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 магістерської роботи

рівень вищої освіти__другий (магістерський) рівень_____

на тему «Оптимізація електронно-променевого плавлення тугоплавких металів з мінімізацією витрат на шихту»

Виконав: студент _2_курсу, гр. *8.1364-мкм*
___Стародуб Д.О.
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Металургія кольорових металів*_
(шифр і назва)

Керівник _Карпенко Г.В.
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент Нестеренко Т.М.
(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*

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 СТУДЕНТУ

Стародуб Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація електронно-променевого плавлення тугоплавких металів з мінімізацією витрат на шихту
керівник роботи: *Карпенко Ганна Володимирівна, к.т.н., доц. каф.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "27" лютого 2025 року № 319-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *19.12.2025 р.*
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: *1. Абразивне зношування: типологія та класифікація 2. Властивості низьколегованої сталі 120Г3С2 3. Вплив умов роботи деталей на характер та інтенсивність абразивного зношування 4 Вплив властивостей матеріалу на абразивну зносостійкість 5. Способи визначення зносостійкості для предикативного аналізу умов зношування та оптимального вибору сталей 6. Охорона праці під час виконання досліджень*
5. *Презентаційний матеріал 12 слайдах (на 12сторінках)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
1. Аналіз технологічних процесів переплаву	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
2 Методологія дослідження та постановка задачі оптимізації	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
3 Розробка математичної моделі оптимізації складу шихти для сплаву еп648	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
4 Результати оптимізації та їх аналіз	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., зав. кафедри*	

7. Дата видачі завдання: *01.03.2025 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*1. Аналіз технологічних процесів переплаву*		
2	*2 Методологія дослідження та постановка задачі оптимізації*		
3	*3 Розробка математичної моделі оптимізації складу шихти для сплаву еп648*		
4	*4 Результати оптимізації та їх аналіз*		
5	*5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях*		

Студент _____ *Д.О. Стародуб*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Г.В. Карпенко*
(підпис) (прізвище та ініціали)

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ

ЕПП – електронно-променевий переплав

ВДП – вакуумно-дуговий переплав

ВІП – вакуумно-індукційне плавлення

Z – загальна вартість шихти на 1 кг сплаву ЕП648, грн/кг;

x_i – масова частка і-го компонента в загальній масі шихти, безрозмірна величина ($0 \leq x_i \leq 1$);

c_i – питома вартість і-го компонента шихти, грн/кг;

n – кількість різних компонентів шихти.

a_{ij} – вміст j-го елемента в і-му компоненті шихти, % мас.;

k_j – коефіцієнт угару j-го елемента при ЕПП, безрозмірна величина;

η_j – коефіцієнт переходу j-го елемента в сплав;

b_j^{min}, b_j^{max} – мінімально і максимально допустимий вміст j-го елемента у сплаві, % мас;

$Z_{шихта}$ – вартість шихтових матеріалів;

$Z_{угар}$ – втрати через угар дорогоцінних легувальних елементів;

$Z_{енергія}$ – витрати на електроенергію;

$Z_{інші}$ – інші технологічні витрати;

ρ_i – насипна густина і-го компонента, г/см³;

d_i – середній розмір частинок і-го компонента, мкм;

x_i – масова частка і-го компонента ;

$\bar{d}$ – середньозважений діаметр всієї шихти, мкм.

$AX \leq B$ (обмеження-нерівності)

$A_eqX = B_eq$ (обмеження-рівності)

$X \geq 0$ (умова невід'ємності)

A, A_eq – матриці коефіцієнтів обмежень;

C – вектор коефіцієнтів цільової функції (вартості компонентів);

B, B_eq – вектори правих частин обмежень.

Z – загальна вартість шихти на 1 кг сплаву ЕП648, грн/кг;

РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається з 107 сторінок, 5 розділів, 15 рисунків, 28 таблиць, 56 літературних джерел.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИЙ ПЕРЕПЛАВ, ЖАРОМІЦНИЙ СПЛАВ ЕП648, ОПТИМІЗАЦІЯ ШИХТИ, ГРАНУЛОМЕТРІЯ, КОЕФІЦІЄНТИ УГАРУ, ЛІНІЙНЕ ПРОГРАМУВАННЯ,

Об’єкт дослідження – процес електронно-променевого переплаву жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 (ХН50ВМТЮБ).

Мета роботи – розробка математичної моделі та методики оптимізації складу шихти для виплавки сплаву ЕП648 методом ЕПП з урахуванням економічних, технологічних та якісних критеріїв.

Методи дослідження включають аналіз літературних джерел, систематизацію технологічних факторів, математичне моделювання, методи лінійного програмування (симплекс-метод), аналіз чутливості, техніко-економічний аналіз.

Результати дослідження полягають у тому що:

- розроблено комплексну математичну модель оптимізації складу шихти для виплавки жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 методом ЕПП, яка враховує одночасно економічні критерії (мінімізація вартості), технологічні обмеження (коефіцієнти угару легувальних елементів), гранулометричні характеристики компонентів та жорсткі вимоги до хімічного складу кінцевого продукту;
- встановлено залежність питомих енерговитрат на плавлення від середньозваженого розміру частинок шихти та обґрунтовано оптимальний гранулометричний склад ($\bar{d}$ = 50 ± 20 мкм) з бімодальним розподілом фракцій, що підвищує продуктивність процесу на 12-15%.

- проведено аналіз чутливості моделі до варіації цін на компоненти (еластичність до ціни нікелю ±5,4%), коефіцієнтів угару (вплив <0,3%) та модифікації обмежень, що підтвердило стійкість до похибок розробленої моделі.
- розроблено програмну реалізацію моделі оптимізації у середовищі Microsoft Excel з використанням вбудованого Solver, доступну для застосування на металургійних підприємствах чи для навчання.

ЗМІСТ

ВСТУП……. 10
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕПЛАВУ…… 13
1.1Аналіз існуючих методів отримання та рафінування тугоплавких металів……. 13
1.2 Фізичні основи та технологічні особливості ЕПП…….. 17
1.2.1 Переваги ЕПП для рафінування тугоплавких металів……. 22
1.3 Хімічний склад та властивості жароміцного сплаву ЕП648…… 22
1.3.1 Мікроструктура та фазовий стан сплаву ЕП648…… 24
1.3.2 Застосування сплаву ЕП648……. 25
1.4 Шихтові матеріали для виплавки нікелевих сплавів…… 26
1.4.1 Вимоги до якості та чистоти шихтових матеріалів…….. 27
2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ……... 29
2.1 Постановка задачі оптимізації складу шихти…… 29
2.1.1 Визначення обмежень математичної моделі…….. 31
2.1.2 Критерії оптимальності……. 32
2.2 Вхідні параметри математичної моделі……. 34
2.2.1 Масові частки компонентів шихти…….. 34
2.2.2 Хімічний склад кожного компонента шихти…….. 36
2.2.3 Гранулометричні характеристики шихтових матеріалів…….. 36
2.2.4 Вартість шихтових компонентів……. 37
2.2.5 Коефіцієнти угару легувальних елементів……. 38
2.3 Обмеження моделі оптимізації…….. 41
2.3.1 Баланс хімічного складу за кожним легувальним елементом…….. 41
2.3.2 Обмеження на мінімальний та максимальний вміст компонентів……. 42
2.3.3. Технологічні обмеження на гранулометрію шихти…….. 44

2.3.4 Обмеження за шкідливими домішками…… 45
2.4 Методи математичної оптимізації……. 47
2.4.1 Лінійне програмування (симплекс-метод Данцига)…… 47
2.4.2 Застосування методу лінійного програмування для оптимізації складу шихти…….. 49
2.4.3 Програмні засоби розв'язання…… 51
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДУ ШИХТИ ДЛЯ СПЛАВУ ЕП648……. 54
3.1 Структура прогностичної математичної моделі…….. 54
3.1.1 Цільова функція мінімізації витрат…… 54
3.1.2 Система обмежень щодо хімічного складу шихти…….. 56
3.1.3 Обмеження на гранулометричний склад…… 57
3.1.4 Балансове обмеження……. 59
3.2 Вихідні дані для розрахунку…….. 60
3.2.1 Перелік доступних шихтових матеріалів…….. 60
3.2.2 Хімічний склад компонентів шихти……. 61
3.2.3 Гранулометричні характеристики компонентів…… 62
3.2.4 Ринкові ціни на компоненти шихти…….. 63
3.2.5 Коефіцієнти угару елементів при ЕПП…… 64
3.3 Алгоритм розв'язання задачі оптимізації…….. 65
3.3.1 Формування матриці коефіцієнтів обмежень…… 66
3.3.2 Перевірка сумісності системи обмежень……. 68
3.3.3 Застосування симплекс-методу для пошуку оптимуму….. 69
3.3.4 Аналіз чутливості рішення до зміни параметрів…… 69
3.3.5 Верифікація результатів……. 71
3.4 Програмна реалізація моделі оптимізації в Excel Solver……. 72
3.4.1 Архітектура Excel-моделі……. 72
4. РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ…….. 75
4.1 Чисельні експерименти з оптимізації складу шихти……. 75

4.1.1 Базовий варіант розрахунку……. 75
4.1.2 Оптимізований варіант моделі……. 76
4.1.3 Економічний ефект…… 78
4.2 Аналіз впливу гранулометрії на ефективність процесу……. 79
4.2.1 Залежність енерговитрат від середнього розміру частинок 79
4.2.2 Вплив розподілу розмірів частинок на якість злитка……. 80
4.2.3 Оптимальний гранулометричний склад для ЕПП сплаву ЕП648…….. 81
4.3 Аналіз чутливості моделі…… 82
4.3.1 Вплив зміни цін на компоненти шихти……. 82
4.3.2 Вплив варіацій коефіцієнтів угару…… 83
4.4 Практичні рекомендації щодо оптимізації шихти…… 84
4.4.1 Рекомендований склад шихти для сплаву ЕП648…….. 84
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ…… 87
5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при ЕПП……... 87
5.2 Вимоги безпеки при роботі з вакуумним обладнанням…….. 89
5.3 Захист від рентгенівського випромінювання…… 90
5.4 Електробезпека при роботі з високовольтним обладнанням….. 91
ВИСНОВОК…….. 95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……. 97
ДОДАТКИ……. 102
Додаток 1. Структура аркуша "Вхідні дані"…… 102
Додаток 2. Структура аркуша "Розрахунки"…… 104

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Розвиток сучасних провідних галузей - авіаційної, космічної та енергетичної висуває все більш жорсткі вимоги до матеріалів, що працюють в умовах надвисоких температур та навантажень. Нікелеві жароміцні сплави є незамінними матеріалами для виготовлення високовідповідальних деталей авіадвигунів, зокрема лопаток та дисків турбін, що працюють при температурах понад 900°C [2]. За відкритими даними, ефективність сучасних авіаційних двигунів безпосередньо залежить від температурної стійкості матеріалів, збереженні їх початкової геометрії, що робить питання виробництва високоякісних сплавів надзвичайно актуальним [3].

