Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

рівень вищої освіти *другий (магістерський) рівень*
(другий (магістерський) рівень)

на тему *Аналіз сучасного стану та напрями вдосконалення виготовлення алюмінієвих сплавів*

Виконав: студент *2* курсу, групи *8.1364-мкм*

Старій Є.В.
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
136 Металургія
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
Металургія кольорових металів
(шифр і назва)

Керівник *Нестеренко Т.М.*
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент
Бєлоконь Ю.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський) рівень*
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність *136 Металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *Металургія кольорових металів*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь

"____" _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

Старій Євген Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) *Аналіз сучасного стану та напрями вдосконалення виготовлення алюмінієвих сплавів*

керівник роботи (проєкту) *Нестеренко Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "27" 02 2025 року № *319-с*

2. Строк подання студентом роботи (проєкту) *10.12.2025 р.*

3. Вихідні дані до роботи (проєкту) *Вторинна некомпактна алюмінієва сировина, що досліджується: відходи механічної обробки литва, пресованих виробів, поковок та ін. (стружка, висічка, обрізки, облой та ін.); відходи прокатної переробки (обрізки прутків, листів, профілів, стружка тощо); науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Зміст. Вступ. 1 Аналітична частина. 2 Методика дослідження. 3 Дослідницька частина. 4 Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентаційний матеріал на 18 слайдах (на 18 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Аналітична частина	*Нестеренко Т.М., доцент*	
Методика дослідження	*Нестеренко Т.М., доцент*	
Дослідницька частина	*Нестеренко Т.М., доцент*	
Охорона праці та		
техногенна безпека	*Нестеренко Т.М., доцент*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., завідувач кафедри*	

7. Дата видачі завдання *01.03.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Вступ*	*до 07.12.2025*	*Виконано*
2	*Реферат*	*до 07.12.2025*	*Виконано*
3	*Аналітична частина*	*до 30.06.2025*	*Виконано*
4	*Методика дослідження*	*до 28.11.2025*	*Виконано*
5	*Дослідницька частина*	*до 28.11.2025*	*Виконано*
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*до 30.11.2025*	*Виконано*
7	*Висновки*	*до 04.12.2025*	*Виконано*
8	*Графічна частина*	*до 10.12.2025*	*Виконано*

Студент _____ *Є.В. Старій*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Т.М. Нестеренко*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 117 с., 37 табл., 34 рис., 37 джерел, 1 додаток.

АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, НЕКОМПАКТНА ВТОРИННА АЛЮМІНІЄВА СИРОВИНА, НЕМЕТАЛЕВІ ДОМІШКИ, ФЛЮСОВЕ РАФІНУВАННЯ, ЯКІСТЬ.

Об’єкт дослідження – процес рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини від неметалевих домішок флюсами, до складу яких входить фторид натрію та кріоліт.

Предмет дослідження – вплив технологічних чинників флюсового рафінування на якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини

Мета роботи – дослідити вплив технологічних умов флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, на якість отриманих алюмінієвих сплавів

Методи дослідження – термодинамічний аналіз реакцій взаємодії алюмінієвого розплаву з флюсами; метод Дардела-Гудченко; технологічні проби Добаткіна-Зинов’єва; металографічний аналіз, хімічний аналіз розплаву; методика визначення балу пористості виливка, математична обробка результатів дослідження.

Одержані наслідки та їх новизна – застосування гранульованого чотирикомпонентного флюсу під час рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини, дозволяє зменшити витрату флюсу до 0,75 %, понизити температуру рафінування на 25-30 °С, забезпечує отримання якісного сплаву. Запропоновані технологічні умови флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, дозволяють знизити газонасиченість розплавів з 0,97-0,58 $см^3$/100 г металу до 0,16-0,19 $см^3$/100 г металу і угар металу, підвищити якість алюмінієвих сплавів.

Результати досліджень можна застосувати для виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.

ЗМІСТ

Вступ……...7
1 Аналітична частина……..……..11
1.1 Класифікація і характеристика алюмінієвих сплавів…….....11
1.2 Сучасний стан застосування алюмінієвих сплавів. Утворення вторинної алюмінієвої сировини……...17
1.3 Способи виготовлення алюмінієвих сплавів…….....23
1.3.1 Електротермічний спосіб отримання конструкційних ливарних алюмінієвих сплавів…….24
1.3.2 Спосіб сплавлення…….....25
1.4 Підготовка алюмінієвих відходів до металургійної переробки……...28
1.5 Сучасні технології та устаткування для плавлення підготовленої вторинної алюмінієвої сировини……...31
1.6 Рафінування алюмінієвих розплавів……..34
1.6.1 Види і характеристика домішок у алюмінієвих сплавах……...34
1.6.2 Методи рафінування алюмінієвих розплавів та їх класифікація…..37
1.6.3 Особливості флюсового рафінування алюмінієвих розплавів……..40
1.7 Напрями вдосконалення виготовлення алюмінієвих сплавів……..45
Висновки…….46
2 Методика дослідження…….……...……...47
2.1 Характеристика вихідних матеріалів і обладнання……..47
2.2 Методика проведення дослідження…….……..50
2.3 Методики визначення газонасиченості сплаву та вмісту неметалевих домішок…….....51
2.2 Методика проведення термодинамічних розрахунків…….…….54
Висновки…….55
3 Дослідницька частина……56
3.1 Термодинамічний аналіз реакцій взаємодії алюмінієвого розплаву з компонентами флюсу…….56
3.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей флюсів. Вибір складу рафінувального флюсу……66
3.3 Вплив температури рафінування і виду підготовки флюсу на ефективність рафінування……...69
3.4 Математична обробка результатів дослідження……...79

3.5 Дослідження мікроструктури алюмінієвого сплаву…….83
3.6 Заходи щодо впровадження результатів дослідження…….85
3.7 Організація виконання науково-дослідницької роботи……....88
3.7.1 Планування етапів науково-дослідницької роботи……88
3.7.1.1 Визначення трудомісткості виконання НДР…….……..89
3.7.1.2 Визначення числа виконавців НДР…….....90
3.7.1.3 Розрахунок тривалості етапів НДР……...90
3.7.1.4 Побудова стрічкового графіку проведення науково-дослідницької роботи.……..……..91
3.7.2 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження……..91
3.7.2.1 Розрахунок витрат на основні матеріали……92
3.7.2.2 Розрахунок витрат на амортизацію обладнання……93
3.7.2.3 Розрахунок витрат на електроенергію……94
3.7.2.4 Розрахунок заробітної плати і відрахування…….……..94
3.7.2.5 Накладні витрати……..……..97
3.7.2.6 Зведений кошторис витрат на науково-дослідницьку роботу……..……97
Висновки……98
4 Охорона праці та техногенна безпека…….....99
4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників виробничого середовища, що впливають на дослідника…….....99
4.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища……..……..….100
4.3 Виробнича санітарія…….....102
4.4 Електробезпека……...……105
4.5 Заходи пожежної безпеки……..……106
4.5 Розрахунок вентиляції для видалення залишкової теплоти……..107
Висновки…….…..110
Загальні висновки……..…….111
Перелік джерел посилання…….112
Додаток. Тези на ІІ Міжнародну науково-практичну конференцію «Інженерні інновації та розбудова національної економіки» Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні (м. Запоріжжя, 15-16 травня 2025 року)…….……..115

ВСТУП

Переваги легкого алюмінію набувають все більшого значення для суспільства, яке прагне до поступового зниження негативного впливу на довкілля при транспортуванні людей і товарів, завдяки зниженню ваги самих транспортних засобів (літаків, автомобілів, інших машин) та ваги самих товарів. Такі екологічні мандати посилюються завдяки можливості повного застосування відпрацьованих алюмінієвих виробів.

Алюміній і алюмінієві сплави є цінними конструкційними матеріалами, мають найширшу сферу застосування від ракетно-космічної галузі до медицини і будівельних матеріалів. Разом с тим, виробництво первинного алюмінію з бокситів пов’язано з великими енерговитратами, що позначається на його високій вартості, а видобуток бокситів також завдає шкоди навколишньому середовищу. Скорочення запасів невідновлюваних природних ресурсів і, як наслідок, дефіцит первинного алюмінію, що зростає, зумовлюють актуальність досліджень з більш глибокої переробки та збільшення частки алюмінієвих сплавів, що отримують з вторинної алюмінієвої сировини.

Переробка та повернення у металообіг відходів чорних та кольорових металів характеризується досить високим рівнем використання – понад 88 % у спільній частці промислових відходів [1]. Це зумовлено, насамперед, тим, що металеві матеріали здатні зберігати (успадковувати) структуру, фізичні властивості та, частково, хімічний склад у складній взаємопов’язаній системі обігу металів у процесах металургії.

Актуальність виготовлення алюмінієвих сплавів з вторинної алюмінієвої сировини зумовлена ще й суттєвою різницею в енергетичних витратах при виробництві продукції з первинних та вторинних металів. Наприклад, на виробництво первинного алюмінію витрачається енергії рівної 174 ГДж/т, проте на виробництво алюмінію з вторинної сировини – 20 ГДж/т [1].

В умовах військового стану ситуація в Україні, однієї сторони, суттєво загальмувала тенденції росту споживання алюмінієвих сплавів, виготовлених з

вторинної сировини, зв’язку з падінням обсягів виробництва у будівництві та машинобудуванні, а з іншого боку, ще більше загострила та актуалізувала завдання з розробки та розвитку ресурсозберігаючих, наукомістких технологій у виробництві алюмінієвих сплавів.

Аналіз відкритих джерел інформації щодо кількості металів і сплавів, що отримують з вторинної сировини, показує, що найбільшу частку у вторинній кольоровій металургії займають такі дефіцитні метали і сплави на їх основі, як алюміній і мідь.

Зростаючий дефіцит первинних металів та забезпечення конкурентоспроможності за рахунок зниження собівартості готових виробів роблять актуальними дослідження, спрямовані на технології більш глибокої переробки та збільшення частки металевих відходів у металургійному виробництві. Однак широке застосування брухту на вітчизняних металургійних підприємствах, а також готової продукції, що отримується з вторинних сплавів, стримується з наступних причин. По-перше, через відсутність комплексних технологій переробки вторинної сировини та подальшого залучення у виробництво і, по-друге, через небажання підприємств, що переробляють вторинну алюмінієву сировину і отримують алюмінієві сплави, освоювати глибші переділи (переплавлення, виробництво якісних алюмінієвих лігатур, сплавів і спеціальних добавок із регламентованими структурою та властивостями).

Мета роботи – дослідити вплив технологічних умов флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, на якість отриманих алюмінієвих сплавів.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати сучасний стан виробництва алюмінієвих сплавів в Україні та напрями вдосконалення технологій виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини (стружки, обрізки, висічка та ін.).

2. Проаналізувати вірогідність рафінування алюмінієвих розплавів від неметалевих домішок флюсами, до складу яких входить фторид натрію та кріоліт.

3. Вибрати склад флюсу для рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.

4. Експериментально дослідити вплив температури рафінування, способу приготування флюсу на якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини. Вибрати технологічні умови рафінування.

5. Розробити технологічну схему виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, яку під час переплавлення рафінують флюсами за запропонованою технологією.

Об’єкт дослідження – процес рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини від неметалевих домішок флюсами, до складу яких входить фторид натрію та кріоліт.

Предмет дослідження – вплив технологічних чинників флюсового рафінування на якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.

Наукова новизна:

1. Термодинамічним аналізом взаємодії алюмінію і його оксиду з компонентами флюсу та вивченням фізико-хімічних властивостей флюсів обґрунтовано вибір композиції флюсу для рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.

2. Якість очищення алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, флюсами залежить не тільки від їхнього складу, а також від технологічних чинників рафінування, які

створюють ті або інші умови доставляння оксидних включень на межу розділу метал – флюс.

3. Експериментальними дослідженнями підтверджено вірогідність очищення алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, від неметалевих домішок чотирикомпонентним флюсом, до складу якого входить фторид натрію та кріоліт.

Практичне значення:

1. Застосування гранульованого чотирикомпонентного флюсу під час рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини, дозволяє зменшити витрату флюсу до 0,75 %, понизити температуру рафінування на 25-30 °С, забезпечує отримання якісного сплаву.

2. Запропоновані технологічні умови флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, виготовлених із залученням до шихти із вторинної алюмінієвої сировини, дозволяють знизити газонасиченість сплавів з 0,97-0,58 $см^3$/100 г металу до 0,16-0,19 $см^3$/100 г металу і угар металу. Вміст водню не перевищує встановленого показника.

3. Розроблена технологічна схема виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини.

4. Використання гранульованої фосфористої міді, що містить 20 % фосфору, як модифікатора алюмінієвого сплаву забезпечує досягнення стійкого модифікуючого ефекту.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Класифікація і характеристика алюмінієвих сплавів

Алюміній (Al) є хімічним елементом третьої групи періодичної системи Д. І. Менделєєва; атомний номер алюмінію – 13; радіус атома – 0,143 нм; атомна маса – 26,98154. Іони алюмінію під час кристалізації металу займають кути і центри граней куба, і елементарна кристалічна решітка алюмінію є кубом з центрованими гранями (ГЦК-решітка). Координаційне число такої гратки дорівнює 12, оскільки кожен іон алюмінію «дотикається» з дванадцятьма сусідніми [2,3]. Розмір ребра елементарного куба (період) кристалічних ґрат алюмінію чистотою 99,97 % становить 0,404 нм. Відстань між двома найближчими іонами алюмінію в елементарному осередку становить 0,286 нм. Алотропічних перетворень алюміній не має. Щільність твердого та розплавленого алюмінію знижується у міру збільшення його чистоти (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 − Залежність щільності алюмінію від його чистоти за різних температур (за даними Д. Едвардса, С. Тейлора)

Температура, °С	Щільність алюмінію (г/см^3) різних ступенів чистоти, %					
	99,25	99,40	99,75	99,97	99,996	99,9998
20	2,72	2,706	2,703	2,6996	2,6989	2,69808
1000	2,311	2,291	2,289	-	-	-

У табл. 1.2 наведено динамічну в’язкість рідкого алюмінію (99,999 %) залежно від температури.

Таблиця 1.2 – Залежність динамічної в’язкості рідкого алюмінію від температури [4]

Температура, °С	669	710	744	776	804
1	2	3	4	5	6
В’язкість, МПа·с	1,1603	1,0909	1,0231	0,9841	0,9481

Продовження табл. 1.2

Температура, °С	837	860	885	923
1	7	8	9	10
В’язкість, МПа·с	0,9002	0,8722	0,8533	0,8104

Зі збільшенням чистоти алюмінію температура плавлення металу підвищується (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Залежність температури плавлення алюмінію від його чистоти [2-4]

Ступінь чистоти, %	99,2	99,5	99,6	99,7	99,996
Температура плавлення, °С	657	658	659,7	659,8	660,24

У момент плавлення обсяг алюмінію чистотою 99,65 % збільшується на 6,25 %, чистішого – на 6,6 %. Зі збільшенням температури розплавленого алюмінію відбувається зниження його тепло- та електропровідності.

Температура кипіння залежить від чистоти металу і за різними даними становить 2348-2520 °С [2-4].

Алюміній має високу електропровідність і займає четверте місце серед металів після Ag, Cu та Au. Питома електрична провідність (γ) алюмінію чистотою 99,99 % (А99) за 20 °С становить 37,9 МСм/м. Великий вплив на величину електропровідність надає кількість і природа елементів, присутніх в алюмінії як домішки. Майже всі елементи знижують електропровідність алюмінію. За ступенем впливу (за спаданням) їх можна розмістити в наступний ряд: Cr, Mn, Ti, Mg, Cu, Zn, Si, Fe, Ni. Таким чином, зниження чистоти алюмінію (збільшення сумарної кількості легуючих елементів та домішок) буде викликати зменшення його електропровідності.

Типова діаграма стану системи Al – легуючий елемент та розташування областей концентрації для сплавів різного призначення наведено на рис. 1.1. На даній діаграмі мається на увазі подвійний або багатокомпонентний твердий розчин на основі алюмінію; літерою β позначена інтерметалідна фаза. Наведена діаграма показує, що алюмінієві сплави дуже різноманітні за фазовим складом та технологічним призначенням [5].

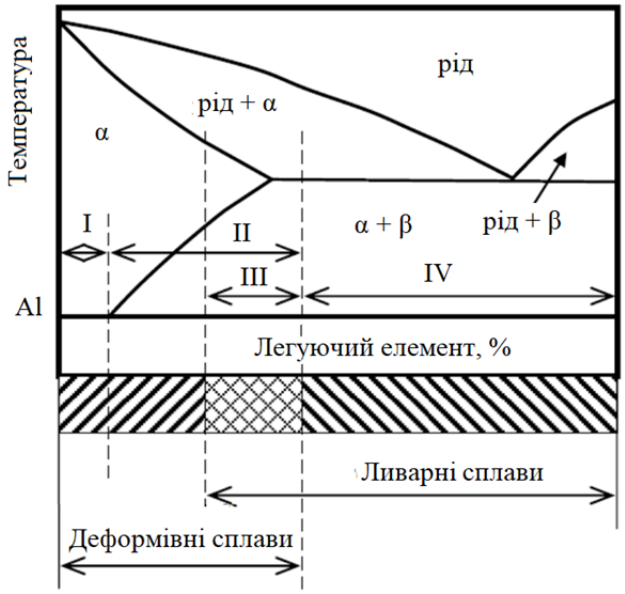


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи Al – легуючий елемент [5]

Малолеговані сплави (область I) не здатні до зміцнюючої термічної обробки і мають невисоку міцність ($\sigma_в$ = 130−200 МПа), але мають дуже хорошу пластичність (δ більше 30-40 %), добре обробляються всіма видами обробки тиском і добре зварюються всіма.

Середньолеговані сплави (області II та III) схильні до зміцнюючої термічної обробки. Міцність таких сплавів, залежно від ступеня легованості, може досягати 600 МПа, а пластичність – 20 %. При цьому пластичність деформованих сплавів вища, ніж ливарних за рахунок чистоти та подрібнення інтерметалідних та інших структурних складових у процесі пластичної деформації. Особливо чітко ця залежність проявляється щодо сплавів, розташованих у області III.

Високолеговані сплави (область IV) є ливарними сплавами, оскільки містять велику кількість інтерметалідної фази в евтектиці, що перешкоджає обробці пластичною деформацією. Як відомо, ливарні властивості покращуються з наближенням хімічного складу сплаву до евтектичного. З цієї точки зору, доцільно було б використовувати евтектичні сплави. Але на практиці найповніше це вдається реалізувати тільки для сплавів системи Al-Si,

у яких евтектична точка лежить при 117-124 % Si. У сплавах Al-Mn евтектична точка лежить близько до чистого алюмінію (2,1 % Mn), у сплавах Al-Zn – близько до цинку (95 % Zn). У сплавах Al-Mg та Al-Cu евтектики розташовані при 33 % і містять велику кількість інтерметалідів Al_3Mg_2 або $CuAl_2$, що перешкоджає промисловому використанню таких сплавів евтектичного складу.

Алюмінієві сплави класифікують за технологією виготовлення з них виробів, за здатністю до зміцнення термічною обробкою та за призначенням. Крім того, їх іноді поділяють за ступенем чистоти (за сумарним вмістом домішок).

За технологією виготовлення виробів алюмінієві сплави поділяють на чотири групи [2,6]: 1) деформівні сплави; 2) ливарні метали; 3) спечені алюмінієві сплави (САС), які отримують методом порошкової металургії; 4) розкислювачі.

За здатністю до зміцнення термічної обробкою розрізняють метали: 1) термічно зміцнювані; 2) термічно незміцнювані.

За призначенням алюмінієві сплави можна поділити на такі групи: 1) сплави низької та середньої міцності звичайного призначення; 2) високоміцні та жароміцні сплави; 3) корозійностійкі сплави; 4) сплави підвищеної герметичності; 5) сплави спеціального призначення (поршневі, заклепувальні, самозагартовувані).

За рівнем чистоти металу розрізняють: 1) сплави звичайної чистоти; 2) чисті сплави (вміст домішок у 2-3 рази менше, ніж у звичайних); наприкінці марок таких сплавів ставлять літеру «ч»; 3) підвищеної чистоти (вміст домішок у 4-5 разів менший); додається маркування «пч»; 4) особливо чисті (вміст домішок значно менше); додатково маркуються літерами «оч».

Згідно з ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) «Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови» всі ливарні алюмінієві сплави поділеяють на 5 груп [7].

I. Сплави з урахуванням системи Al-Si-Mg.

II. Сплави з урахуванням системи Al-Si-Cu.

III. Сплави з урахуванням системи Al-Cu.

IV. Сплави з урахуванням системи Al-Mg.

V. Сплави на основі системи Al-інші компоненти.

Хімічні склади деформівних алюмінієвих сплавів регламентуються ГОСТ 4784 «Алюміній і сплави алюмінієві деформівні. Марки». Згідно зі стандартом всі деформівні алюмінієві сплави поділяють на 8 груп [8]:

I. Алюміній технічної чистоти.

II. Сплави систем Al-Cu-Mg та Al-Cu-Mn.

III. Сплави системи Al-Mn.

IV. Сплави системи Al-Mg.

V. Сплави системи Al-Mg-Si

VI. Сплави системи Al-Zn-Mg.

VII. Сплави для виготовлення дроту холодної висадки системи Al-Cu-Mg-Mn.

VIII. Сплави для виготовлення зварювального дроту з алюмінію технічної чистоти та систем Al-Mg, Al-Si та Al-Cu-Mn.

Порівняльний аналіз хімічних складів, наприклад, ливарних сплавів системи алюміній-кремній Al-Si показує, що у зарубіжних аналогах вміст деяких домішкових елементів вищий у порівнянні з вітчизняними українськими сплавами (табл. 1.4). Найбільш характерними домішками для вторинних алюмінієвих сплавів є залізо та цинк.

Таблиця 1.4 − Хімічний склад вітчизняних силумінів та їх зарубіжних аналогів

Марка сплаву	Стандарт	Масова частка елементів,%			
		Si	Cu	Fe	Mg
1	2	3	4	5	6
АК12М2	ДСТУ 2839-94	11,0-13,0	1,8-2,5	0,6-0,9	<0,2
А385.1	АА(США)	11,0-13,0	2,0-4,0	<1,1	<0,3
А385.0	АА(США)	11,0-13,0	2,0-4,0	<1,1	<0,3
АК12ММгН	ДСТУ 2839-94	11,0-13,0	0,8-1,5	<0,7	0,85-1,35
G-AlSi12(Cu)	DIN1725 (Німеччина)	10,5-13,5	<1,0	<0,8	<0,3
АК6М2	ДСТУ 2839-94	5,5-6,5	1,8-2,3	<0,5	0,35-0,50
АС2В	JIS H5202 (Японія)	5,0-7,0	2,0-4,0	<1,0	<0,5

Продовження табл.1.4

Марка сплаву	Масова частка елементів,%				
	Mn	Zn	Ni	Ti	Pb
1	7	8	9	10	11
АК12М2	<0,5	<0,8	<0,3	<0,2	<0,15
А385.1	<0,5	<2,9	<0,5	–	–
А385.0	<0,5	<2,9	<0,5	–	–
АК12ММгН	<0,2	<0,2	0,8-1,3	–	<0,05
G-AlSi12(Cu)	0,1-0,5	<0,5	<0,2	<0,15	<0,2
АК6М2	<0,1	<0,06	<0,05	0,1-0,2	–
АС2В	<0,5	<1,0	<0,35	<0,2	<0,2

Наведені у табл.1.4 дані свідчать, що у промислово розвинених країнах частка використання вторинної алюмінієвої сировини під час виробництва алюмінієвих сплавів набагато вище, ніж в Україні.

Заготовки з порошкових алюмінієвих сплавів мають форму брикетів, з яких обробкою тиском виготовляють напівфабрикати. Розмір часточок порошкових сплавів становить 5-500 мкм, гранульованих – 1-2 мм [6].

Є дві групи спечених алюмінієвих сплавів промислового значення:

- САП (спечена алюмінієва пудра);

- САС (спечений алюмінієвий сплав).

Спечені алюмінієві сплави характеризуються низьким коефіцієнтом лінійного розширення і підвищеним модулем пружності. За цими характеристиками порошкові сплави помітно перевершують відповідні ливарні алюмінієві сплави.

З вторинної алюмінієвої сировини виплавляють сплави трьох типів: ливарні, деформівні та розкислювачі.

Сплави-розкислювачі звичайно виготовлюють з низькосортної вторинної алюмінієвої сировини або з первинного алюмінію, забрудненого розчиненим залізом. Хімічний склад цих сплавів відповідно до ДСТУ 3753 (ГОСТ 295) наведений у табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад алюмінію для розкислення, виробництва феросплавів і алюмінотермії за ДСТУ 3753 (ГОСТ 295) [9]

Марка сплаву	Масова частка, %							
	Al+Mg		домішки, не більше					
	усього, не менше	у тому числі Mg, не більше	Cu	Zn	Si	Pb	Sn	сума
АВ97	97,0	0,1	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	3,0
АВ91	91,0	3,0	3,0	0,8	3,0	0,3	0,2	9,0
АВ87	87,0	3,0	3,8	3,3	5,0	0,3	0,2	13,0

Як випливає з даних табл.1.5, існування на них стандарту і, отже, споживача відкриває можливість переробки сировини з підвищеним вмістом Mg, Zn, Pb, Sn. Однак чим менше підприємство випускає сплавів-розкислювачів, тим вище рентабельність і культура виробництва.

Алюмінієві сплави-розкислювачі використовують для розкислення вуглецевих сталей, при виробництві феросплавів, металевого хрому, ванадієвих, титанових і кобальтових сплавів, одержуваних методами алюмотермії.

Нині розробляють методи виробництва фероалюмінію з низькосортних алюмінієвих відходів – зйомів, вигребів, що утворюються під час безфлюсової плавки. Застосування такого фероалюмінію дозволить скоротити витрату алюмінію марок АВ для розкислення сталей [6].

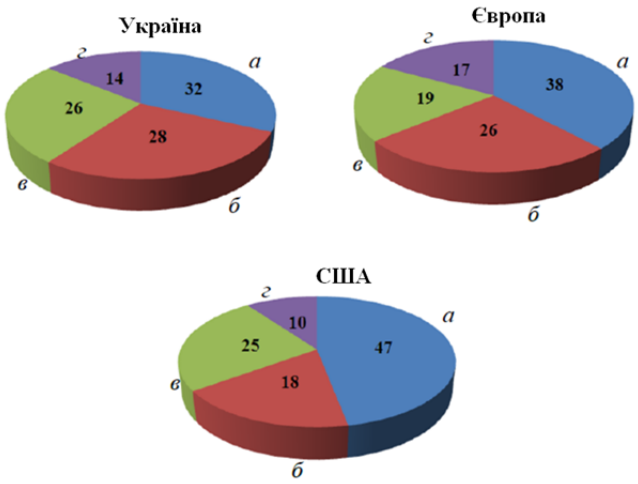
1.2 Сучасний стан застосування алюмінієвих сплавів. Утворення вторинної алюмінієвої сировини

Алюміній та сплави на його основі знаходять застосування у різних галузях промисловості.

На рис. 1.2 наведені дані щодо споживання алюмінієвих сплавів у різних галузях промисловості.

З наведених даних видно, що найбільше виробів з алюмінію та алюмінієвих сплавів посідає машинобудування (32-47 %). На другому місці за

споживанням алюмінію в Україні та Європейських країнах будівництво (28 та 26 %, відповідно). Значна кількість алюмінієвих сплавів споживається під час виготовлення різних видів пакування (19-26 %).



а – машинобудування; б – будівництво; в – пакування і тара; г – інші

Рисунок 1.2 – Споживання виробів з алюмінієвих сплавів за галузями промисловості (%) [11]

На рис. 1.3 представлені дані щодо динаміки зростання обсягів виробництва литих виробів з алюмінієвих сплавів.

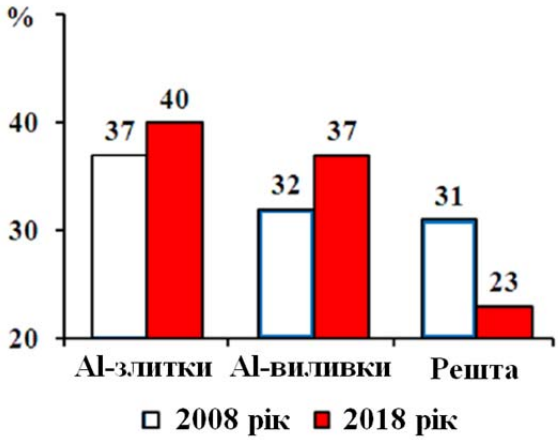


Рисунок 1.3 – Зростання обсягів виробництва литих виробів із алюмінієвих сплавів в Україні [12]

За даними рис. 1.3 випливає, що після світової кризи 2008 року в Україні у 2018 р. відзначено зростання обсягів виробництва злитків і виливків з

алюмінієвих сплавів відповідно на 8 % та 15 % [12]. Найбільш інтенсивно розвивається лиття автомобільного призначення.

Алюмінієві конструкції застосовуються в будівництві як монтажне обладнання (наприклад, опалубка), елементів несучих каркасів, огорож, віконних рам. Основними сплавами, з яких виготовляють зазначені вироби, є алюмінієві сплави, що деформуються.

Як елементи конструкцій виробу застосовують:

1) у стаціонарних нерухомих конструкціях перекриттів великопрогонових будівель за наявності агресивних середовищ (відділення промислових споруд), а також у перекриттях громадських будівель (авто- та аеровокзалів, виставкових павільйонах тощо);

2) у рухомих конструкціях, що несуть (каркаси та обрешітки великорозмірних воріт, розвідних прольотів мостів, затворах гідротехнічних споруд);

3) у збірно-розбірних конструкціях невеликих будівель, павільйонів, кіосків;

4) у палітурках віконних рам для склопакетів.

Основними марками сплавів виготовлення зазначених виробів є, переважно, сплави систем Al-Cu-Mg і Al-Mg, у тому числі обробкою тиском отримують листи, плити, панелі, і навіть профілі різної конфігурації.

Застосування алюмінієвих сплавів у суднобудуванні дозволяє суттєво полегшити судно, збільшити його вантажопідйомність та покращити експлуатаційні характеристики (збільшити швидкість, маневреність, термін служби). Особливо це актуально для морських суден.

Вироби із алюмінієвих сплавів використовують для будівництва корпусів плаваючих засобів та суднових надбудов. З деформівних сплавів систем Al-Cu-Mg та Al-Mg для суднобудування виготовляють листи товщиною до 10 мм, плити товщиною понад 10 мм, а також профілі, цільнопресовані панелі та труби.

