Fe), свинець (Pb) та розчинений водень (H_2).

Використання даного препарату дозволяє нівелювати негативний вплив критичних забруднювачів:

– нейтралізація заліза (надлишок Fe призводить до формування пластинчастих інтерметалідів, які роблять метал крихким, знижують його механічну міцність та підвищують електричний опір. РМК змінює характер цих фаз);

– дегазація (високий вміст водню провокує утворення газової пористості (згідно з нормами ДСТУ 2839-94), що суттєво погіршує герметичність та щільність виливків);

– оптимізація структури (комплекс забезпечує дрібнозернисту структуру та високу чистоту розплаву від неметалевих включень).

Застосування запропонованого складу дозволяє отримати алюмінієвий сплав із чітко заданими хімічними параметрами. Кінцевий продукт характеризується:

– мінімальним вмістом газів та сторонніх домішок;

– покращеними технологічними та експлуатаційними показниками;

– ефективним легуванням матриці сплаву цирконієм (Zr) безпосередньо під час плавки.

В основу РМК покладено суміш сірки та гексафтороцирконату калію. Для досягнення максимального ефекту до складу введені додаткові реагенти. Співвідношення компонентів (у масових відсотках) виглядає наступним чином:

– гексафтороцирконат калію (K_2ZrF_6) – 40…50;

– карбонат барію ($BaCO_3$) – 10…15;

– хлорид калію (KCl) – 5…10;

– тетрафтороборат калію (KBF_4) – 5…10;

– сірка (S) – решта.

Саме сукупність цих компонентів і їх співвідношення гарантують досягнення нового технічного результату – визначений хімічний склад і збільшення ступеня рафінування сплавів від шкідливих домішок і розчинених газів; забезпечення тривалого ефекту модифікування матриці сплаву та присутніх в ньому інтерметалідних фаз, з наданням їм визначеної форми, розмірів і розподілу; підвищення рівня фізико-механічних і службових властивостей за рахунок отримання модифікованої, упорядкованої та однорідної структури.

Сірка, яка присутня у складі РМК взагалі в кремнії має низький коефіцієнт розподілу, а в рідкому алюмінії обмежену розчинність, що має значний рафінувальний вплив на розплав через виникнення великої кількості парів сірки, пухирі якої посилено барботують розплав та продуктивно усуваються неметалеві включення, розчинений водень за адсорбційним і флотаційним процесами. Сірка відноситься до поверхнево-активних елементів, завдяки якому забезпечується зміна типу хімічного зв'язку залізовмісних фаз з ковалентного на металевий ненаправлений, що в решті-решт, зумовлює утворення залізовмісних фаз компактної форми. Завдяки синергетичному ефекту сірки досягається глибоке рафінування металу, що своєю чергою позитивно позначається на ливарних характеристиках і здатності сплаву заповнювати форми.

Введення до складу комплексу РМК 10...15 мас.% $BaCO_3$ дозволяє контролювати швидкість окиснення сірки. Це сприяє дробленню пароподібних потоків сірки на дрібніші пухирці, що суттєво розширює площу контакту між газом та розплавом. Як наслідок, інтенсифікуються процеси очищення (рафінування) та структурної перебудови (модифікування).

При виконанні термодинамічного аналізу реакцій взаємодії $BaCO_3$ з компонентами алюмінієвих сплавів в інтервалі температур 933...1100 К відбувається дисоціація з'єднання $BaCO_3$ з виділенням газів CO і CO_2 та відновленням чистого Ba з його оксиду за рахунок взаємодії з компонентами сплаву або вуглецем тигля. На відміну від традиційного натрію (Na), барій забезпечує тривалий ефект модифікування, що особливо важливо при переробці вторинної (низькосортної) шихти. Будучи поверхнево-активною речовиною з низьким натягом, барій: знижує температуру солідусу; суттєво підвищує рідинноплинність розплаву, що критично для отримання якісної катанки та дроту.

Зниження вмісту $BaCO_3$ нижче 10 мас.% не дає змоги досягти потрібного рівня модифікування кремнію, що дестабілізує комплекс механічних і службових (електропровідність) властивостей та погіршує структуру. Спостерігається надто швидке окиснення сірки, що призводить до бурхливого барботажу, викидів розплавленого металу та ризиків для персоналу. Ступінь подрібнення структурних складників кремнію є недостатньою, що знижує механічну міцність та електропровідність виробів. Погіршується заповнюваність ливарних форм, збільшуючи частку браку.