Електронно-променеве плавлення (ЕПП) є одним з найбільш перспективних методів спеціальної електрометалургії для отримання високочистих металів та сплавів [4]. Завдяки унікальному поєднанню високого вакууму (порядку 10^{-3}-10^{-4} Па), можливості точного контролю температури розплаву та відсутності контакту з вогнетривкими матеріалами, ЕПП забезпечує ефективне рафінування металу від неметалевих та газових домішок [6]. Як вказано у роботі [7], математичне моделювання теплових процесів при ЕПП дозволяє оптимізувати технологічні режими та підвищити якість продукції.

Водночас, виробництво жароміцних нікелевих сплавів характеризується високою вартістю, значну частину якої становлять витрати на шихтові матеріали та їх підготовку. За оцінками фахівців, вартість сировини може сягати 60-70% від загальної собівартості продукції [8]. В сучасних економічних умовах оптимізація складу шихти з метою мінімізації витрат при збереженні заданих властивостей сплаву набуває критичного значення для галузі [9].

Важливим фактором, що впливає на ефективність процесу ЕПП та якість кінцевого продукту, є гранулометричний склад шихтових матеріалів. Дослідження [11] показують, що фракційний розподіл частинок безпосередньо впливає на швидкість плавлення, однорідність хімічного складу отриманого злитка та енергоефективність самого процесу. Однак комплексний підхід до

оптимізації складу шихти з одночасним урахуванням хімічного складу, гранулометричних характеристик та економічних показників залишається недостатньо опрацьованим.

Застосування методів математичної оптимізації, зокрема лінійного програмування, для розрахунку оптимального складу металевої шихти широко розповсюджені у металургії [13]. Сучасні дослідження демонструють ефективність симплекс-методу для вирішення задач мінімізації витрат на сировину при дотриманні умов обмежень щодо хімічного складу [15]. Проте специфіка електронно-променевого плавлення жароміцних сплавів потребує розробки сконкретних моделей, що враховують особливості випаровування легувальних елементів у вакуумі та вплив гранулометрії на технологічний процес.

Метою роботи є розробка прогностичної математичної моделі оптимізації складу шихти для електронно-променевого плавлення жароміцного нікелевого суперсплаву ЕП648, яка гарантує мінімізацію витрат на шихтові матеріали при дотриманні вимог щодо хімічного складу та гранулометричних показників.

Для досягнення поставленої мети планується вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану технології електронно-променевого плавлення жароміцних нікелевих суперсплавів та визначити основні фактори, що впливають на якість та собівартість продукції.

2. Систематизувати дані щодо хімічного складу, властивостей та вартості шихтових матеріалів для виплавки сплаву ЕП648 (ХН50ВМТЮБ).

3. Дослідити вплив гранулометричного складу шихти на ефективність процесу електронно-променевого плавлення та якість злитка.

4. Розробити математичну модель оптимізації складу шихти на основі методів лінійного програмування з урахуванням хімічних, гранулометричних та економічних обмежень.

5. Виконати чисельні експерименти з оптимізації складу шихти та провести аналіз чутливості моделі до зміни вхідних параметрів.

Об'єктом дослідження є процес електронно-променевого плавлення

жароміцного нікелевого суперсплаву ЕП648 (ХН50ВМТЮБ).

Предметом дослідження є закономірності формування оптимального складу шихти для ЕПП з урахуванням хімічного складу компонентів, їх гранулометричних показників та вартості.

Методи дослідження. Застосовано комплекс методів дослідження, а саме: аналіз літературних джерел та нормативно-технічної документації для узагальнення сучасного стану проблеми; методи математичного моделювання та оптимізації, зокрема лінійне програмування (симплекс-метод) для побудови моделі оптимізації складу шихти; методи чисельного експерименту для перевірки моделі; статистичні методи для аналізу чутливості отриманих рішень; методи техніко-економічного аналізу для оцінки ефективності запропонованих рішень. Програмна реалізація моделі виконана з використанням середовища Microsoft Excel з надбудовою Solver, що входить до його складу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено комплексну математичну модель оптимізації складу шихти для електронно-променевого плавлення жароміцного суперсплаву ЕП648, яка на відміну від існуючих підходів одночасно враховує хімічний склад компонентів, коефіцієнти угару легувальних елементів у вакуумі та гранулометричні характеристики шихтових матеріалів.

2. Встановлено кількісні залежності між гранулометричним складом шихти та ефективністю процесу ЕПП, що дозволило сформулювати додаткові обмеження в моделі оптимізації для забезпечення технологічності процесу.

3. Обґрунтовано критерії оптимальності складу шихти для ЕПП нікелевих суперсплавів, що забезпечують мінімізацію витрат при гарантованому досягненні заданого хімічного складу кінцевого продукту.

Практична цінність роботи полягає у створенні інструментарію для розрахунку оптимального складу шихти. Застосування розробленої моделі дозволяє знизити витрати на шихтові матеріали на 15-20% порівняно з традиційними методами розрахунку.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕПЛАВУ

1.1. Аналіз існуючих методів отримання та рафінування тугоплавких металів

У сучасній металургії тугоплавких та жароміцних сплавів (включно з нікелевими сплавами типу ЕП648 (ХН50ВМТЮБ) застосовується кілька основних технологічних підходів до отримання та рафінування: електронно-променевий переплав (ЕПП), вакуумно-дуговий переплав (VAR, ВДП), вакуумно-індукційний переплав (VIM), електрошлаковий переплав (ESR) та чимало інших методів (плазмова та інертна газова плавка, селективне плавлення порошків тощо). Кожен з них має свої слабкі і сильні сторони відповідно до позицій чистоти матеріалу, контролю газового вмісту, неоднорідностей хімічного складу, енергоємності та собівартості виробництва [11].

Електронно-променевий переплав проводиться у високому вакуумі, де сфокусований електронний промінь плавить шихту або підготовлений злиток; процес поєднує плавлення та часткове рафінування за рахунок високих температур і вакуумної дегазації. Переваги ЕПП для тугоплавких та реактивних металів полягають у: значному зниженні вмісту розчинених газів (O, H, N), видалення летких домішок та неметалевих включень, можливості точного локального нагріву й регулювання теплової подачі, а також сумісності з виробництвом спеціальних авіаційних сплавів, що містять тугоплавкі елементи. Основні обмеження які існують, це – висока капітальна вартість обладнання, обмежена продуктивність при масовому переплаві великих зливків і необхідність попередньої підготовки шихти/електрода. Для отримання інтенсивної рафінації часто застосовують неодноразові переплави чи їх поєднання [12].

Вакуумно-дуговий переплав (vacuum arc remelting, скорочено VAR) – традиційна металургійна технологія для отримання зливків високої чистоти та однорідної структури, яка широко застосовується для виробництва турбінних лопаток, шпинделів та інших компонентів, що працюють у важких умовах. Цей процес забезпечує ефективне видалення летких домішок і зменшення включень завдяки плавленню підготовлених електродів у вакуумі у дуговому розряді. Він добре масштабується для великих масивних зливків, що є перевагою. Однак VAR може залишати деякі макрогетерогенності структур (через теплові градієнти), а також потребує виготовлення попереднього електрода (наприклад методом індукційного лиття) – що збільшує загальні витрати та ускладнює процес. Для деяких тугоплавких елементів – W, Ta, Mo цей метод не завжди оптимальний. Для них краще підходять спеціалізовані вакуумні або плазмові методи [13].

Вакуумно-індукційний переплав (скорочено VIM) та електрошлаковий переплав (ESR) надає добрий контроль над хімічним складом при розплаві в захищеному середовищі й часто використовується як попередній етап підготовки електродів перед VAR або ESR. Так, ESR використовують для додаткового очищення від неметалевих включень і вирівнювання хімічного складу за рахунок очищувального ефекту розплавленого шлаку. ESR часто комбінується з VAR задля отримання найвищої якості зливків у відповідальних пристосуваннях. Основні недоліки *VIM* це – додаткові капіталовкладення, енергоспоживання і необхідність ретельного підбору флюсів [13, 14].

З появою адитивних технологій (таких як SLM та EBM) з’явилась можливість прямого виробництва деталей зі складною геометрією зі спечених або переплавлених порошків нікелевих сплавів, включно з дослідженнями EP648. Для таких методів характерні наступні проблеми: додатковий контроль пористості, негетерогенні мікроструктури та чутливість до тріщин при охолодженні, які потребують оптимізації режимів та подальшого термічного оброблення. Але EBM залишається важливим металургійним методом

рафінування шихти і підготовки високочистих зливків для подальшої механічної обробки [15].

Особливості застосування вищеназваних технологій до нікелевих жароміцних сплавів (типу ЕП648), що включають тугоплавкі елементи, полягають у тому, що вони чутливі до розчинених газів та неметалевих домішок, які погіршують пластичні властивості при високих температурах. Для таких сплавів у металургії часто комбінують метод VIM (для однорідного розплаву шихти) із подальшим VAR чи EBM для досягнення необхідного рівня чистоти й контрольованої структури зливків. Дослідження сплву ЕП648, показують, що технології порошкового плавлення (SLM/EBM) можуть дати прийнятну якість деталей за умови подальшої термообробки та оптимізації параметрів, але традиційні методи переплаву залишаються еталоном для масивних відповідальних виробів [15].

На риснку 1.1 та таблиці 1.1 наведено порівняння вищезазначених технологій.