З ливарних сплавів (в основному, системи Al-Si) різними способами лиття виробляють корпуси підвісних моторів човнів та яхт та дизельних двигунів великовантажних суден.

У вагонобудуванні найбільш перспективним вважається використання деформівних напівфабрикатів з деформівних алюмінієвих сплавів, як елементів, що несуть, каркасів вагонів та їх обшивки. Використання зазначених елементів дозволяє створювати двоповерхові пасажирські вагони, корозійностійкі вантажні вагони для твердих сипких та рідких агресивних вантажів. У зв'язку з тим, що складання елементів таких вагонів є доцільним із застосуванням зварювання, то використовуються сплави системи Al-Mg, додатково леговані іншими елементами (наприклад, скандієм).

До 60-90 % виробів з алюмінієвих сплавів застосовують в аерокосмічній техніці при виготовленні планерів, гелікоптерів та літаків, що літають на швидкостях до 2500 км/год. З алюмінієвих сплавів виготовляють рідинні та твердопаливні ракети та супутники. В аерокосмічній техніці використовують деформовані напівфабрикати з високоміцних сплавів, що зміцнюються термообробкою (Д16, В95, В93 та ін.).

Основною тенденцією в галузі розробок космічних матеріалів є створення гранульованих алюмінієвих сплавів, які забезпечують практично 30 % зниження ваги вузлових конструкцій. Розширюється діапазон їх робочих температур до 850 °С. За останні кілька років було розроблено декілька таких сплавів. Фахівці об'єднують їх у клас інтерметалідів, це, як правило, сплави титану, причому найперспективнішими вважаються варіанти системи Ti–Al. Крім титанових сплавів у ракетобудуванні застосовуються варіанти систем Ni−Al і Fe−Cr−Al.

Частка ливарних сплавів у літакових конструкціях становить 3-5 %. З них отримують у різний спосіб лиття корпусу двигунів, поршні, головки блоків двигунів, деталі паливної апаратури).

Найбільший обсяг алюмінієвих сплавів в електротехніці використовується виготовлення проводів ліній електропередач. Алюмінієві дроти виготовляють з

нелегованого алюмінію марок АЕ, АД0, АД00.

Досить ємним сегментом споживання алюмінієвих сплавів є пакування і тара. У медичному пакуванні використовують переважно нелегований алюміній у вигляді фольги. Найбільш динамічно розвивається виробництво посуду, тари у вигляді банок з-під напоїв, побутових приладів. Для виготовлення банкової тари з-під напоїв використовують сплави систем Al-Mn і Al-Mg.

Автомобілебудування є найбільш ємним споживачем виробів з алюмінієвих сплавів. Більшою мірою використовуються ливарні метали систем Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Ni. З них виробляють колісні диски, головки блоку циліндрів та самі блоки, поршні, елементи картерів рульового управління та коробки передач. Деформівні алюмінієві сплави поки що меншою мірою застосовуються в автомобілебудуванні через їх високу вартість порівняно з виробами зі сталі. Але в перспективі прогнозується виготовлення навісних елементів кузовів і самих кузовів з алюмінієвих сплавів, що деформуються.

Нині намітилася тенденція виготовлення деталей з алюмоматричних композиційних сплавів з урахуванням системи Al-Si. Підвищену зносостійкість, низький коефіцієнт термічного лінійного розширення та тривалий термін експлуатації надають виробам за допомогою армування алюмінієвої матриці невеликими добавками карбіду кремнію або титану.

У сучасних зарубіжних моделях автомобіля маса деталей із алюмінієвих сплавів досягає 110-200 кг. Основна тенденція у світовому автомобілебудуванні спрямована на збільшення частки виробів із легких сплавів – алюмінію та магнію. Так, виливок блоку циліндрів з чавуну, в середньому, важить 72 кг, з алюмінієвого сплаву – 23 кг [11]. Зниження маси автомобіля на кожні 10 % дає економію бензину 6 %.

Основним стримуючим фактором є різниця у вартості вихідних матеріалів: чавун і сталь значно дешевше за алюміній. Отже, знизити собівартість деталей з алюмінієвих сплавів можна й рахунок збільшення частки вторинних сплавів, одержуваних з алюмінієвих брухту і відходів. Природно,

необхідною умовою при цьому є забезпечення гарантованого запасу характеристик міцності і ресурсних виробу.

Аналогічні тенденції відзначаються у залізничному транспорті та будівництві [12]. Створення «алюмінієвих» вагонів відповідає світовій стратегії розвитку залізничного транспорту. Відомо, що «алюмінієві» вагони мають життєвий цикл до 40 років та меншу вагу порівняно із сталевим вагоном (практично, на 40 %) [11].

У промислово розвинених країнах частка використання вторинної алюмінієвої сировини під час виробництва алюмінієвих сплавів набагато вище, ніж в Україні. Кількість споживаного вторинного алюмінію у загальному споживанні алюмінію у розвинених країнах перевищує 30 % (США – 34,8 %; Німеччина – 35,1 %; Японія – 34,8 %), в у Україні – 10,6 % (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 − Використання вторинного алюмінію [10]

Країна	Споживання алюмінію, тис. т		Частка вторинного алюмінію, %
	загальне	вторинного алюмінію	
США	8412,0	2296,0	34,8
Німеччина	2519,0	888,4	35,1
Японія	3564,0	1240,0	34,8
Україна	47,20	5,10	10,6

Відмінність європейського підходу щодо утилізації та переробки вторинної сировини кольорових металів і сплавів на їх основі від українського полягає, в першу чергу, у використанні більш сучасного та технологічного обладнання на всіх етапах переробки.

Істотним стримуючим чинником у впровадженні та розвитку наукомістких технологій на українських підприємствах вторинної металургії є застарілі ДСТУ, що регламентують вимоги до якості сплавів. ДСТУ 2839-94 [7] висуває мінімальні вимоги до ливарних алюмінієвих сплавів у чушках, що полягають, в основному, у регламентації хімічного складу та балу пористості. Занижений (стосовно сучасних вимог технологій і техніки) рівень механічних властивостей, що регламентуються, у виробах також не сприяє розвитку

сучасних технологій і прагненню виробників до їх впровадження на своїх підприємствах.

Основні вимоги до вторинної алюмінієвої сировини викладено у ДСТУ 3211-95 «Брухт і відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови» [10]. Вимоги ДСТУ 3211-95 поширюються на брухт та відходи кольорових металів та сплавів, які призначені для подальшого виробництва кольорових металів та сплавів, а також інших видів продукції. Брухт і відходи кольорових металів та сплавів поділяють за найменуваннями металів; за фізичними ознаками – на класи; за хімічним складом – на групи та марки сплавів; за показниками якості – на сорти [10].

Зі збільшенням порядкового номера виду відходів змінюються ступінь легованості сплавів (збільшення кількості легуючих елементів у сплаві), походження, вид та сортність. Відповідно, змінюються найменування показників та норм, яким має відповідати кожен вид відходів. Крім того, основною відмінністю нової редакції стандарту в порівнянні з раніше діючим стандартом є те, що він інтегрований із закордонними аналогами.

Актуальність раціонального використання алюмінієвих брухту і відходів обумовлена тим, що алюмінієві сплави знаходять все ширше застосування в будівництві, енергетиці, на транспорті, в авіації та ін. Збільшується частка алюмінієвих сплавів у виробництві тари, особливо банок з-під напої.

Таким чином, неухильне зростання споживання виробів з алюмінієвих сплавів у всіх галузях промисловості сприяє збільшенню кількості вторинної алюмінієвої сировини, що утворюються, і вимагає розробки раціональних технологій її переробки для повторного використання.

1.3 Способи виготовлення алюмінієвих сплавів

Алюмінієві сплави виготовляють традиційними металургійними способами (електротермічним відновленням природних алюмосилікатів вуглецевим відновником, сплавлянням чистих металів, лігатур з

електролітичним алюмінієм, електролізом), а також методом порошкової металургії [13], який не розглядається через істотну відмінність технології від традиційних металургійних способів.

1.3.1 Електротермічний спосіб отримання конструкційних ливарних алюмінієвих сплавів

Електротермічний спосіб одержання конструкційних ливарних алюмінієвих сплавів з природних алюмосилікатів складається з трьох основних стадій: 1) підготовка сировини і готування шихти; 2) пряме безшлакове відновлення природних алюмосилікатів у руднотермічній електропечі для одержання первинного алюмінієво-кремнієвого сплаву; 3) переробка первинного сплаву на марочні ливарні алюмінієві сплави [4,5].

Електротермічний спосіб дозволяє одержати алюмінієво-силіцієві сплавів прямим відновленням природних алюмосилікатів вуглецем у потужних руднотермічних електропечах. Одержаний первинний алюмінієво-силіцєвий сплав (силікоалюміній), що містить близько 35-40 % силіцію, розбавляють потім електролітичним або вторинним алюмінієм до складу, що відповідає різним маркам конструкційних алюмінієвих сплавів (ливарних і сплавів, що деформуються), рафінують від домішок і розливають у чушки.

Сировиною для виплавки сплавів (силікоалюмінію) є руди, що містять одночасно глинозем Al_2O_3 і кремнезем SiO_2: каоліни ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), кіаніти ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), дистенсиліманіти ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), низькозалізні боксити, різні алюмосилікати.

Реакція відновлення оксиду алюмінію вуглецем може бути виражена рівнянням:

$$Al_2O_3 + 3C = 2\ Al + 3CO - 1340\ кДж. \qquad (1.1)$$

Шихта складається з природних алюмосилікатів, вуглецевого відновника і в’яжучого для одержання брикетів. Вимоги до сировини різні в залежності від призначення одержуваного сплаву. Найважливіша домішка, на яку слід

звертати увагу – залізо. Вміст. заліза повинен, бути мінімальним, якщо сплав надалі йде на приготування конструкційних сплавів. Значна кількість заліза припустима, якщо сплав (силікоалюмінію) призначений для розкислення.

Електротермічний спосіб виробництва сплавів дозволяє повністю використовувати силіцій первинного алюмінієво-силіцієвого сплаву й одночасно скоротити витрату електролітичного алюмінію. Крім того, при виготовленні сплаву не потрібно спеціального додавання заліза, тому що воно міститься в необхідних кількостях у первинному сплаві.

1.3.2 Спосіб сплавлення

Алюмінієві ливарні сплави та сплави, що деформуються, виготовляють методом сплавлення на ливарних ділянках металургійних і машинобудівних заводів та у плавильних цехах металургійних заводів, що переплавляють вторинну алюмінієву сировину.

Технологічний процес виробництва алюмінієво-кремнієвих сплавів сплавленням рідкого електролітичного алюмінію та кристалічного силіцію включає такі основні стадії: 1) підготовка шихтових матеріалів; 2) вибір и підготовка плавильних агрегатів; 3) плавлення (приготування сплаву); 4) рафінування; 5) модифікування; 6) розливання сплаву в чушки.

До шихтових матеріалів відносяться всі матеріали, необхідні для одержання сплавів певного хімічного складу: а) алюміній-сирець рідкий або твердий марок А7, А6, А5, А0; б) кристалічний кремній марок Кр1, Кр2 і Кр3; в) алюміній-сирець з підвищеним вмістом кремнію, одержаний при переплавлянні зйомів виробництва силуміну; г) легуючі матеріали, необхідні для готування сплавів різних марок; д) лігатури або проміжні сплави; є) відходи виробництва (браковані деталі, випори, ливники, стружка, обрізки та ін.).

При використанні вторинної алюмінієвої сировини різноманітність її хімічного складу створює труднощі при наборі компонентів шихти на плавлення. Тому для розрахунку шихти беруть типові комбінації, використання

яких забезпечує сприятливі умови для раціональної витрати алюмінієвої сировини. Для виготовлення алюмінієвого сплаву заданого хімічного складу шихту розраховують так, щоб використовувати мінімум первинних кольорових металів (Cu, Al, Si й ін.) і дотримуватись економічних вимог.

Вторинна алюмінієва сировина включає 76 видів найменувань. Для того щоб комплексно використовувати сировину і знизити втрати при її переробці застосовують складні, багатостадійні технологічні схеми [2-6]. Компонування конкретної технологічної схеми переробки вторинної алюмінієвої сировини визначається видами використовуваної сировини і застосовуваних плавильних агрегатів [2,6]. У загальному випадку технологічна схема переробки вторинної алюмінієвої сировини включає процеси приймання, первинної обробки, металургійної переробки і відвантаження готової продукції.

Основними плавильними агрегатами, які застосовують для виготовлення чушкових алюмінієво-кремнієвих сплавів в умовах алюмінієвих заводів, є поворотна відбивна електропіч опору САН, індукційна тигельна піч ІАТ, тигельна піч опору САТ [6]. Поворотна відбивна електропіч опору САН використовується як міксер-накопичувач при розливанні алюмінію на чушки або для сплавлення кристалічного кремнію з електролітичним алюмінієм та легуючими матеріалами. Індукційну тигельну піч використовують як плавильний агрегат, із якого готовий сплав переливають у встановлені на ливарних ділянках роздавальні електричні печі типу САТ, необхідні для витримки сплаву у вузьких інтервалах технологічних температур, рафінування і модифікування.

Під час плавлення алюміній з киснем активно реагує, тому його поверхня завжди покрита оксидною плівкою:

$$2Al + 3/2O_2 = Al_2O_3 + 1680 \text{ кДж/моль}. \qquad (1.2)$$

Інтенсивність окислювання залежить від вологості навколишнього середовища, температури нагрівання та складу сплаву.

Під час плавлення взаємодія алюмінієвого розплаву з пічними газами приводить до окислювання й ошлакування практично всіх складових сплаву. Однак у присутності магнію втрати металу різко зростають завдяки вибірковому окислюванню магнію, і прискоренню окислювання алюмінію з утворенням шпінелі $MgO \cdot Al_2O_3$ [6]:

$$2Al + 3/2\,O_2 = Al_2O_3, \quad (1.3)$$

$$6Al + 3SO_2 = 2Al_2O_3 + Al_2S_3, \quad (1.4)$$

$$6Al + 3CO_2 = Al_2O_3 + Al_4C_3, \quad (1.5)$$

$$2Al + 3H_2O = Al_2O_3 + 3H_2, \quad (1.6)$$

$$Mg + H_2O = MgO + H_2. \quad (1.7)$$

Металотермічні реакції у рідкій ванні характерні для алюмінію і магнію, крім збільшення втрат металу викликають перегрів ванни через їх високу екзотермічність:

$$2Al + Fe_2O_3 = Al_2O_3 + 2Fe, \quad (1.8)$$

$$4Al + 3SiO_2 = 2Al_2O_3 + 3Si, \quad (1.9)$$

$$3Mg + Fe_2O_3 = 3MgO + 2Fe, \quad (1.10)$$

$$2Mg + SiO_2 = 2MgO + Si. \quad (1.11)$$

Хімічні втрати алюмінію різко зростають при додаванні до флюсів кріоліту:

$$5Al + Na_3AlF_6 = 6AlF + 3Na. \quad (1.12)$$

Механічні втрати металу обумовлені проникненням рідкого металу в шлак через поверхневі і в’язкісні явища та просоченням футеровки ванни в силу капілярних ефектів.

Після розплавлення завантажених у піч матеріалів, видалення шлаку, перемішування відбирають пробу розплаву на попередній експрес-аналіз, який рідко повністю відповідає марці сплаву, що виготовляється. Причина цієї

невідповідності – неточність відомостей, зазначених у сертифікатах постачальників сировини, помилки при зважуванні, втрати на угар і ін.

Боротьбу з втратами металу зі шлаками слід проводити в трьох напрямках: зменшувати засміченість шихти і, таким чином, знижувати кількість одержаного шлаку; підвищувати рідкоплинність шлаків застосуванням достатньої кількості флюсів і створенням температурних умов, які сприяють виділенню крапель металу із шлаку; організувати переробку власних шлаків, що дозволяє регенерувати метал у кількості до 2,1 % готової продукції, а також хлоридні солі – до 90 %.

1.4 Підготовка алюмінієвих відходів до металургійної переробки

Відходи алюмінію та його сплавів є різноманітними за походженням, формою та дисперсністю матеріали, які потрібно до відправлення у плавильну піч ретельно підготувати.

Моторний брухт, як правило, має лите походження зі сплавів системи Al-Si. Основними операціями під час первинної підготовки моторного брухту до металургійної переробки є поділ за виглядом; додаткове відділення деталей, отриманих під тиском; витягання залізовмісних приробок; подрібнення великогабаритних відходів; виділення з моторного брухту елементів, одержаних зі сплавів інших систем.

1. Поділ за виглядом – деталі головок блоків, блоки і картера відокремлюють від поршневої групи.

2. Додатково можуть бути відділені деталі, отримані під тиском.

3. Витягання з моторного брухту по можливості залізовмісних приробок: залишки шпильок, болтів, вкладиші та вставки.

4. Подрібнення великогабаритних відходів на прес-ножицях, гідравлічних ножицях або різного виду дробарках.

5. Виділення з моторного брухту елементів, одержаних зі сплавів інших систем, з використанням спеціальних експрес-аналізаторів хімічного складу.

Відходи деформованих напівфабрикатів переважно переробляються на великих металургійних заводах, де вони утворюються. Відходи складуються за марками сплавів в обробних цехах і у міру накопичення повертаються в плавильні цехи. Відходи, що утворюються в результаті тривалого циклу експлуатації, збираються і сортуються за марками сплавів та видом, подрібнюються і пакетуються на спеціальних пресах. Розміри прес-пакетів регламентуються ДСТУ 3211-95. Відходи, що мають різні покриття (лак, фарбу та ін.), можуть бути піддані попередньому відпалу.

Відходи електрокабелів та проводів вимагають, перш за все, звільнення від ізоляції на основі полівінілхлоридів та броні. Ізоляцію відокремлюють за допомогою спеціальних штрабів - апаратів з одночасним подрібненням. Подрібнену ізоляцію направляють на спеціалізовані підприємства для подальшого рециклювання. Очищені від ізоляції дроти подрібнюють сортують за фракціями. Велика фракція брикетується і спрямовується для подальшої металургійної переробки. Дрібні фракції використовуються як розкислювачі при виробництві ряду сплавів на основі заліза.

Стружка вимагає більш ретельної та багатостадійної підготовки до переплавлення. В процесі утворення алюмінієва стружка засмічується мастильно-охолоджувальною рідиною (МОР), залізовмісними доробками від зносу ріжучого інструменту. У процесі накопичення до алюмінієвої стружки можуть потрапляти стружки із залізовмісних сплавів, ганчір’я, папір, деревина та ін. На рис. 1.4 надана принципова технологічна схема підготовки алюмінієвої стружки до плавлення.

Сипуча стружка утворюється під час механічної обробки виробів із алюмінієвих ливарних сплавів. В’юноподібна стружка є виробом з алюмінієвих сплавів, що деформуються. Стружки від ливарних і деформованих сплавів готуються до переробки окремо. Вміст вологи та рідин у стружці, що надійшла на переробку, може становити до 50 %.

Підготовка алюмінієвої стружки до металургійної переробки полягає в дробленні витої стружки, відсіванні сторонніх включень і землистого

засмічення (тобто бруду), вилучення феромагнітних включень, видаленні залишків мастил, олив і емульсій, сушінні стружки. Ці операції здійснюють на спеціалізованих установках термічного знежирення та сушіння стружки. Після видалення вологи та залишків мастильно-охолоджувальних рідин вміст вологи в стружці не повинен перевищувати 0,2 % [6]. Готовий до переплавлення продукт пакетується на пресах.

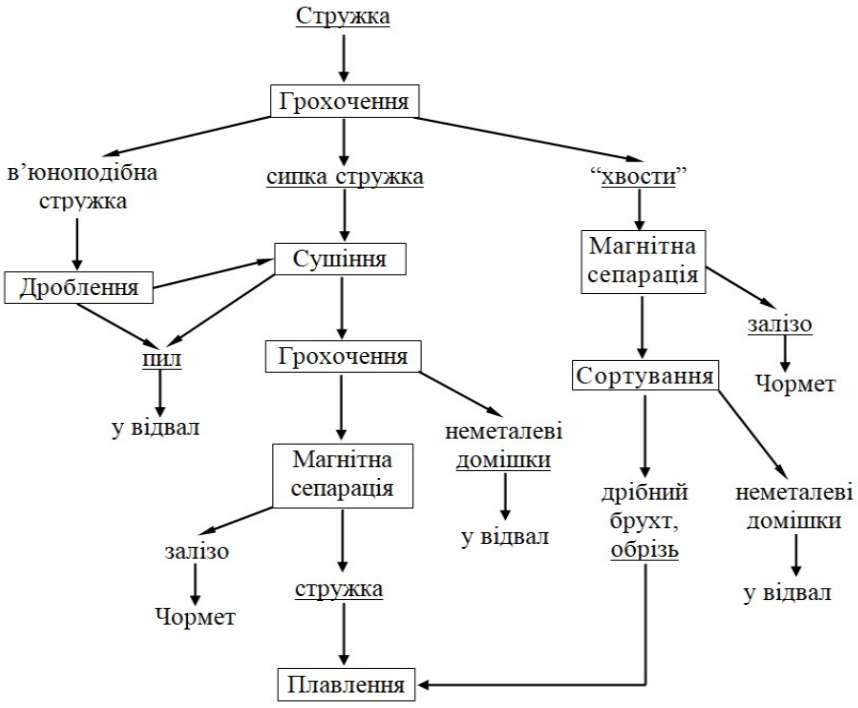


Рисунок 1.4 – Принципова технологічна схема підготовки стружки до металургійної переробки

Металошлаки, що містять алюміній, є низькосортними відходами. У світі щорічно утворюється близько 4 млн. т первинних та вторинних алюмінієвих шлаків, значна частина яких підлягає похованню на спеціальних полігонах. Первинні алюмінієві шлаки утворюються на металургійних заводах під час електролітичного виробництва первинного алюмінію. Вторинні алюмінієві шлаки утворюються на металургійних і машинобудівних підприємствах під час виготовлення алюмінієвих сплавів та виробництва виробів з них, а також під час переробки алюмінієвих брухту та відходів. Алюмінієвий шлак, отриманий на різних виробництвах і різних підприємствах, відрізняється за вмістом алюмінію, оксидів металів і залишків флюсів. У шлаках зазвичай міститься від

5 % до 80 % алюмінію. Хімічний склад алюмінієвих шлаків представлено у табл.1.7.

Таблиця 1.7 – Хімічний склад алюмінієвих шлаків [3,11]

Шлак	Масова частка елементів, %				
	Al	SiO_2	Al_2O_3	NaCl+KCl	Інші сполуки
Збагачений шлак	20-80	5-20	10-50	10-20	10-20
Сольовий шлак	5-10	2-15	30-70	40-80	5-15

До плавлення у плавильній піч шлак піддається первинній обробці (збагаченню). Частка вилучення металу з алюмінієвого шлаку досягає близько 90 %. Алюмінієвий шлак проходить стадії просіювання, подрібнення та помелу. В результаті виходять різні фракції, які можуть бути перероблені або використані для інших цілей. Вони зазвичай містять 70-80 % алюмінію і є цінною сировиною для алюмінієвих сплавів.

Найбільш ефективною є технологія вилучення металу в барабанній печі, що обертається, яка дозволяє проводити переробку алюмінієвих шлаків з високою питомою площею поверхні за наявності великої кількості металевих і неметалічних домішок.

Кріогенний метод є перспективним методом розбирання кабельного брухту, відходів провідників струму, електродвигунів, автомобільних і побутових приладів [14]. Магнітною сепарацією, просіванням, гідравлічною класифікацією, збагаченням у важких середовищах подрібнений матеріал поділяють на відповідні продукти. Перевагою кріогенних установок також є відсутність викидів і газів, що забруднюють навколишнє середовище.

1.5 Сучасні технології та устаткування для плавлення підготовленої вторинної алюмінієвої сировини

Для металургійної переробки вторинної алюмінієвої сировини застосовують різні технології: плавлення на сухому черені, плавлення у рідкій ванні (металу або флюсу), відокремлення залізних приробок оплавленням, безсольове плавлення, видалення металу з горячого шлаку пресуванням (процес

TARDIS) та ін. Підприємства використовують плавильні печі різних конструкцій, кожна з яких в тому або іншому ступеню пристосована для плавлення певного виду вторинної алюмінієвої сировини [6,15].

Приготування алюмінієвих сплавів із підготовленої вторинної алюмінієвої сировини, як правило, для економії енергоресурсів ведуть у печах, що працюють на газовому паливі. Печі по конструкційним особливостям поділяють на відбивні, шахтно-ванні та барабанного типу. Кускові та брикетовані відходи переплавляють у відбивних печах ванного типу. Печі з електронагрівом (індукційні, опору, дугові) застосовують рідше. Однак саме такі печі дозволяють забезпечувати менші втрати на угар і отримувати чистіші сплави.

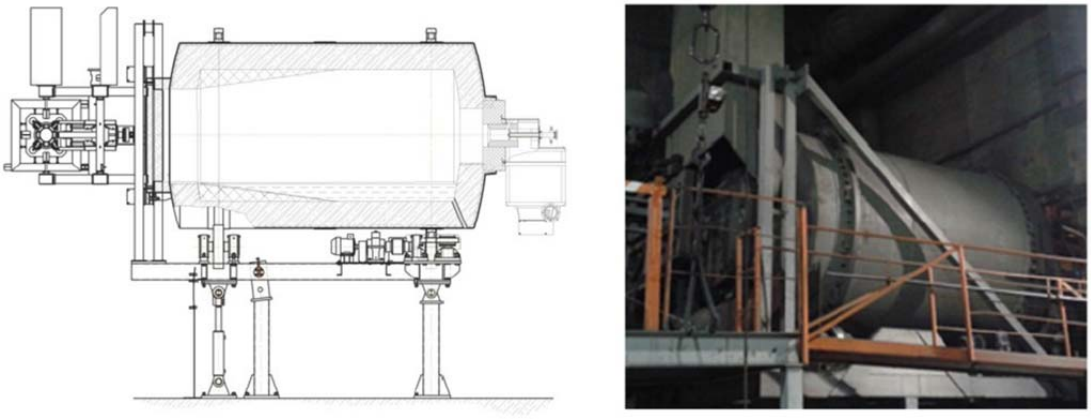
Розроблено роторні (барабанні) печі з горизонтальною віссю обертання, місткістю 2-40 т, які випускають компанії “Remetall”(Іспанія), “Tolltreck Limited” (Великобританія), “Tonolli” (Італія) та ін. Подальшим вдосконаленням таких печей є роторні печі з похилою віссю обертання, які набули поширення в США та європейських країнах, випускають компанії “Altek-MDY” (США), “Mechatherm”, “EMP Technologies” і “Melting Solutions” (Великобританія), Intec (Німеччина) та ін. Основними перевагами печей з похилою віссю обертання є високий термічний ККД, велика швидкість плавлення, усунення ручної праці при видаленні залишків шлаку і залишків при оплавочному режимі [16,17].

Алюмінієві шлаки та сипуча стружка ефективно переплавляються у роторних печах барабанного типу (рис. 1.5).

В даний час для переробки стружки використовують такі способи: переплавлення стружки в індукційних печах; переплавлення брикетованої стружки в газополуменевих відбивних печах; дощовий переплав стружки в індукційній печі промислової частоти; переплав стружки в печах опору, переплав стружки в роторних печах, переплав стружки в електродугових печах постійного струму та ін.

Один із найбільш ефективних способів зниження угару металу – плавка на «болоті». Для переплаву алюмінієвої стружки з використанням болота,

наприклад, використовується тризонна дугова піч постійного струму. Піч забезпечує переробку стружки при угарі металу 7-10 %. Економія електроенергії проти плавлення в печах опору становить близько 25 %. Головною перевагою такого процесу є висока якість металу. Різко знижується газонасиченість металу, підвищується щільність злитка, знижується кількість оксидних плівок у злитку.



а б

а – креслення; б – зовнішній вигляд

Рисунок 1.5 – Роторна піч [17]

Використання в шихті некомпактної алюмінієвої вторинної сировини, наприклад алюмінієвої стружки, що не пройшла попередньої підготовки (сушіння, брикетування та ін), неминуче під час плавки знижує якість розплаву і дає низький металургійний вихід (близько 30-60 %) [18,19]. Володіючи розвиненою питомою поверхнею, стружка інтенсивно окислюватиметься, перебуваючи на поверхні розплаву. За даними Г. В. Ларіонова, збільшення вмісту в шихті стружки з 15 % до 50 % призводить до збільшення кількості неметалевих включень у сплаві більше, ніж у 2 рази. Для підвищення металургійного виходу А. С. Циганов запропонував застосовувати підготовку стружки до плавки, встановити додаткове обладнання та ін. Проте, крім безперечних переваг, такі заходи мають деякі недоліки: технологія енергоємна, екологічно шкідлива, не завжди досягається необхідна чистота розплаву.

Для плавлення дрібного алюмінієвого брухту та некомпактних відходів використовують відбивні печі з виносними ваннами [6]. Такий скрап

завантажують у наплавлений в металоприймачі метал, щоб уникнути його окислення. Для перемішування розплаву у плавильних печах використовують циркуляційні насоси, футеровані графітом.

У сучасних печах Ecomelt за технологією компанії Hecrtwich (Австрія) можна переробляти вторинну алюмінієву сировину будь-якого сорту, в тому числі низькосортний брухт. Порція шихти, забруднена фарбою і пластмасами, в камері газифікації піддається дії гарячого газового потоку і нагрівається до температури вище 500 °С. Висока температура нагрівання дуття (800 °С) також, як і спалювання піролізних газів приводить до виключно низької витрати енергії на плавлення (370-450 кВт·год/т) і мінімальної дії на навколишнє середовище [20]. Плавлення заздалегідь нагрітого металу здійснюється зануренням в розплавлений потік, що створюється насосом рідкого металу. Швидкість безперервного плавлення складає 2 т/год або 240 т/(добу).

Для виплавки алюмінієвих сплавів із вторинної сировини пропонується принцип комбінування двох плавильних агрегатів, який дає можливість компенсувати недоліки одного типу печей перевагами іншої печі.

1.6 Рафінування алюмінієвих розплавів

1.6.1 Види та характеристика домішок у алюмінієвих сплавах

Для вирішення проблем, пов’язаних із підвищенням якості алюмінієвих сплавів, у кожному конкретному випадку необхідно насамперед знати, які домішки забруднюють метал. Домішки, що існують в алюмінієвих сплавах, поділяють на три основні групи: металеві домішки, гази і тверді неметалеві включення.

Металеві домішки утворюють з алюмінієм подвійні, потрійні та четверні сполуки, які негативно впливають на фізико-механічні властивості виробів, технологічні властивості сплавів.