При надмірному вмісті $BaCO_3$ більш ніж 15 мас.% виникає ризик перемодифікування, яке спричиняє деградацію мікроструктури. Це призводить до зниження комплексу експлуатаційних та технологічних характеристик готового сплаву.

Присутність 5...10 мас.% КСl у складі РМК є доцільною тому, що у розплаві КСl дисоціює на К та Cl_2. Як відомо, хлор дуже ефективний рафінувальний агент, а його невеликий вміст не вливає на погіршення санітарно-

гігієнічних і екологічних вимог. Калій, отриманий як продукт дисоціації КСl, інтенсивно модифікує присутній кремній, що позитивно відображається на механічних властивостях алюмінієвих сплавів. У той же час, збільшення вмісту КСl у компонентах РМК (>10 мас.%) є нераціональним тому, що калій, хоча й сприяє подрібненню структури, однак, при збільшенні його концентрації, значно підвищує пористість і в'язкість сплавів. Така дія калію буде погіршувати ливарні (рідиннoплинність) і механічні властивості сплавів, а збільшення кількості хлору, який виділиться в результаті дисоціації з'єднання КСl, негативно вплине на екологічні та санітарно-гігієнічні умови виробництва.

Вміст менше 5 мас.% КСl у складі РМК не є доцільним тому, що не буде забезпечена достатня ступінь рафінування сплавів таким ефективним рафінувальним агентом, як хлор, у зв'язку з його недостатньою кількістю.

Використання 5...10 мас.% тетрафтороборату калію (КВF_4) у складі РМК є доцільним та у поєднанні з іншими складниками створює синергетичний ефект. Який сприяє високому рівню рафінування й тривалому модифікувальному ефекту, що безпосередньо відображається на зростанні фізико-механічних показників матеріалу.

Калій, що вивільняється під час термічного розпаду тетрафтороборату калію, у поєднанні з калієм, що надходить із хлориду калію (KCl), гарантує якісну структурну перебудову (модифікування) кремнієвої фази в алюмінієвих сплавах. Згідно з актуальними науковими даними, бор відіграє ключову роль у формуванні мікроструктури, знижуючи енергію взаємодії між атомами кремнію у кристалічній гратці сприяє утворенню стабільних модифікованих структур. А також завдяки зміщенню точок фазових перетворень у бік вищих температур (на 323...473 К), бор суттєво підвищує термічну стабільність отриманого сплаву. Навіть у малих дозах бор діє як активний подрібнювач структурних складників, що позитивно впливає на рафінування розплаву та підвищує пластичні характеристики металу. Фтор, який вводиться у розплав через сполуку KBF_4, виступає потужним реагентом для рафінування. Він забезпечує інтенсивне видалення з рідкого металу газових включень (дегазацію) та очищення від

небажаних неметалевих мікрочастинок.

Завдяки введенню тетрафтороборату калію KBF_4, у склад РМК, на дзеркалі розплаву формується стабільна захисна плівка. Цей компонент сприяє ефективній флотації твердих неметалевих часток та частковому виведенню розчинених газів. У поєднанні з карбонатами, KBF_4, активізує процес адсорбції шлакових домішок та інтенсифікує дегазацію, зокрема забезпечуючи видалення водню, що міститься у складі комплексних оксидно-водневих сполук $(Al_2O_3 - H_2)$.

Концентрація компонента нижче 5 мас.% KBF_4 у складі РМК не є ефективною тому, що не вдається досягти потрібного рівня модифікування, що негативно позначається на однорідності структури та призводить до зниження міцнісних характеристик сплаву. Збільшення частки KBF_4 більш ніж 10 мас.% є недоцільним, бо надлишок реагенту може спровокувати ефект перемодифікування, який дестабілізує структуру сплавів та їх ливарні (рідиннопливність), експлуатаційні (електропровідність) і механічні властивості.

Сполуки сірки, калію і барію є доцільними для використання у складі РМК, бо вони сумісні як модифікатори алюмінієвих сплавів.