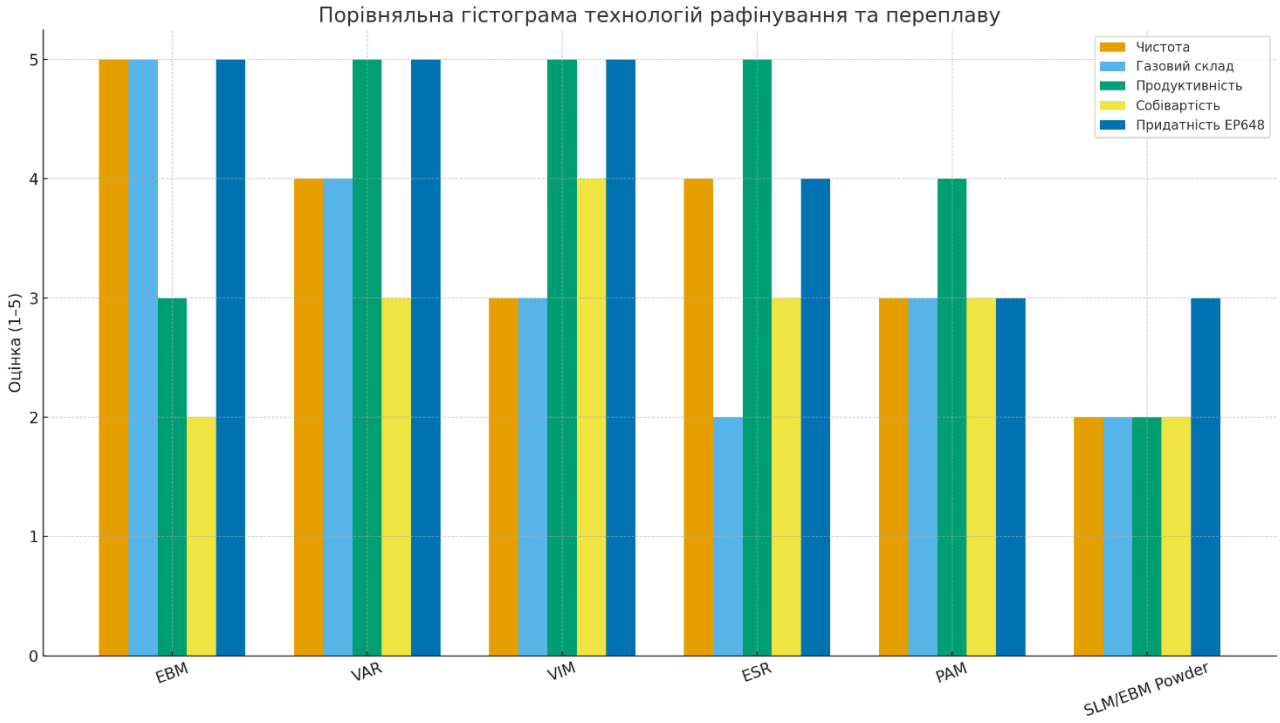


Рисунок 1.1 – Порівняльна гістограма технологій металургійного переплаву та рафінування

Таблиця 1.1 – Порівняння застосовуваності технологій рафінування та переплаву тугоплавких металів

Метод	Рівень чистоти матеріалу	Газовий склад (O, N, H,)	Продуктивність	Собівартість процесу	Придатність для сплаву ХН50ВМТЮБ
ЕПП (електронно-променевий переплав)	Дуже високий рівень очищення; ефективне видалення летких домішок та неметалевих включень	Найкраща дегазація серед усіх методів (вакуум 10^{-3}–10^{-5} мм рт. ст.)	Середня; обмежена масою зливка та енергетикою гармати	Висока (дороге обладнання, низька продуктивність), але економічно виправдана при дорогій шихті	Висока. Оптимальний метод для рафінування шихти та усунення домішок, особливо при підготовці високої чистоти
ВДП (вакуумно-дуговий переплав)	Висока; добре усуває включення, стабільна структура	Добра дегазація, але нижча, ніж у ЕВМ	Висока; підходить для великих інготів	Середня; потребує виготовлення електрода	Висока. Промисловий стандарт для великих зливків нікелевих суперсплавів
ВІП (вакуумно-індукційне плавлення)	Середня–висока; добрий контроль хімскладу	Добре видаляє гази, але гірше, ніж VAR/EBM	Висока; підходить для попереднього плавлення	Середня; нижча за VAR/EBM	Висока. Оптимальний перший етап перед VAR або ЕВМ
ЕШП (електрошлаковий переплав)	Висока; ефективне видалення неметалевих включень через шлакову ванну	Обмежена дегазація; не вакуум	Висока; підходить для великих зливків	Середня; залежить від вартості флюсів	Середня–висока. Покращує чистоту, але менш ефективний для газових домішок, ніж VAR/EBM
Плазмове/дугове плавлення у вакуумі (PAM/arc melting)	Середня–висока	Краща дегазація, ніж у звичайному атмосферному плавленні	Середня	Середня	Середня. Застосовується для реактивних компонентів, але рідше для високовідповідальних нікелевих сплавів
Адитивні технології (SLM, EBM порошкове)	Залежить від якості порошку; можливі локальні дефекти	Контрольоване, але ризик пористості	Низька–середня (локальна побудова)	Висока	Придатність висока для дрібних деталей, але не для масивних зливків ЕР648

1.2 Фізичні основи та технологічні особливості ЕПП

Електронно-променевий переплав - це один із найбільш ефективних методів рафінування та виплавки високочистих тугоплавких металів і сплавів. Процес базується на перетворенні кінетичної енергії прискорених електронів у теплову енергію при їх зіткненні з поверхнею металу. Електронний пучок формується за допомогою електронно-променевої гармати, де електрони емітуються з катода (зазвичай вольфрамового), прискорюються у високому вакуумі напругою від 15 до 60 кВ і фокусуються за допомогою магнітних або електростатичних лінз у компактний промінь діаметром від декількох міліметрів до декількох сантиметрів [16].

При взаємодії електронного пучка з металевою мішенню відбуваються складні фізичні процеси, що визначають ефективність енергопередачі. Коли високоенергетичні електрони проникають у поверхневий шар металу на глибину від декількох мікрометрів до десятків мікрометрів (залежно від енергії пучка та атомного номера матеріалу), їх кінетична енергія передається атомам кристалічної решітки через серію непружних зіткнень [17].

Коефіцієнт корисної дії перетворення енергії електронного пучка в теплову енергію для більшості металів становить 80-95%, що суттєво перевищує інші методи нагріву. Але всеодно частина енергії втрачається через відбиття електронів, генерацію рентгенівського випромінювання (близько 1-3% для нікелевих сплавів при напрузі 30 кВ) та випромінювання у видимому та інфрачервоному діапазонах [18].

Основною характеристикою електронного пучка, що прямо впливає на роботу є його потужність та густину потужності. Для нікелевих сплавів типу ЕП648 зазвичай використовуються пучки потужністю від 50 до 300 кВт з густиною потужності на поверхні розплаву від 10^3 до 10^6 Вт/см² [19]. При таких режимах досягається швидке плавлення шихтових матеріалів з мінімальними тепловими втратами.

Теплопередача під час ЕПП відбувається за рахунок таких механізмів: конвекції, випромінювання і теплопровідності. Взаємне співвідношення між цими механізмами залежить від режимів плавлення, геометрії ванни розплаву та властивостей металів та шихти [20].

На рисунку 1.2 наведено механізм теплопередачі та енергетичний баланс при ЕПП.

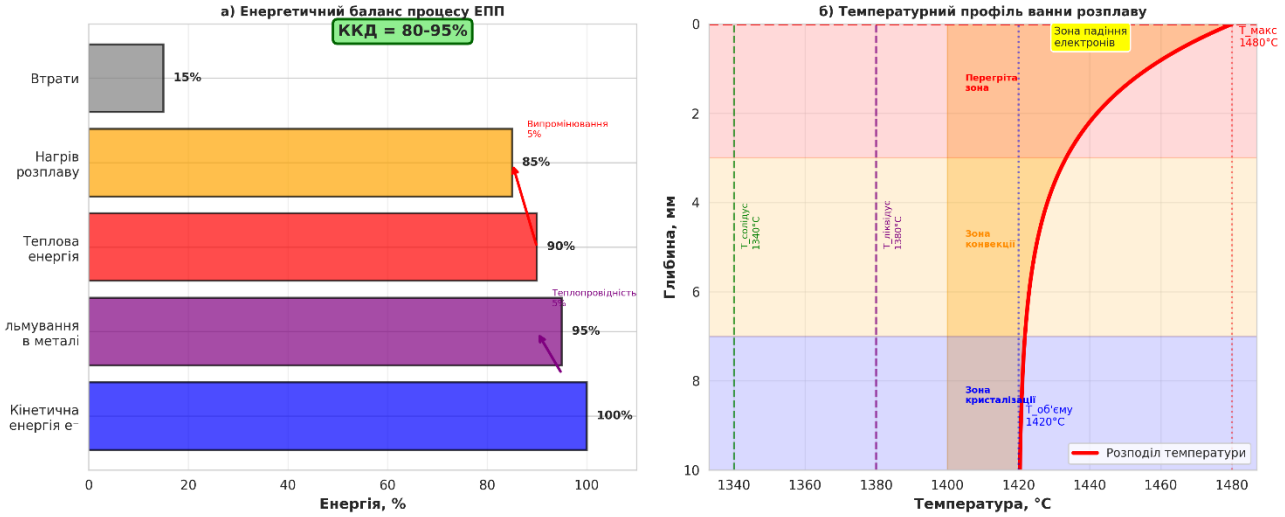


Рисунок 1.2 - Механізм теплопередачі та енергетичний баланс при ЕПП.

Діаграма (а) показує енергетичний баланс процесу ЕПП у вигляді каскаду перетворень, де кінетична енергія електронів (100%) перетворюється на гальмування в металі з генерацією теплоти та рентгенівського випромінювання (95%, втрати 5% на рентген), наступним кроком йде теплова енергія розплаву (90%, втрати 5% на теплопровідність до кристалізатора), далі - нагрів та плавлення металу (85%, втрати 5% на випромінювання). Результуючий ККД процесу становить 80-95%, що значно вище за дуговий переплав (60-70%) та індукційне плавлення (70-80%).

Графік (б) демонструє вертикальний температурний профіль ванни розплаву від поверхні (0 мм) до глибини 10 мм. Червона крива показує експоненціальний спад температури від максимальних 1480°C у зоні падіння електронів до 1420°C в об'ємі розплаву.

Високий вакуум є однією з основних умов проведення ЕПП. Робочий тиск у камері зазвичай тримають у межах 10^{-2}-10^{-4} Па (10^{-4}-10^{-6} мбар), що досягається за допомогою багатоступінчастих вакуумних систем. Такі системи складаються з механічних форвакуумних та дифузійни насосів або турбомолекулярних високовакуумних насосів [21].

Вакуумне виконує важливі функцій у процесі ЕПП. Насамперед вакуум забезпечує можливість прямого руху електронів від катода до мішені без розсіювання на молекулах газу. При тисках вище 10^{-2} Па зростає ймовірність зіткнень електронів з молекулами залишкового газу, що призводить до розширення пучка, зменшення густини потужності та іонізації газу з утворенням електричних розрядів [22], також він запобігає окисленню та азотуванню розплаву. Вакуум сприяє рафінуванню металу від летких домішок та елементів з високим тиском пари. У процесі ЕПП ефективно видаляються S, P, As, Pb, Bi, і надлишок таких елементів як Zn та Mg.

Ще однією функцією вакууму є дегазація розплаву від розчинених газів, особливо H_2. Розчинність водню в нікелевих сплавах різко зменшується при переході від твердого стану до рідкого, а у вакуумі практично вся кількість розчиненого водню видаляється у вигляді молекулярного H_2 [23]. Це запобігає утворенню газової пористості при кристалізації злитка.

У промисловості використовуються різні типи ЕПП установок, що дозволяє якісно добирати їх для поставлених задач.

В таблиці 1.2 наведено типи електронно-променевих установок та їх характеристики.