Неметалеві включення в алюмінієвих сплавах за впливом на якість готової продукції діляться на три категорії: відносно нешкідливі пухкі флокули, частинки середньої компактності і тверді включення, в основному оксиди. У вигляді включень в алюмінієвих сплавах виявляється до дванадцяти різновидів оксидів Al_2O_3 (щільністю 2,35-4,0 г/см^3 [3,5]), гігроскопічні конгломерати діаметром 20-100 мкм, що містять оксид кремнію, хлорид натрію, нітрид алюмінію, оксид магнію, борід титану, хлориди кальцію і магнію.

Стабільні оксидні сполуки, практично нерозчинні у розплаві, призводять до появи у литому металі структурних неоднорідностей. Великі оксидні включення (плівки, частинки шлаку) різко знижують механічні властивості, особливо втомну міцність, при обробці тиском роблять метал сплавів схильним до тріщиноутворення і провокують появу полосчастості на поверхні деформованих напівфабрикатів, що проявляється значною мірою при обробних операціях, знижують корозійну стійкість виробів, утворюючи з воднем сполуки складного складу та сприяючи газонасичення розплавів. Проте поряд з цим необхідно враховувати, що дрібнодисперсні та рівномірно розподілені частинки оксидів (розміром 10^{-3}-10^{-5} мкм) при обробці призводять до зміцнення сплаву, особливо при знижених температурах.

Неметалеві домішки значно впливають на процеси взаємодії сплавів з атмосферою у рідкому і в твердому станах. Інтенсивність взаємодії залежить від концентрації цих домішок у сплаві. Такі тверді включення, як оксид алюмінію, карбід кремнію, оксид кремнію, при подальшій переробці сплавів випадають в осад на дно і стінки ковшів, вакуум-фільтрувальних печей тощо, захоплюючи значну кількість металу. Кількість металу в шлаках досягатиме 50 %, а в фільтр-залишках може досягати 70 %, що відповідно знижує вихід придатного металу.

Оскільки водень у молекулярній формі накопичується на частинках оксидів у розплаві, створюючи так званий ефект «газового парашута» та перешкоджає осіданню твердих неметалевих включень. Тому кількість

газоподібного водню, що знаходиться у вигляді скупчень у алюмінієвих сплавах, є пропорційним концентрації оксидів у алюмінієвому розплаві.

З газоподібних домішок найбільше негативно впливає на властивості алюмінієвих сплавів водень, який сприяє розвитку макро- та мікропористості в литому металі та перешкоджає заварюванню несуцільностей, що утворюються під час обробки тиском. Водень, джерелами якого є волога пічної атмосфери, волога і масла, адсорбовані на поверхні інструменту, у шихтових матеріалах, футерування печі та ін., розчиняється в розплаві. Допустимою концентрацією водню в розплаві вважається величина, менша 0,2 $см^3$/100 г.

Основні причини забруднення розплавів за даними Технічного центру фірми «Алкоа» (США) при виробництві напівфабрикатів з алюмінієвих сплавів наведено у табл. 1.8 [18].

Таблиця 1.8 − Класифікація, типи домішок та потенційні джерела їх утворення [18]

Класифікація	Типи домішок	Потенційні джерела домішок
Неметалеві екзогенні включення	Різні частинки вогнетривів, $A1_4C_3$ та ін.	Руйнування вогнетривів, метал ковша, реакції вогнетривів з металом
Неметалеві домішки, що утворюються в алюмінієвих розплавах	Скупчення плівок MgO, Al_2O_3 та дисперсоїди; плівки і скупчення $MgAl_2O_4$	Плавлення, легування, турбулентність перенесення металу у технологічному ланцюгу
Гомогенний розподіл частинок галогенідів	$MgCl_2$ – NaCl – $CaCl_2$ та ін.	Поганий поділ продуктів реакції ошлакування (рафінування)
Сіль/частинка	$MgCl_2$ – NaCl – $CaCl_2$ / MgO	Сіль, що утворюється під час рафінування хлором сплавів, що містять магній; фільтри та системи розливання

Для вирішення проблем, пов’язаних із підвищенням якості алюмінію та його сплавів, у кожному конкретному випадку необхідно насамперед знати, які домішки забруднюють метал. Тому за кордоном велика увага приділяється

питанням визначення якісного та кількісного складу різних домішок (включень, газів) у розплавах.

1.6.2 Методи рафінування алюмінієвих розплавів та їх класифікація

Очищення алюмінієвих розплавів від неметалевих (розчинних та нерозчинних) та газових домішок, поряд із модифікуванням, є основною технологічною операцією підготовки розплавів до лиття. Джерелами забруднення розплавів є шихтові метали (різні відходи, повернення власного виробництва), пічна атмосфера, матеріали футерування плавильних і роздаткових ємностей та ін. [17,18]. Для алюмінієвих сплавів розчинною домішкою, що погіршує якість сплавів та виробів з них, є водень. До нерозчинних включень відносяться оксиди алюмінію, шлакові включення та ін. представлено Класифікацію існуючих способів очищення алюмінієвих розплавів від надано в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Способи рафінування та дегазації алюмінієвих розплавів

Способи рафінування	Характеристика середовища
1. Газами	Нейтральні гази
	Активні гази
	Газові суміші
	Розріджені гази (вакуумування)
2. Рідкими середовищами	Покривні флюси
	Флюси, що рафінують
	Флюси, що модифікують
	Універсальні (комплексні) флюси
3. Твердими середовищами	Фільтрування
	Обробка гетерами
4. Дією полей	Вистоювання розплавів
	Електрогідроімпульсна обробка
	Магніто-імпульсна обробка
	Ультразвукова обробка
5. Плазмою	Плазмореагентна обробка

Традиційними методами видалення зважених твердих включень та водню з алюмінієвих розплавів є наступні: вистоювання; обробка сумішами

фторидних і хлоридних солей; продування інертними та активними газами; вакуумування; фільтрування через різні фільтри (сітчасті, гранульовані, пінокерамічні). В основі перерахованих методів лежать різні фізико-хімічні процеси: седиментація (вистоювання розплавів); екстрагування на основі адсорбційно-флотаційних механізмів (обробка флюсами); флотація (обробка активними та інертними газами); адгезія (фільтрація через фільтри). Найменшою ефективністю характеризується обробка розплавів флюсами в плавильних агрегатах або міксерах (ступінь дегазації – не більше 20 %). Найкращі показники забезпечує вакуумування (ступінь дегазації - до 70 %).

Більшість фізичних способів рафінування розплавів ґрунтується на процесах, які у системі «розплав – зовнішні сили». З усіх відомих фізичних способів рафінування найбільшого поширення набуло вакуумування. Проте такі фізичні способи, як електрообробка, ультразвукова, акустична, електрогідроімпульсна, магнітно-імпульсна, плазмова обробки мають безперечний практичний інтерес, є перспективними напрямками в галузі рафінування алюмінієвих розплавів. Насамперед, це пов’язано з тим, що ці способи не забруднюють атмосферу цехів шкідливими газоподібними продуктами реакції і сприяють утворенню в шлаках водорозчинних сполук. Технології обробки розплавів фізичними способами є більш керованими, що дозволяє гнучко встановлювати режими обробки залежно від природи сплаву, ступеня його забруднення та ін. Крім того, дослідження показують, що крім рафінувальної дії фізичні способи надають і модифікувальний вплив на структуру литих виробів.

Рафінування газами при продуванні інертними газами (аргоном, азотом) і активними газами (хлором, фреоном) є процесом дегазації алюмінієвого розплаву, що складається з дифузії водню в бульбашки газу, що продувається. Дегазація включає процеси як перенесення речовини, так і хімічну реакцію – молізацію.

Істотний вплив на швидкість дегазації надає склад газу, що рафінує: наявність у газі активних добавок (хлору, фреону-12, гексафториду сірки та ін.),

що зв’язують водень у бульбашці в нерозчинні сполуки, помітно прискорює процес, а наявні у газі, що рафінує, кисень, пари води або водень гальмує видалення газів. Наявність кисню в газі, що рафінує, призводить до утворення на поверхні бульбашки плівки оксиду, що перешкоджає переходу водню з розплаву в бульбашку: дегазації практично не спостерігається за наявності в газі (аргоні), що рафінує, близько 1 % кисню.

Крім дегазації бульбашки газу, що рафінує, видаляють з розплаву допомогою флотації тверді неметалеві включення. Аналіз процесу показує, що газові бульбашки діаметром 10 мм можуть у разі повного контакту з розплавом видалити неметалеві включення розміром понад 20 мкм. Проте у реальних умовах цього не досягають і для гарантованого видалення дисперсних включень використовують процеси тонкого фільтрування.

Очищення алюмінієвих розплавів від завислих включень під час фільтрування зумовлене механічними та адгезійними процесами. Першим належить вирішальна роль при відділенні великих включень і плівок, другим – при відділенні тонкодисперсних включень [2,5,6].

На ефективність очищення від дисперсних включень впливає ряд факторів. Чим менше діаметр зерен фільтра і щільніше їх укладання, чим більш звивистий шлях металу у фільтрі, більше товщина шару фільтра, тим краще результати. Фільтри, що змочуються розплавом, більш ефективні, ніж ті, що не змочуються. Видалення включень полегшується зі збільшенням часу знаходження розплаву у фільтрі. Підвищення температури металу, зменшення швидкості потоку крізь фільтр сприяють очищенню.

Найкращі результати з очищення алюмінієвих сплавів від дисперсних включень розміром 5-10 мкм отримують при використанні жорстких пористих керамічних фільтрів з числом пор до 20 шт./см. Такі фільтри забезпечують оптимальне поєднання високої пропускної здатності, малого перепаду тисків, міцності, ресурсу роботи і рафінірувальної здатності.

1.6.3 Особливості флюсового рафінування алюмінієвих розплавів

Основу більшості флюсів для обробки алюмінієво-кремнієвих розплавів складають сполуки натрію та калію з хлором та фтором. Широке поширення цього напряму обумовлено порівняно невисокими цінами препаратів та простотою їх застосування. Однак ця перевага багато в чому нівелюється такими істотними недоліками: низька керованість процесом рафінування (у виробничих умовах є лише одна можливість – варіювання кількістю препарату, що вводиться); невисокі ступеня очищення розплавів, негативний вплив на довкілля (шкідливі викиди в атмосферу цеху, наявність значної кількості водорозчинних включень у шлаках); необхідність складного обладнання для вентиляції та газоочищення.

Саме низькою керованістю процесу зумовлено велику кількість флюсових композицій, які пропонуються на сучасному ринку алюмінієвому виробництву (за оцінками експертів – до 100 різних складів). У процесі виготовлення алюмінієвих сплавів застосовують різні флюси, призначення яких полягає в наступному: захист поверхні розплаву від окислення та газонасичення; зниження металоємності алюмінієвих шлаків; видалення твердих (нерозчинних) неметалевих включень; видалення водню; поліпшення структури отриманого металу та ін.

За призначенням флюси поділяються на такі основні групи:

а) покривні флюси (Na_3AlF_6, K_3AlF_6 або дешевші солі кремнефторидів натрію та калію) − оберігають розплави від взаємодії з пічною атмосферою, окислювальною атмосферою повітря; забезпечують зниження металоємності шлаків;

б) флюси, що рафінують (NaF, $Na_2B_4O_7$, K_2TiF_6, AlF_3) − забезпечують видалення з розплавів нерозчинних неметалевих включень та металевих домішок;

в) флюси, що модифікують (Na_2CO_3, K_2ZrF_6, S, Sb, Na_3PO_4) − призначені для подрібнення структури литого металу;

г) флюси, що дегазують (C_2Cl_6, B_2O_3) − забезпечують видалення з розплавів газових домішок;

д) універсальні або комплексні флюси (K_2SO_4, Na_2NO_3 та ін.) − виконують дві або більше технологічних операцій.

Залежно від призначення до флюсів висуваються такі вимоги: температура плавлення повинна бути нижчою за технологічну температуру алюмінієвого розплаву; щільність рідких флюсів повинна бути меншою за щільність алюмінієвих розплавів; висока рідина і низька в'язкість; інертність по відношенню до пічних газів та матеріалів футерування; хімічна активність до видалених домішок; хороша змочуваність неметалевих включень та алюмінієвого розплаву; мінімальна гігроскопічність та ін.

Сучасні уявлення про механізм видалення Al_2O_3 з алюмінієвих розплавів флюсами грунтуються на роботах О. І. Бєляєва і О. О. Жемчужиної, які встановили, що дія рафінувальних флюсів визначається їх поверхневими властивостями, тобто співвідношенням величин поверхневого натягу рідин, що беруть участь у процесі. Ці умови виражаються нерівностями [6,24]:

$$\sigma_{Me-MeO} > \sigma_{фл-Me} > \sigma_{фл-MeO}, \qquad (1.13)$$

$$\sigma_{Me-MeO} > \sigma_{фл-Me} + \sigma_{фл-MeO}, \qquad (1.14)$$

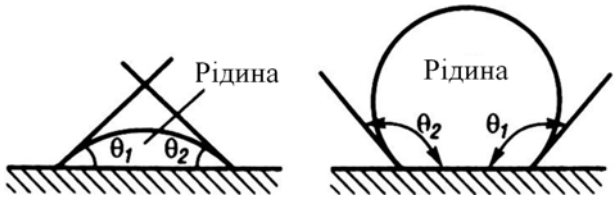
де σ_{Me-MeO} – поверхневий натяг алюмінію на межі з оксидом;

$\sigma_{фл-Me}$ – поверхневий натяг флюсу на межі з алюмінієм;

$\sigma_{фл-MeO}$ – поверхневий натяг флюсу на межі з оксидом.

Алюміній гірше змочує оксид алюмінію, ніж флюс. Отже, рафінування металевого розплаву відбувається внаслідок адсорбції оксидів флюсом через їхню кращу змочуваність флюсом, ніж металом. Якісно можна оцінити поверхневий натяг розплавленої солі на межі з твердою фазою за розміром крайового кута змочування краплі цієї солі, що знаходиться на твердій поверхні. Форми крапель рідини, які добре і погано змочують тверду поверхню, зображено на рис. 1.6 [6]. Якщо крайовий кут змочування θ<90°, то рідина добре змочує поверхню випробуваного матеріалу і поверхневий натяг у

такій рідині низький. Якщо в краплі крайовий кут змочування θ>90°, то така рідина погано змочує дану поверхню і, отже, її поверхневий натяг високий.



а б

а – добре змочування; б – погане змочування

Рисунок 1.6 – Крайовий кут змочування на межі тверда поверхня–розплав–газ

Тверді неметалеві включення можуть бути легше чи важче розплавленого металу або мати з ним однакову питому вагу. Залежно від цього застосовується верхнє, нижнє рафінування або рафінування всієї маси металу [17].

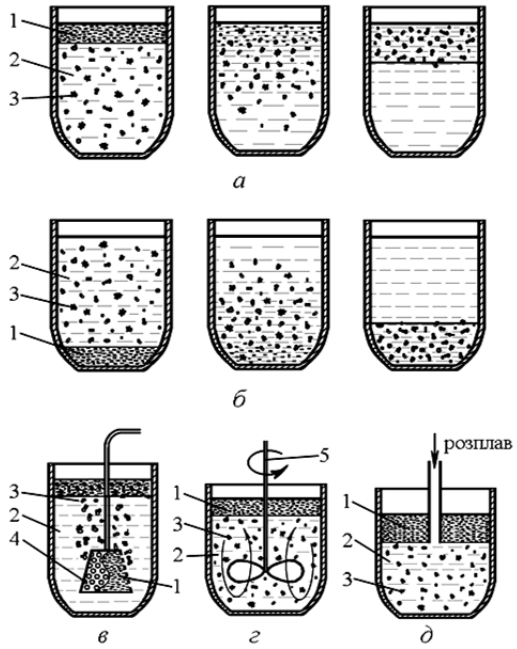
Проте незалежно від способу рафінування рафінувальна здатність буде високою тільки в тому випадку, коли флюси змочують неметалеві включення краще, ніж метал. Тому при використанні таких флюсів неметалеві включення в залежності від їх виду, щільності і способу рафінування коагулюють і більш інтенсивно спливають наверх або осідають у нижніх шарах розплаву.

Верхнє рафінування застосовують в тому випадку, коли неметалеві включення володіють меншою щільністю і розташовуються переважно у верхніх шарах розплаву. При такому розташуванні неметалевих включень флюс розчиняє їх у верхній частині, очищаючи метал. Вільний від оксидів метал у верхній частині розплаву стає важчим і опускається на дно, а на його місце надходять нові порції металу, забрудненого неметалевими включеннями.

У результаті взаємодії з флюсом цей шар, як і попередній, опускається на дно ванни, і процес повторюється до повного видалення неметалевих включень. Схема верхнього флюсування алюмінієвих сплавів показано на рис. 1.7, *а*.

Нижнє рафінування застосовують в тих випадках, коли оксиди володіють більш високою щільністю, ніж основний метал, і розташовуються переважно внизу. Процес нижнього рафінування (рис. 1.7, б) відрізняється від верхнього

рафінування напрямком руху неметалевих включень. Однак при нижньому рафінування алюмінію ванну необхідно захищати від окислення з поверхні покривним флюсом.



а – верхнє рафінування легким флюсом; б – нижнє рафінування важким флюсом; в – рафінування “дзвіночком”;

г – рафінування з механічним перемішуванням;

д – пропусканням струменя металу через шар флюсу;

1 – флюс; 2 – розплав; 3 – домішки; 4 – «дзвіночок»; 5 – мішалка

Рисунок 1.7 – Схеми рафінування алюмінієвих розплавів флюсами

При використанні методу рафінування по всьому об’єму можна застосовувати важкі і легкі флюси. Легкі флюси з допомогою “дзвіночка” занурюють на дно ванни (рис. 1.7, в), звідки вони піднімаються на поверхню розплаву, розчиняючи по шляху оксиди і захоплюючи їх у верхні шари.

Дослідженнями і практикою рафінування встановлено [23], що кращою рафінувальною здатністю володіють флюси, до складу яких входять солі – кріоліт, плавиковий шпат, фтористий натрій та ін.

Рафінування флюсами сприяє також видалення твердих неметалевих включень і дегазації розплаву.

Якість очищення алюмінієвих розплавів флюсами залежить не тільки від складу флюсу, а також від інших технологічних чинників рафінування, які створюють ті або інші умови доставляння оксидних включень на межу розділу метал – флюс.

Нині українському ринку широко представлені різні зарубіжні флюсові композиції. Слід зазначити, що зарубіжні фірми-виробники в документації, що супроводжує, не вказують хімічні склади флюсів, а наводять тільки назву торгових марок, призначення та рекомендації за технологією застосування, параметри яких змінюються в досить широких межах. Така ситуація призводить до того, що споживач змушений через численні експерименти адаптувати придбаний препарат до конкретних умов виробництва.

Найпоширеніші зарубіжні флюсові препарати, пропоновані німецькою фірмою «SCHAFER», надано в табл.1.9.

Таблиця 1.9 − Флюси фірми «SCHAFER»

Торгова марка препарату	Призначення та сфера застосування
ARSAL2120	Комплексний порошкоподібний препарат для покривної та рафінувальної дії для алюмінію та силумінів.
PROBATFLUSS DEGASER T200	Таблетований препарат для рівномірного розподілу та диспергування бульбашок газу в розплаві.
EUTECTAL T200	Таблетований модифікатор для до-, за- та евтектичних силумінів з підвищеним вмістом натрію; подрібнення кристалів первинного кремнію.
DEGASAL T200	Таблетований препарат для дегазації алюмінієвих розплавів.
MIKROSAL AL T100	Універсальний препарат для подрібнення зерна алюмінієвих сплавів на основі титану-бору.
PROBATFLUSS MONOTAB NS	Таблетований препарат для підтримки необхідної концентрації натрію в до- та евтектичних силумінах.
PROBATFLUSS AL T1	Комплексний таблетований препарат, що не містить гексахлоретану, для рафінування та дегазації силумінів із вмістом магнію до 5 %.

Для підвищення якості силумінів споживачу може знадобитися 2-3 флюсові препарати, що є незручним і економічно не виправданим у виробничих умовах.

Одним з ефективних способів очищення алюмінієвих розплавів від плівок і крупних неметалевих включень є електрофлюсове рафінування [25]. Оптимальний режим цього процесу передбачає пропускання струменя металу діаметром 5-7 мм, нагрітого до 700-720 °С, через шар розплавленого флюсу товщиною 100-150 мм із накладенням поля постійного струму силою 600-800 А і напругою 6-12 В з катодною поляризацією металу. Електрофлюсове рафінування на відміну від очищення зернистими фільтрами не супроводжується дегазацією розплаву й очищенням від тонко дисперсних включень і не впливає на макроструктуру виливок.

1.7 Напрями вдосконалення виготовлення алюмінієвих сплавів

Аналіз сучасних тенденцій розвитку виробництва і застосування алюмінію та алюмінієвих сплавів показує, що поступово стираються відмінності між первинним і вторинним металом, знімаються питання про походження сировини для отримання алюмінієвих сплавів: електролізний алюміній або вторинний алюміній [14,21].

Некомпактну вторинну алюмінієву сировину (стружку, обрізки прутків, листів, профілів, висічку, виплески, облой тощо) для повернення в оборот металу додають під час плавлення до складу змішаної шихти. Такий вид сировини переплавляють у рідкій ванні, що утворюється після наплавлення розплаву із компактної алюмінієвої сировини у полуменевих і електричних плавильних печах [22].

Вдосконалення технології та обладнання на стадії плавлення вторинної алюмінієвої сировини відбувається в напряму оптимізації енерговитрат, досягнення високої продуктивності обладнання і максимального виходу придатного металу.

Ефективність використання енергії можна підвищити максимально можливим збільшенням обсягів виробництва, скорочуючи робочий цикл печі шляхом усунення непродуктивних втрат часу при завантаженні шихти і

простоїв устаткування, які не передбачаються. Для швидкого завантаження великогабаритного брухту в відбивних печах доцільно використовувати знімне або зрушуване склепіння, що виготовляють з вогнетривких виробів блокового типу, та великі робочі вікна для завантаження шихти завалковою машиною. Велику кількість відходів з низькою насипною щільністю доцільно завантажувати на похилий пандус із бічними обмежувачами для легкого проштовхування в піч. Складну шихту (в тому числі дрібну сипку або виту алюмінієву стружку, обрізки) доцільно завантажувати та плавити в циркулюючій ванні рідкого металу (електропечі ІАТ або опору) або в роторній печі з похилою віссю обертання.

Зниження питомої витрати енергії на 35-40 % досягають шляхом підвищення термічного к.к.д. печі при її роботі за додатного тиску; використання дуття, збагаченого киснем (5-7 % O_2); застосовування примусової циркуляції розплаву; встановлення інноваційних рекуператорів для підігрівання гарячими відхідними газами повітря, що використовується для дуття, до 800-900 °С з одночасним зниженням температури відхідних газів до 200-260 °С. Регулятори масового співвідношення палива і повітря слід встановлювати навіть на простих печах.

Зменшити тривалість плавлення, підвищити якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із алюмінієвої вторсировини, збільшити ступінь засвоєння легуючого елемента розплавом дозволяють сучасні технології легування алюмінієвих сплавів шляхом використання легуючих пігулок, дроту, гранул.

Завдання дослідження:

1. Вибрати склад флюсу для рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих переплавленням вторинної некомпактної алюмінієвої сировини.

2. Дослідити вплив температури рафінування, способу приготування флюсу на якість алюмінієвих розплавів, отриманих переплавленням вторинної некомпактної алюмінієвої сировини. Вибрати технологічні умови рафінування.

3. Розробити технологічну схему виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної некомпактної алюмінієвої сировини, яку під час переплавлення рафінують флюсами за запропонованою технологію.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристики вихідних матеріалів і обладнання

Вторинна некомпактна алюмінієва сировина, що досліджується: а) відходи механічної обробки литва, пресованих виробів, поковок та ін. (стружка, висічка, обрізки, облой та ін.); б) відходи прокатної переробки (обрізки прутків, листів, профілів, стружка тощо).

Для приготування досліджуваних зразків використовується: алюміній технічний марки А5 по ГОСТ 11069-2001 (табл. 2.1) у вигляді гранул; алюмінієва стружка І групи 1 сорту по ГОСТ 1639-93 (табл. 2.1) з розміром витків від 20 до 50 мм.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад алюмінієвої сировини

Найменування	Масова частка, %						
	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Al
Алюміній А5	0,25	0,01	-	-	0,24	-	99,53
Стружка	0,50	0,05	-	-	0,50	0,10	98,85
Висічка	0,30	0,25	1,1	1,3	0,70	0,25	96,9

Зовнішній вигляд алюмінієвої стружки, висічки, обрізків, що використовуються для дослідження наведено на рис. 2.1. Така сировина має досить одно-рідний хімічний склад (табл.2.1).



а *б*

а – стружка; *б* – висічка, обрізки

Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд вторинної некомпактної алюмінієвої сировини, що досліджується

Для видалення залишків змащувально-охолоджуваних рідин та поверхневого бруду, підготовки до плавлення використовуються обробка горячою водою з подальшим сушінням на горячому повітрі.

Для захисту поверхні вторинної алюмінієвої сировини від окислення та очищення від домішок в процесі плавлення використовуються такі сольові флюси (рис. 2.2):

– хлорид натрію за ГОСТ 4233 марки «ч» [24];

– хлорид калію за ГОСТ 4468-95 дрібний першого сорту [25];

– кріоліт штучний технічний за ГОСТ 10561-80 [26];

– фторид натрію за ГОСТ 4463-76 [27].

Для приготування алюмінієвого розплаву в тиглі використовується алюміній технічний марки А5 по ГОСТ 11069-2001 у вигляді гранул, що містить 99,53 % Al, 0,25 % Si, 0,01 % Cu, 024 Fe.

Для модифікування алюмінієвого сплаву використовується модифікатор фосфориста мідь МФ-20, що містить 12 % фосфора, у вигляді гранул (рис.2.3).



а *б*

а – сипкий флюс; *б* – гранульований флюс

Рисунок 2.2 – Флюси, що досліджуються

Для розплавлення металу використовується лабораторна шахтна електрична піч опору лабораторна шахтна електропіч опору SNOL 8,2/1100 (рис. 2.4), яка працює при температури не вище 1000 °С. Навколо футеровки

шахти цієї печі намотано ніхромовий нагрівник. У футеровану шахту печі встановлюють тигель з графіту або з заліза з шихтою. Піч має термометр. Після виходу печі на потрібний температурний режим починає горіти сигнальна лампочка.



Рисунок 2.3 – Гранульований модифікатор МФ-20

Тигель графітошамотний для розплавлення шихти з температурою експлуатації до 1000 °С.

Мішалка графітова для перемішування металу в тиглі.

Ваги лабораторні електронні ТВЕ–3–0,05 за ТУ У 29.2-32126739-003:2005 з похибкою зважування до ± 0,01 г.

Металевий інструмент для зняття шлаку з поверхні металу.

Термопара типу хромель-алюмель (ТХА) в захисному чохлі.



Рисунок 2.4 – Лабораторна шахтна електропіч опору

Устаткування для виготовлення шліфів: верстати токарний, шліфувальний, полірувальний.

2.2 Методика проведення дослідження

Для приготування розплаву в лабораторних шахтних електропечах опору в графітових тиглях наплавляли гранули алюмінію марки А5. Для цього необхідна кількість металу (100 г) зважується на аналітичних вагах типу ВЛК-500-М по ГОСТ 24104 з похибкою зважування не більше ± 0,1 г. Шихта завантажується у шамотографітовий тигель. Тигель з металом завантажується в піч. Температура в печі доводиться до заданої у інтервалі температур 670−730 °С. Контроль температури забезпечується термопарою типу ТХА в захисному чохлі.

Після нагрівання розплаву на його поверхню наносили порцію некомпактної алюмінієвої вторсировини (стружка, обрізки тощо) масою 20 г, яку замішували в розплав шумівкою. Потім доводили температуру розплаву до заданої і знову повторювали операції завантаження вторсировини. При досягненні розплавом маси 200 г порцію вторсировини, що вводиться, збільшували до 50 г і проводили ще два завантаження. Після досягнення розплавом заданої температури на його поверхню наносили розрахункову кількість флюсу (у інтервалі від 0,3 % до 0,6 % від маси металу в тиглі), який замішували в розплав графітовою мішалкою протягом 3-5 хв. Розплав відстоювали заданий час, знімали з його поверхні шлак і відбирали проби для аналізу мікроструктури і наявності шлакових включень. Метал розливали у виливниці, зважували і визначали вихід металу.

Якість шлаку визначається візуально (сухий, в’язкий, наявність корольків металу). Показники якості металу після рафінування (визначаються до та після рафінування): масова частка водню, аналіз мікроструктури і визначення наявності шлакових включень.

Металургійний вихід металу під час плавлення різноманітного виду вторинної алюмінієвої сировини залежить від фізичного стану шихти (розміру, насипної щільності), її хімічного складу, наявності оксидних сполук, від конструкції печі, температури плавлення, кількості і складу флюсів.

Визначення металургійного виходу є важливим показником визначення доцільності проведення плавлення, за яким встановлюють наскільки ефективно проведено плавлення.

Для визначення металургійного виходу на лабораторних електронних вагах слід зважити окремо вихідні компоненти, необхідні для проведення плавлення, та зважити кінцений продукт плавлення. Температура в печі доводиться до заданої. Контроль температури забезпечується термопарою типу ТХА в захисному чохлі.

Металургійний вихід М (%) визначаємо за формулою:

$$M = \frac{m_{мет}}{m_{шихти}} \cdot 100, \qquad (2.1)$$

де $m_{мет}$ – маса металу, яку отримали після плавлення шихти, г;

$m_{шихти}$ – маса вихідних компонентів шихти до плавлення, г.

Плавлення вторинної алюмінієвої сировини проводиться в лабораторній електропечі опору шахтного типу SNOL 8,2/1100 у графітових тиглях. Технологічні проби виливаються у металеві виливниці. Для зваження зразків використовуються електронні ваги. Використовується набір плавильно-заливального інструменту, захисні окуляри, рукавиці.

2.3 Методики визначення газонасиченості сплаву та вмісту неметалевих домішок

Методика спостереження за поверхнею проби А.Г. Спаського і О.М. Кулагіної. Одним з методів якісного оцінювання вмісту газів в алюмінії та алюмінієвих сплавах є спостереження за поверхнею проби А.Г. Спаського і О.М. Кулагіної, що кристалізується. Пробу отримують, заливаючи невелику порцію металу у відкриті металеві або графітові форми-виливниці діаметром 60 мм і завтовшки 10 мм або в графітові тигельки діаметром 25-40 мм і заввишки 50-60 мм [31]. При кристалізації на поверхні проби відбуваються крапкові розриви поверхневої оксидної плівки, які є слідами пузирків газу, що

виділяється. Кількість розривів є умовним критерієм, що характеризує пористість виливка. По ньому роблять висновок про ступінь газонасиченості, порівнюючи пробу з еталоном.