Гексафтороцирконат калію, при дисоціації з'єднання K_2ZrF_6 у розплаві, забезпечує підвищення ефективності модифікування структурних складових сплаву, а також за рахунок атомарного цирконію, утворює значну кількість додаткових центрів кристалізації у вигляді тугоплавких, компактних і дрібнодисперсних інтерметалідів Al_3Zr, що додатково сприяють підвищенню міцності сплаву. Фтор, що звільняється при дисоціації з'єднання K_2ZrF_6, значно покращує рафінувальну дію РМК від неметалевих включень, шкідливих домішок і розчинених газів.

З метою полегшення технологічності вводу до розплаву розробленого РМК, методом пресування були виготовлені таблетовані брикети певної ваги (рис. 3.1). З метою виключення взаємодії компонентів розробленого РМК з повітрям, що призвело би до значного зниження коефіцієнта корисної дії РМК та

необхідності збільшення його кількості, було рекомендовано виконувати введення РМК на дно ванни розплавленого металу.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд таблетованого рафінувально-модифікувального комплексу

3.3 Технологія виготовлення експериментального сплаву системи $Al - Zr$

Вага таблетованого РМК, що був отриманий за допомогою пресування, становила 25 г і 50 г. Завдяки обраній методиці вдалося швидко визначати необхідну порцію реагенту відповідно до маси рідкого металу. Практичне впровадження такої схеми підтвердило її високу результативність. Процес введення комплексу в розплав здійснювався за допомогою спеціального пристрою — «дзвоника». Обробка проводилася при температурі $680 \ldots 720℃$. Після завершення металургійного етапу було підготовлено контрольні зразки для оцінки механічних характеристик згідно з регламентом ДСТУ 2839–94 [18].

В процесі плавлення сплаву на основі технічного алюмінію марки А0, експериментальну перевірку дії РМК проводили в печі опору. В ході експерименту досліджували комплексний вплив рафінувально-модифікувальної дії РМК, а також його здатність до легування сплаву цирконієм. Властивості алюмінієвих дротів, що виготовлено зі сплаву на основі технічного алюмінію марки А0 до та після оброблення його РМК наведено в таблиці 3.1.

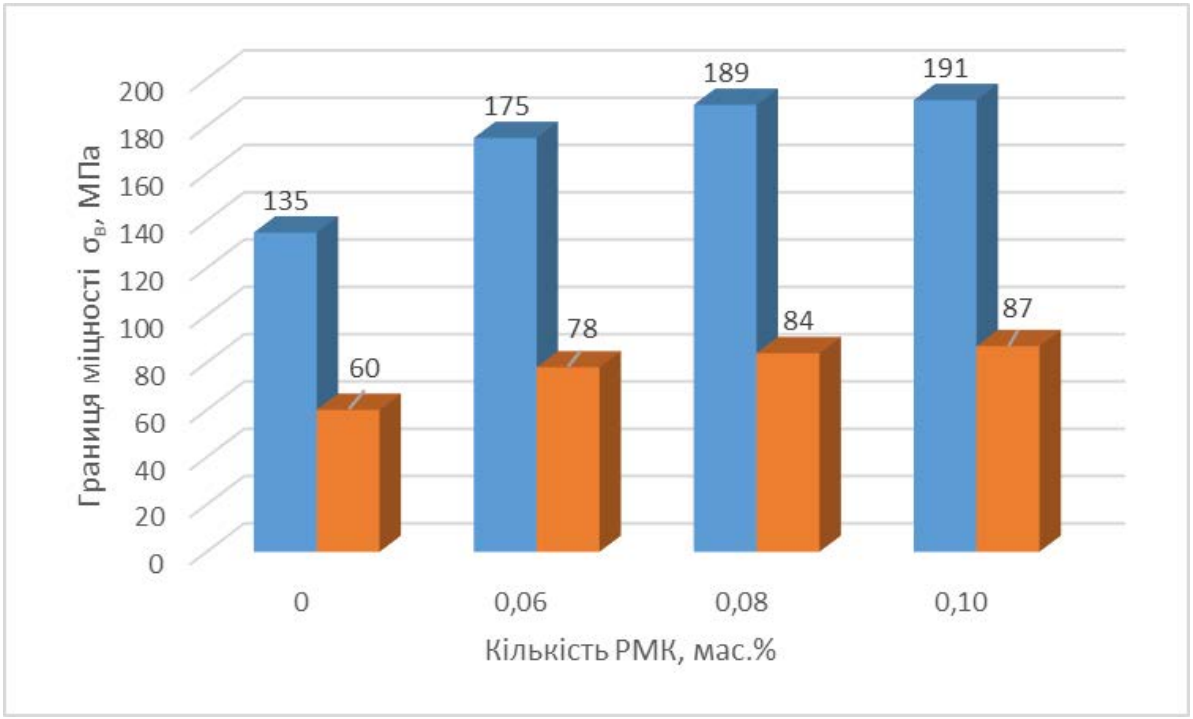
Таблиця 3.1 – Властивості алюмінієвих дротів з експериментального сплаву $Al - Zr$