Таблиця 1.2 – Класифікація електронно-променевих установок та їх характеристики [22-26]

Критерій класифікації	Тип електронно-променевих установок / характеристика	Короткий опис
Спосіб формування злитка	Класичні установки ЕПП з водоохолоджуваним кристалізатором	Шихта подається зверху або знизу, розплавляється електронним пучком і формується у злиток
	Установки для зонного переплаву	Застосовуються для отримання ультрачистих матеріалів; вузька зона розплаву переміщується вздовж злитка
Потужність установки	Лабораторні	Призначені для досліджень та малих партій
	Промислові середньої потужності	Використовуються для плавлення більшості жароміцних сплавів
	Потужні промислові установки	Забезпечують плавлення великих масивів металу, у т.ч. суперсплавів
	Установки для сплаву ЕП648	Найбільш ефективні ЕПП потужністю 150-400 кВт
Конструктивні компоненти	Вакуумна камера	Забезпечує високий вакуум та чистоту процесу
	Електронно-променева гармата (1 або декілька)	Формує електронний пучок високої енергії
	Система подачі шихти	Гравітаційна подача або витратний електрод
	Водоохолоджуваний кристалізатор	Формує геометрію злитка, забезпечує контроль кристалізації
	Система керування	Комп'ютеризоване управління процесами плавлення
Особливі конструкції ЕПП	Установки ЕПП з проміжною ємністю (ЕППЄ)	Розплавлення у проміжному тиглі з подальшою дозованою подачею

На рисунку 1.3 зображено принципову схему установки ЕПП.

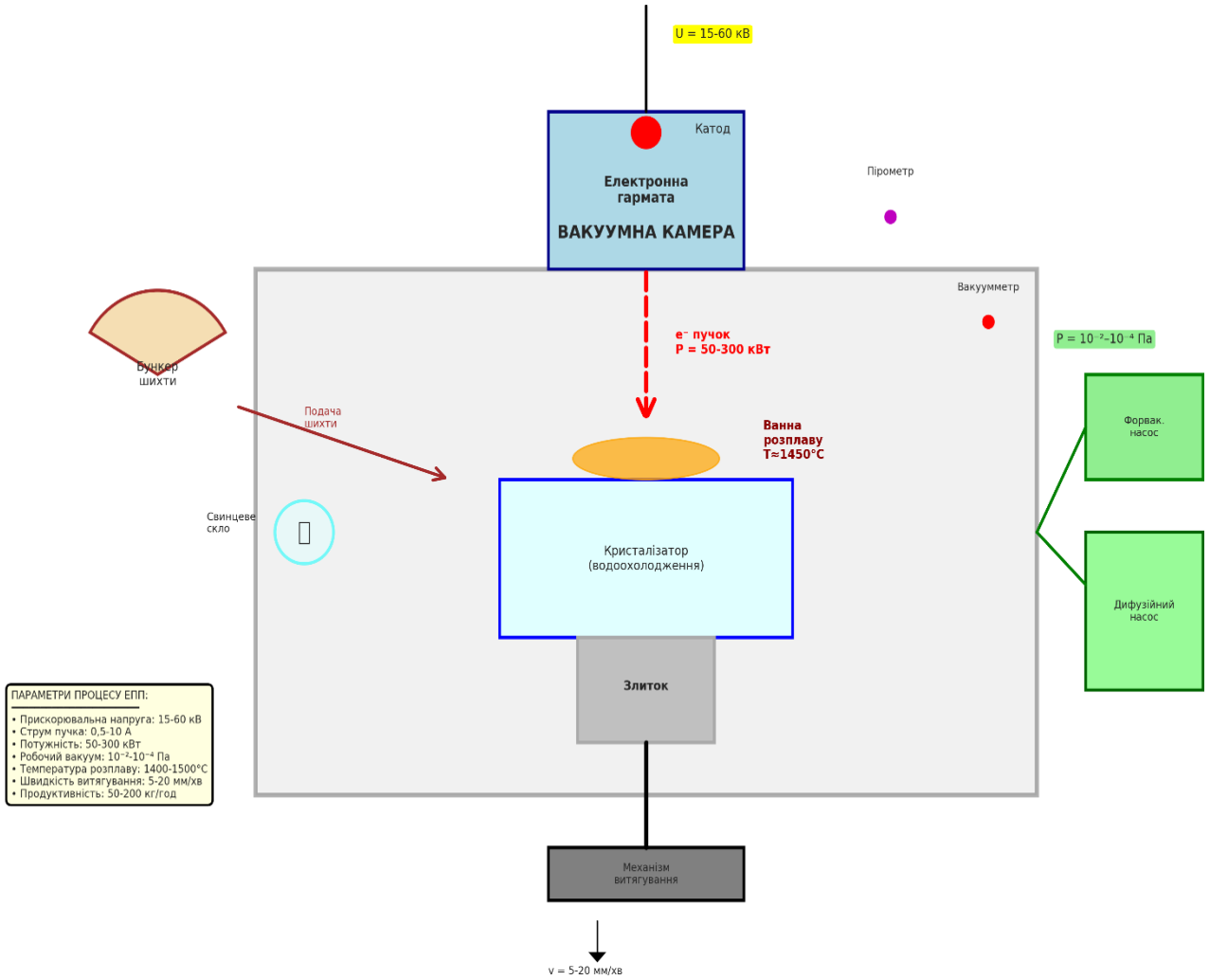


Рисунок 1.3 – Принципова схема установки електронно-променевого плавлення (з водоохолоджуваним кристалізатором)

Зображена схема відображає ключові вузли установки ЕПП, а семе: електронну гармату (верхня частина), що генерує пучок електронів при прискорювальній напрузі U = 15-60 кВ та струмі 0,5-10 А; вакуумну камеру, що забезпечує робочий тиск 10^{-2}-10^{-4} Па для безперешкодного руху електронів та ефективного рафінування розплаву; водоохолоджуваний кристалізатор з ванною розплаву (T ≈ 1450°C); механізм витягування злитка зі швидкістю 5-20 мм/хв; систему подачі шихти з бункера; вакуумну систему (форвакуумний + дифузійний насоси).

1.2.1 Переваги ЕПП для рафінування тугоплавких металів

ЕПП має важливі переваги порівняно з іншими методами виплавки жароміцних сплавів, таких як вакуумно-індукційне плавлення (ВІП), вакуумно-дугове переплавлення (ВДП) та плазмово-дугове плавлення [24].

Нижче, у таблиці 1.3 наведено основні переваги ЕПП.

Таблиця 1.3 – Основні переваги електронно-променевого плавлення (ЕПП) [25, 26]

Перевага	Ключові характеристики	Порівняння з іншими методами
Рафінування від газів та включень	O: 5-15 ppm; N: 10-30 ppm; H: 1-3 ppm; включення ↓ 3-5 разів	ВІП: O 30-50 ppm; вище рівень включень
Прецизійний контроль структури	Злитки ф600-800 мм; сегрегація 1.05-1.10; контроль пучка та температури	У дугових методах – нерівномірний нагрів, більша сегрегація
Відсутність забруднення тиглем	Немає Al_2O_3, MgO, ZrO_2; чисті розплави	У ВІП/ВДП – контакт із тиглем → оксидні включення
Енергоефективність	ККД 80-90%; 1.5-2.5 кВт·год/кг	Індукційне: 60–70%; дугове: 40–50%; витрати ↑ 20–30%
Гнучкість щодо шихти	Стружка, порошки, відходи; пряме легування W, Mo, Nb, Ta	У ВІП/ВДП – потрібні лігатури, обмеження за шихтою
Екологічність процесу	Відсутність атмосферних викидів; домішки конденсуються	У відкритих/інертних процесах – викиди газів, аерозолів

1.3 Хімічний склад та властивості жароміцного сплаву ЕП648

Сплав ЕП648 належить до класу жароміцних нікелевих суперсплавів, зміцнених γ'-фазою, та призначений для виготовлення дисків і лопаток газотурбінних двигунів, що працюють при температурах до 950-1000°C. Базовий хімічний склад сплаву регламентується технічними умовами та включає наступні елементи (% мас.): Ni (основа, ~50%), Cr 14,0-16,0%, W 4,5-6,5%, Mo 2,5-4,0%, Ti 0,9-1,4%, Al 1,1-1,6%, Nb 0,8-1,2%, B до 0,008%, C 0,03-

0,07%, Fe до 2,0% (як домішка від феросплавів) [27].

Хром забезпечує корозійну стійкість та стійкість до окиснення при високих температурах через формування захисної оксидної плівки Cr_2O_3. Вольфрам та молібден є елементами твердорозчинного зміцнення γ-матриці та підвищують температуру рекристалізації. Титан, алюміній та ніобій формують зміцнюючу γ'-фазу $Ni_3(Al,Ti,Nb)$, об'ємна частка якої становить 40-45%. Бор у мікродомішках сегрегує на границях зерен, підвищуючи їх міцність та довготривалу пластичність [28].

Густина сплаву ЕП648 при кімнатній температурі становить 8,30-8,40 г/см³, що типово для нікелевих суперсплавів з високим вмістом тугоплавких елементів. Температура солідуса (початку плавлення) складає близько 1340°С, ліквідуса (повного розплавлення) – 1380°С. Коефіцієнт теплопровідності при 20°С становить 11-13 Вт/(м·К) та зростає до 20-22 Вт/(м·К) при 800°С. Коефіцієнт термічного розширення в діапазоні 20-1000°С дорівнює 14,5-15,5·10^{-6} K^{-1} [29].

Температура γ'-солідусу (повного розчинення зміцнюючої фази) для сплаву ЕП648 знаходиться в межах 1100-1120°С, що визначає верхню межу температури гартування при термічній обробці. Критична температура утворення топологічно щільнопакованих фаз (σ, μ, Laves) становить 750-850°С при тривалих витримках понад 1000 годин [30].

Сплав ЕП648 демонструє високий рівень міцності та жароміцності у широкому температурному діапазоні. При температурі 20°С тимчасовий опір розриву σ_v = 1100-1250 МПа, межа плинності $\sigma_{0.2}$ = 850-950 МПа, відносне подовження δ = 12-18%. При робочій температурі 900°С: σ_v = 750-850 МПа, $\sigma_{0.2}$ = 600-700 МПа, δ = 8-12% [31].

Критичною характеристикою для дисків турбін є довготривала міцність. Для сплаву ЕП648 при температурі 950°С та напруженні 200 МПа час до руйнування становить не менше 100 годин. Межа повзучості (напруження, що викликає деформацію 0,2% за 100 годин) при 900°С дорівнює 280-320 МПа. Втомна міцність при 850°С (10^7 циклів) складає 350-400 МПа [32].

На рисунку 1.4 наведено криві залежностей механічних властивостей сплаву ЕП648 при високих температурах.