Методика визначення балу пористості виливка. Повніше уявлення про газонасиченість (пористість) металу можна скласти при розгляді подовжнього макрошліфа технологічної проби або темплета, вирізаного з готового виливка. Відповідно до ГОСТ 1583, темплети, вирізані з чушок алюмінієвих ливарних сплавів, фрезерують, а потім послідовно шліфують наждачним папером № 80, 120 і 280. Для остаточного доведення поверхні шліфа наждачний папір останнього номера покривають парафіном. Шліф перед травленням промивають спиртом або ацетоном, а потім просушують за допомогою фільтрувального паперу і протравлюють. Після травлення шліф промивають проточною водою і висушують фільтрувальним папером.

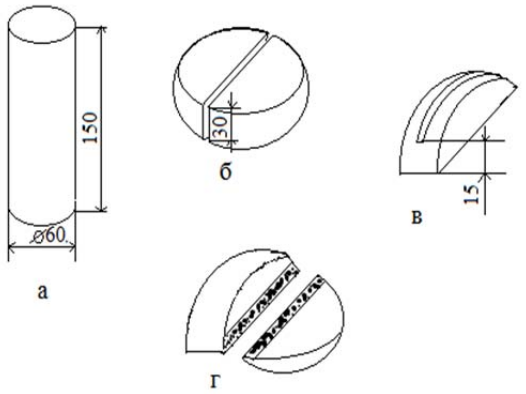
Для оцінювання щільності металу користуються шкалою пористості. Ступінь пористості шліфів в балах встановлюють порівнянням їх з еталонами шкали: бал 1 – дрібна; бал 2 – знижена; бал 3 – середня; бал 4 – підвищена; бал 5 – велика. Отже, пористість виливків оцінюють за п’ятибальною шкалою пористості. Допустима кількість пор на 1 $см^2$ поверхні шліфа і діаметра їх залежно від номера еталону, надана в табл. 2.1. Еталонами ступеня пористості можна користуватися незалежно від марки сплаву.

Метод першого пузирка (метод Дардела-Гудченко) заснований на тому, що в умовах рівноваги парціальні тиски газу в металі і навколишньому середовищі рівні. По ГОСТ 21132.0 пробу металу заливають в тигель, що обігрівається і знаходиться у вакуумній камері. При постійній температурі поступово зменшують тиск над розплавом до появи першого пузирка газу, що виділився з розплаву. Момент виділення першого пузирка (за наявності на поверхні розплаву щільної оксидної плівки, що затримує дифузію водню) відповідає рівності парціального тиску в розплаві і поза ним. Знаючи температуру розплаву і визначивши тиск, при якому виділяється перший пузирьок, розраховують за рівнянням (1.13) вміст водню в розплаві.

Таблиця 2.2 – Число і діаметр пор, що відповідають еталонам шкали пористості [23]

Пористість, бали	Число пор на 1 см^2, не більше	Діаметр пор, мм, не більше	Пористість, %
1	5	0,1	100
2	10	0,1 0,2	80 20
3	15	0,3 0,5	80 20
4	20	0,5 1,0	70 30
5	25	0,5 1,0 > 1,0	60 30 10

Масову частку неметалевих домішок визначають методами хімічного аналізу і відбором технологічних проб. Враховуючи складність і трудомісткість хімічного методу кількісного визначення неметалевих включень для поточного контролю в цехових умовах його не застосовують. Наявність крупних включень і плівок визначають за допомогою технологічних проб Добаткіна-Зінов'єва (рис.2.5).



а – лита заготівка; б – осаджена і розірвана заготівка («галета»);

в – розташування бічного надрізу; г – злам

Рисунок 2.5 – Технологічна проба Добаткіна–Зіновьева [26]

Для цієї мети з досліджуваного розплаву відливають (або вирізують зі

злитка) заготівку діаметром 50 мм і завдовжки 150 мм. Заготівку в нагрітому стані осаджують по довжині у «галету» завтовшки 30 мм (п'ятиразова осадка). Після цього по площині, перпендикулярній напряму осадки, "галету" надрізають і ламають. По кількості і площині неметалевих домішок у зламі роблять висновок про чистоту розплаву. Задовільним вважається такий розплав, площа неметалевих включень в якому не перевищує 0,05 % на 1 см^2 площі зламу [28].

2.4 Методика проведення термодинамічних розрахунків

Хімічна взаємодія супроводжується виділенням або поглинанням теплоти. Кількість теплоти, яка виділяється або поглинається в ході хімічної реакції при заданій температурі початкових речовин і продуктів реакції, називається тепловим ефектом.

Для розрахунку енергії Гіббса запропоновано два методи: ентропійний і розрахунок по рівнянню Гіббса-Гельмгольца. Розрахунок константи рівноваги також можна проводити, використовуючи рівняння нормального хімічного засобу і рівняння ізобари хімічної реакції. У всіх випадках розрахунок може бути точним і наближеним. Допускається три наближення: перше наближення: $\Delta C_P = 0$; друге наближення: $\Delta C_P = \text{const}$; третє наближення: $\Delta C_P = f(T)$.

Стандартну зміну ентальпії ΔH^0_{298} реакції, що досліджується,

$$\nu_1 A_1 + \nu_2 A_2 + ... = \nu_3 B_1 + \nu_4 B_2 + ... \qquad (2.2)$$

визначають, використовуючи закон Гесса, за стандартними змінами ентальпій речовин ΔH^0_{298} [26]:

$$\Delta H^0_{298} = \sum \left(\nu_i \Delta H^0_{298,B_i} \right)_{кін} - \sum \left(\nu_i \Delta H^0_{298,A_i} \right)_{поч}. \qquad (2.3)$$

По знаку ΔH^0_{298} визначають характер вірогідності хімічної реакції за температури $T = 298$ К. Якщо $\Delta H^0_{298} > 0$, реакція вважають ендотермічною, якщо $\Delta H^0_{298} < 0$, реакція вважають екзотермічною.

Аналогічно розраховують стандартні зміни ентропії ΔS^0_{298} реакції:

$$\Delta S^0_{298} = \sum \left(\nu_i S^0_{298,B_i} \right)_{кін} - \sum \left(\nu_i S^0_{298,A_i} \right)_{поч}. \quad (2.4)$$

Зміну стандартної енергії Гіббса даній хімічній реакції розраховують за ентропійним методом:

$$\Delta G^0_T = \Delta \mathrm{H}^0_T - \Delta S^0_T \cdot T. \quad (2.5)$$

У першому наближенні, приймаючи, що $\Delta C_P = 0$, рівняння (2.6) має вид:

$$\Delta G^0_{298} = \Delta \mathrm{H}^0_{298} - \Delta S^0_{298} \cdot T, \quad (2.6)$$

де $T = 298$ К.

По знаку ΔG^0_{298} визначають напрям хімічної реакції при Т=298 К і Р=10^2 кПа. Якщо $\Delta G^0_{298} < 0$, то реакція протікає мимовільно зліва направо; якщо $\Delta G^0_{298} > 0$, напрям реакції зворотній. Якщо $\Delta G^0_{298} = 0$, реакція знаходиться в стані рівноваги. Абсолютна величина ΔG^0_{298} показує ступінь видалення реакції від стану рівноваги за стандартних умов.

Залежність ізобарної теплоємності від температури в довідниках термодинамічних величин звичайно задається рівняннями типу для неорганічних речовин:

$$C^0_P = a + в \cdot 10^{-3} T + c \cdot 10^{-5} T^{-2}, \quad (2.7)$$

Зміну теплоємності речовин в хімічній реакції розраховують, використовуючи закон Гесса:

$$\Delta C^0_P = \sum \left(\nu_i C_{P,B_i} \right)_{кін} - \sum \left(\nu_i C_{P,A_i} \right)_{поч}, \quad (2.8)$$

яке приймає вид: $\Delta C^0_P = \Delta a + \Delta в \cdot 10^{-3} T + \Delta c \cdot 10^{5} T^{-2}$.

Підставляючи значення Т=298 К, знаходимостандартну зміну теплоємності для даної хімічної реакції.

Висновки. Наведено характеристику вихідних матеріалів і лабораторного обладнання. Розроблена методика проведення дослідження щодо рафінування флюсами алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням некомпактної вторинної алюмінієвої сировини від неметалевих домішок на якість одержаного металу.

3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Термодинамічний аналіз реакцій взаємодії алюмінієвого розплаву з компонентами флюсу

В досліджені розглянуто взаємодії компонентів алюмінієвого розплаву (алюмінію та його оксиду) з компонентами флюсу (NaCl, KCl, NaF, Na_3AlF_6). Внаслідок взаємодії імовірно перебіг таких реакцій:

$$Al + 3NaCl = AlCl_3 + 3Na, \quad (3.1)$$

$$Al + 3KCl = AlCl_3 + 3K, \quad (3.2)$$

$$Al + 3NaF = AlF_3 + 3Na, \quad (3.3)$$

$$5Al + Na_3AlF_6 = 6AlF + 3Na, \quad (3.4)$$

$$Al_2O_3 + 6NaCl = 2AlCl_3 + 3Na_2O, \quad (3.5)$$

$$Al_2O_3 + 6KCl = 2AlCl_3 + 3K_2O, \quad (3.6)$$

$$Al_2O_3 + 6NaF = 2AlF_3 + 3Na_2O, \quad (3.7)$$

$$Al_2O_3 + 2Na_3AlF_6 = 4AlF_3 + 3Na_2O. \quad (3.8)$$

Для дослідження термодинамічних характеристик реакцій (3.1) − (3.8) вибрано температури від 573 К до 1473 К. Термодинамічні характеристики реакцій (3.1) − (3.8) обчислюються з інтервалом в 150°, враховуючи фазові перетворення речовин, за третім наближенням по рівнянню Гіббса-Гельмгольца. Розрахунки термодинамічних характеристик виконано з використанням електронних таблиць Microsoft Excel та перевірено на програмі HSC. Термодинамічні характеристики речовин, що беруть участь в реакціях, надано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Термодинамічні характеристики речовин [26,27]

Речовина	Фаза	Ентальпія ΔH^0_{298}, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	Ентропія ΔS^0_{298}, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$	Коефіцієнти рівняння $\Delta C_P = f(T)$, Дж/(моль·К)			Температура перетворення $T_{пр}$, К	Ентальпія перетворення $\Delta H_{пр}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
				a_0	a_1	a_{-2}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	тв	0	28,34	20,67	12,38	–	932	10,76
	рід	–	–	29,31	–	–	2600	284,38
$AlCl_3$	тв	–695,9	167,5	55,48	117,22	–	453	56,10
	г	–	–	82,9	–	–	–	–
AlF	тв	–427,1	61,7	43,9	13,4	–	1100	21,80
	рід	–	–	64,7	–	–	1675	155,0
AlF_3	тв	–1352,3	99,5	77,5	23,4	–7,49	1545	318,0
Al_2O_3	тв	–1675,6	50,02	119,36	18,37	–30,43	2300	109,0
Na	тв	0	51,54	23,685	13,615	–	371	2,64
	рід	–	–	37,49	–19,16	–	1187	97,97
	г	–	–	20,81	–	–	–	–
NaCl	тв	–411,1	72,13	45,94	16,32	–	1073	30,23
	рід	–	–	66,99	–	–	1738	170,85
NaF	тв	–569,4	54,85	40,44	18,84	–1,38	1265	32,66
	рід	–	–	66,99	–	–	1977	222,99
Na_3AlF_6	$\alpha_ф$	–3309,5	283,49	172,27	158,45	–	834	9,29
	$\beta_ф$	–	–	151,49	144,29	–	1279	107,28
	рід	–	–	396,22	–	–	2500	–
Na_2O	тв	–416,2	72,9	65,73	22,61	–	1193	29,7
	рід	–	–	92	–	–	–	–
K	тв	0	63,64	5,55	81,24	–	337	2,33
	рід	–	–	37,19	–19,11	–	1052	79,05
	г	–	–	20,81	-	–	–	–
KCl	тв	–436,68	82,55	41,38	21,76	3,22	1043	26,84
	рід	–	–	66,99	–	–	1680	162,62
K_2O	тв	–361,7	96	66,60	26,8	–	980	28,5
	рід	–	–	92,00	–	–	–	–

Для визначення ентальпії реакції (3.1) в обраному інтервалі температур спочатку розраховано стандартну ентальпію утворення ΔH^0_{298} за формулою (2.3)

з урахуванням кількості молей речовин, що беруть участь, яка складає $\Delta H^0_{298} = 537{,}40$ кДж.

Оскільки стандартна ентальпія утворення відома, розраховуємо ΔH^0_T в інтервалі температур від 573 до 1473 К з інтервалом 150 градусів.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 573 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{573} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{573} \Delta C'''_P dT .$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{573} =575,382 кДж.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 723 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{723} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{723} \Delta C'''_P dT .$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{723} =577,831 кДж.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 873 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{873} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{873} \Delta C'''_P dT .$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{873} =578,473 кДж.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 1023 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{1023} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{932} \Delta C'''_P dT -$$

$$- \Delta H_{932} + \int_{932}^{1023} \Delta C^{IV}_{I\,p_P} dT.$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{1023} =566,093 кДж.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 1173 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{1173} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{932} \Delta C'''_P dT - \Delta H_{932} +$$

$$+ \int_{932}^{1073} \Delta C^{IV}_{I\,p_Д} dT - 3 \cdot \Delta H_{1073} + \int_{1073}^{1173} \Delta C^{V}_{I\,p_Д} dT .$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{1173} =478,022 кДж.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 1323 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{1323} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{932} \Delta C'''_P dT - \Delta H_{932} +$$

$$+ \int_{932}^{1073} \Delta C^{IV}_{I\,p_P} dT - 3 \cdot \Delta H_{1073} + \int_{1073}^{1187} \Delta C^{V}_{I\,p_P} dT + 3 \cdot \Delta H_{1187} + \int_{1187}^{1323} \Delta C^{VI}_{I\,p_P} dT .$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{1323} =474,953 кДж.

Ентальпію реакції (3.1) за температури 1473 К розраховуємо за виразом:

$$\Delta H^0_{1473} = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{371} \Delta C'_P dT + 3 \cdot \Delta H_{371} + \int_{371}^{453} \Delta C''_P dT + 3 \cdot \Delta H_{453} + \int_{453}^{932} \Delta C'''_P dT - \Delta H_{932} +$$

$$+ \int_{932}^{1073} \Delta C^{IV}_{I\,p_P} dT - 3 \cdot \Delta H_{1073} + \int_{1073}^{1187} \Delta C^{V}_{I\,p_P} dT + 3 \cdot \Delta H_{1187} + \int_{1187}^{1473} \Delta C^{VI}_{I\,p_P} dT .$$

Після підстановки чисельних значень величин ΔC_p, ΔH^0_{298} отримали ΔH^0_{1473} =472,312 кДж.

Далі аналогічно розраховуємо ΔS^0_T з урахуванням п’яти фазових перетворень за температур 371, 453, 932, 1073, 1187 К. Результати розрахунків ΔS^0_T зведено в табл. 3.2.

Визначивши ΔH^0_T і ΔS^0_T в діапазоні температур 573−1473 К, розраховуємо ΔG^0_T з інтервалом в 150º за формулою (2.5):

$$\Delta G^0_{573} = \Delta H^0_{573} - \Delta S^0_{573} \cdot 573 = 503{,}670 \text{ кДж.}$$

Результати розрахунків ΔG^0_T зведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків термодинамічних характеристик в залежності від температури для реакції (3.1)

Температура, К	Ентальпія ΔH_T^0, кДж	Ентропія ΔS_T^0, Дж/К	Енергія Гіббса ΔG_T^0, кДж
573	575,382	125,152	503,670
723	577,831	128,996	484,528
873	578,473	129,888	465,080
1023	566,094	116,702	446,748
1173	478,022	34,772	437,234
1323	474,953	32,314	432,236
1473	472,312	30,314	427,394

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.1), який надано на рис. 3.1.

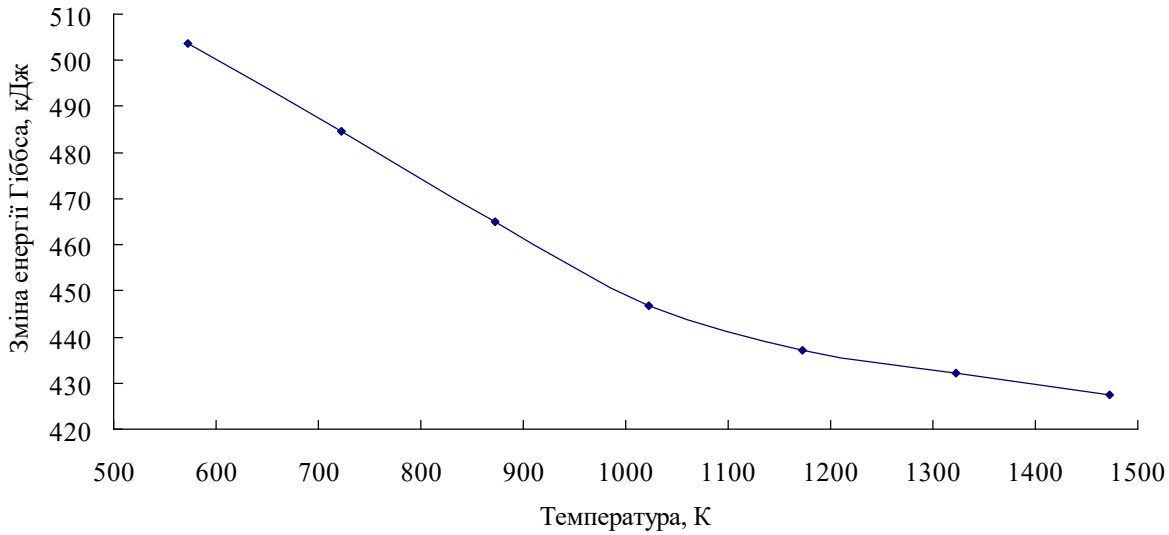


Рисунок 3.1 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.1)

За аналогічною схемою проведено розрахунки термодинамічних характеристик (ΔH_T^0, ΔS_T^0, ΔG_T^0) для інших реакцій.

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.2), який надано на рис. 3.2.

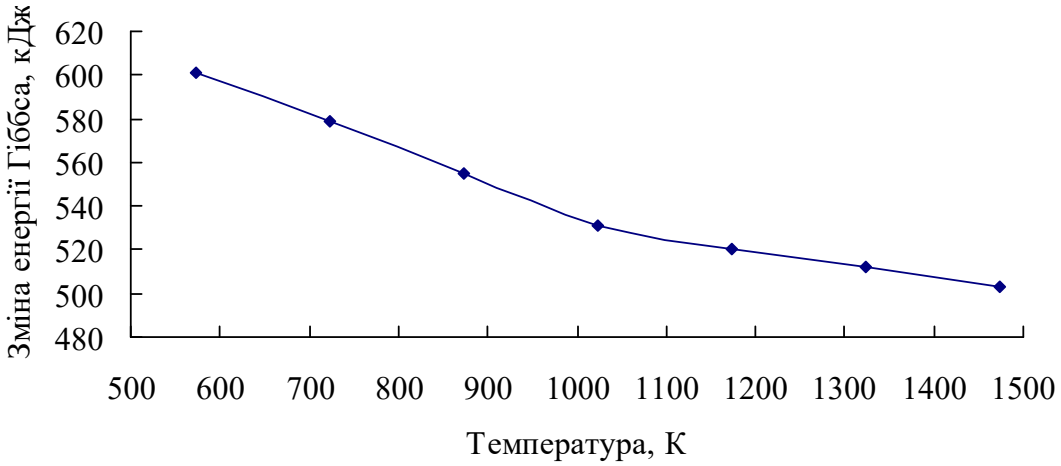


Рисунок 3.2 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.2)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.3), який надано на рис. 3.3.

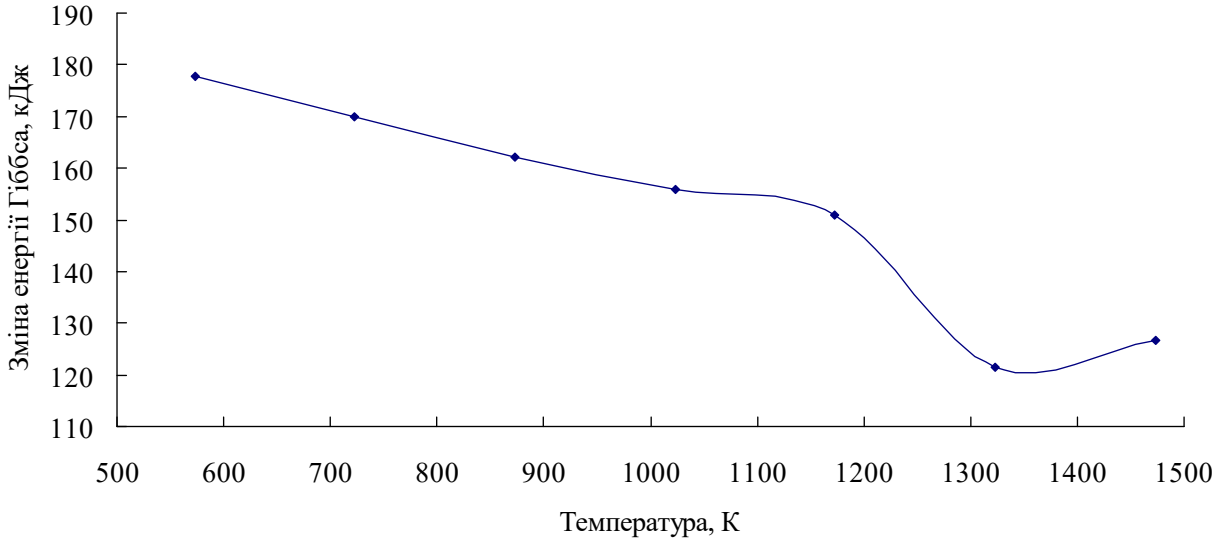


Рисунок 3.3 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.3)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.4), який надано на рис. 3.4.

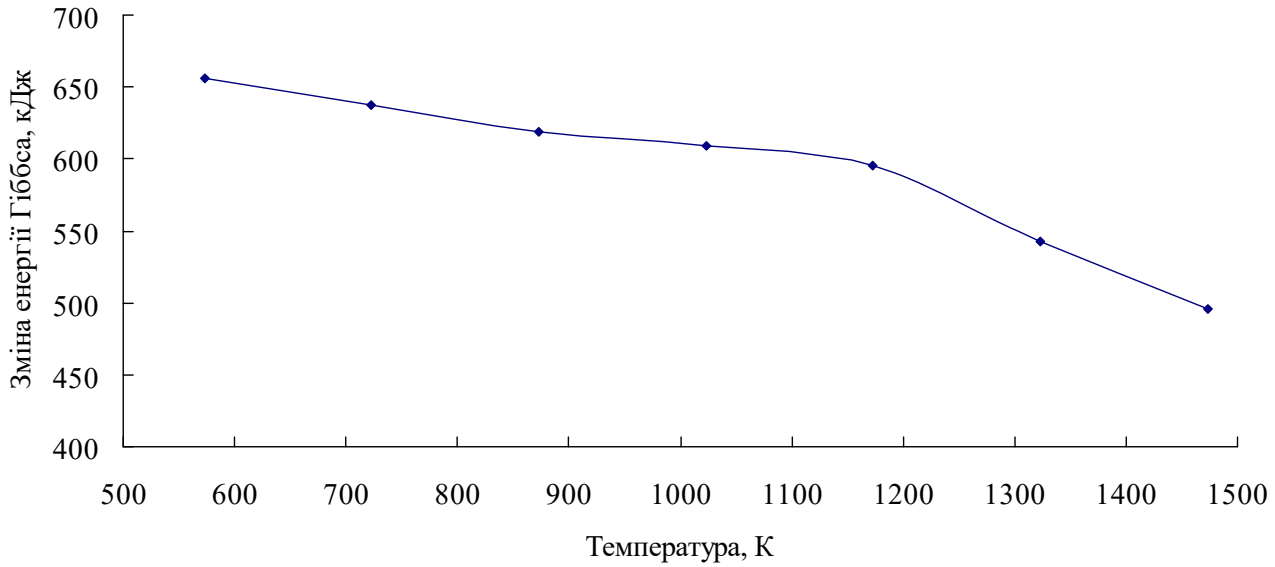


Рисунок 3.4 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.4)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.5), який надано на рис. 3.5.

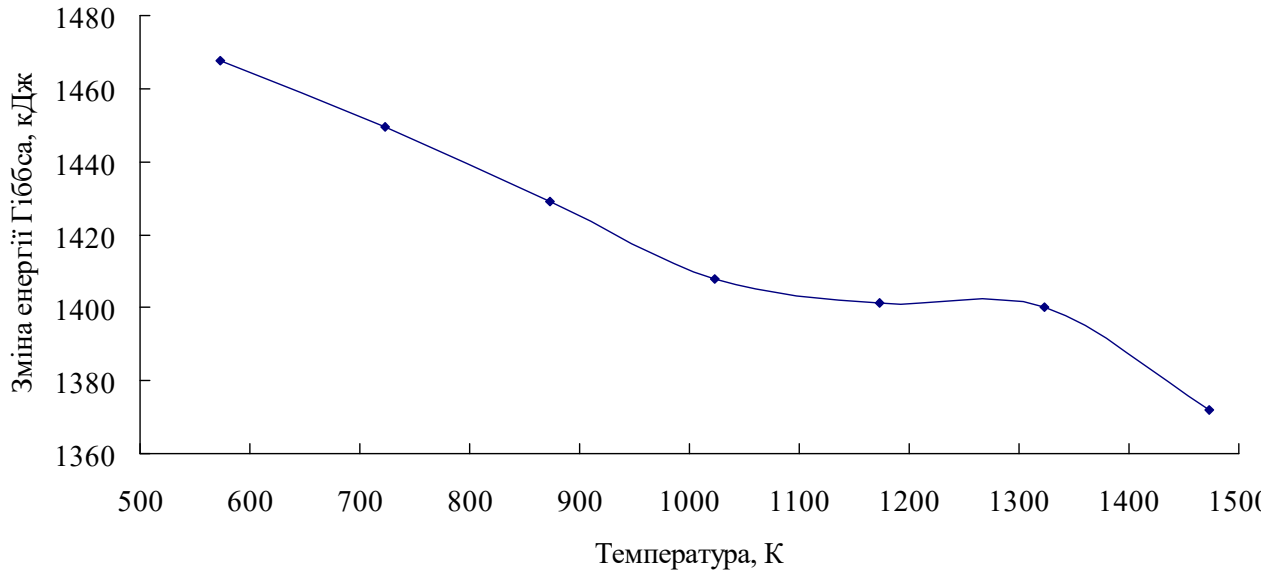


Рисунок 3.5 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.5)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.6), який надано на рис. 3.6.

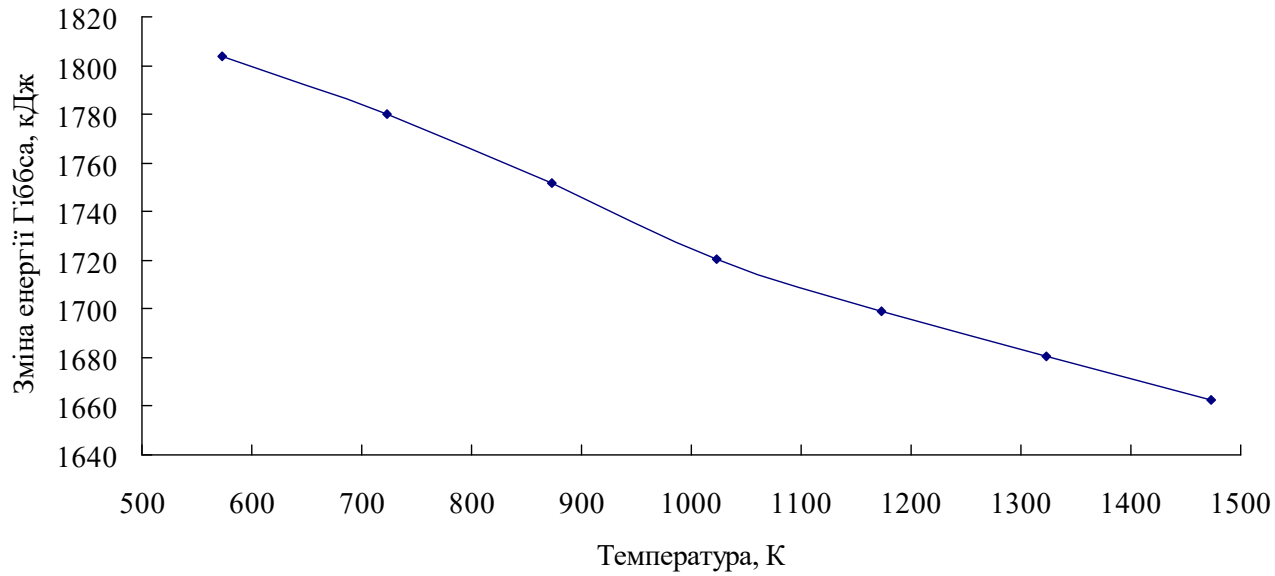


Рисунок 3.6 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.6)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.7), який надано на рис. 3.7.