Кількість РМК, мас. %	Границя міцності * $\sigma_в$, МПа	Відносне видовження δ, %	Число згинань до руйнування N, разів	Питомий електроопір $R \cdot 10^9$, Ом·м	Корозійна втрата ваги **, г/м^2·год
Вихідний матеріал ***	135/60	9/28	9/12	26,8/26,6	0,0074
0,06	175/78	8/25	12/18	26,8/26,7	0,0067
0,08	189/84	6/21	11/16	27,0/26,7	0,0061
0,10	191/87	5/19	9/14	27,6/27,1	0,0061

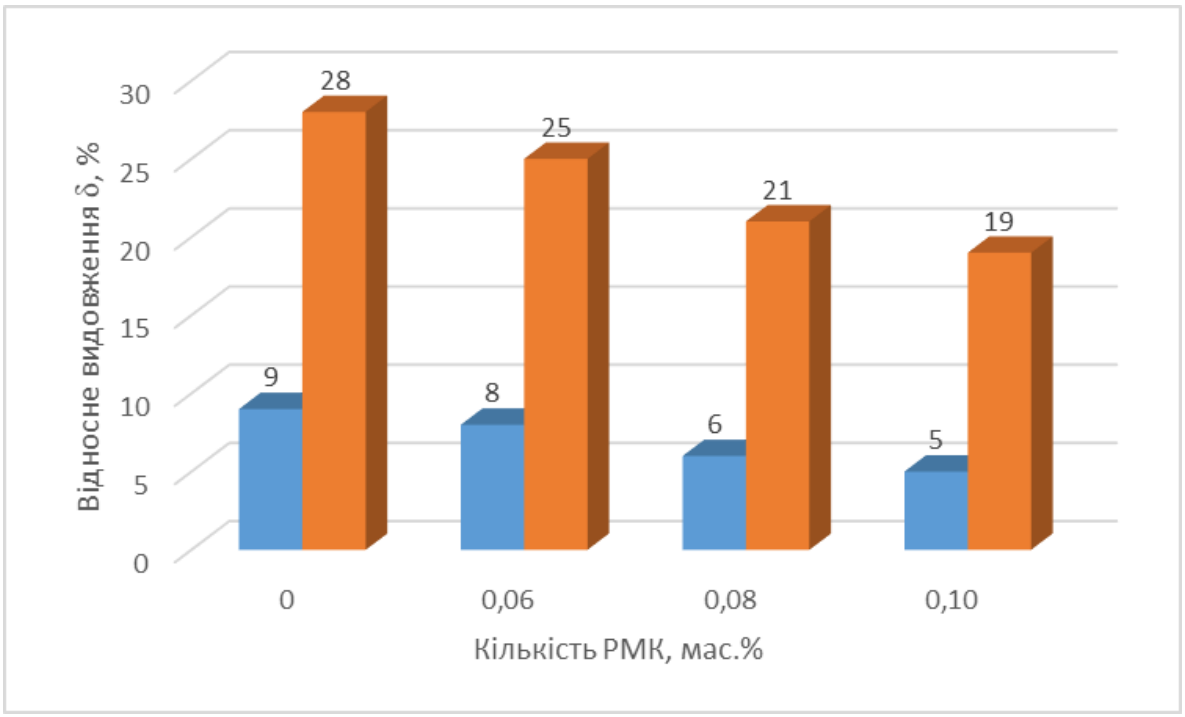
Примітка: * – у чисельнику в нагартованому стані, у знаменнику – після відпалу;
** – дослідження у водному розчині 3%NaCl+0,1%H_2O_2 впродовж 10 діб;
*** – хімічний склад вихідного матеріалу, мас.%: 99,616%Al; 0,28%Fe; 0,1%Si та 0,004% домішок (Cu + Ti + V).