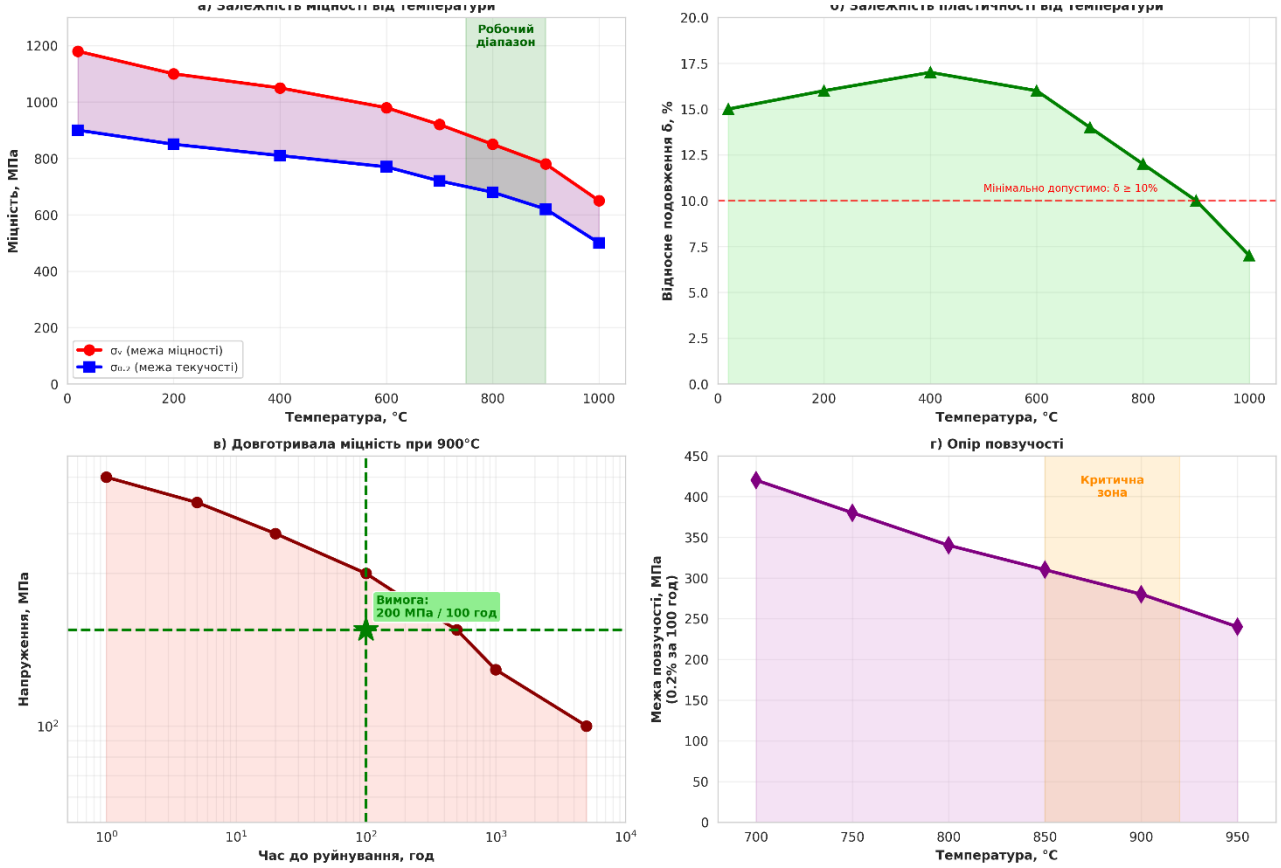


Рисунок 1.4 – Механічні властивості сплаву ЕП648 при високих температурах

Висока жароміцність сплаву забезпечується когерентними виділеннями γ'-фази розміром 0,3-0,5 мкм, які блокують рух дислокацій, а також дисперсними карбідами MC (на основі NbC, TiC) та M_6C (переважно W_3Mo_3C), розташованими по границях зерен.

1.3.1 Мікроструктура та фазовий стан сплаву ЕП648

Мікроструктура сплаву ЕП648 після стандартної термічної обробки (гартування з 1150-1170°C та старіння при 800-850°C протягом 16 годин) складається з γ-матриці на основі нікелю та зміцнюючих фаз [33].

Таблиця 1.4 – Мікроструктурні складові жароміцного нікелевого суперсплаву (ЕП648) та їх характеристики

Структурна складова	Склад / структура	Морфологія та розмір	Функціональна роль
γ'-фаза ($Ni_3(Al,Ti,Nb)$)	Упорядкована ГЦК структура $L1_2$	Об'ємна частка 40-45%; частинки 0,3-0,5 мкм; форма кубоїдальна; невідповідність γ/γ' 0,3–0,5%	Основне когерентне зміцнення; висока термостабільність до 950-1000°C
Первинні карбіди MC (Nb, Ti, частково W, Mo)	Карбіди типу MC; формуються при первинній кристалізації	Розмір 1-5 мкм; у зернах та на межах	Контроль зернорості; вплив на високу температурну міцність
Вторинні карбіди M_6C (W_3Mo_3C)	Виділяються при старінні по межах зерен	Розмір 50-200 нм; дрібнодисперсні частинки	Зміцнення меж зерен; підвищення опору повзучості; надмірна коагуляція → зниження пластичності
Бориди M_3B та інші борвмісні фази	Бориди при вмісті B 0,005-0,008%	Локальні виділення на межах зерен	Підвищують когезійну міцність меж зерен, покращують змочуваність γ'-фазою
Зерна γ-матриці (Ni-fcc)	Твердий розчин на основі Ni, ГЦК	Після термообробки: 30-50 мкм (ASTM 4-5);	

1.3.2 Застосування сплаву ЕП648

Цей сплав знайшов широке застосування у виробництві критичних деталей газотурбінних двигунів для авіаційної та енергетичної промисловості завдяки оптимальному поєднанню жароміцності, технологічності та економічної ефективності [34].

Диски турбін виготовляються з сплаву ЕП648 методом ізотермічного штампування або гарячого деформування з подальшою термічною обробкою. Диски працюють при температурах 750-900°C та високих відцентрових навантаженнях (до 500 МПа на периферії). Критичними вимогами є висока довготривала міцність, опір повзучості та втомі при термоциклічному

навантаженні.

Лопатки турбін (направляючі та робочі) піддаються ще більш жорстким умовам експлуатації: температура газу до 950-1050°С, високі механічні напруження від відцентрових сил та вібрацій, термоциклічне навантаження при запусках-зупинках двигуна, корозійно-активне середовище продуктів згоряння. Для лопаток застосовується додаткове захисне покриття (алітування, хромалітування або багатошарові керамічні покриття типу thermal barrier coating).

Сплав ЕП648 використовується в двигунах ТВ3-117, Д-136, АІ-25, АІ-450 вітчизняного виробництва, а також має аналоги серед закордонних сплавів.

1.4 Шихтові матеріали для виплавки нікелевих сплавів

Шихтові матеріали для виплавки нікелевих суперсплавів поділяються на три основні категорії: первинні (virgin materials), вторинні або зворотні (revert materials) та лігатури (master alloys).

Первинні матеріали включають чисті метали та феросплави, отримані з рудної сировини: нікель електролітний марок НПА-1, НПА-2 (чистота 99,5-99,9%), хром електролітний Х99 (99,2% Cr), алюміній первинний А99 (99,5% Al), феровольфрам ФВ80 (80% W), феромолібден ФМо60 (60% Mo), феротитан ФТі70 (70% Ti), феронобій ФНб60 (60% Nb). Первинні матеріали характеризуються стабільним хімічним складом та низьким вмістом шкідливих домішок [35].

Зворотні матеріали – це відходи власного виробництва: обрізки злитків, стружка, бракована продукція зі сплаву ЕП648 або близьких за складом сплавів. Використання зворотних матеріалів знижує собівартість виробництва на 15-25%, однак їх частка обмежується 20-30% через можливе накопичення домішок та варіабельність хімічного складу в межах допуску. Перед завантаженням зворотні матеріали підлягають обов'язковому спектральному аналізу [36].

Лігатури – це проміжні сплави, що містять два або більше легувальних елементів у певній пропорції для спрощення дозування та зменшення угару. Наприклад, лігатура Ni-Al-Ti дозволяє одночасно вносити алюміній та титан з компенсацією їх різного угару. Використання лігатур особливо ефективне для легування бором (лігатура Ni-B з 2-5% B замість чистого феробору).

1.4.1 Вимоги до якості та чистоти шихтових матеріалів

Ключовими вимогами до шихтових матеріалів для виплавки авіаційних сплавів є мінімальний вміст шкідливих домішок та неметалевих включень, оскільки вони визначають втомну міцність та тріщиностійкість деталей.

Обмеження на домішки: S ≤0,005%, P ≤0,010%, O ≤50 ppm, N ≤50 ppm у первинному нікелі; для феросплавів допускається дещо вищий вміст (S ≤0,02%, P ≤0,03%). Особливо критичним є вміст елементів з низькою температурою плавлення (Pb, Bi, Sn, Sb ≤5 ppm кожен), які викликають гарячеламкість при деформації.

Контроль неметалевих включень: загальний вміст оксидних, нітридних та сульфідних включень у первинних матеріалах не повинен перевищувати 0,01% за масою. Розмір окремих включень обмежується 20-30 мкм для запобігання їх проростанню в злиток при кристалізації.

Гранулометричні вимоги: для ефективного плавлення методом ЕПП шихтові матеріали мають бути підготовлені у вигляді гранул (1-10 мм) або порошків (20-150 мкм). Кускові матеріали розміром понад 50 мм потребують попереднього подрібнення через низьку швидкість нагріву та плавлення.