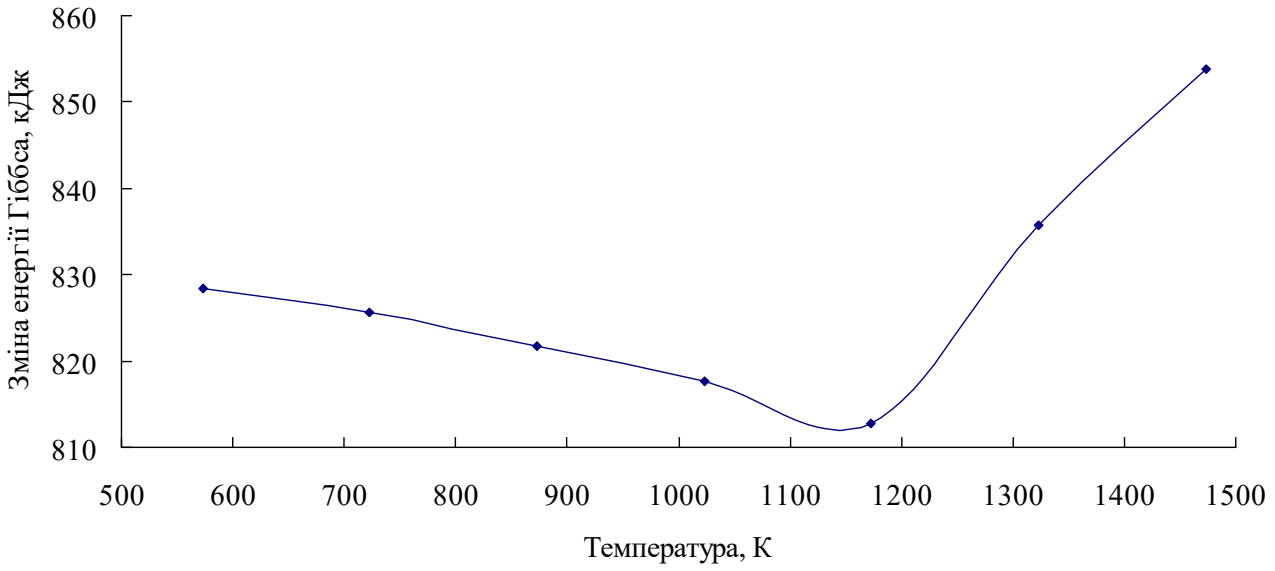


Рисунок 3.7 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.7)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.8), який надано на рис. 3.8.

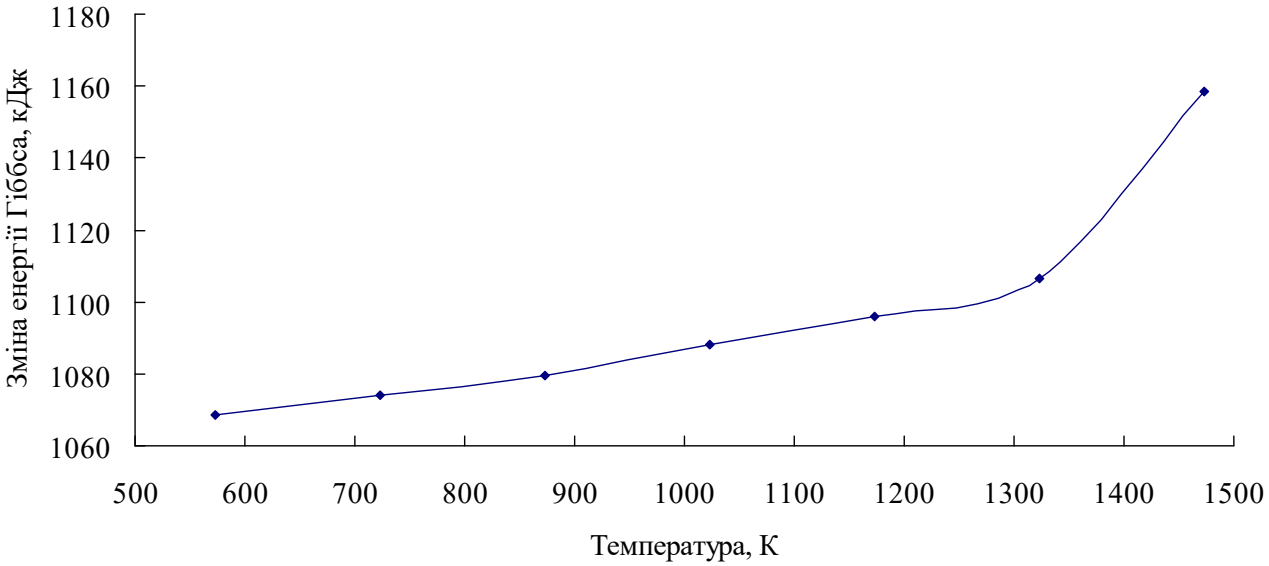


Рисунок 3.8 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.8)

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакцій (3.1) − (3.4), який надано на рис. 3.9.

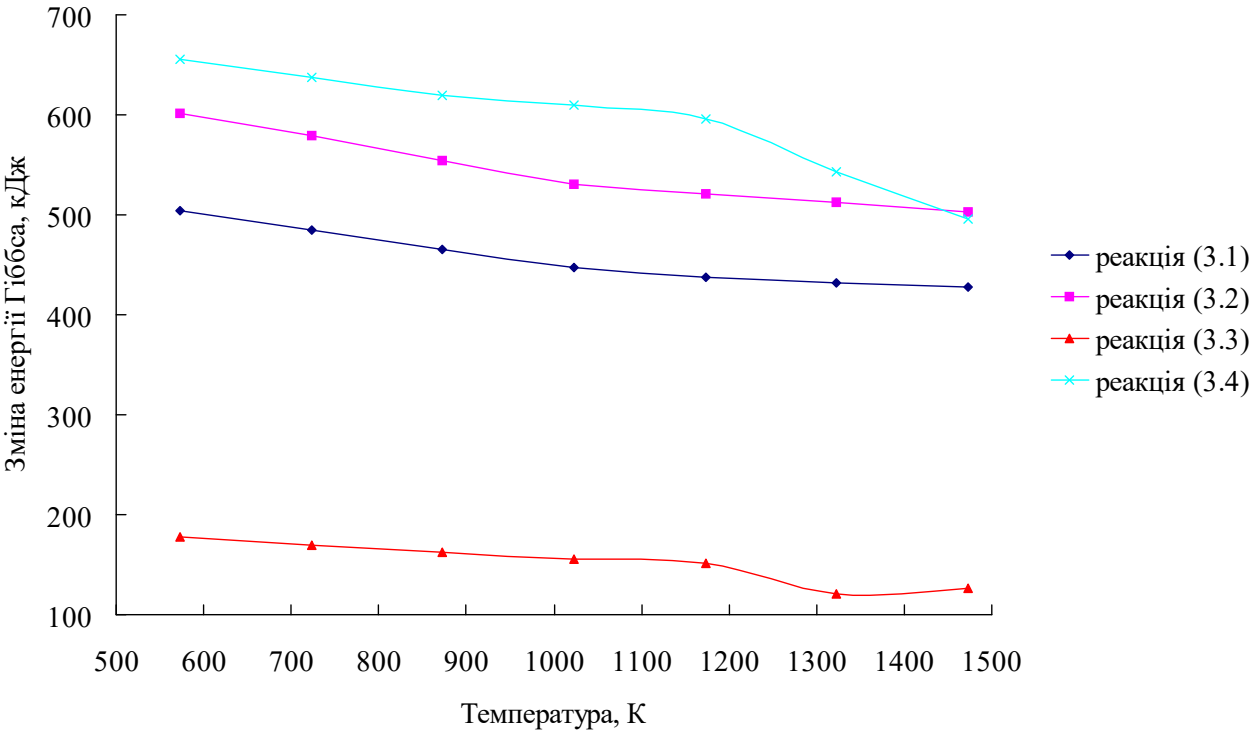


Рисунок 3.9 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакцій (3.1) − (3.4)

З аналізу даних рис. 3.9 видно, що при взаємодії алюмінію з хлоридами натрію і калію енергія Гіббса реакцій (3.1), (3.2) монотонно зменшується в інтервалі температур від 573 до 1473 К (від 300 до 1200 °С). При взаємодії алюмінію з фторидом натрію та кріолітом енергії Гіббса реакцій (3.3), (3.4) в заданому інтервалі температур спочатку повільно зменшуються, а далі – з точкою перегину за температури 1187 К, що зумовлено фазовим перетворенням натрію з рідкого в пароподібний стан.

Будуємо графік залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакції (3.5) − (3.8), який надано на рис. 3.10.

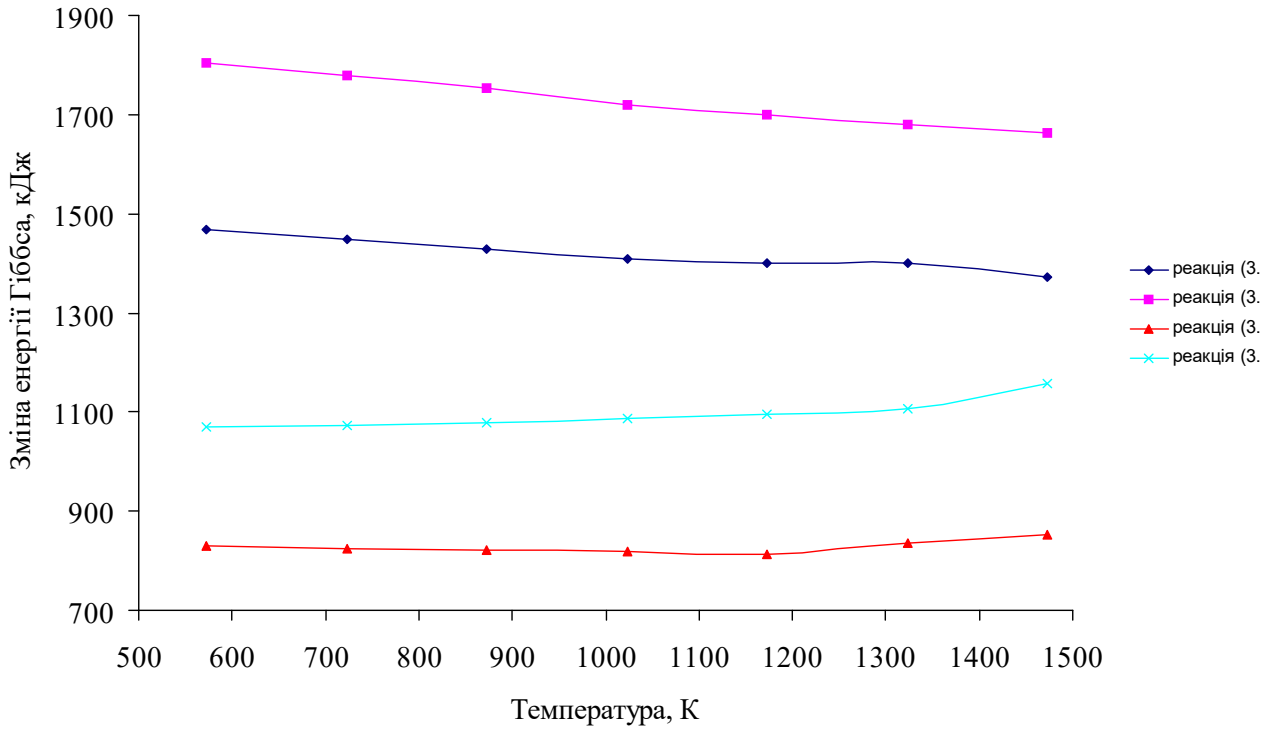


Рисунок 3.10 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакцій (3.5) − (3.8)

З аналізу даних рис. 3.10 видно, що при взаємодії оксиду алюмінію з хлоридами натрію і калію енергії Гіббса реакцій (3.5), (3.6) монотонно зменшуються в інтервалі температур від 573 до 1473 К. При взаємодії оксиду алюмінію з фторидом натрію енергія Гіббса реакції (3.7) в заданому інтервалі температур

майже не змінюється в заданому інтервалі температур. При взаємодії оксиду алюмінію з кріолітом енергія Гіббса реакції (3.8) в заданому інтервалі температур повільно збільшується.

Таким чином, всі розглянуті солі не вступають у взаємодію з алюмінієм і оксидом алюмінію (зміна енергії Гіббса для реакцій (3.1) − (3.8) позитивна, істотно більше нуля), тому всі перелічені солі можна використовувати як флюс для плавлення вторинної алюмінієвої сировини та рафінування алюмінієвих розплавів за температур 573−1473 К.

3.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей флюсів. Вибір складу рафінувального флюсу

Розроблено більше ста різних композицій флюсів, продовжують розроблятися склади флюсів на основі фторидів і хлоридів. Різноманіття складу флюсів зумовлено їх багатоцільовим призначенням і великою різноманітністю алюмінієвих сплавів. Найбільш широке розповсюдження знайшли флюси на основі хлоридів натрію і калію з добавками фторидів.

Під час розробки складу флюсів потрібно враховувати, що реакційна здатність фторидів натрію і калію вища, ніж хлоридів цих металів. Тому обмінні реакції з фторидом натрію приводитимуть до насичення розплаву натрієм. Інкін С. В. встановив, що з флюсу, що містить натрієвий кріоліт, переходить в алюміній 0,01 % Na, а при витримці алюмінію під флюсом системи NaCl–KCl–AlF_3 у ньому відбувається зниження концентрації натрію з 0,004 до 0,0007 % [29]. Таким чином, серед флюсів на основі NaCl і KCl практичне значення для видалення натрію з алюмінієвих сплавів можуть мати тільки флюси з фторидом алюмінію AlF_3.

У роботі [25] було показано, що додавання до складу флюсів на основі NaCl–KCl добавок фторидів натрію зменшує міжфазне натягнення на межі розділу флюс-метал і підвищує рафінуючи властивості флюсів.

Оксиди і розплавлений алюміній добре змочуються хлоридно-фторид-

ними флюсами. Краєвий кут змочування оксиду алюмінію флюсами систем NaCl–KCl–NaF і NaCl–KCl–Na_3AlF_6 складає від 20 до 40 град. залежно від складу флюсів і температури [30,31].

Залежність краєвого кута змочування оксиду алюмінію флюсом системи NaCl–KCl–NaF від його складу і температури приведена на рис. 3.11.

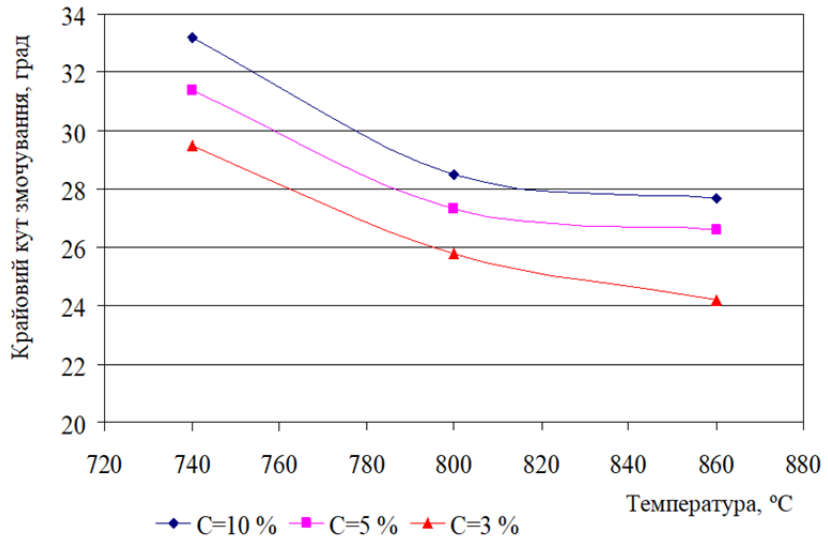


Рисунок 3.11 – Залежність крайового кута змочування Al_2O_3 флюсом системи NaCl–KCl–NaF від температури

Вплив добавок кріоліту до флюсу системи NaCl – KCl на величину його краєвого кута змочування оксиду алюмінію показаний на рис.3.12.

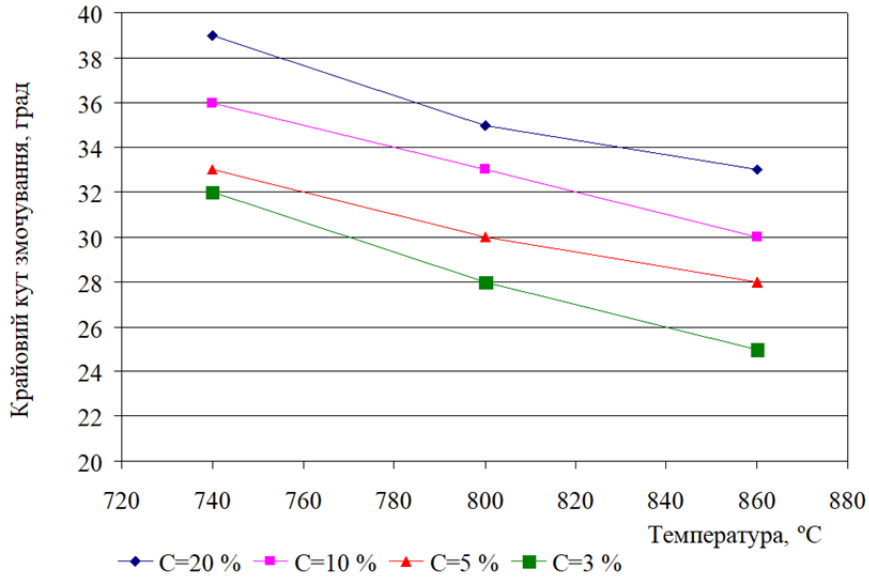


Рисунок 3.12 – Залежність кураєвого кута змочування Al_2O_3 флюсом системи NaCl–KCl–Na_3AlF6 від температури

Щільність хлоридних і хлоридно-фторидних флюсів, якщо в системі не утворюється хімічна сполука, підкоряється закону адитивності. Тому із збільшенням концентрації фторидів натрію і кріоліту відповідно в розплавах систем NaCl–KCl–NaF (рис.3.13) і NaCl–KCl–Na_3AlF_6 (рис.3.14) щільність флюсу підвищується пропорційно їй.

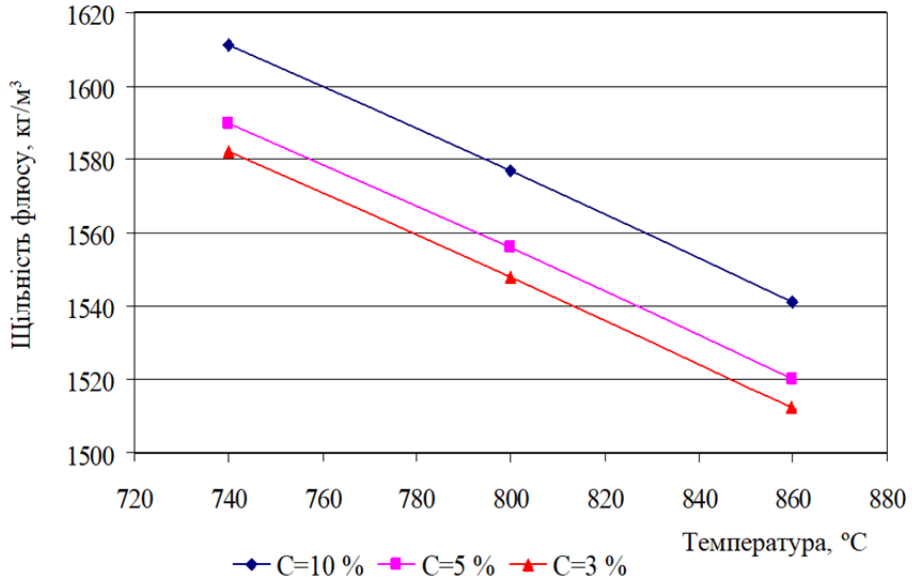


Рисунок 3.13 – Залежність щільності флюсів системи NaCl–KCl–NaF від температури

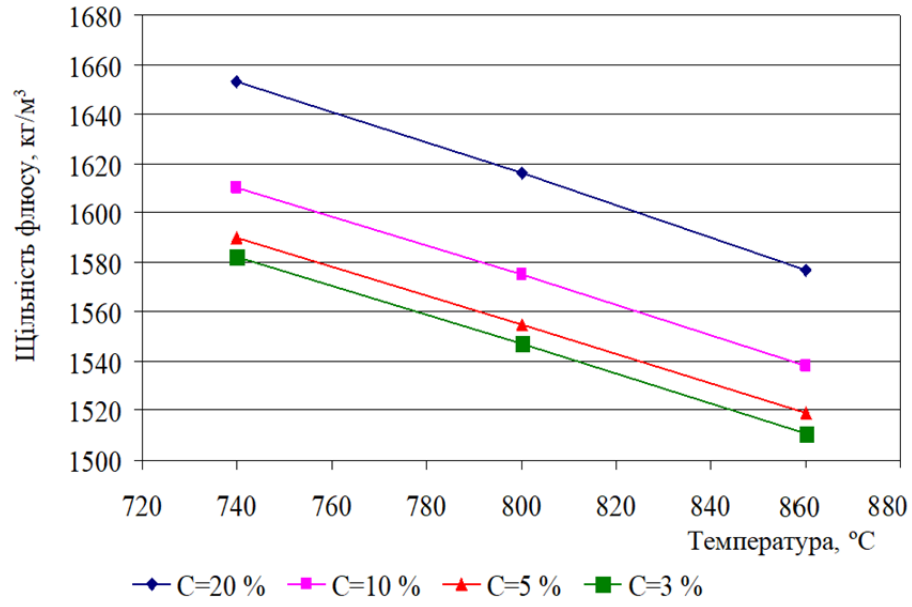


Рисунок 3.14 – Залежність щільності флюсів системи NaCl – KCl – Na_3AlF_6 від температури

Розглянуті закономірності взаємодії алюмінієвого розплаву, флюсів і оксидних плівок справедливі і для аналізу процесів відділення металу від шлаку при переплавленні алюмінієвої стружки. Мінімальні втрати алюмінію в шлаку досягаються при використанні добавки фториду алюмінію від 5 до 10 % у флюси на основі хлоридів натрію і калію.

З урахуванням вищевикладеного для захисту алюмінієвого розплаву від окислення і рафінування від газових і шлакових включень при переплавці алюмінієвої стружки вибираємо чотирикомпонентний флюс складу %: 56 NaCl, 22 NaF, 15 KCl, 7 Na_3AlF_6.

3.3 Вплив температури рафінування і виду підготовки флюсу на ефективність рафінування

Дослідження плавки алюмінієвої стружки і рафінування розплаву полягають у визначенні змін якісних характеристик сплаву при його рафінуванні флюсом, як флюс використовується стандартний чотирикомпонентний флюс NaCl–NaF–KCl–Na_3AlF_6, що пройшов різну попередню підготовку.

Для визначення оптимальних умов рафінування флюсами алюмінієвих розплавів, отриманих при плавці алюмінієвої стружки, досліджувався вплив попередньої підготовки флюсу, витрати флюсу і температури рафінування на вихід і якість металу.

Проведено експериментальне дослідження впливу наступних флюсів на ефективність рафінування металу (металургійний вихід, газонасиченість – бал пористості):

– флюс № 1 – сипкий флюс, отриманий механічним змішуванням чотирьох солей (компонентів);

– флюс № 2 – гранульований 4-х компонентний флюс фракції – 4+2 мм.

Результати по дослідженню рафінування сипким флюсом приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати дослідження при рафінуванні флюсом № 1

Номер досліду	Температура рафінування, °С	Металургійний вихід, %		Бал пористості	
		0,5	1,0	0,5	1,0
1	2	3	4	5	6
1	670	82,7	86,5	3	2
2	670	82,5	88,1	3	2
3	670	84,2	87,9	3	3
4	670	84,6	86,3	3	3
5	700	83,3	89,7	3	2
6	700	84,6	88,8	3	2
7	700	84,3	88,4	3	3
8	700	84,2	89,5	3	2
9	730	90,2	92,0	2	2
10	730	87,5	90,8	3	2
11	730	87,3	92,5	3	2
12	730	86,6	89,9	3	3

Результати по дослідженню рафінування гранульованим флюсом приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати дослідження при рафінуванні флюсом № 2

Номер досліду	Температура рафінування, °С	Металургійний вихід, %		Бал пористості	
		0,5	1,0	0,5	1,0
1	670	90,9	93,2	2	2
2	670	89,5	91,9	2	2
3	670	91,1	93,4	2	1
4	670	89,3	92,3	3	2
5	700	91,8	94,5	2	1
6	700	93,2	96,1	1	1
7	700	92,1	96,2	1	2
8	700	93,3	94,8	1	1
9	730	93,2	95,1	1	1
10	730	91,8	95,3	1	1
11	730	91,7	94,2	1	1
12	730	92,9	93,8	1	1

Під час обробки отриманих результатів усереднюємо значення металургійного виходу і балу пористості металу, отримані при однаковій температурі рафінування для одного і того ж флюсу при відповідній його витраті (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Вплив попередньої підготовки флюсу на металургійний вихід і якість металу

Вид флюсу та його витрата	Показники при температурі рафінування, ºС					
	670		700		730	
	Металургійний вихід, %	Бал пористості	Металургійний вихід, %	Бал пористості	Металургійний вихід, %	Бал пористості
Флюс №1, 0,5 %	83,5	3	84,1	3	87,9	2,75
Флюс № 1, 1,0 %	87,2	2,5	89,1	2,25	91,3	2,25
Флюс № 2, 0,5 %	90,2	2,25	92,6	1,25	92,4	1,25
Флюс № 2, 1,0 %	92,7	1,75	95,4	1,25	94,6	1

За даними, наведеними в табл.3.3 і табл.3.4, видно, що зниження газонасиченості металу залежить не тільки від виду вживаного флюсу, але і від температури. При температурі рафінування 730 °С найбільш ефективним є флюс №2 – газонасиченість металу знижується до 1 балу пористості. Проте найбільший металургійний вихід металу досягається при температурі 700 °С.

На рисунках 3.15 і 3.16 приведено залежності металургійного виходу від температури рафінування при витраті флюсу 0,5 % і 1,0 % для сипкого і гранульованого флюсів відповідно. Як видно з наведених результатів, незалежно від витрати сипкого флюсу при підвищенні температури рафінування металургійний вихід збільшується з 83,5 % до 91,3 %. Для гранульованого флюсу металургійний вихід має достатньо високі значення в дослідженому інтервалі температур 670-730 °С, найбільше значення

досягається при температурі рафінування 700 °С незалежно від кількості флюсу, що вводиться (рис. 3.16).

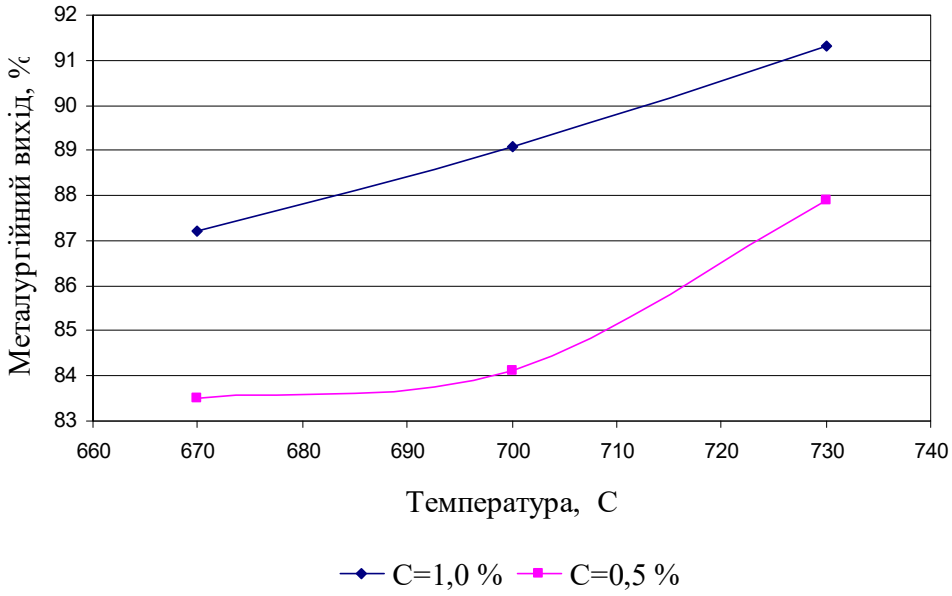


Рисунок 3.15 – Залежність металургійного виходу від температури рафінування при витраті сипкого флюсу 0,5 % і 1,0 %

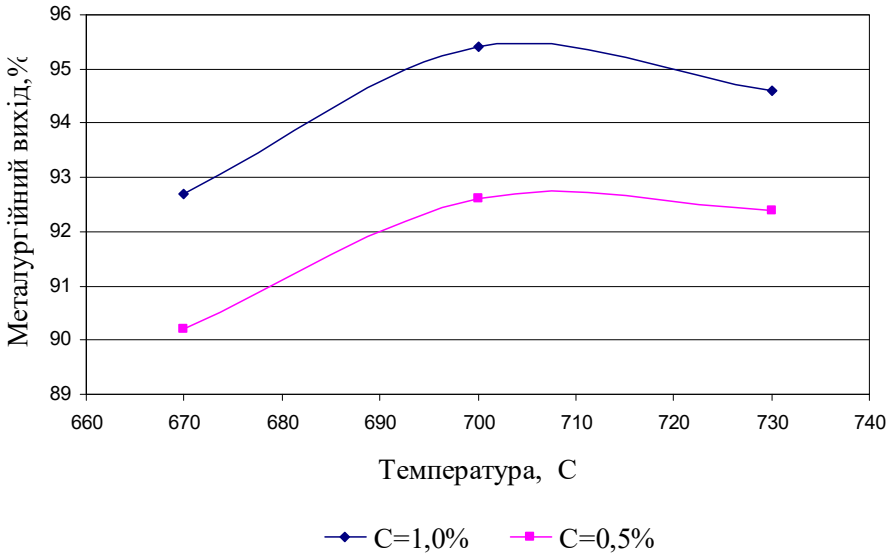


Рисунок 3.16 – Залежність металургійного виходу від температури рафінування для різної витрати гранульованого флюсу

Експериментальна-статистична модель процесу рафінування побудована за допомогою математичних методів планування повного факторного експерименту (статистична обробка приведена в п. 3.4) має вид:

$$Y = 65{,}033 + 4{,}7 \quad X_1 + 0{,}034 \quad X_2 \qquad (3.9)$$

де Y – металургійний вихід при плавці стружки і рафінуванні розплаву флюсом, %;

X_1 – витрати флюсу, %;

X_2 – температура рафінування, °С.

На підставі аналізу моделі можна зробити висновок, що величини лінійних коефіцієнтів регресії несиметричні. Тому перш ніж переходити до вибору оптимальних умов процесу, слід зменшити інтервали варіювання чинників і провести додаткову серію дослідів.

Друга серія дослідів була реалізована для флюсу №1 і флюсу №2 у вигляді повного двофакторного експерименту із зменшеними інтервалами варіювання: 0,25 % для витрати флюсу, 15 °С для температури рафінування.

У таблиці 3.6 представлені результати другої серії дослідів по дослідженню рафінування алюмінієвого розплаву сипким флюсом з варіюванням першого чинника (витрати флюсу) на трьох рівнях і другого чинника (температури рафінування) на п'яти рівнях.