Виходячи з рекомендацій [13, 14] стосовно граничного вмісту цирконію (0,35…0,45 мас.%) в алюмінієвих сплавах для дротів ВПЛ призначили необхідну кількість РМК для оброблення експериментального сплаву в межах до 0,10 мас.% (див. табл. 3.1). Оброблення виконували послідовним додаванням таблетованого РМК до розплаву з початковою кількістю 0,06 мас.% та з інтервалом зростання у 0,02 мас.% та наступним відбором проб і зразків для визначення властивостей, що наведено у таблиці 3.1. Початкова кількість таблетованого РМК у 0,06 мас.% була обрана з міркувань його застосування у якості легувальної добавки з метою збільшення кількості цирконію у сплаві.

З метою полегшення аналізу отриманих результатів їх було представлено в графічному вигляді (рис. 3.2).



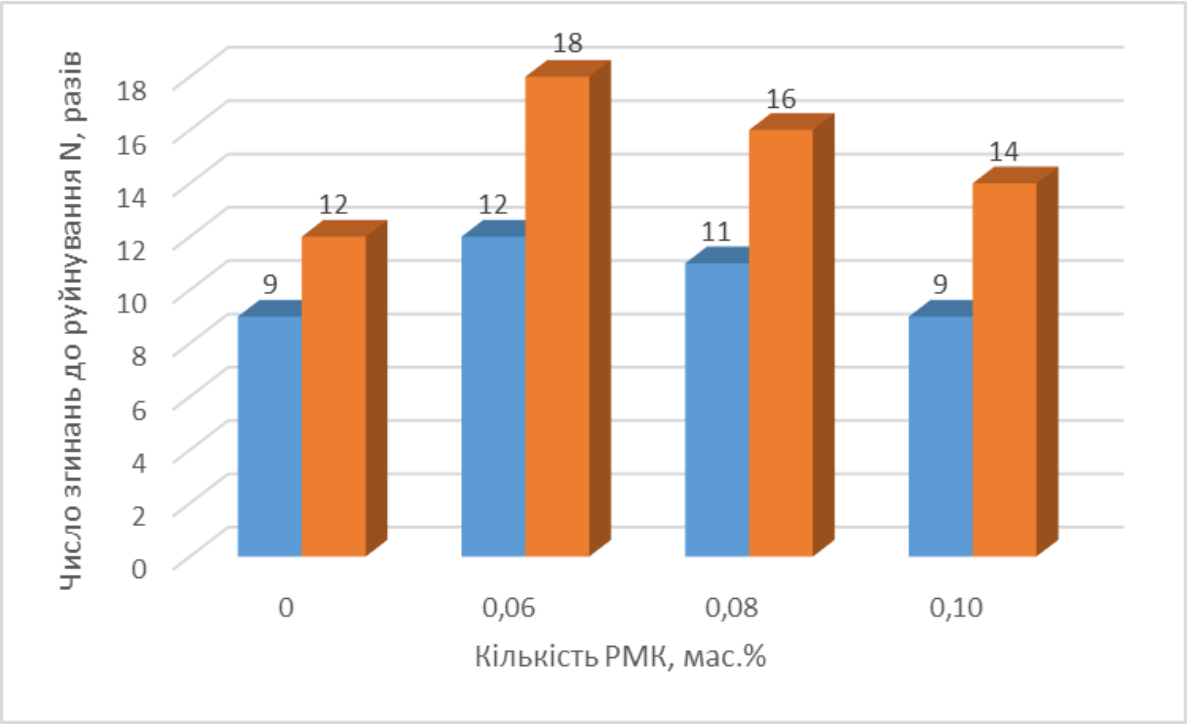
а



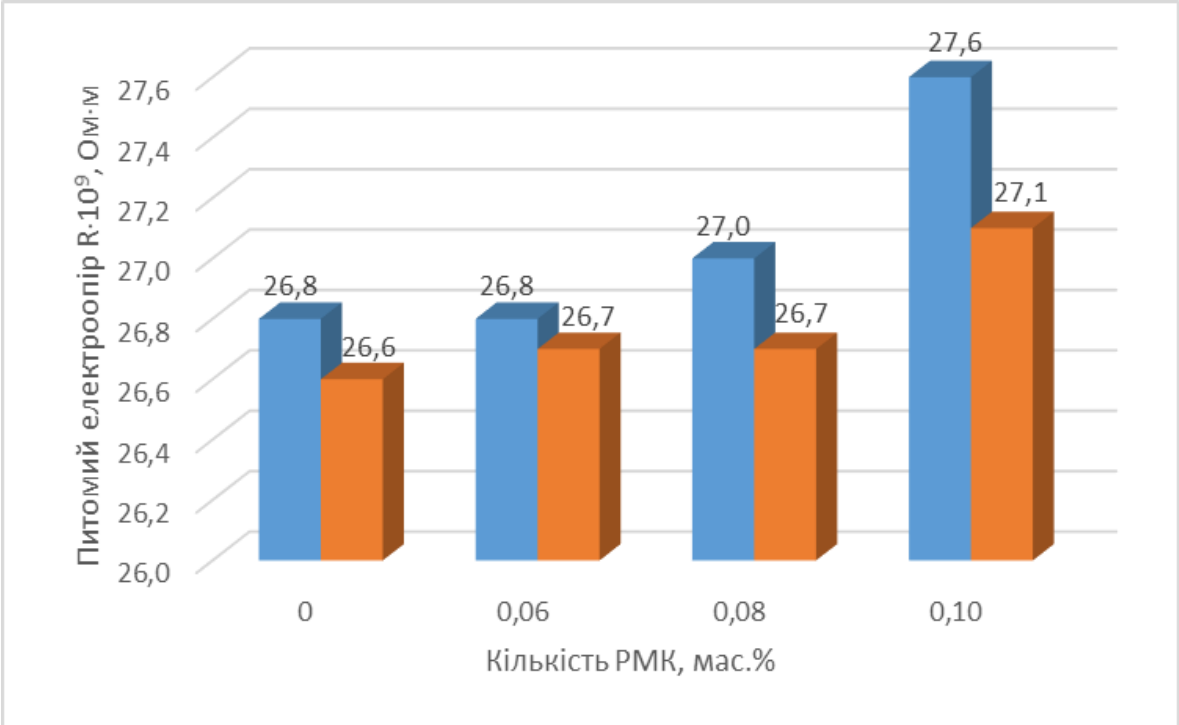
б

а – вплив на границю міцності $\sigma_в$; б – вплив на відносне видовження δ;

Рисунок 3.2 – Графічний вигляд експериментальних результатів



в



г

в – число згинань до руйнування N; г – питомий електроопір $R \cdot 10^9$;

Рисунок 3.2, аркуш 2

Характер зміни властивостей експериментального сплаву продемонстрував наступне (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Характер змін властивостей, що контролювали (див. табл. 3.1)

№№	Контрольний показник	Характеристика змін