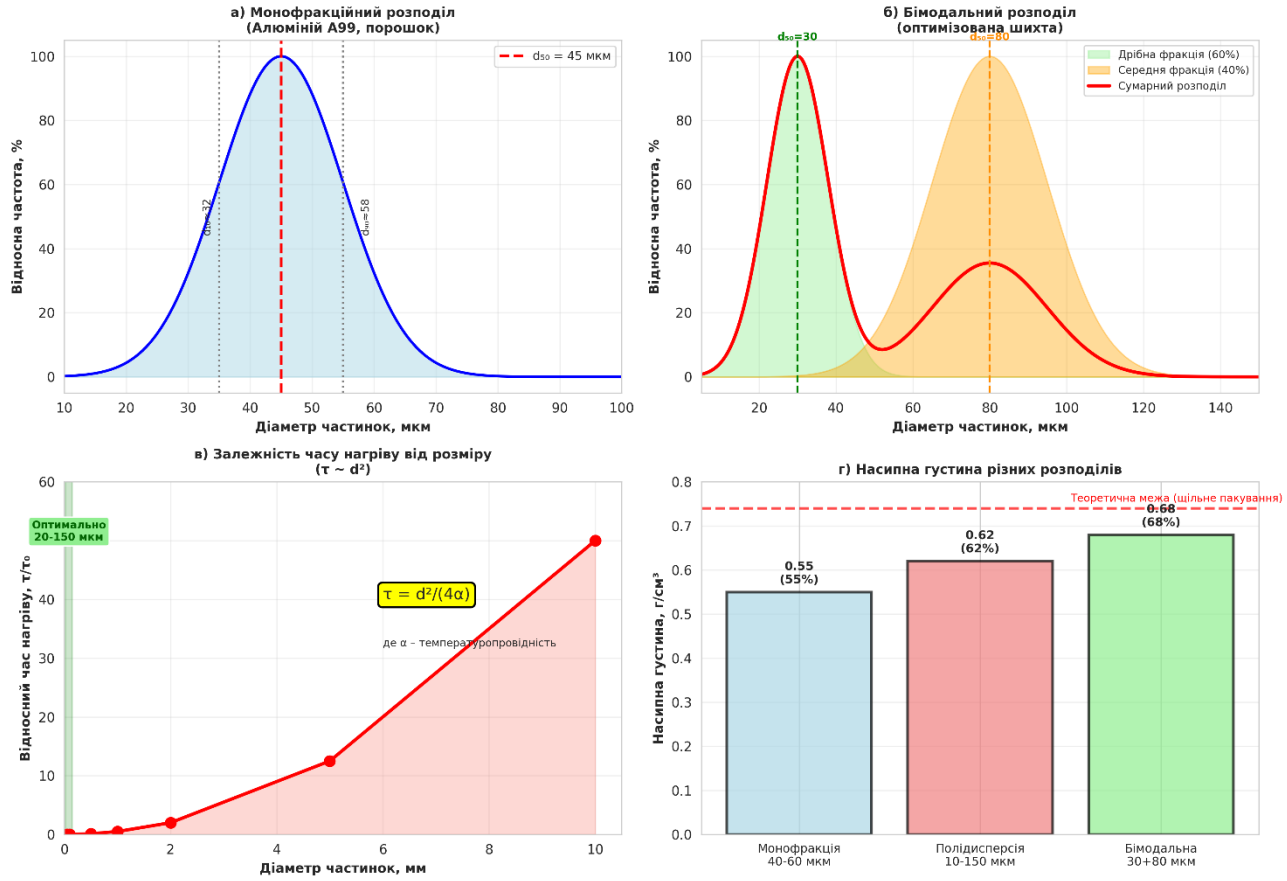


Рисунок 1.5 – Гранулометричні характеристики шихтових матеріалів та їх вплив на процес ЕПП

Графік (а) показує монофракційний розподіл для алюмінієвого порошку А99 з медіанним діаметром d_{50} = 45 мкм та стандартним відхиленням σ = 10 мкм. Залежність (б) демонструє бімодальний розподіл оптимізованої шихти: суміш дрібної фракції (d_{50} = 30 мкм, 60%, зелене затінення) та середньої фракції (d_{50} = 80 мкм, 40%, помаранчеве затінення). Графік (в) ілюструє квадратичну залежність часу нагріву від діаметра частинок $\tau \sim d^2$ згідно з рівнянням Фур'є для нестаціонарної теплопровідності. Стовпчата діаграма (г) порівнює насипну густину трьох різних типів розподілів: монофракція (0,55 г/см³, 55% ефективність пакування), полідисперсія 10-150 мкм (0,62 г/см³, 62%), бімодальна суміш 30+80 мкм (0,68 г/см³, 68% – найкраща).

2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

2.1 Постановка задачі оптимізації складу шихти

Виплавка жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 методом електронно-променевого плавлення вимагає використання високоякісних шихтових матеріалів, вартість яких становить 60-75% загальних витрат на виробництво злитка. У зв'язку з цим актуальною задачею є оптимізація складу шихти з метою мінімізації економічних витрат при забезпеченні необхідного хімічного складу та якості кінцевого продукту.

Основною метою оптимізації є визначення такого співвідношення шихтових компонентів, яке забезпечить мінімальну загальну вартість шихти на одиницю маси виплавленого сплаву. Математично цільова функція формулюється наступним чином [37]:

$$Z = \Sigma_{i=1}^{n} (c_i \cdot x_i) \rightarrow \min$$

де: Z – загальна вартість шихти на 1 кг сплаву ЕП648, грн/кг;

x_i – масова частка і-го компонента в загальній масі шихти, безрозмірна величина ($0 \leq x_i \leq 1$);

c_i – питома вартість і-го компонента шихти, грн/кг;

n – кількість різних компонентів шихти.

Ця цільова функція є лінійною відносно змінних x_i, що дозволяє застосувати ефективні методи лінійного програмування для знаходження оптимального розв'язку. Треба уточнити, що вартість шихти c_i включає не тільки ціну матеріалу, але й інші сопутні витрати (транспортні, зберігання, вартість підготовки.

При формулюванні цільової функції необхідно враховувати змінний характер цін на ринку шихтових матеріалів. Ціни на первинний нікель,

ферросплави та чисті метали можуть суттєво коливатися залежно від світової кон'юнктури, курсу валют та логістичних факторів. Тому оптимізаційну модель доцільно переглядати періодично (щомісяця або щокварталу) з актуалізацією вартісних параметрів.

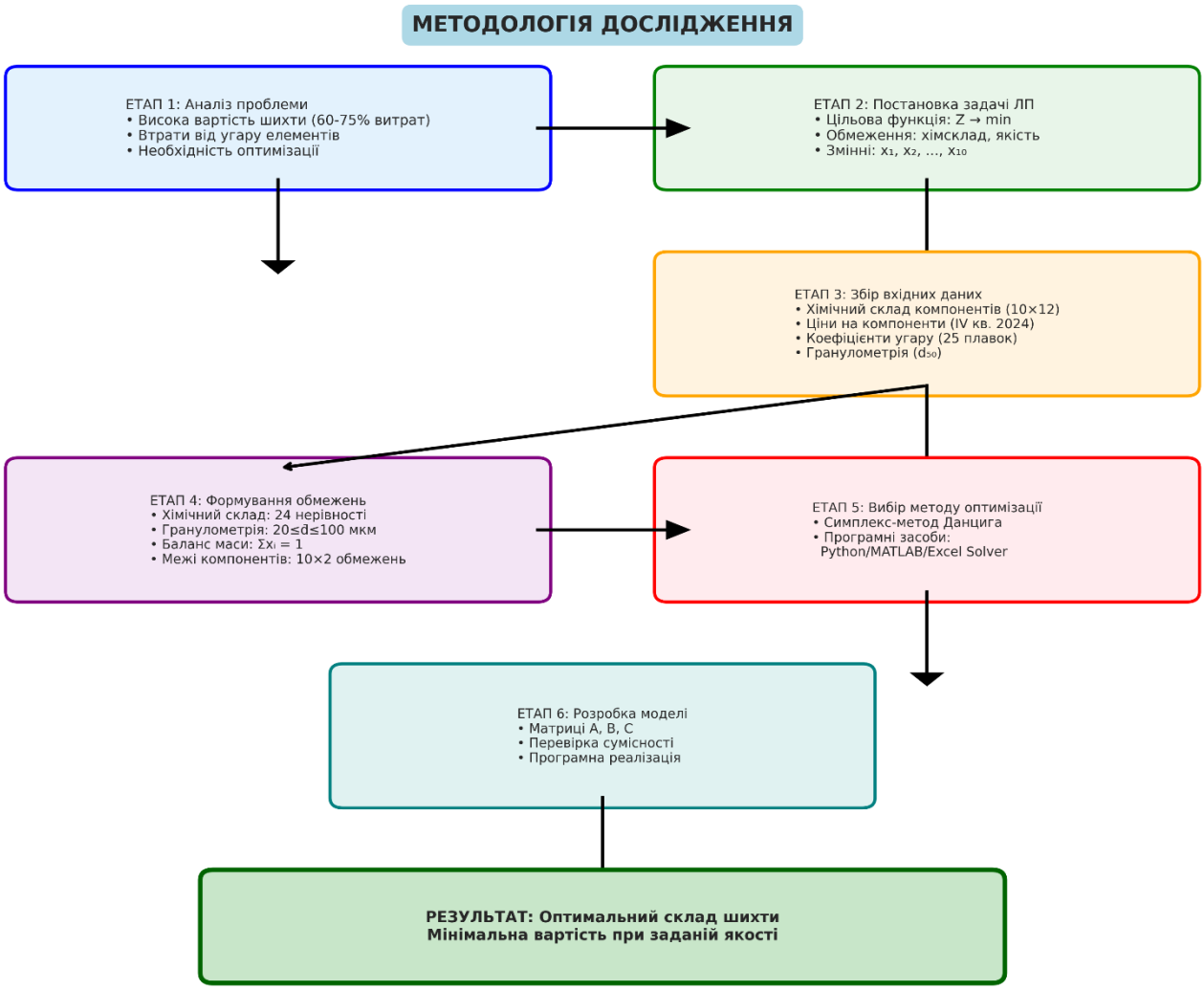


Рисунок 2.1 – Методологічна схема дослідження оптимізації складу шихти

Схема ілюструє класичну структуру науково-дослідної роботи за методологією operations research за класичною схемою: проблема → математична модель → дані → обмеження → метод → реалізація → результат. Може використовуватися як шаблон для постановки і розв'язання інших задач оптимізації металургійних процесів (оптимізація складу сталей, шлаків, флюсів для зварювання).

2.1.1 Визначення обмежень математичної моделі

Процес оптимізації не може бути зведений виключно до мінімізації вартості, оскільки необхідно забезпечити відповідність хімічного складу виплавленого сплаву нормативним вимогам. Згідно з технічними умовами на сплав ХН50ВМТЮБ, вміст кожного легувального елемента має знаходитися в певному діапазоні. Тобто це будуть обмеження за хімічним складом.

Для кожного j-го легувального елемента (Cr, Ti, Al, Nb, W, Mo, B та ін.) має виконуватися нерівність:

$$b_j^{min} \le \Sigma_{i=1}^{n} (a_{ij} \cdot x_i \cdot \eta_j) \le b_j^{max}$$

де: a_{ij} – вміст j-го елемента в і-му компоненті шихти, % мас.;

k_j – коефіцієнт угару j-го елемента при ЕПП, безрозмірна величина;

$\eta_j = (1 - k_j)$ – коефіцієнт переходу j-го елемента в сплав (з урахуванням угару);

b_j^{min}, b_j^{max} – мінімально і максимально допустимий вміст j-го елемента у сплаві, % мас. \

Для сплаву ЕП648 приймаємо наступні обмеження, що вказані у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Обмеження за хімічним складом для сплаву ЕП648

Елемент	Cr	W	Mo	Ti	Al	Nb	B	Ni	S	P	O	N
Вміст / Граничний вміст	14,0 … 16,0	4,5 … 6,5	2,5 … 4,0	0,9 … 1,4	1,1 … 1,6	0,8 … 1,2	≤ 0,008	основа	≤ 0,007 %	≤ 0,015 %	≤ 0,0015 % (15 ppm)	≤ 0,003 % (30 ppm)

Якість сплаву визначається не тільки хімічним складом, але й чистотою по неметалевих включеннях, відсутністю грубих інтерметалідних фаз та гетерогенністю розподілу легувальних елементів. Тому до нашої моделі включимо додаткові обмеження, а саме:

1. *Обмеження на вміст неметалевих включень*. Загальний вміст оксидів (переважно Al_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3) не повинен перевищувати 0,01% за масою.