Таблиця 3.6 – Результати другої серії дослідів при рафінуванні флюсом №1

Номер досліду	Температура рафінування, °С	Металургійний вихід (%) при витраті флюсу			Бал пористості при витраті флюсу		
		0,5 %	0,75 %	1,0 %	0,5 %	0,75 %	1,0 %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	670	82,7	85,0	86,5	3	3	2
2	670	82,5	83,9	88,1	3	3	2
3	670	84,2	83,8	87,9	3	3	3
4	670	84,6	85,0	86,3	3	3	3
5	670	83,3	83,8	87,1	4	3	3
6	685	82,8	85,6	87,9	3	3	3
7	685	85,3	85,3	88,3	3	3	2
8	685	84,4	86,0	87,5	3	2	3
9	685	83,0	84,2	89,0	3	3	2
10	685	83,5	84,4	88,8	3	3	2
11	700	83,3	85,2	89,7	3	3	2
12	700	84,6	86,2	88,8	3	2	2
13	700	84,3	86,2	88,4	3	3	3

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8
14	700	84,2	85,3	89,5	3	3	2
15	700	84,0	86,1	89,3	3	2	3
16	715	85,1	87,6	89,8	3	2	2
17	715	86,7	86,3	89,5	2	3	3
18	715	85,3	87,5	90,6	3	2	2
19	715	86,7	87,4	90,5	3	2	2
20	715	86,2	86,7	90,6	3	3	2
21	730	90,2	89,5	92,0	2	2	2
22	730	87,5	89,3	90,8	3	2	2
23	730	87,3	88,3	92,5	3	3	2
24	730	86,6	89,5	89,9	3	2	3
25	730	88,0	88,4	91,3	2	2	1

Результати другої серії дослідів по дослідженню рафінування алюмінієвого розплаву гранульованим флюсом з варіюванням першого чинника (витрати флюсу) на трьох рівнях і другого чинника (температури рафінування) на п'яти рівнях приведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати другої серії дослідів при рафінуванні флюсом № 2

Номер досліду	Температура рафінування, °С	Металургійний вихід при витраті флюсу			Бал пористості при витраті флюсу		
		0,5 %	0,75 %	1,0 %	0,5 %	0,75 %	1,0 %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	670	90,9	91,5	93,2	2	2	2
2	670	89,5	91,6	91,9	2	2	2
3	670	91,1	92,6	93,4	2	2	1
4	670	89,3	92,6	92,3	3	2	2
5	670	90,4	91,7	92,7	2	2	2
6	685	91,0	92,8	93,5	2	2	2
7	685	91,3	92,8	93,6	2	2	2
8	685	91,9	93,6	94,3	1	1	1
9	685	91,1	92,9	93,7	2	1	1
10	685	91,7	93,4	94,4	1	1	1
11	700	91,8	93,6	94,5	2	1	1
12	700	93,2	94,6	96,1	1	1	1
13	700	92,1	94,6	96,2	1	1	2
14	700	93,3	94,7	94,8	1	1	1
15	700	92,6	93,5	95,4	2	2	1

Продовження таблиці 3.7

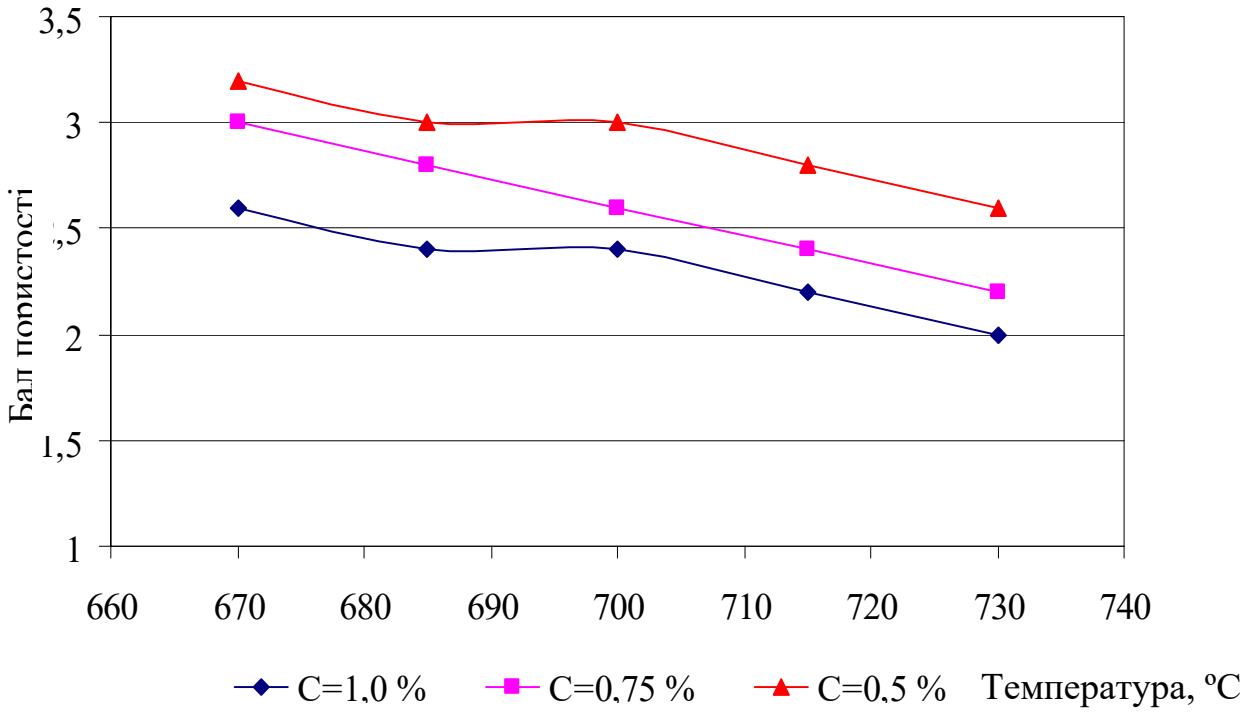
1	2	3	4	5	6	7	8
16	715	93,2	93,7	95,3	1	1	1
17	715	92,7	93,8	94,6	1	1	1
18	715	91,8	94,3	94,7	2	1	1
19	715	93,2	94,4	95,3	1	1	1
20	715	91,6	94,3	94,6	1	1	1
21	730	93,2	94,2	95,1	1	1	1
22	730	91,8	93,2	95,3	1	1	1
23	730	91,7	93,3	94,2	2	1	1
24	730	92,9	94,2	93,8	1	1	1
25	730	91,9	94,1	94,6	1	1	1

З даних, представлених в таблиці 3.6 і таблиці 3.7, витікає, що в дослідженому інтервалі температур з підвищенням температури рафінування від 670 °С до 730 °С газонасиченість (бал пористості) металу знижується незалежно від виду флюсу і стабілізується на певному рівні.

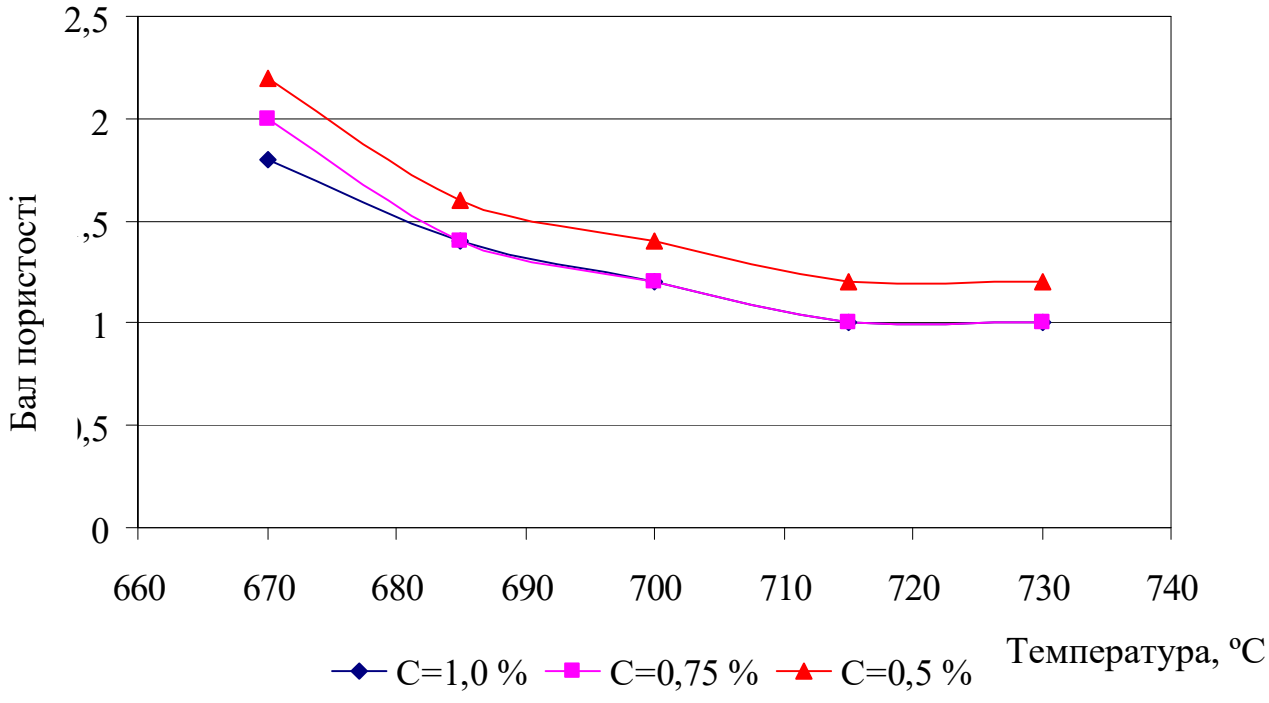
Зниження витрати флюсу з 1,0 % до 0,5 % при рафінуванні збільшує газонасиченість металу незалежно від температури рафінування і виду вживаного флюсу.

При обробці результатів другої серії дослідів усереднюємо значення металургійного виходу і балу пористості металу, отримані при однаковій температурі рафінування, для одного і того ж флюсу при відповідній його витраті і будуємо графічні залежності впливу температури рафінування на бал пористості металу (рис. 3.17).

З даних, представлених на рис.3.17 витікає, що при рафінуванні в інтервалі температур від 715 °С до 730 °С найбільш ефективним є застосування флюсу №2 – газонасиченість металу знижується до 1 балу пористості при витраті його 0,75 % і 1,0 %.



а



б

Рисунок 3.17 – Залежність балу пористості від температури рафінування для сипкого (а) і гранульованого (б) флюсу при витраті сипкого флюсу 0,5 %; 0,75 % і 1,0 %

Застосування гранульованого флюсу дозволяє знизити питому витрату флюсу шляхом зниження його механічних втрат при завантаженні в пічні агрегати і пилевиноса в систему газоочищення в порівнянні з традиційним приготуванням флюсу змішуванням солей. Зниження витрати флюсу приводить до зменшення кількості шлаку, що утворюється, і, отже, механічних втрат металу з шлаком. Оскільки перший бал пористості металу при рафінуванні флюсом № 2 досягається при витраті його 0,75 % і 1,0 %, то доречно рекомендувати витрату флюсу №2 в кількості 0,75 %.

Залежності металургійного виходу від температури рафінування для сипкого і гранульованого флюсів в дослідженому інтервалі температур 670-730 °С при витраті флюсу 0,5 %; 0,75 % і 1,0 % приведено на рисунках 3.18 і 3.19 відповідно.

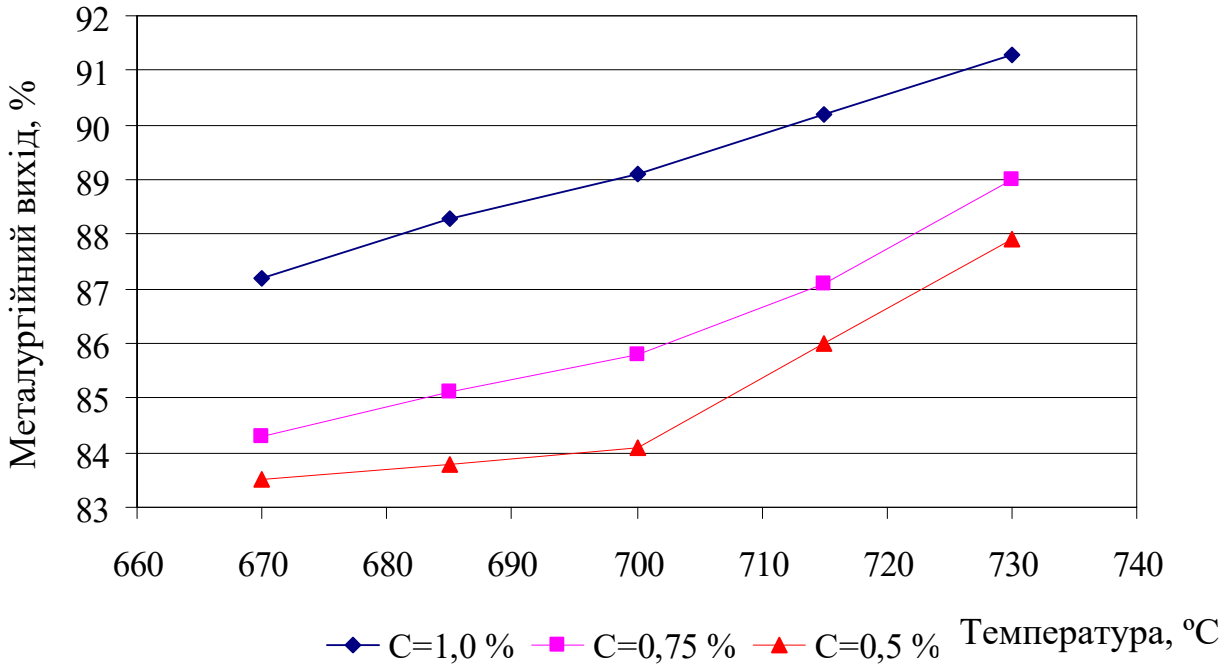


Рисунок 3.18 – Залежність металургійного виходу від температури рафінування при витраті сипкого флюсу 0,5 %; 0,75 % і 1,0 %

Для гранульованого флюсу в дослідженому інтервалі температур рафінування найбільший металургійний вихід металу досягається при температурі 700 °С, та далі зменшується незалежно від кількості флюсу, що

вводиться.

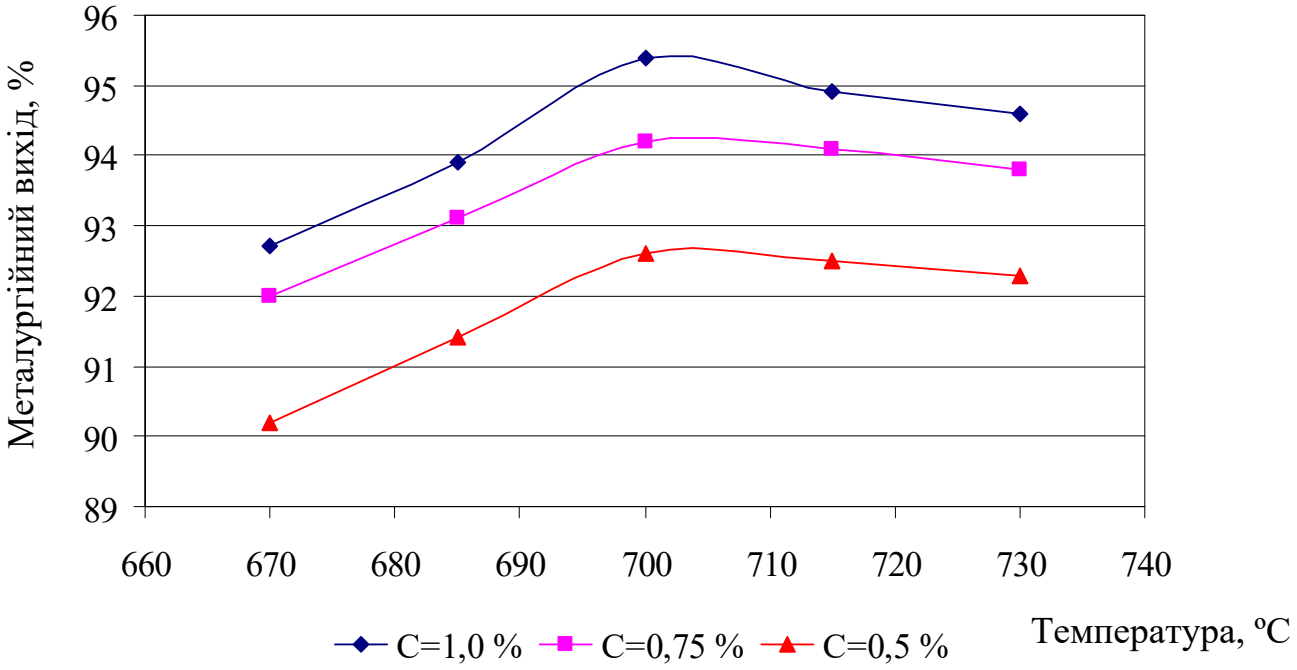


Рисунок 3.19 – Залежність металургійного виходу від температури рафінування при витраті гранульованого флюсу 0,5 %; 0,75 % і 1,0 %

Відомо [ ], що при підвищенні температури плавлення збільшується ступінь окислення алюмінію і більша кількість металу ошлаковується. Із збільшенням температури присадки флюсу в печі збільшуються втрати флюсу за рахунок випаровування (і відповідно знижується ефект захисту розплаву від використання флюсів). Підвищення робочої температури в печі приводить також до збільшення вмісту водню в алюмінієвому розплаві (за рахунок збільшення абсорбції водню металом), тому необхідно обмежувати робочі температури ведення процесів плавки і рафінування, вибираючи в розумних межах перегрів розплаву над температурою його плавлення.

На підставі наведених результатів рафінування розплаву, отриманого при плавці вторинної некомпактної алюмінієвої сировини, можна рекомендувати застосування гранульованого флюсу в кількості 0,75 % при температурі 715 °С.

При вибраних технологічних параметрах рафінування гранульованим флюсом масова частка водню в алюмінієвому розплаві до і після рафінування,

який визначено методом першої бульбашки в п'яти пробах, склало відповідно 0,97-0,58 см^3/100 г і 0,16-0,19 см^3/100 г металу. Кількість водню в алюмінієвому розплаві після рафінування сипким флюсом в кількості 1 % при температурі 730 °С склала 0,28-0,24 см^3/100 г металу.

Таким чином, зменшення оптимальної температури рафінування розплаву, отриманого при плавленні вторинної некомпактної алюмінієвої сировини, гранульованим флюсом порівняно з традиційно вживаним сипким флюсом повинно позитивно позначитися на якості отримуваного металу і техніко-економічних показниках процесу плавки.

3.4 Математична обробка результатів дослідження

За допомогою повного факторного експерименту шукають математичний опис об’єкту дослідження у вигляді рівняння регресії [32]:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + ... + b_{(n\ 1)n}x_{n\ 1}x_n \qquad (3.10)$$

де Y – змінна стану;

b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії;

x_i – чинники;

n – число чинників.

Для побудови математичної моделі процесів плавлення вторинної некомпактної алюмінієвої сировини і рафінування розплаву флюсом, за допомогою якої можна оптимізувати об'єкт дослідження, реалізований повний факторний експеримент типу 2^2, основними чинниками якого є:

X_1 – витрата флюсу, %;

X_2 – температура рафінування, °С.

Як змінною стану (Y) приймається металургійний вихід (%). Число паралельних дослідів прийняте рівним чотирьом.

Основні характеристики плану експерименту приведено в табл.3.8.

Змінні кодують за формулою:

Таблиця 3.8 – Основні характеристики плану експерименту

Характеристики	Кількість для чинників	
	X_1, %	X_2, °C
Основний рівень	0,75	700
Интервал варіювання	0,25	30
Верхній рівень	0,50	730
Нижній рівень	1,00	670

$$x_i = (X_s - X_{i0}) / \Delta X_i \qquad (3.11)$$

де x_i – поточне значення і-ого чинника в кодованій формі;

X_i – поточне значення і-ого чинника в натуральних одиницях;

X_{i0} – основний рівень і-ого чинника в натуральних одиницях;

ΔX_i – інтервал варіювання і-ого чинника в натуральних одиницях.

Результати дослідження процесів плавлення і рафінування приведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Матриця планування і результати експерименту

Номер серії дослідів	Чинники			Досліди					Розрахунки		
	x_0	x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	y_4	$\overline{y_i}$	s_i^2	$\overline{y_i^p}$	$(\overline{y_i} - y_i^p)^2$
1	+1	+1	+1	95,1	95,3	94,2	93,8	94,6	0,513	94,675	0,005625
2	+1	–1	+1	93,2	91,8	91,7	92,9	92,4	0,580	92,325	0,005625
3	+1	+1	–1	93,2	91,9	93,4	92,3	92,7	0,513	92,625	0,005625
4	+1	–1	–1	90,9	89,5	91,1	89,3	90,2	0,867	90,275	0,005625

Коефіцієнти рівняння регресії (3.2) обчислюють по формулах:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \overline{y_i}\ , \qquad (3.12)$$

$$b_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ij} y_i \quad (j=1,2,\ldots n), \qquad (3.13)$$

$$b_{jk} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ij} x_{ik} \overline{y_i} \quad (j \neq k), \qquad (3.14)$$

де $\overline{y_i}$ – середнє значення по m паралельним дослідам і-ого рядка матриці планування:

$$\overline{y_i} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} y_{ij}, \qquad (3.15)$$

n – число чинників;

m – число паралельних дослідів, проведених при однакових умовах.

Відрядкові дисперсії відтворюваності вихідної величини обчислені за формулою:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m} (y_{ij} - \overline{y_i})^2 \qquad (3.16)$$

і внесено в табл. 3.9.

Однорідність дисперсій перевірена по критерію Кохрена G_P, який обчислюють за формулою:

$$G_P = \frac{\max S_i^2}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2}, \qquad (3.17)$$

де $\max S_i^2$ – максимальна з розрахованих відпорядкових дисперсій;

$\sum_{i=1}^{N} S_i^2$ – сума всіх дисперсій по N рядкам матриці планування.

Оскільки розрахункове значення критерію Кохрена, розраховане по формулі (3.17), G_P = 0,4655 менше табличного значення (G_T = 0,6841 [32]), досліди можна вважати відтворними.

Коефіцієнти рівняння регресії, обчислені по формулах (3.12) – (3.14), склали b_0 = 92,475; b_1 = 1,175; b_2 = 1,025; b_{12} = 0,075.

Для оцінювання значущості коефіцієнтів обчислюють оцінку дисперсії коефіцієнтів S_{bi}^2 і довірчий інтервал Δb_i, який унаслідок рівності S_{bi}^2 для всіх коефіцієнтів, однаковий для всіх b_i:

$$s_{bi}^2 = \frac{s_0^2}{N}, \qquad (3.18)$$

$$\Delta b_i = \pm t_T \quad s_{bi}, \qquad (3.19)$$

де s_{bi} – середньоквадратичне відхилення b_i;

t_T – табличне значення критерію Стьюдента (для числа ступенів свободи $f=N\cdot(m-1)=12$ і рівня значущості q = 0,05 за даними [32] t_T=2,18);

s_0^2 – помилка досліду:

$$s_0^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} s_i^2 \ . \qquad (3.20)$$

Довірчий інтервал, розрахований за формулою (3.19), $\Delta b_i = 2{,}18 \cdot 0{,}3932 = 0{,}86$. Тому $|b_{12}| < \Delta b_i$, отже, коефіцієнт b_{12} є незначущим. Рівняння регресії, що описує експериментальні дані, має вигляд:

$$y = 92{,}475 + 1{,}175x_1 + 1{,}025x_2. \qquad (3.21)$$

Розрахункові значення y_i^p обчислені по рівнянню (3.21) для відповідних рядків матриці планування і приведені в табл. 3.9.

Дисперсія адекватності $s_{ад}^2$ розраховується за формулою:

$$s_{ад}^2 = \frac{m}{N - B}\sum_{i=1}^{N} (\overline{y_i} - y_i^p)^2 \qquad (3.22)$$

де m – число паралельних дослідів;

N – число рядків матриці планування;

y – число значущих коефіцієнтів в рівнянні регресії;

B – число коефіцієнтів в рівнянні регресії, які залишилися після оцінки значущості, включаючи і вільний член.

Адекватність рівняння регресії перевіряють по розрахунковому значенню критерію Фішера F_P, який обчислюють за формулою:

$$F_P = s_{ад}^2 / s_0^2 \ . \qquad (3.23)$$

Розрахункове значення критерію Фішера $F_P = 0{,}0225/0{,}6183 = 0{,}3639$ менше табличного $F_T = 4{,}75$ для числа мір свободи $f_0 = 12$ і $f_{ад} = 1$ [32], тому рівняння регресії (3.21) адекватно описує експериментальні дані.

Для переходу в природну систему координат використовуються формули переходу (3.11). Тоді підставляючи у рівняння (3.21) рівність:

$$x_1 = (X_1 - 0{,}75)/0{,}25 \quad \text{и} \quad x_2 = (X_2 - 700)/30 \ ,$$

отримуємо рівняння регресії в натуральних одиницях:

$$Y = 65{,}033 + 4{,}7 \cdot X_1 + 0{,}034 \cdot X_2.$$

де Y – металургійний вихід при плавці стружки і рафінуванні розплаву флюсом %;

X_1 – витрати флюсу , %;

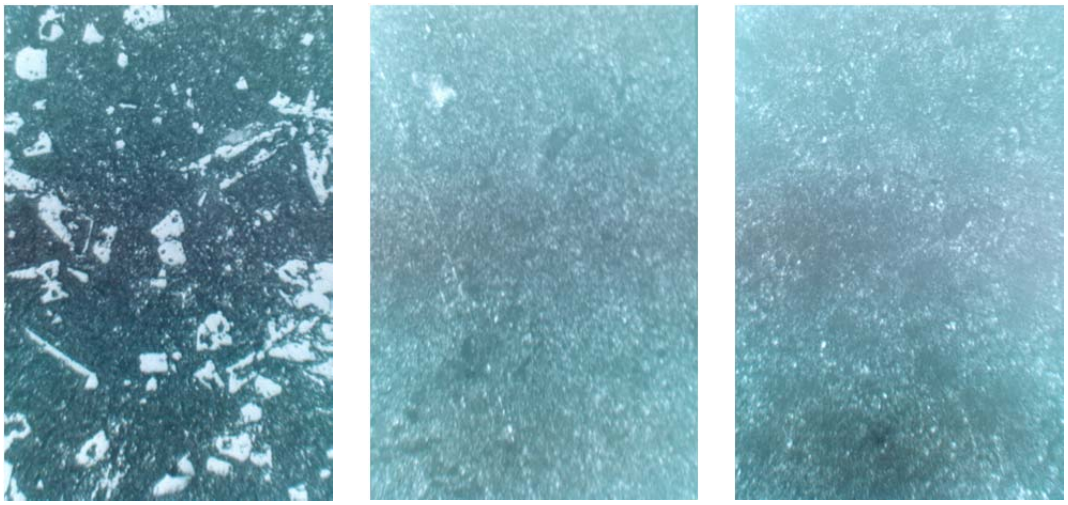
X_2 – температура рафінування, °C.

3.5 Дослідження мікроструктури алюмінієвого сплаву

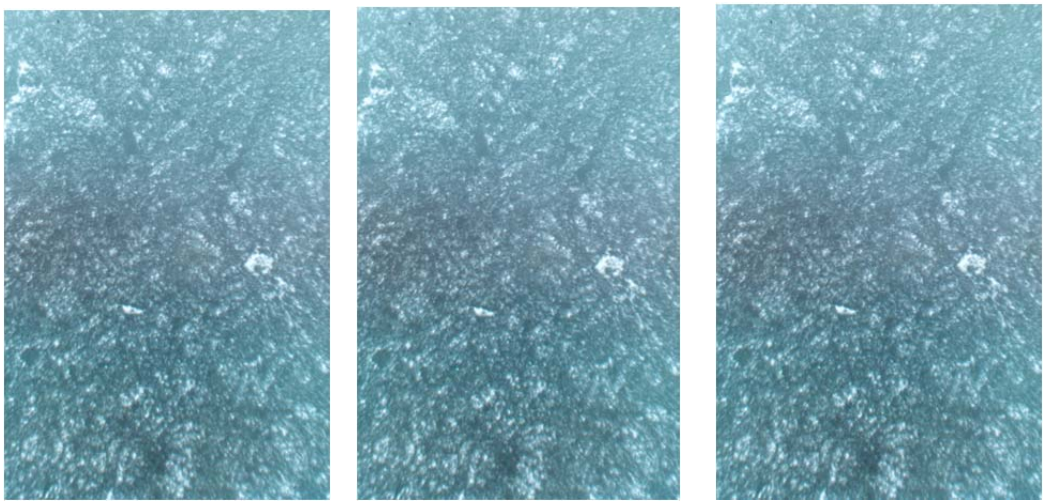
Дослідження з модифікування та збереження модифікуючого ефекту проводилися на сплаві АК-12, приготованому з алюмінієвої стружки, обрізків з добавкою кристалічного кремнію. Плавлення здійснювалося в електричній тигельній печі опору з карбідокремневим тиглем. До модифікування здійснювалося рафінування сплаву вище описаної технологією. Після зняття шлаку, при температурі 780 °С, розплав модифікувався гранулами фосфористої міді МФ-20, що містить 12 % фосфору. Кількість введеного у розплав модифікатора відповідала розрахунковому вмісту фосфору в сплаві 0,012 %. Для повного утворення фосфору з 20 хв витримкою розплаву. Потім була здійснена 5 год витримка, проби відбиралися кожні 60 хв, при температурі розплаву 780 °С.

Металографічний аналіз результатів лабораторних дослідів для сплаву АК-12 показав, що у мікроструктурі матеріалу отриманого без обробки модифікатором МФ-20 присутні великі, неправильної форми і нерівномірно розподілені кристали первинного кремнію (рис.3.20, *а*). Розміри цих кристалів з одного боку змінюються в інтервалах 30-270 мкм, більшість має розміри 70-100 мкм. Площі кристалів кремнію змінюються в інтервалах 900-25000 мкм^2, більша частина зерен має площу 7200-9000 мкм^2.

Дослідження проб, взятої після 20 хв. витримки (рис.3.20, б), а також взятих (через 1 год (рис.3.20, б) та протягом 5 год через кожну годину) протягом наступних 4 год (рис.3.20, в), показало, що основна маса кристалів кремнію має розмір не більше 10 мкм, хоча і зустрічаються одиничні кристали розміром до 45 мкм (площа до 100 мкм^2). Після 5 год витримки розміри кристалів залишаються в цих інтервалах, але кількість кристалів розміром 10-45 мкм, по одній стороні, збільшується і становить 1-2 кристали на квадрат розміром 450 × 450 мкм (рис.3.20, г).