1	Границя міцності $\sigma_в$, МПа	Підвищення показника спостерігалось в усьому діапазоні концентрацій РМК, котрим було оброблено експериментальний сплав. Визначається це утворенням і рівномірним розповсюдженням у структурі матеріалу компактної інтерметалідної фази Al_3Zr, що відіграє роль зміцнювальної. Найбільша величина зростання припала на діапазон 0,06…0,08 мас.% РМК. Зростання спостерігали як у нагартованому стані, так і після відпалу.
2	Відносне видовження δ, %	Пластичність експериментального сплаву з підвищенням його міцності дещо знижувалася, що також пов’язано з утворенням і збільшенням кількості зміцнювальної фази Al_3Zr, однак у діапазоні 0,06…0,08 мас.% РМК вона повністю відповідала необхідним вимогам.
3	Опір механічному руйнуванню	Найкращі показники забезпечуються в діапазоні 0,06…0,08 мас.% РМК у зв’язку з високим ступенем рафінування експериментального сплаву від неметалевих включень і розчинених газів, а також модифікування всіх структурних складових. Погіршення опору руйнування при 0,10 мас.% РМК засвідчує явище перемодифікування.
4	Питомий електроопір, $R \cdot 10^9$, Ом·м	Підвищення питомого електроопору при зростанні кількості РМК пов’язано зі змінами структурно–фазового складу експериментальних сплавів та збільшенням кількості інтерметалідної фази Al_3Zr. В той же час, рівень зростання питомого електроопору сплавів в діапазоні 0,06…0,08 мас.% РМК можна вважати несуттєвим та задовільним.
5	Корозійна стійкість	Швидкість корозійних процесів пов’язаних з експериментальними сплавами помітно гальмується, що обумовлено отриманням упорядкованої та рівноважної структури, завдяки високому ступеню рафінування від неметалевих включень, шкідливих домішок, розчинених газів та модифікуванню структурних складових.