2. *Обмеження на гранулометричний склад шихти*. Оптимальний розмір частинок шихтових матеріалів для ЕПП має знаходитися в діапазоні 10-150 мкм, при цьому середньозважений розмір має бути 20 мкм $\leq \bar{d} \leq$ 100 мкм.
3. *Обмеження на баланс маси*. Сума масових часток усіх компонентів шихти має дорівнювати одиниці ($\Sigma_{i=1}^{n} x_i = 1$).
4. *Обмеження на мінімальну та максимальну частку компонентів*. Для деяких компонентів існують технологічні обмеження на їх частку в шихті, що описується умовою $x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}$.

Наприклад, частка первинного Ni не може бути менше 40%, оскільки він формує основу, а частка B у вигляді феробору не повинна перевищувати 0,5% через складність його точного дозування.

2.1.2 Критерії оптимальності

При розробці оптимізаційної моделі необхідно враховувати не тільки прямі витрати на шихтові матеріали, але й непрямі втрати, пов'язані з угаром легувальних елементів у процесі плавлення.

Введемо *критерій мінімізації загальних витрат*. Загальні економічні витрати на виплавку 1 кг сплаву включають:

$$Z_{заг} = Z_{шихта} + Z_{угар} + Z_{енергія} + Z_{інші}$$

де: $Z_{шихта}$ – вартість шихтових матеріалів;

$Z_{угар}$ – втрати через угар дорогоцінних легувальних елементів;

$Z_{енергія}$ – витрати на електроенергію;

$Z_{інші}$ – інші технологічні витрати.

У даному дослідженні основна увага приділяється оптимізації першого та другого компонентів, оскільки вони становлять понад 80% загальних витрат.

Під час електронно-променевого плавлення відбувається селективне випаровування елементів з високою пружністю пари (Mn, Cr, Al). Коефіцієнт

угару для різних елементів варіює від 0,5% (для W, Mo) до 8-12% (для Mn, Cr). Економічні втрати від угару можна оцінити як:

$$Z_{угар} = \Sigma_j (c_{ел,j} \cdot \Delta m_j)$$

де: $c_{ел,j}$ – вартість 1 кг j-го легувального елемента;

Δm_j – маса j-го елемента, що випарувалася при плавленні 1 кг сплаву.

Величина угару залежить від технологічних параметрів переплаву: глибини вакууму, температури перегріву розплаву, площі поверхні ванни та тривалості витримки. В таблиці 2.2 наведені коефіцієнти угару при стандартних режимах плавки сплаву ЕП648 (вакуум 10^{-3} Па, температура розплаву 1450-1500°C) [38, 39]:

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти угару елементів при стандартних режимах плавки сплаву ЕП648 (вакуум 10^{-3} Па, температура 1450-1500 °C)

Елемент	Позначення	Коефіцієнт угару	Угар, %
Хром	kCr	0,03-0,05	3-5%
Алюміній	kAl	0,06-0,08	6-8%
Марганець	kMn	0,10-0,12	10-12%
Молібден	kMo	0,005-0,01	0,5-1%
Вольфрам	kW	0,003-0,005	0,3-0,5%
Титан	kTi	0,01-0,02	1-2%
Ніобій	kNb	0,005-0,01	0,5-1%

У деяких випадках доцільно розглядати задачу багатокритеріальної оптимізації, де одночасно мінімізуються такі параметри як:

- вартість шихти;
- вміст шкідливих домішок;
- енерговитрати на плавлення;

- ризик браку через відхилення хімічного складу.

Для розв'язання такої задачі можна застосувати метод згортки критеріїв з ваговими коефіцієнтами або метод Парето-оптимізації. Однак у даному дослідженні ми обмежуємося однокритеріальною задачею з мінімізації вартості шихти при жорстких обмеженнях щодо якості отриманих зливків.

2.2 Вхідні параметри математичної моделі

Для побудови адекватної прогностичної математичної моделі оптимізації складу шихти необхідно зібрати та систематизувати конкретний обсяг вхідної інформації про доступні шихтові матеріали, їх властивості та вартість.

2.2.1 Масові частки компонентів шихти

Масові частки компонентів шихти x_i є основними змінними оптимізаційної задачі. Кількість компонентів n залежить від переліку доступних матеріалів. А для кожного з компонентів шихти змінна x_i показує, яку частку від загальної маси шихти він становить. Для отримання сплаву ЕП648 типовий склад шихтових компонентів наступний:

В таблиці 2.3 представлено типовий склад шихтових компонентів для виплавки сплаву ЕП648.

При практичній реалізації оптимізаційного розв'язку необхідно враховувати, що:

1. Мінімальна партія завантаження деяких компонентів обмежена точністю дозувального обладнання (зазвичай ±0,5 кг).
2. Деякі компоненти (наприклад, феробор для введення бору) використовуються в дуже малих кількостях (0,1-0,3%), що вимагає точного зважування.
3. Зворотні матеріали можуть мати змінний хімічний склад, тому їх частка обмежується 20-30% від загальної маси шихти для забезпечення стабільності процесу.

Таблиця 2.3 – Типовий склад шихтових компонентів для виплавки сплаву ЕП648

№	Компонент	Марка / Тип	Основний вміст	Додатковий склад / Примітки
1	Нікель первинний	НПА-1, НПА-2	Ni ≥ 99,5%	Основа сплаву
2	Феронікель	ФН20, ФН30	Ni 20-30%	Fe – решта
3	Хром електролітний	Х99, Х995	Cr ≥ 99%	-
4	Феровольфрам	ФВ80	W 75-85%	Fe – решта
5	Феромолібден	ФМо60	Mo 55-70%	Fe – решта
6	Феротитан	ФТі70	Ti 65-75%	Al 4-8%, Si 0,5-2%
7	Алюміній первинний	А99, А995	Al ≥ 99%	-
8	Феронобій	ФНб60	Nb 55-65%	Fe – решта
9	Феробор	ФБ20	B 18-22%	Si 1-2%, Fe – решта
10	Зворотні матеріали	-	Близькі до цільового складу ЕП648	Стружка, обрізки сплаву

2.2.2 Хімічний склад кожного компонента шихти

Матриця хімічного складу $\{a_{ij}\}$ є ключовим параметром моделі. Кожен елемент a_{ij} показує вміст j-го хімічного елемента (Ni, Ti, Al, Nb, B, Fe, Cr, W, Mo, S, P, C, та ін.) в і-му компоненті шихти, виражений у відсотках за масою.

У таблиці 2.4 представлено фрагмент матриці для основних легувальних елементів розглянутого сплаву. Слід врахувати, що у феробору також міститься 20% B та 1,5% Si.

Повна матриця має розмірність n × m, де n – кількість компонентів шихти (10-15), m – кількість хімічних елементів, що контролюються (15-20, включаючи домішки).

Таблиця 2.4 – Хімічний склад основних шихтових компонентів для сплаву ЕП648

Компонент	Ni, %	Cr, %	W, %	Mo, %	Ti, %	Al, %	Nb, %	Fe, %
Нікель НПА-1	99,6	0,02	-	-	-	-	-	0,15
Хром Х99	-	99,2	-	-	-	-	-	0,30
ФВ80	-	-	80,0	-	-	-	-	19,5
ФМо60	-	-	-	60,0	-	-	-	39,0
ФТі70	-	-	-	-	70,0	6,0	-	23,0
Алюміній А99	-	-	-	-	-	99,5	-	0,20
ФНб60	-	-	-	-	-	-	60,0	39,0
ФБ20	-	-	-	-	-	-	-	78,0*

Важливо враховувати, що хімічний склад реальних матеріалів може варіювати в межах допусків стандарту. Наприклад, вміст молібдену у феромолібдені ФМо60 коливається від 55% до 70%. Ця невизначеність має враховуватися при формуванні обмежень моделі через введення запасу міцності (розрахунок на найгірший варіант або використання стохастичної оптимізації).

2.2.3 Гранулометричні характеристики шихтових матеріалів

Розмір частинок шихтових матеріалів суттєво впливає на енергетичну ефективність процесу ЕПП та якість кінцевого продукту. Дрібніші частинки швидше нагріваються та плавляться, але можуть призводити до пилоутворення та нерівномірної подачі. Занадто великі шматки повільно прогріваються, що збільшує енерговитрати.

Для електронно-променевого плавлення нікелевих сплавів рекомендований діапазон фракцій становить:

- порошкові матеріали: 20-100 мкм (алюміній, феробор);
- гранульовані матеріали: 0,5-5 мм (нікель, феросплави);
- кускові матеріали: 5-50 мм (хром електролітний, зворотні матеріали).

Середньозважений розмір частинок шихти d_i визначається для кожного компонента окремо. Для порошків його вимірюють методами лазерної дифракції або ситового аналізу за стандартом ISO 13320. Для гранульованих і кускових матеріалів застосовують ситовий аналіз.

Дослідження показують, що при зменшенні середнього розміру частинок нікелю з 10 мм до 1 мм питомі енерговитрати на плавлення знижуються на 15-20% за рахунок збільшення площі поверхні теплообміну [40]. Однак частинки розміром менше 100 мкм можуть частково випаровуватися або виноситися потоками газу у вакуумній камері, що призводить до втрат матеріалу.

Для характеристики гранулометричного складу використовують параметр d_i – середньомасовий діаметр частинок і-го компонента. Додатково корисно враховувати ширину розподілу частинок за розміром (наприклад, коефіцієнт полідисперсності або параметри d_{10}, d_{50}, d_{90}).

У математичній моделі вплив гранулометрії враховується через:

1. Обмеження на середньозважений розмір всієї шихти: $\bar{d} = \Sigma_i (d_i \cdot x_i \cdot \rho_i) / \Sigma_i (x_i \cdot \rho_i)$ з умовою: 20 мкм $\leq \bar{d} \leq$ 100 мкм
2. Корекцію коефіцієнтів угару елементів залежно від розміру частинок (дрібніші частинки мають більший угар летких елементів);
3. Оцінку енерговитрат на плавлення як функції від гранулометричного складу.

2.2.4 Вартість шихтових компонентів

Вартість шихтових компонентів є визначальним параметром цільової функції оптимізації. Ціни на матеріали формуються виходячи з:

- світових котирувань на біржах металів (London Metal Exchange для нікелю, молібдену);
- регіональних цін постачальників феросплавів;
- транспортних витрат та митних зборів;
- витрат на підготовку матеріалів (подрібнення, фракціонування, сушіння).