а б в



г д є

а − вихідний сплав; б − модифікований сплав через 1 год витримки; в – модифікований сплав через 5 год витримки; г – модифікований сплав після переплавлення; д − модифікований сплав після переплавлення і витримки 1 год; є − модифікований сплав після переплавлення і витримки 5 год

Рисунок 3.20 – Мікроструктура проб алюмінієвого сплаву до та після модифікування

Далі було проведено дослідження збереження модифікуючого ефекту після другого переплаву. Модифікований і підданий 5 год витримки сплав, що

розплавлявся, температура розплаву доводилася до 780 °С. Після чого взята проба і далі здійснено чотиригодинну витримку, з відбиранням проб кожні 60 хв. Проба, взята відразу після досягнення розплавом 780 °С, показала, що кристали кремнію мають розміри 10-1940 мкм^2 (рис.3.20, г). Дослідження наступних проб показало, що зі збільшенням часу витримки розміри кристалів залишаються в тому ж інтервалі, але зростає питома кількість великих кристалів площею 320-1940 мкм^2 (рис.3.20, д). Наприклад, якщо безпосередньо після розплавлення число таких зерен у квадраті 450 × 450 мкм було не більше п’яти, то після 4 год витримки їх кількість зросла до 20 на квадрат тих самих розмірів (рис.3.20, є).

Таким чином, використання гранульованої фосфористої міді, що містить 20 % фосфору, як модифікатора алюмінієвого сплаву АК12 забезпечує досягнення стійкого модифікуючого ефекту.

3.6 Заходи щодо впровадження результатів дослідження

Застосування гранульованого чотирикомпонентного флюсу розміром від 3 мм до 5 мм при плавленні вторинної алюмінієвої сировини дозволяє понизити витрату флюсу і температуру рафінування на 25-30 °С і забезпечує отримання якісного металу. Рафінування при нижчій температурі дозволяє зменшити енергетичні витрати на розігрівання металу і підтримку його при заданій температурі, зменшити угар металу і втрати флюсу за рахунок зменшення його випаровування.

На підставі проведених досліджень розроблено схему підготовки флюсових солей і отримання гранульованого чотирикомпонентного флюсу для виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини в умовах вітчизняних металургійних підприємств (рис. 3.21).

Початкові флюсові солі (NaCl, KCl, NaF, Na_3AlF_6) дозуються у кількості, перерахованій за наведеними вище формулами, змішуються у механічному

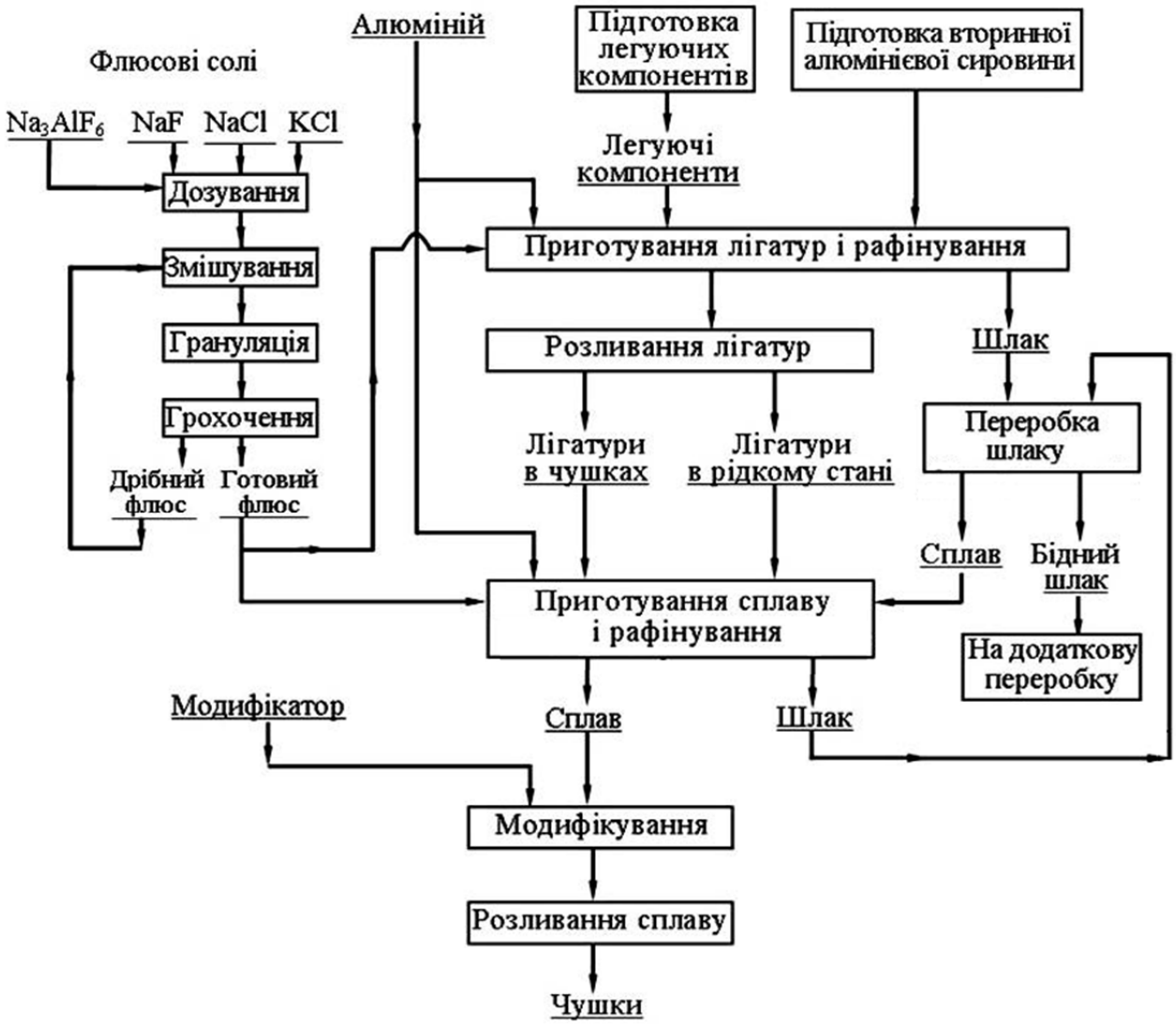


Рисунок 3.21 – Технологічна схема виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини

змішувачі та надходять у гранулятор. Після грануляції отриманий флюс розсівають на гуркотах для відокремлення частинок розміром від 3 мм до 5 мм, які є готовим гранульованим флюсом.

Приготування алюмінієвого розплаву з вторинної алюмінієвої сировини проводиться в індукційній тигельній печі ІАТ-6 (рис.3.21). Технологічний процес виробництва алюмінієвих сплавів в індукційній печі включає наступні основні операції: завантаження в піч шихтових матеріалів; плавлення (до повного розчинення шихтових матеріалів); рафінування розплаву; відстоювання металу; зняття шлаку; проведення експрес-аналізу сплаву;

переливання розплаву в ківш (або роздавальну піч); розливання металу у чушки. Процес приготування – періодичний, проводиться окремими плавками.

Перед завантаженням матеріалів піч потрібно повністю звільнити від залишків попередньої плавки, ретельно видалити шлак. На очищений черінь тигля печі рівномірно і щільно укладають розрахункову кількість пакетів вторинної алюмінієвої сировини і первинного алюмінію у вигляді чушок, щоб утворилася щільна монолітна маса. Піч поступово розігрівається до температури від 750 °С до 800 °С для утворення розплаву (пускової садки).

Далі в підігріту піч завантажують розрахункову кількість алюмінію, а потім силіцію. Силіцій завантажують порціями по 40-50 кг зі спеціального бункера, установленого над піччю. Після завантаження силіцію в розплав вводять всі інші легуючі компоненти сплаву, крім магнію. Після введення легуючих компонентів (крім магнію) нагрівають розплав в печі до температури 830-850 °С, при якій йде інтенсивне перемішування і розчинення завантаженої шихти. Після повного розчинення завантажених шихтових матеріалів у розплав вводять магній за допомогою шумівки або дірчатого короба, які перед використанням повинні бути разом із магнієм добре нагріті. Враховуючи високий угар магнію, кількість його в шихті беруть дещо більшу верхньої межі необхідного вмісту в сплаві.

Після введення магнію піч удруге вмикають на 10-15 хв для розчинення магнію і рівномірного розподілу його по всій масі металу. Потім піч відключають, розплав відстоюють протягом 9±3 хв, із поверхні металу збирають шлак, відбирають пробу сплаву на експрес-аналіз для визначення вмісту основних компонентів сплаву і домішки заліза.

За результатами експрес-аналізу розплав рафінують за температури 710±10 °С. Для цього в розплав графітовою мішалкою замішують відповідну кількість чотирикомпонентного флюсу і повторно перемішують метал включенням печі на 5-10 хв. Виготовлений сплав зливають з індукційної печі в ківш і потім переливають у роздавальну піч, з якої печі метал після витримки у вузькому інтервалі температур надходить у ливарний конвеєр для розливання

чушок масою 15 кг або в установку напівбезперервного лиття для виливання великогабаритних чушок масою до 600 кг.

3.7 Організація виконання науково-дослідницької роботи

3.7.1 Планування етапів науково-дослідницької роботи

Планування науково-дослідницької роботи (НДР) включає визначення складу та послідовності виконання етапів і робіт по них, їх трудомісткості, тривалості і календарних строків виконання [33].

У проведенні дослідження щодо рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих із некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, можна виділити наступні етапи, наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Етапи НДР з дослідження особливостей рафінування розплавів, отриманих з некомпактної вторинної алюмінієвої сировини

Номер етапу	Етап НДР	Зміст етапу
1	Літературний огляд і постановка задачі	1.1 Видача завдання. 1.2 Збір, вивчення, аналіз інформації з вітчизняних та іноземних джерел. 1.3 Узгодження та затвердження мети і завдання дослідження. 1.4 Виявлення можливих напрямків дослідження. 1.5 Затвердження програми дослідження. 1.6 Вибір состава виконавців.
2	Теоретичні дослідження	Розробка методики дослідження.
3	Експериментальні дослідження	Проведення досліджень з рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих із некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.
4	Узагальнення й оцінка результатів дослідження	4.1 Аналіз і обробка експериментальних даних. 4.2 Виконання графічної частини
5	Завершальний	5.1 Приймання дослідницької роботи. 5.2 Захист дослідницької роботи.

3.7.1.1 Визначення трудомісткості виконання НДР

Для визначення трудомісткості запланованих робіт найбільш часто застосовується метод імовірних оцінок. Його суть полягає в тому, що безпосередній виконавець робіт оцінює максимальну $T_{max\,i}$ і мінімальну $T_{min\,i}$ трудомісткість роботи. На основі цих оцінок визначається очікувана трудомісткість $T_{оч\,i}$ (чол·днів) робіт за формулою [34]:

$$T_{оч\,i} = \frac{3T_{min\,i} + 2T_{max\,i}}{5}., \qquad (3.24)$$

де $T_{max\,i}$ – максимальна трудомісткість роботи;

$T_{min\,i}$ – мінімальна трудомісткість роботи;

$T_{оч\,i}$ – очікувана трудомісткість.

Визначаємо трудомісткість першого етапу:

$$T_{оч\,1} = \frac{3 \cdot 7 + 2 \cdot 10}{5} = 8 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість другого етапу:

$$T_{оч\,2} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 8}{5} = 7 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість третього етапу:

$$T_{оч\,3} = \frac{3 \cdot 22 + 2 \cdot 26}{5} = 24 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість четвертого етапу:

$$T_{оч\,4} = \frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 10}{5} = 9 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість п’ятого етапу:

$$T_{оч\,5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 7}{5} = 5 \text{ чол.·днів.}$$

3.7.1.2 Визначення числа виконавців НДР

У таблиці 3.11 наведена кількість виконавців необхідних для виконання НДР.

Таблиця 3.11 – Кількість виконавців НДР

Номер етапу	**Виконавець НДР**	Кількість виконавців
1	Дослідник	1
2	Дослідник, старший науковий співробітник	2
3	Дослідник, старший науковий співробітник, плавильник, лаборант-вимірник	4
4	Дослідник, старший науковий співробітник	2
5	Дослідник	1

3.7.1.3 Розрахунок тривалості етапів НДР

Тривалість етапів дослідження $t_{оч\,i}$ розраховується за формулою:

$$t_{оч\,i} = \frac{T_{оч\,i}}{P_i \cdot K_{вн}}\ , \qquad (3.25)$$

де $T_{оч\,i}$ – очікувана трудомісткість виконання даної роботи, чол.-днів;

P_i – кількість виконавців, чол.;

$K_{вн}$ – коефіцієнт виконання норми, $K_{вн}$=0,95.

Тривалість 1 етапу:

$$t_{оч\,1} = \frac{8}{1 \cdot 0{,}95} = 8{,}42 \approx 8 \text{ дн.}$$

Тривалість 2 етапу:

$$t_{оч\,2} = \frac{7}{2 \cdot 0{,}95} = 3{,}68 \approx 4 \text{ дн.}$$

Тривалість 3 етапу:

$$t_{оч\,3} = \frac{24}{4 \cdot 0{,}95} = 6{,}32 \approx 6 \text{ дн.}$$

Тривалість 4 етапу:

$$t_{оч\,4} = \frac{9}{2 \cdot 0{,}95} = 4{,}74 \approx 5 \text{ дн.}$$

Тривалість 5 етапу:

$$t_{оч\,5} = \frac{5}{1 \cdot 0{,}95} = 5{,}26 \approx 5 \text{ дн.}$$

3.7.1.4 Побудова стрічкового графіка проведення науково-дослідної роботи

При невеликій кількості робіт з етапів і виконавців, основним документом планування виконання НДР є стрічковий графік.

Відрізком горизонтальної прямої показується тривалість етапу роботи від першого до останнього дня роботи. За розрахованим даними будуємо стрічковий графік, що наведений у табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Стрічковий графік проведення науково-дослідної роботи

Етапи	Трудомісткість, чол.·днів	Кількість виконавців, чол.	Тривалість етапів, днів	Виконання робіт у робочі дні																								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	8	1	8	■	■	■	■	■	■	■	■																			
2	7	2	4									■	■	■	■															
3	24	4	6													■	■	■	■	■	■									
4	9	2	5																			■	■	■	■	■				
5	3	1	3																								■	■	■	■	■

Загальна тривалість робіт склала 28 днів.

3.7.2 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження

Кошторисну калькуляцію складають на весь обсяг дослідницької роботи. Для визначення витрат для проведення дослідження необхідно розрахувати: витрати на основні матеріали; витрати на заробітну плату; витрати на

амортизацію використаного обладнання; витрати на електроенергію; накладні витрати.

3.7.2.1 Розрахунок витрат на основні матеріали

У дану статтю включаються всі витрати на придбання матеріалів, покупних виробів і напівфабрикатів, необхідних для безпосереднього виконання роботи з теми з урахуванням транспортно-заготівельних витрат.

Транспортно-заготівельні витрати $S_{ТЗ}$ становлять 2 % від суми основних матеріалів і розраховуються за формулою:

$$S_{ТЗ} = \frac{\sum S_М \cdot 2}{100}, \quad (3.26)$$

де $S_М$ – витрати на основні матеріали, грн.

$$S_{ТЗ} = 1749{,}20 \cdot 0{,}02 = 34{,}98 \text{ грн},$$

1749,20 – сума витрат на основні матеріали, грн.

Витрати на основні матеріали при виконанні НДР показано в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Розрахунок вартості матеріалів по НДР

Найменування матеріалів	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за кг, грн	Усього витрат, грн
Вторинна некомпактна алюмінієва сировина	кг	4,0	200,0	800,0
Натрію хлорид	кг	0,7	26,0	18,20
Калію хлорид	кг	0,7	38,00	26,60
Натрію фторид	кг	0,7	1180,0	826,0
Кріоліт	кг	0,7	112,0	78,40
Транспортно-заготівельні витрати				34,98
Разом				1784,18

3.7.2.2 Розрахунок витрат на амортизацію обладнання

Витрати на амортизацію $S_{ам}$ використаного при дослідженнях лабораторного обладнання визначаються за формулою:

$$S_{ам} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_{ам\,i}}{100} \cdot K_i \cdot \frac{T_{др}}{T_р}, \qquad (3.27)$$

де $\alpha_{ам\,i}$ – норма амортизаційних відрахувань для даного виду обладнання або приладу приймаємо 15%;

K_i – вартість обладнання або приладу і-го виду, грн;

$T_{др}$ – тривалість використання даного і-го виду обладнання або приладу в дослідницькій роботі, години;

$T_р$ – можливе число годин використання обладнання або приладів на протязі року.

При однозмінній роботі $T_р$ приймається 2000 годин.

Розрахунок витрат на амортизацію обладнання й приладів наведений в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Витрати на амортизацію обладнання

Найменування обладнання	Кіль-кість одиниць	Ціна за одиницю, грн.	Норма аморти-зації, %	Тривалість використання, год.	Усього $S_{ам}$, грн.
Електропіч опору	1	2360000	15	48	8496,0
Гранулятор	1	459900	15	8	275,94
Верстат шліфувально-полірувальний	1	344700	15	8	2068,20
Витяжна шафа	1	64500	15	144	6966,0
Набір плавиль-ного і допоміж-ного інструмента	3	210000	15	48	2268,0
Разом					20074,14

3.7.2.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Вартість електроенергії S_e витраченої на проведення дослідження визначають за формулою:

$$S_e = \sum_{i=1}^{N} T_e \cdot N_{c\,i} \cdot T_{в\,i} \cdot m_i, \qquad (3.28)$$

де T_e – тариф за кожен споживаний кВт/годину, грн;

$N_{c\,i}$ – середня споживана потужність і-го виду обладнання, кВт;

$T_{в\,i}$ – час використання і-го виду обладнання або приладу, година/цикл;

m_i – кількість обладнання і-го виду, примірників.

Тариф за 1 кВт електроенергії з урахуванням ПДВ становить 6,90 грн.

Розрахунок витрат на електроенергію наведений у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Кіль-кість одиниць	Потуж-ність, кВт	Число годин використання, година	Тариф за 1кВт·год, грн.	Усього витрат, грн.
Електропіч опору	1	5,2	48	6,90	1722,24
Гранулятор	1	4,5	8	6,90	248,40
Верстат шліфувально-полірувальний	1	1,6	8	6,90	88,32
Витяжна шафа	1	3,8	144	6,90	3775,68
Разом					5834,64

3.7.2.4 Розрахунок заробітної плати і відрахування

У розрахунок заробітної плати входять наступні статті: основна заробітна плата наукових, інженерно-технічних і допоміжних працівників, зайнятих виконанням робіт з теми; додаткова заробітна плата, що включає виплати по оплаті чергових і додаткових відпусток, на виконання державних і суспільних

доручень, винагороди.

Величина заробітної плати по темі може бути розрахована за формою представленої в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Величина заробітної плати

Виконавець	Кіль-кість, чол.	Оклад, грн.	Тривалість, дні	Оплата праці, грн.
Старший науковий співробітник	1	36700	15	26214,29
Плавильник	1	31000	6	8857,14
Лаборант-вимірник	1	15200	6	4342,86
Разом				39414,29

Заробітна плата виконавців НДР $З_{осн}$ розраховується за формулою:

$$З_{осн} = \frac{З_{окл}}{Т_{міс}} \cdot Т_{ет}, \quad (3.29)$$

де $З_{окл}$ – посадовий оклад, грн;

$Т_{міс}$ – кількість робочих днів у місяці, днів;

$Т_{ет}$ – тривалість певного етапу, днів.

Заробітна плата старшого наукового співробітника $З^{снс}$:

$$З^{снс} = 36700 \cdot 15/21 = 26214,29 \text{ грн.}$$

Заробітна плата плавильника $З^{пл}$:

$$З^{пл} = 31000 \cdot 6/21 = 8857,14 \text{ грн.}$$

Заробітна плата лаборанта-вимірника $З^{л\text{-}в}$:

$$З^{л\text{-}в} = 15200 \cdot 6/21 = 4342,86 \text{ грн.}$$

Премія $З_{пр}$ становить 20 % від основної заробітної плати і розраховується за формулою:

$$З_{пр} = \frac{З_{осн} \cdot 20}{100}. \quad (3.30)$$

Премія виконавців НДР:

$$ЗПР^{снс} = 26214,29 \cdot 20/100 = 5242,86 \text{ грн.};$$

$$ЗПР^{пл} = 8857,14\ 20/100 = 1771,43 \text{ грн};$$

$$ЗПР^{пл} = 4342,86\ 20/100 = 868,57 \text{ грн}.$$

Загальна заробітна плата виконавців НДР розраховується по формулі:

$$З_{заг} = З_{осн} + З_{пр} + З_{дод}, \quad (3.31)$$

де $З_{дод}$ – додаткова заробітна плата виконавців (10 % від ($З_{осн} + З_{пр}$)).

$$З_{заг} = 39414,29 + 12612,57 = 52026,86 \text{ грн}.$$

Нарахування на фонд оплати праці $З^{ФОПнар}$ становить 39 %:

$$З^{ФОП}_{нар} = \frac{З_{заг} \cdot 37,5}{100}. \quad (3.32)$$

$$З^{ФОПнар} = 52026,86\ 39/100 = 20290,48 \text{ грн}.$$

З них:

– у фонд державного соціального страхування $З^{ФДССнар}$ становить 2,5 %:

$$З^{ФДСС}_{нар} = \frac{З_{заг} \cdot 2,5}{100}. \quad (3.33)$$

$$З^{ФДССнар} = 52026,86 \cdot 2,5/100 = 1300,68 \text{ грн};$$

– у пенсійний фонд $З^{ПФнар}$ становить 32 %:

$$З^{ПФ}_{нар} = \frac{З_{заг} \cdot 32,0}{100}. \quad (3.34)$$

$$З^{ПФнар} = 52026,86\ \ 32,0/100 = 16648,60 \text{ грн};$$

– у фонд безробіття $З^{ФБнар}$ становить 1,5 %:

$$З^{ФБ}_{нар} = \frac{З_{заг} \cdot 1,5}{100}. \quad (3.35)$$

$$З^{ФБнар} = 52026,86 \cdot 1,5/100 = 780,40 \text{ грн};$$

– у фонд соціального страхування від нещасного випадку $З^{ФНВнар}$ становить 1,5 %:

$$З^{ФНВ}_{нар} = \frac{З_{заг} \cdot 1,5}{100}. \quad (3.36)$$

$$З^{ФНВнар} = 52026,86 \cdot 1,5/100 = 780,40 \text{ грн};$$

– у фонд військового внеску $З^{ФВВнар}$ становить 1,5 %:

$$З_{нар}^{ФНВ} = \frac{З_{заг} \cdot 1,5}{100}. \quad (3.37)$$

$$З^{ФВВнар} = 52026,86 \cdot 1,5/100 = 780,40 \text{ грн.}$$

3.7.2.5 Накладні витрати

Накладні витрати $Н_В$ становлять 40 % від фонду оплати праці:

$$Н_в = \frac{З_{заг} \cdot 40}{100}. \quad (3.38)$$

$$Н_В = 52026,86 \cdot 40,0/100 = 20810,74 \text{ грн.}$$

3.7.2.6 Зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Кошторис витрат на науково-дослідну роботу визначається на весь обсяг виконаних робіт. Кошторис витрат наведений у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Статті витрат	Витрати	
	грн	%
1. Витрати на матеріали	1784,18	1,48
2. Основна заробітна плата	39414,29	32,62
3. Додаткова заробітна плата	12612,57	10,44
4. Нарахування на фонд оплати праці (39 %):	20290,48	16,80
– на держ. соцстрах (2,5 %)	1300,68	1,07
– пенсійний фонд (32 %)	16648,60	13,78
– у фонд безробіття (1,5 %)	780,40	0,65
– у фонд соціального страхування від нещасного випадку (1,5 %)	780,40	0,65
– військовий внесок (1,5 %)	780,40	0,65
5. Амортизаційні відрахування	20074,14	16,61
6. Витрати на електроенергію	5834,64	4,83
7. Накладні витрати	20810,74	17,22
Разом	120821,04	100,00

Висновки.

Термодинамічним аналізом взаємодії алюмінію і його оксиду з компонентами флюсу та вивченням фізико-хімічних властивостей флюсів обґрунтовано вибір композиції флюсу для рафінування алюмінієвих розплавів, сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.

Експериментальними дослідженнями підтверджено вірогідність очищення алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, від неметалевих домішок чотирикомпонентним флюсом, до складу якого входить фторид натрію та кріоліт. Досліджено вплив технології приготування сольового чотирикомпонентного флюсу і технологічних умов флюсового рафінування на якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням некомпактної вторинної алюмінієвої сировини.

Застосування гранульованого чотирикомпонентного флюсу під час рафінування алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини, дозволяє зменшити витрату флюсу до 0,75 %, понизити температуру рафінування на 25-30 °С, забезпечує отримання якісного сплаву. Розроблена технологічна схема виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини.

В результаті проведення науково-дослідної роботи побудовано стрічковий календарний план. Загальна тривалість виконання науково-дослідної роботи складала 28 днів. Розраховано зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідницької роботи. Загальні витрати на проведення роботи склали 120821,04 грн.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників виробничого середовища, що впливають на дослідника

Основними шкідливими чинниками під час дослідження особливостей флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих плавленням некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, для приготування товарних алюмінієвих сплавів є тепло- і газовиділяння, а також неіонізуюче випромінювання. Найбільша кількість теплоти виділяється під час плавлення вторинної некомпактної алюмінієвої сировини, приготування і розливання алюмінієвих сплавів, менша кількість тепловиділень – під час твердіння злитків.

Джерелом інтенсивних тепловиділень є лабораторна шахтна електропіч опору SNOL 8,2/1100. При проведенні експерименту температура у печі не більше 900 °С, проте завдяки вогнетривкої кладки і кожуху печі температура поверхні печі складає близько 20 °С. Основна кількість теплоти виділяється при вийманні алюмінієвого розплаву з печі, тому цю операцію слід проводити з використанням допоміжних щипців у спеціальних захисних рукавицях.

Під час дослідження плавлення некомпактної вторинної сировини (алюмінієвої стружки, обрізків, висічки та ін.) і рафінування отриманих розплавів основними потенційними небезпеками є ураження електричним струмом. Джерелами прихованої небезпечної дії електричного струму є електроустановки. Робота електротермічного устаткування створює небезпеку теплового ураження.

Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів та карта умов праці для робочого місці дослідника щодо рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих плавленням некомпактної вторинної сировини, під час приготування алюмінієвих сплавів надано в табл. 4.1 [35–37].

Таким чином, проведений аналіз умов праці під час дослідження особливостей рафінування флюсами алюмінієвих розплавів, отриманих плавленням

Таблиця 4.1 – Оцінка чинників виробничого і трудового процесу

№	Чинники виробничого середовища і процесу праці	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови			Тривалість дії чинників за зміну, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3 2 клас небезпеки: фторид натрію кріоліт 3-4 клас небезпеки: хлорид натрію хлорид калію	 1,0 1,0 5,0 5,0	 1,12 0,85 4,0 3,0	 – – – –	 – – – –	 – – – –	 35 35 35 35
2	Неіонізуючі випромінювання: - діапазон промислової частоти, кВ/м	20	20	–	–	–	35
3	Мікроклімат в приміщенні: - температура повітря, °С - швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	 18 0,5 40−60	 24 0,4 50	 – – –	 6 – –	 – – –	 85 85 85
4	Категорія важкості і напруженість праці	Категорія праці – легка, помірно напружена					

некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, для приготування алюмінієвих сплавів дозволяє зробити висновок про незначне перевищення нормативних показників по рівню для фториду натрію, але за рахунок незначної тривалості дії чинників це дозволяє вважати категорію праці легкою, помірно напруженою.

4.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища

При дослідженні особливостей рафінування флюсами алюмінієвих розплавів, отриманих плавленням некомпактної вторинної сировини, для приготування алюмінієвих сплавів, робота, яка проводиться, пов’язана з

використанням і виділенням шкідливих речовин, наявністю і використанням електричного струму, експлуатацією обладнання з підвищеною температурою. Невиконання правил безпеки може привести до отруєння шкідливими газами, травмам, ураженню електричним струмом, термічним і хімічним опікам.

Перелік шкідливих речовин, що використовуються при дослідженні, зведений у табл. 4.2 [35–37].

Таблиця 4.2 – Перелік шкідливих речовин

Найменування шкідливої речовини, формула	Характеристика дії на організм людини	Шляхи проникнення в організм людини	Засоби захисту і засоби попередження
Фторид натрію	Викликає гострі і хронічні отруєння з ураженням життєво важливих органів і систем, при контакті з шкірою і слизовою викликає опіки	Дихальні шляхи, шкіряні та слизові покрови	Засоби індивідуального захисту, правила гігієни і працювати під витяжною шафою
Хлорид натрію	Викликає подразнення слизових оболонок верхніх дихальних шляхів і шкіри	Дихальні шляхи, шкіряні та слизові покрови	Засоби індивідуального захисту, правила гігієни і працювати під витяжною шафою
Хлорид калію	При попаданні на шкіряні рани ускладнюють загоєння	Шкіряні покрови	Засоби індивідуального захисту і не допускати потрапляння на рани
Кріоліт	Токсичний, викликає порушення діяльності центральної нервової системи, хвороби кісних тканин, очей і шкіряних покровів	Дихальні шляхи, шкіряні та слизові покрови	Засоби індивідуального захисту, правила гігієни і працювати під витяжною шафою, не допускати потрапляння кріоліту всередину організму

Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які трапляються при проведені дослідження особливостей флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, надано в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Найменуівання шкідливого виробничого фактору	Параметр (норма)	Значення параметра на робочому місті	Характер дії на організм людини	Засоби захисту
Електричний струм	0,01А	Опір заземлення має бути не більше 10 Ом, опір ізоляції по паспорту на устаткування	Електрошок, електротравма, електроудар, термічні опіки тіла, зупинка роботи серця і дихання	Діелектричні рукавиці
Джерело: Електрична піч опору, сушильна шафа. Заходи запобігання: Корпуси печі і сушильної шафи мають бути надійно заземленими. Строго стежити за станом електроізоляції і заземлення устаткування. Всі поверхні устаткування мають бути чистими і сухими.				

Для поліпшення умов праці і захисту працюючих від теплової дії та виділення пічних газів передбачено наступні заходи: теплоізоляція, механічна вентиляція, природна аерація, спецодяг і засоби індивідуального захисту дослідників.