На рисунку 3.3 наведено мікроструктуру розробленого сплаву, що

характеризується наявністю в матриці сплаву рівномірно розповсюджених, дрібнодисперсних та компактних за формою тугоплавких інтерметалідних включень Al_3Zr. Саме забезпечення отримання в дослідному сплаві наведеної структури спричиняє підвищення міцності сплаву та покращення його експлуатаційних характеристик.

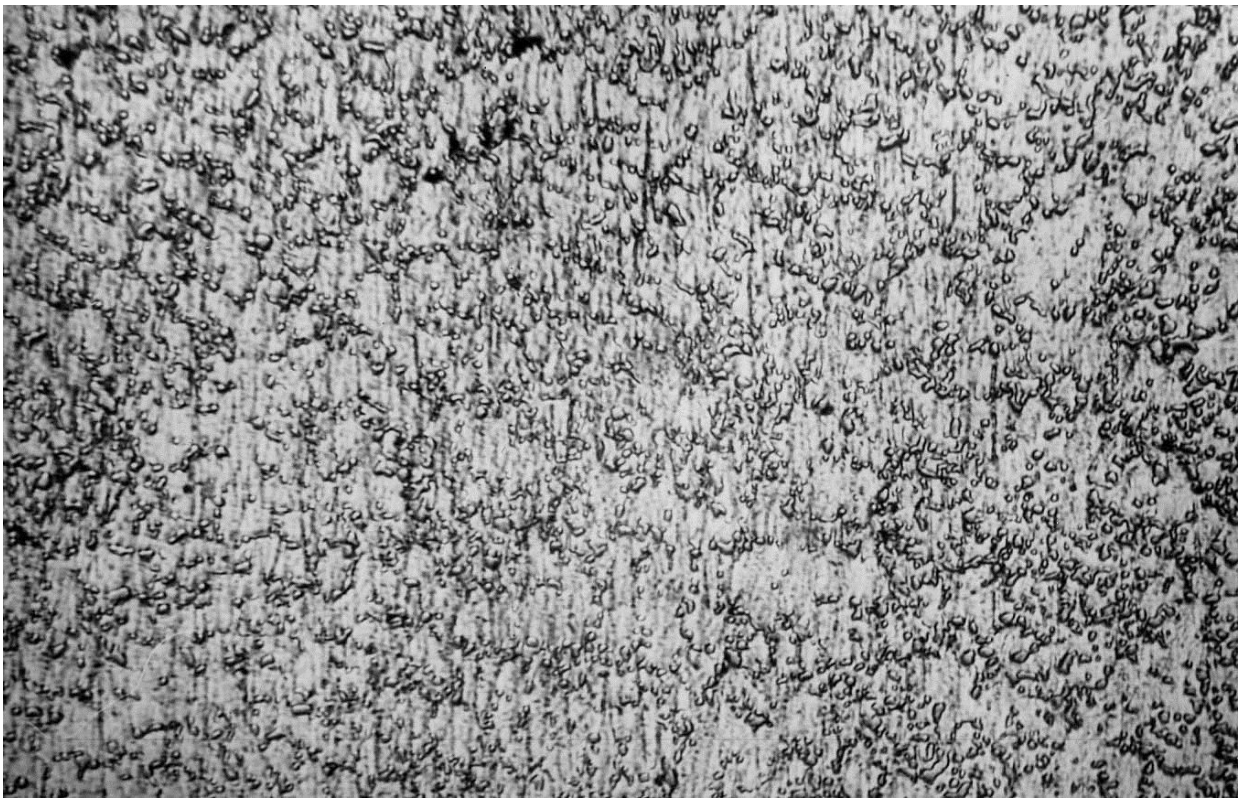


Рисунок 3.3 – Мікроструктура розробленого дослідного сплаву, × 400

ВИСНОВКИ

1. Аналіз технічної літератури показує, що на теперішній час, значно зростають технічні вимоги до комплексу механічних та експлуатаційних властивостей проводів ЛЕП, а також до якості матеріалів з яких вони виготовлені [19, 20].

2. Нові матеріали повинні мати низький електричний опір, бути термічно стабільними до температур ~ 240 ℃ та характеризуватися високим рівнем комплексу механічних властивостей.

3. Аналіз джерел за темою дослідження дозволяє зробити висновок, що одним з перспективних методів вирішення задачі забезпечення сучасних технічних вимог до провідникових матеріалів є застосування сплавів системи $Al - Zr$.

4. Перевагами цих сплавів є наявність у структурі дрібнодисперсної компактної інтерметалідної фази Al_3Zr, котра відіграє роль зміцнювальної та забезпечує стабільність структури, високі показники рівня механічних і експлуатаційних властивостей з підвищенням температури.

5. З метою гарантованого отримання високоякісних сплавів системи $Al - Zr$ було розроблено рафінувально–модифікувальний комплекс, застосування якого забезпечувало рафінування сплаву від шкідливих домішок, модифікування всіх структурних складових і утворення певної кількості інтерметалідної фази Al_3Zr.

6. Встановлено, що для забезпечення необхідних вимог до сплавів для виробництва дротів, раціонально застосовувати рафінувально-модифікувальний комплекс у кількості 0,06…0,08 мас.% (див. табл. 3.1.)

7. Застосування розробленого рафінувально-модифікувального комплексу при виробництві алюмінієвих сплавів, що призначені для виготовлення дротів, за рахунок підвищення комплексу їхніх механічних та експлуатаційних властивостей, дозволить допускати більші за довжиною

прольоти між опорами в ЛЕП, зменшити їхню кількість та площу земельних ділянок під них, а також забезпечить полегшення монтажу і здешевлення будівництва нових ЛЕП в цілому.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Циганенко Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні їх класу напруги: дис. … канд. тех. наук: 05.14.02 / Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського. 2007, 271 с.

2. Національна енергетична компанія України. (2022). Національна звітність про функціонування електричної системи України в 2021 році.URL: https://ua.energy/wp–content/uploads/2022/02/Zvitnist–pro–funkcionuvannya–elektroenergetichnoji–sistemi–Ukrayini–za–2021–rik.pdf (дата звернення 09.04.2023).

3. Сулейманов В. М., Кацадзе Т. Л. Електричні системи та мережі: лекції. Частина 1. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2011. 131 с.

4. Акімов О. І., Сушко Д.Л. Електричні мережі електрифікованих залізниць: навчальний посібник. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту, 2012. 293 с.

5. Кирик В. В. Електричні мережи та системи. Режим роботи розімкнених мереж: навчальний посібник. Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2014. 132 с.

6. Дьяков Є. Д. Повітряні лінії електропередачі: лекції. Харків: Харківська національна академія міського господарства, 2008. 67 с.

7. ДСТУ 839–94. Дроти неізольовані для повітряних ліній електропередачі. Київ: Держстандарт України, 1996. 21 с.

8. ДСТУ 2824–94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1996. 31 с.

9. ДСТУ 2825–94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять. Київ: Держстандарт України, 1996. 42 с.

10. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT). [Чинний від 2020–07–01]. Київ, 2020. 75 с.

11. ДСТУ 3830-98 Корозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2000–01–01]. Київ, 2000. 36 с.

12. URL: https://studfile.net/preview/5196941/ (дата звернення 13.11.2023).

13. Клименко М. М., Єгорова О. Ю. Аналіз ефективності використання існуючих засобів підвищення пропускної здатності ліній електропередач. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. №1. С. 96–100.

14. Матвєєва І. А. Дослідження та розробка технології виробництва алюмінієвого катанки з добавкою цирконію способом безперервного лиття та прокатки з метою отримання з неї термостійких проводів ЛЕП : дис. … канд. техн. наук : 05.16.04 / Матвєєва Ірина Артурівна – А., 2014. – 149 с. – Бібліогр.: С. 129–136 – 04201456622.

15. IEC 62004. Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. First edition 2007–02. International electrotechnical commission, 2007. 16 p.

16. ASTM B941–16. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes. 4 p.

17. Мітяєв О. А. Науково–технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01. Запоріжжя, 2008. 285 с.

18. ДСТУ 2839–94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. Київ: Держстандарт України, 1996. 109 с.

19. Циганенко Б. В., Кирик В. В. Особливості функціонування розподільних мереж середнього класу напруги та їх переведення на напругу 20кВ. *Гідроенергетика України*. 2016. №3–4. С. 7–13.

20. Циганенко Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні їх класу напруги : дис. … канд. техн. наук : 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Київ, 2017. 271 с.