Для захисту від дії шкідливих хімічних речовин під час дослідів передбачена механічна вентиляція (витяжна шафа) та природна аерація. На роботах зі шкідливими умовами праці, а також в особливих температурних умовах повинні бути використаними засоби індивідуального захисту (халат, нарукавники, рукавиці гумові, рукавиці бавовняні, захисні окуляри).

4.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат визначається сукупністю фізичних параметрів повітряного середовища, таких як температура, швидкість руху, вологість і барометричний тиск повітря, температура поверхонь, що оточують людину, та інтенсивність інфрачервоного випромінювання. Кількість тепла, що утворюється в організмі

людини, залежить від фізичних навантажень, а рівень тепловіддачі – від мікрокліматичних умов, переважно температури повітря.

Згідно з категорії виконуваних робіт, важкості та характеристикою приміщення стосовно надлишку тепловипромінювання, з урахуванням періоду року встановлюють значення показників мікроклімату, базуючись на вимогах санітарних норм зведених в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Нормовані величини температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура, °С					Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима				Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних, не більш	Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних
			верхня межа		нижня межа					
			на робочих місцях							
			постійних	непостійних	постійних	непостійних				
Холодний	Легка	21-23	24	25	20	17	40-60	75	0,1	не більше 0
Теплий	Легка	22-24	28	30	21	19	40-60	60 (при 27 °С)	0,2	0,1-0,3

Освітлення виробничих приміщень. Серед чинників зовнішнього середовища, що впливають на організм людини в процесі праці, світлу відводиться одне із чільних місць. Адже відомо, що майже 90 % всієї інформації про довкілля людина отримує через органи зору.

Вплив світла спостерігається не лише на функцію зору, а й на діяльність організму в цілому: посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу. Відомий сприятливий вплив природного освітлення на скелетну мускулатуру.

Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому

зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад гостроти зору; світлові відблиски – тимчасове засліплення.

Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути природним, штучним і суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним [35]. Для створення сприятливих умов зорової роботи для виконання роботи середньої точності використовуємо такі норми освітлення, які зазначені в табл. 4.5 і табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Нормовані значення природного освітлення для виробничих процесів за СНіП І-4

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкту для розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Коефіцієнт природного освітлення $e_н$, %	
			При верхньому і комбінованому освітленні	При звичайному освітленні
Середньої точності	0,5-0,1	IV	3,6	1,4

Таблиця 4.6 – Норми освітлення штучним світлом за СНіП ІІ-4

Характеристика роботи	Розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд роботи	Підрозряд роботи	Контраст об'єкта з фоном	Фон	Найменше освітлення, Лк			
						При газорозрядних		При лампах розжарювання	
						Комбіноване	Загальне	Комбіноване	Загальне
Середньої точності	0,5-1	IV	Г	Великий	Світлий	300	150	300	100

Вентиляція є сукупністю заходів і пристроїв, необхідних для забезпечення заданої якості повітряного середовища в робочих приміщеннях. В умовах виробництва вентиляція може бути: природна та механічна (за способом переміщення повітря), місцева та загальна (за формою організації повітрообміну). Вентиляційні установки можуть бути витяжними, що

призначені для видалення повітря, та припливними, які здійснюють подачу повітря.

Природна вентиляція. Повітрообмін відбувається за рахунок різниці температур, а отже, і питомої маси повітря всередині виробничого приміщення і поза ним. Природна вентиляція виробничих приміщень може бути неорганізованою (провітрювання) і організованою (аерація).

Механічна вентиляція. На відміну від природної механічна дозволяє виробляти попередню обробку припливного повітря (зволоження, нагрів або охолоджування і очищення).

Загальна вентиляція. Застосовується коли шкідливі речовини, надлишкове тепло і волога виділяються розосереджено по всьому робочому приміщенню і видалити їх за допомогою місцевих відсмоктувань технічно не можливо, а також в тих випадках, коли необхідно розбавити до ГДК залишки повітря, що не видаляється місцевими відсмоктуваннями.

Припливна вентиляція. Рециркуляція повітря в системах припливно-витяжної вентиляції застосовується в холодну і перехідну пору року. При рециркуляції частина повітря, що видаляється з приміщення після відповідного очищення від шкідливих речовин, знову прямує в приміщення [36].

4.4 Електробезпека

Для освітлення дослідницької лабораторії і живлення устаткування використовують найчастіше змінний електричний струм напругою 220-380 В. Змінний струм напругою більше 42 В небезпечний, силою струму 0,1 А і вище смертельний. Для мережі загального освітлення допускається напруга не вище 220 В. В приміщеннях з підвищеною небезпекою, а також особливо небезпечних приміщень напруга для переносних освітлювачів і ручного інструменту не повинно перевищувати 12 В [37].

При експлуатації устаткування персонал піддається небезпеці ураження електричним струмом і отриманню електричних травм. Електричний струм,

проходячи через організм людини, надає наступну дію: термічну, електричну, біологічну.

Розрізняють два основні види поразок електричним струмом: електричні травми і удари. Тягар поразки електричним струмом залежить від сили струму, електричного опору тіла людини, тривалості протікання струму через тіло, роду та частоти струму, індивідуальних властивостей людини, умов довкілля.

Основний чинник, що обумовлює той або інший ступінь ураження людини – сила струму. Для характеристики його дії на людину встановлено три критерії (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Середні значення порогових струмів [35]

Струм	Значення струму		
	пороговий відчутний, мА	пороговий невідпускаючий, мА	порогово-фібриляційний, мА
Змінний частотою 50 Гц	0,5-1,5	6-10	50-100
Постійний	5,0-20	50-80	300

Усі електрощітки, зборки повинні постійно знаходитись з закритому положенні і не захаращувати сторонніми предметами. Струмопровідні частини устаткування, які находяться під високою напругою, повинні бути заземлені.

4.5 Заходи пожежної безпеки

Пожежна безпека об’єкту повинна забезпечуватися системами запобігання пожежі і протипожежному захисту, у тому числі організаційно-технічними заходами. З метою попередження пожеж і обмеження розповсюдження вогню передбачають необхідну вогнестійкість будівель [ ]. Згідно з ОНТП 24-86 приміщення дослідницької лабораторії відноситься до категорії В по вибухопожежній і пожежній небезпеці (табл. 4.8).

Ступінь вогнестійкості за СНіП 2.09.02-85 П–І, його характеристика надана в табл.°4.9. Необхідний ступінь вогнестійкості виробничих будівель

визначається залежно від категорії вибухопожежної небезпеки, площі і поверхні будівлі [36].

Таблиця 4.8 – Категорія приміщень вибухопожежної та пожежної небезпеки за ОНТП 24-86

Категорія	Конструктивні характеристики
В	- ТГРіГР з $T_{сп} > 61$ °С; - Пил і волокна з НМС > 65 г/м^3; - ТР, пальні і важко горючі речовини і матеріали; - Речовини при взаємодії з H_2O; O_2 і один з одним без наслідків.

Таблиця 4.9 – Конструктивні характеристики будівель залежно від їх ступеня вогнестійкості за СНіП 2.01.02

Ступінь вогнестій-кості	Конструктивні характеристики
I	Будівлі з несучими і огороджуючими конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів.

Усі легкозаймисті рідини повинні зберігатися в зачинених металевих ящиках, реактиви в зачинених шафах. Заборонено залишати без догляду включені схеми і устаткування.

4.5 Розрахунок вентиляції для видалення залишкової теплоти

Для видалення залишкової теплоти і шкідливих речовин використовуємо витяжну шафу маркою ШВ-2А за ДСТУ 25743, креслення шафи зображено на рис. 4.1.

В лабораторії об'ємом 120 м^3 для флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих плавленням вторинної алюмінієвої сировини, встановлена електропіч опору лабораторна SNOL 8,2/1100 з сумарною тепловиділяючою поверхнею 1,23 м. Температура в середні печі $t_{вн} = 750$ °С. Стінки печі цегляні із шамоту товщиною $\delta_1 = 120$ мм. Кожух печі зі сталі

товщиною $\delta_2 = 3$ мм. Сумарна продуктивність печі P = 0,1 кг/год. Початкова температура витягуваного із печі металу $t_{поч} = 580$ ºС, до миті вивозки з відділення метал остигає до $t_{кін} = 90$ °С. Температура зовнішнього повітря $t_{зовн} = 20$ °С. Температура повітря у дослідницькій лабораторії $t_{від} = 25$ ºС, температура вихідного повітря $t_{вих} = 30$ °С.

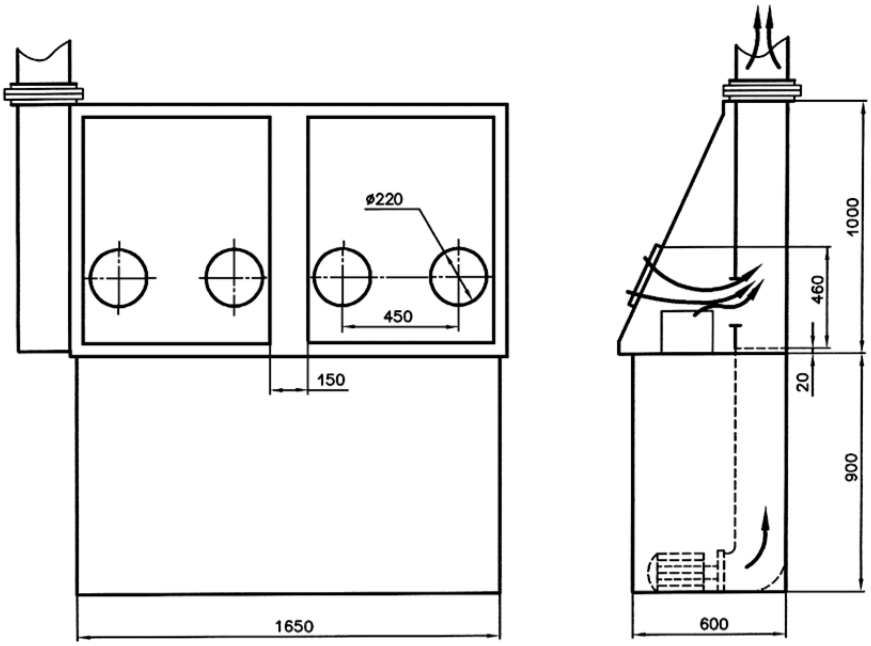


Рисунок 4.1 – Креслення витяжної шафи марки ШВ-2А

Знайдемо загальне тепловиділення в **лабораторії** за годину. Основне джерело теплоти – електрична піч і остигаючий метал.

Тепловиділяння від електричної печі визначаються за формулою, Дж/с:

$$Q_n = R(t_{вн} - t_{від})S \tag{4.1}$$

де R – коефіцієнт теплопередачі стінок печі, Дж/(м^2·с·К),

S – сумарна площа тепловиділяючих поверхонь печей, м^2.

Коефіцієнт теплопередачі стінки печі розраховується за формулою:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \tag{4.2}$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні печі, вони відповідно дорівнюють 14 і 9,3 Дж/(м^2·с·К) [37];

λ_1 і λ_2 – коефіцієнт теплопередачі шамотної цегли і кожуху печі, вони відповідно рівні 0,93 і 7 Дж/(м^2·с·К) [37].

Тоді за формулою (4.2):

$$R = \frac{1}{\frac{1}{14} + \frac{0,12}{0,93} + \frac{0,003}{7} + \frac{1}{9,3}} = 3,24 \text{ Дж/(м}^2\text{·с·К).}$$

Тепловиділення від електричної печі по формулі (4.1) складатиме

$$Q_п = 3,24 \cdot (750 - 25) \cdot 1,23 = 2889,27 \text{ Дж/с.}$$

Знаходимо тепловиділення від остигаючого металу, Дж/с:

$$Q_м = P \cdot C(t_{поч} - t_{кін})S \qquad (4.3)$$

де С – теплоємність алюмінію, Дж/(кг·К).

Підставляючи у формулу (4.3) значення показників, отримуємо

$$Q_м = 0,1 \cdot 0,93 \cdot (580 - 90) = 45,57 \text{ Дж/с.}$$

Далі знаходимо загальну кількість теплоти, що виділяється в лабораторії від електричної печі і остигаючого металу:

$$Q_{заг} = Q_п + Q_м = 2889,27 + 45,57 = 2934,84 \text{ Дж/с.}$$

Приймемо втрату теплоти 20 % від загальної кількості теплоти. Тоді залишкова кількість теплоти

$$Q_{зал} = Q_{заг} \cdot 0,8 = 2934,84 \cdot 0,8 = 2347,87 \text{ Дж/с.}$$

Кількість повітря, яке необхідно ввести для видалення залишкової теплоти, м^3/год:

$$V_{пов} = \frac{3600 \cdot Q_{зал}}{C_в(t_{від} - t_{зовн})} \qquad (4.4)$$

де $C_в$ – об’ємна теплоємкість повітря, кДж/(м^3·К),

$$V_{пов} = \frac{3600 \cdot 2347,87}{1,256(30 - 20)} = 672,96 \text{ м}^3\text{/год.}$$

Знаходимо кратність повітрообміну:

$$K = \frac{V_{пов}}{V_{прим}}, \tag{4.5}$$

де $V_{прим}$ – об'єм дослідницької лабораторії, м^3,

Тоді за формулою (4.5) отримаємо

$$K = \frac{672,96}{120} = 6,$$

тобто, повітря в приміщенні за годину обмінюється 6 раз.

Визначаємо об'єм повітря, видаляємого із шафи, за формулою:

$$V_{від} = 120 \sqrt[3]{Q_{зал} \cdot h_{пр} \cdot F_{пр}^2} \tag{4.6}$$

де $h_{пр}$ − висота робочого вікна, м;

$F_{пр}$ − площа відчиненого робочого вікна шафи, м^2,

$$V_{від} = 120 \cdot \sqrt[3]{2347,87 \cdot 0,84 \cdot 0,6132^2} = 1086,18 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Вибираємо відцентровий вентилятор марки FLUGER KB 250 з продуктивністю 1100 м^3/год.

Висновки. Основними шкідливими чинниками під час дослідження особливостей флюсового рафінування алюмінієвих розплавів, що утворюються під час переплавлення некомпактної вторинної алюмінієвої сировини, і для приготування алюмінієвих сплавів є тепло- і газовиділяння, а також неіонізуюче випромінювання. Найбільша кількість теплоти виділяється під час плавлення вторинної алюмінієвої сировини, приготування і розливання алюмінієвих сплавів, менша кількість теплоти – під час тверднення злитків.

Для видалення залишкової теплоти і шкідливих речовин виконано розрахунок повітрообміну витяжної шафи марки ШВ-2А. Вибрано відцентровий вентилятор марки FLUGER KB 250 з продуктивністю 1100 м^3/год.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасний стан виробництва алюмінієвих сплавів в Україні та надано рекомендації щодо вдосконалення технологій виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти.

2. Виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини (стружки, обрізки, висічка та ін.) спричинює додаткове насичення неметалевими домішками алюмінієвих розплавів, що утворюються під час переплавлення. Для підвищення якості таких сплавів обов'язковою технологічною операцією є флюсове рафінування.

3. Підвищити якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням до шихти вторинної некомпактної алюмінієвої сировини, зменшити втрати металу внаслідок його ошлакування дозволяють сучасні технології рафінування алюмінієвого розплаву шляхом використання гранульованих і таблетованих флюсів.

4. Досліджено вплив технології приготування сольового чотирикомпонентного флюсу і технологічних умов флюсового рафінування на якість алюмінієвих сплавів, виготовлених із залученням вторинної алюмінієвої сировини.

5. Запропоновані технологічні умови рафінування алюмінієвих розплавів, виготовлених із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини, гранульованим флюсом порівняно з рафінуванням сипким флюсом дозволяють зменшити температуру рафінування на 25-30 градусів, зменшити витрату флюсу до 0,75 % завдяки його попередньої підготовки шляхом грануляції, знизити газонасиченість розплавів з 0,97-0,58 $см^3$/100 г сплаву до 0,16-0,19 $см^3$/100 г сплаву і угар металу, підвищити якість алюмінієвих сплавів.

6. Використання гранульованої фосфористої міді, що містить 20 % фосфору, як модифікатора алюмінієвого сплаву забезпечує досягнення стійкого модифікуючого ефекту.

7. Розроблена технологічна схема виготовлення алюмінієвих сплавів із залученням до шихти вторинної алюмінієвої сировини.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kircher G. Aluminium scrap as vital source of aluminium supply. *Erzmetall*. 2011. Vol. 64. № 4. P. 210−212.

2. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технологія одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 224 с.

3. Villars P., Prince A., Okamoto H. Handbook of Ternary Alloy Phase Diagramms. ASM International : Geauga Country, OH, USA. 2006. Vol. 3. P. 3501–3514, 3597–3621.

4. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

5. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного литва / В. О. Богуслаєв та ін. ; за ред. С. І. Реп'яха, В. Г. Могилатенка. Запоріжжя : АТ «МОТОР СІЧ», 2016. 474 с.

6. Нестеренко Т. М., Нестеренко О. М., Колобов Г. О., Грицай В. П. Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної та вторинної сировини : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2007. 207 с.

7. ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU1/dstu_2839-94.pdf (дата звернення: 21.10.2025).

8. GOST 4784-2019. Wrougth aluminium and aluminium alloys. URL: https://www.splav-kharkov.com/gost/gost_start.php?gost_number=4784 (дата звернення: 21.10.2025).

9. ДСТУ 3753-98 (ГОСТ 295-98). Алюміній для розкислення, виробництва феросплавів та алюмотермії. Технічні умови. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93232 (дата звернення: 21.10.2025).

10. ДСТУ 3211-95 (ГОСТ 1639-93). Брухт і відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови. URL: https://www.italukraine.com/wp-content/uploads/DSTU-3211-2009.pdf (дата звернення: 21.10.2025).

11. Timm H. Modern Lightweight Design At Audi. *Aluminium International Today*. 2018. October. Issue 24. P. 27.

12. Rombach G. Zukünftige Potentiale des Aluminiumrecyclings. Erzmetall. 2021. Vol. 55. No. 5/6. S. 127−134.

13. Narayanan R., Sahai Y. Chemical Interactions of Dross with Water and Water Vapor in Aluminium Scrap Remelting. *Materials Transactions*. 2019. Vol. 38. No. 1. P. 85–88.

14. WISSENSCHAFTSKONGRESS Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 15 und 16. Februar 2024 an der Technischen Universität Wien In Zusammenarbeit mit der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen der Technischen Universität

Wien. URL: https://www.uibk.ac.at/iup/buch_pdfs/10.15203-99106-120-5.pdf (дата звернення: 21.10.202

15. Нестеренко Т. М., Старій Є. В. Особливості підготовки алюмінієвої стружки до металургійної переробки. *Інженерні інновації та розбудова національної економіки* : матеріали І міжнар. наук.-практ. конф. Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні (9-10 трав. 2024 р.) Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2024. С. 529-533. URL: https://www.znu.edu. ua/ ii_znu/nauka/conf10/zbirnyk_24.pdf. (дата звернення: 21.10.2025).

16. Старій Є.В., Нестеренко Т.М. Особливості технології та устаткування для сушіння алюмінієвої стружки. *Інженерні інновації та розбудова національної економіки* : матеріали І міжнар. наук.-практ. конф. Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні (9–10 трав. 2024 р.). Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2024. С. 560−563. URL: https://www.znu.edu.ua/ ii_znu/nauka/conf10/zbirnyk_24.pdf. (дата звернення: 21.10.2025).

17. Старій Є. В., Іванніков С. В., Нестеренко Т. М. Щадне витрачання металургійної сировини та концепції рециклінгу кольорових металів. Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки : матеріали І Всеукр. наук.-практ. конф. за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти (16-18 жовт. 2024 р.). Запоріжжя: ЗНУ, 2024. С. 23−24. URL: https://www.znu.edu.ua/ii_znu/ nauka/2024/aktualni-pytannya/zbirnyk_24.pdf. (дата звернення: 21.10.2025).

18. Старій Є. В., Нестеренко Т. М. Аналіз сучасного стану та напрями вдосконалення виготовлення алюмінієвих сплавів. *Молода наука-2025* : збірник наук. праць студентів, здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2025» (м. Запоріжжя, 14-18 квітня 2025 р.). Запоріжжя: ЗНУ, 2025. Т. 5. С. 328. URL: https://www.znu.edu.ua/ii_znu/nauka/2025/conf1/3__zb__rnik_moloda _nauka_2025___nn__.pdf (дата звернення: 21.10.2025).

19. Nesterenko T. M. The present state and development perspectives of technology and equipment for metallurgical processing of secondary aluminium raw materials. *SWorld*. 2015. Vol.5. №4(41). P. 41–45.

20. Старій Є. В., Нестеренко Т. М. Технології плавки некомпактних алюмінієвих відходів. *Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки* : матеріали ІІ Всеукр. наук.-практ. конф. за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти (м. Запоріжжя, 28-30 жовт. 2025 р.). Запоріжжя: ЗНУ, 2025. С. 31−32.

21. Старій Є. В., Іванніков С. В., Нестеренко Т. М. Технології переробки автомобільного брухту. *Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки* : матеріали ІІ Всеукр. наук.-практ. конф. за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти (28-30 жовт. 2025 р.). Запоріжжя: ЗНУ, 2025. С. 34−35.

22. Hall Clive. Furnaces for cost-effective melting of contaminated aluminium scrap. *Aluminium International Today*. 2013. Vol.25. № 26. P.26.

23. Hall Clive. Norton Aluminium choose tilt rotary furnace over reverbatory.

Aluminium International Today. 2008. Vol.20. № 2. P.26.

24.Kevorkjjan V. The recycling of standard quality wrought aluminum alloys from low-grade contamined scrap. *J. Miner., Metals and Mater. Soc*. 2010. Vol. 62. № 8. P. 37–42.

25.°Gaustad G. *et al. Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies. Resour. Conserv. Recycl*. 2021. № 3. P.107−116.

26. Ecomelt furnaces considerably reduce energy consumption. *Heat process*. 2012. Vol.10, № 2. P.64.

27. Kamavaram V., Reddy R.G. Recycling of Aluminum based Materials in Ionic Liquids. *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing*, *TMS*. 2022. P. 517−526.

28. Stariy Y. V., Nesterenko T. M. On directions for improving the production of aluminium alloys from secondary raw materials. *Інженерні інновації та розбудова національної економіки* : матеріали ІІ-ї міжнар. наук.-практ. конф. Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні (м. Запоріжжя, 15-16 трав. 2025 р.). Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2025. С. 450−451.

29. Capitalist V. All the Metals We Mined in 2021 in One Visualization. URL: https://elements.visualcapitalist.com/all-the-metals-mined-in-2021/ (дата звернення: 21.10.2025).

30. Нестеренко Т. М. Про технології переробки відходів виробництва та споживання із кольорових металів. *Еко Форум – 2021* : зб. тез доп. V спеціалізов. міжнар. Запорізького еколог. форуму (14-16 вер. 2021 р.). Запоріжжя, 2021. С. 288–290. URL: https://ziif.in.ua/wpcontent/uploads/2021/09/tezysy-21_sajt.pdf (дата звернення: 21.10.2025).

31. Нестеренко Т. М. Технологічні особливості процесів виробництва кольорових металів : метод. вказівки до лабораторних робіт. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 64 с. URL: http://ebooks. znu. edu. ua/files/ZII/metodychky/2023/0044102.pdf (дата звернення: 21.10.2025).

32. Управління та рекуперація відходів : навч. пос. / С. В. Станкевич та ін. Харків : Видавництво Іванченка І.С., 2020. 134 с.

33. Дзядикевич Ю. В. Економічні основи ресурсозбереження : навч. посібник. Тернопіль : Вектор, 2015. 76 с.

34. Іващенко О. М. Методичні рекомендації до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту : метод. вказівки. Запоріжжя : ЗДІА, 2004. 31 с.

35. Гандзюк М. П., Желібо Е. П., Халимовський М. О. Основи охорони праці : підручник. Київ : Каравела, 2005. 393 с.

36. Кожемякін Г. Б., Рижков В. Г., Белоконь К. В. Охорона праці та техногенна безпека : метод. вказівки до виконання розділу магістерських робіт. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 48 с.

37. НПАОП 27.0-7.04-21. Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров’я на роботі в металургійній промисловості. URL: https://dnaop.com/search?q=%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F+27.0-7.04-21 (дата звернення: 21.10.2025).

ДОДАТОК

ТЕЗИ НА ІІ МІЖНАРОДНУ НАУКОВО-ПРАКТИЧНУ КОНФЕРЕНЦІЮ «ІНЖЕНЕРНІ ІННОВАЦІЇ ТА РОЗБУДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ»

ІНЖЕНЕРНОГО НАВЧАЛЬНО-НАУКОВОГО ІНСТИТУТУ ім. Ю. М. ПОТЕБНІ (м. Запоріжжя, 15-16 травня 2025 року)

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет
Інженерний навчально-науковий
інститут ім. Ю. М. Потебні

ІНЖЕНЕРНІ ІННОВАЦІЇ ТА РОЗБУДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

Матеріали
ІІ Міжнародної науково-практичної конференції
Інженерного навчально-наукового інституту
ім. Ю. М. Потебні

15–16 травня 2025 року

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

УДК 330.341.1-027.542(062.552)
І-62

Редакційна колегія:

В. В. Храпкіна, доктор економічних наук, професор, професор кафедри маркетингу та управління бізнесом, Національний університет «Києво-Могилянська академія» (м. Київ);

О. Г. Вагонова, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної економіки, підприємництва та публічного управління, НТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро)

Рекомендовано до друку
Рішенням Вченої ради Запорізького національного університету
(протокол № 12 від 01 липня 2025 року)

І-62 **Інженерні інновації та розбудова національної економіки** : матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні (15–16 травня 2025 року, м. Запоріжжя) / наук. ред. Н. Г. Метеленко ; Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету. – Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. – 960 с.

ISBN 978-617-554-649-9

У виданні представлені тези доповідей учасників ІІ Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні «Інженерні інновації та розбудова національної економіки» (15–16 травня 2025 року), які підготовлені за такими базовими тематичними напрямами, що охоплюють всі спеціальності підготовки ЗдВО І–ІІІ рівнів вищої освіти: Цифрова трансформація: маркетинг, бізнес-середовище, публічне управління та адміністрування, право; Європейські інтеграційні процеси розбудови національної економіки: облік, фінанси, оподаткування, аудит, страхування, фондовий ринок; Фізична електроніка та біоінженерія: тренди розвитку; Інженерна екологія; Сучасні технології та тренди кольорової і чорної металургії; Інновації в інженерії програмного забезпечення; Електрична інженерія: відновлювані джерела енергії, «зелена» воднева енергетика, інтеграція в енергетичну інфраструктуру Європи; Архітектура та будівництво: фундатор сучасних будівельних технологій; Механічна інженерія: сучасне обладнання та новітні технології в галузях промисловості; Філософія управління та адміністрування: ризик-менеджмент, екологічний менеджмент, сталий розвиток; Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка: сучасні виклики та перспективи.

Для науковців, держслужбовців, представників бізнесу, аспірантів, студентів закладів вищої освіти та зацікавлених організацій.

УДК 330.341.1-027.542(062.552)

© Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету, 2025
© Автори статей, 2025

ISBN 978-617-554-649-9

UDC 669.054.8:669.715

Stariy Yevgen
master's degree, first year of full-time study, speciality 136 "Metallurgy", educational and professional program "Metallurgy of non-ferrous metals" Engineering Educational and Scientific Institute by name of Yu. M. Potebnya ZNU

Nesterenko Tetiana
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of department of metallurgical technologies, ecology and man-made safety Engineering Educational and Scientific Institute by name of Yu. M. Potebnya ZNU

ON DIRECTIONS FOR IMPROVING THE PRODUCTION OF ALUMINIUM ALLOYS FROM SECONDARY RAW MATERIALS

There are hundreds of millions of passenger cars in use worldwide, about a quarter of which are deregistered and scrapped each year. Average age and mileage values for scrapped vehicles vary across countries and are related to such economic indicators as the wealth of the country's population, average gross income per capita, and the average number of passenger cars per thousand inhabitants.

A legislative framework is needed to develop auto recycling (a utilization system for cars that have become unusable) at the state level. Such legislation should be flexible and establish uniform requirements, obligations and rights for all participants in auto recycling. To develop it, it is necessary to study international experience, foreign legislative regulations, requirements and standards for organizing national auto recycling systems, as well as problems and shortcomings that have arisen in different countries in organizing the collection and recycling of old cars.

Automotive engineering that has been out of service for various reasons and is accumulating has a negative impact on the life of the city, worsening the environmental situation. However, it is a valuable raw material for the secondary use of materials, as well as a real source of profit from recycling, restoration of spare parts and assemblies.

For the development of modern production of high-quality aluminum alloys from secondary raw materials, the following are urgent tasks:

– use of a rational technological scheme for processing aluminum slags for each enterprise;

– improvement of the technology for preparing aluminum scrap for smelting;

– improvement of the technology for processing scrap into high-quality alloys;

– reduction of costs for refining from magnesium in the production of aluminum alloys containing up to 0.1 % Mg, while simultaneously solving the issues of reducing the emissions of salt slags into the environment.

To reduce metal losses with slags, it is necessary to identify and eliminate the causes of slag formation during the smelting of aluminum secondary raw materials:

– the presence of contaminants on the amortization scrap, its humidity and corrosion degree, the heating rate of the scrap in the furnace during smelting;

– heat transfer conditions in the layers of the charge in the furnace space;

– the presence in the charge composition of scrap fragments with an increased magnesium content.

To increase the efficiency of heat transfer from molten metal to solid charge, circulation of liquid metal in the bath volume is required. Forced circulation of the melt by an external electromagnetic stirring system can be used for periodic and continuous furnaces.

The introduction of modern technological schemes for preparing the charge for melting, improving the technologies for melting aluminum scrap in the furnace ensure a reduction in the amount of slag and metal losses with slag.

The use of optimal technologies and modernized equipment for crushing, pneumatic and magnetic separation of aluminum scrap allows:

– to clean secondary raw materials from mechanical impurities and oxides;

– to dry the scrap due to the heat released during scrap crushing.

Modern technologies for alloying aluminum alloys using alloying pellets allow reducing the melting time, improving the quality of aluminum alloys made from recycled materials, and reducing production costs.

The main factors for profitable processing of secondary aluminium raw materials at the melting stage are optimization of energy consumption, high productivity and maximum yield of usable metal.

References

1. Rombach G. Zukünftige Potentiale des Aluminiumrecyclings. Erzmetall. 2021. Vol. 55. №. 5/6. S. 127–134.
2. Narayanan R., Sahai Y. Chemical Interactions of Dross with Water and Water Vapor in Aluminium Scrap Remelting. *Materials Transactions*. 2019. Vol. 38. No. 1. P. 85–88.