Таблиця 2.5 – Типові ціни на шихтові матеріали (станом на 2024 рік)

Матеріал	Ціна, грн/кг	Ціна, USD/кг
Нікель первинний НПА-1	950-1100	30-35
Хром електролітний Х99	280-350	9-11
Феровольфрам ФВ80	1200-1500	38-48
Феромолібден ФМо60	850-1050	27-33
Феротитан ФТі70	320-400	10-13
Алюміній первинний А99	90-120	3-4
Феронобій ФНб60	1400-1800	45-58
Феробор ФБ20	600-800	19-25
Зворотні матеріали ЕП648	400-600	13-19

Через високу волатильність цін на метали оптимізаційну модель необхідно періодично актуалізувати. Практичний підхід полягає у:

- використанні середніх цін за квартал або за місяць;
- проведенні аналізу чутливості оптимального рішення до зміни цін на ±10-20%;
- розробці сценаріїв оптимізації для песимістичного, базового та оптимістичного прогнозів цін.

2.2.5 Коефіцієнти угару легувальних елементів

Коефіцієнт угару k_j показує, яка частка j-го легувального елемента втрачається у процесі переплву окисненням, випаровуванням, чи іншими процесами. Рівень угару визначається експериментально шляхом порівняння розрахункового та фактичного вмісту елемента у виплавленому злитку.

Розглядаються наступні фактори, що прямо впливають на величину угару:

1. Тиск пари елемента при температурі плавлення (визначальний фактор для, Zn, Mg, Mn, Cr);

2. Глибина вакууму в камері де відбувається плвлення (відомо, що чим нижчий тиск, тим інтенсивніше випаровування).
3. Температура перегріву розплаву (підвищення температури на 50°С може, наприклад, збільшити угар Cr до 2 разів).
4. Площа поверхні ванни розплаву та тривалість витримки зливку.
5. Хімічна активність елемента, що розглядається (важливе значення має схильність елементу до окиснення залишковим киснем).

На основі промислових плавок на установках ЕПП встановлено наступні середні значення, що представлені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Середні значеннями коефіцієнтів (k) втрат хімічних елементів під час промислових плавок на установках ЕПП

Елемент	Позначення коефіцієнта	Діапазон k	Еквівалент втрат, %	Орієнтовне середнє k	Орієнтовне середнє, %	Примітка
Нікель	kNi	0,005-0,01	0,5-1	0,0075	0,75	-
Хром	kCr	0,030,05	3-5	0,04	4	-
Вольфрам	kW	0,003-0,005	0,3-0,5	0,004	0,4	-
Молібден	kMo	0,005-0,01	0,5-1	0,0075	0,75	-
Титан	kTi	0,01-0,02	1-2	0,015	1,5	-
Алюміній	kAl	0,06-0,08	6-8	0,07	7	Висока схильність до втрат
Ніобій	kNb	0,005-0,01	0,5-1	0,0075	0,75	-
Бор	kB	0,15-0,20	15-20	0,175	17,5	Дуже висока реакційна здатність

Значення цих коефіцієнтів не є константами та мають деяку вірогідність щодо величин і можуть варіювати залежно від конкретних умов плавлення. Тому в розрахунках використовують середні значення з певним запасом. Наприклад, для хрому приймають kCr = 0,04 (4%), що відповідає типовим режимам ЕПП для розглянутого сплаву.

Коефіцієнт угару входить у обмеження щодо хімічногго складу через коефіцієнт переходу $\eta_j = (1 - k_j)$. Якщо в шихту завантажується m_j кілограмів j-го

елемента, то в сплав переходить лише $m_j \cdot \eta_j$ кілограмів. Решта випаровується або окиснюється.

Для елементів з великим угаром (Al, Cr) необхідно попередньо врахувати надлишкове завантаження, що враховується в оптимізаційній математичній моделі автоматично через обмеження за хімічним складом отримуваного продукту.

На рисунку 2.2 зображена комплексна візуалізація чотирьох основних категорій вхідних даних моделі: хімічного складу компонентів, цін, коефіцієнтів угару та гранулометричних характеристик.

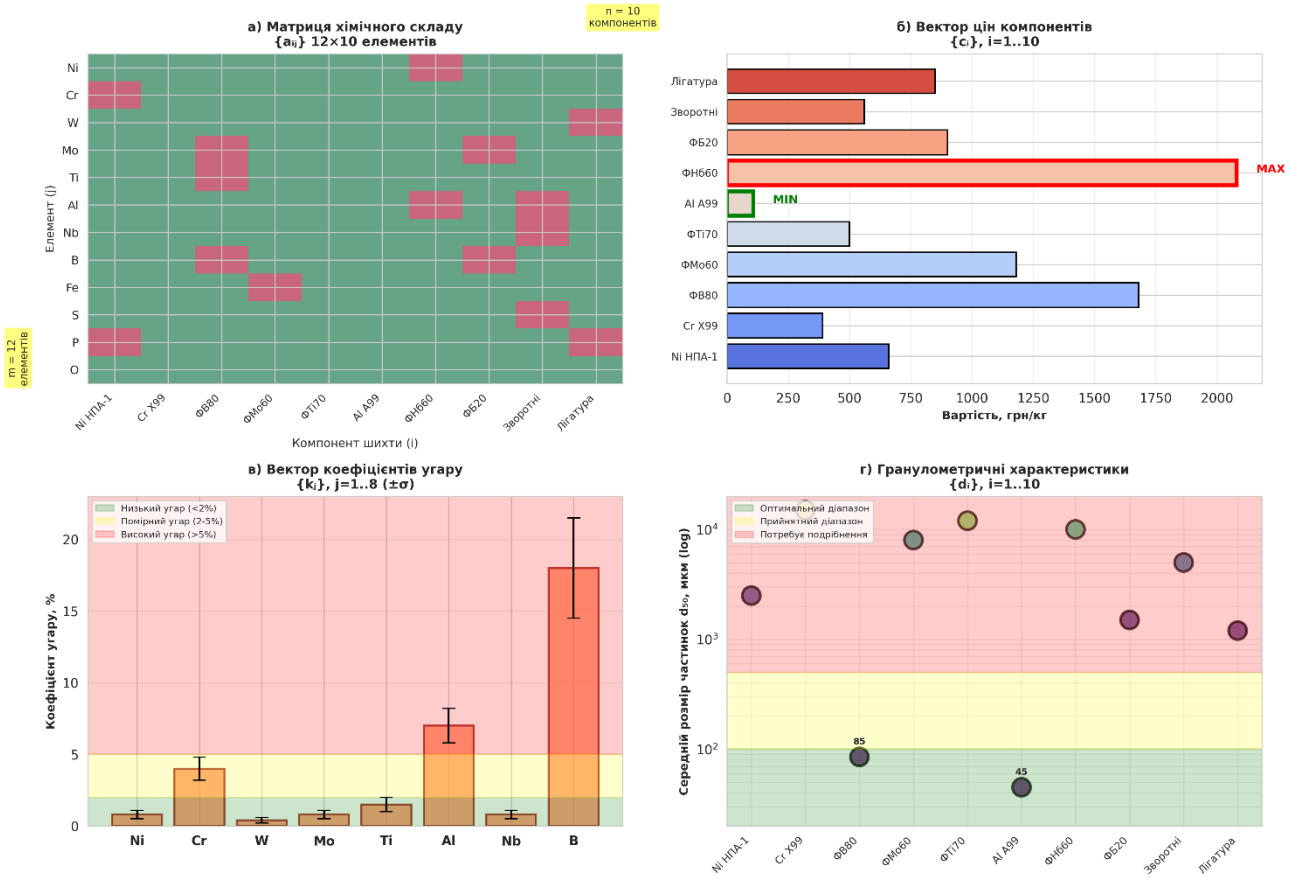


Рисунок 2.2 – Структура вхідних даних математичної моделі оптимізації

2.3 Обмеження моделі оптимізації

Система обмежень визначає допустиму область розв'язків оптимізаційної задачі та забезпечує відповідність складу шихти технічним вимогам до розглянутого сплаву і технологічним можливостям процесу ЕПП (таблиця 2.7).

2.3.1 Баланс хімічного складу за кожним легувальним елементом

Основні обмеження моделі стосуються забезпечення необхідного вмісту легувальних елементів у виплавленому сплаві. Для кожного j-го елемента (Cr, Ni, Al, Nb, W, Mo, Ti, B) має виконуватися умова:

$$b_j^{min} \le \Sigma_{i=1}^{n} (a_{ij} \cdot x_i) \cdot (1 - k_j) \le b_j^{max}$$

де ліва частина нерівності представляє фактичний вміст j-го елемента в сплаві після врахування угару.

Таблиця 2.7 – Перелік обмежень за хімічним складом для сплаву ЕП648 (з урахуванням втрат елементів під час ЕПП)

№	Елемент / параметр	Розрахункове визначення	Коефіцієнт збереження (1= угар)	Допустимий інтервал у сплаві, %	Пояснення
1	Нікель (Ni, як основа)	$Ni = 100\% - \Sigma_{j \neq Ni} C_j$	-	Ni≥48Ni	Мінімальна частка для збереження γ-матриці
2	Хром (Cr)	$14{,}0\% \le \Sigma_i (a_{i,Cr} \cdot x_i) \cdot 0{,}96 \le 16{,}0\%$	0,96	14,0≤Cr≤16,0	0,96 враховує 4% угару хрому
3	Вольфрам (W)	$4{,}5\% \le \Sigma_i (a_{i,W} \cdot x_i) \cdot 0{,}995 \le 6{,}5\%$	0,995	4,5≤W≤6,5	Низькі втрати W
4	Молібден (Mo)	$2{,}5\% \le \Sigma_i (a_{i,Mo} \cdot x_i) \cdot 0{,}99 \le 4{,}0\%$	0,99	2,5≤Mo≤4,0	Помірні втрати Mo
5	Титан (Ti)	$0{,}9\% \le \Sigma_i (a_{i,Ti} \cdot x_i) \cdot 0{,}985 \le 1{,}4\%$	0,985	0,9≤Ti≤1,4	Втрати 1,5%
6	Алюміній (Al)	$1{,}1\% \le \Sigma_i (a_{i,Al} \cdot x_i) \cdot 0{,}93 \le 1{,}6\%$	0,93	1,1≤Al≤1,6	0,93 враховує 7% угару Al – найбільший серед основних легувальних

Продовження таблиці 2.7

7	Ніобій (Nb)	$0{,}8\% \le \Sigma_i (a_i,Nb \cdot x_i) \cdot 0{,}99 \le 1{,}2\%$	0,99	0,8≤Nb≤1,2	Втрати близько 1%
8	Бор (B)	$0{,}003\% \le \Sigma_i (a_i,B \cdot x_i) \cdot 0{,}85 \le 0{,}008\%$	0,85	0,003≤B≤0,008	Значний угар 15% через високу реакційну здатність

Додатковою вимогою для жароміцних нікелевих сплавів є забезпечення оптимального співвідношення γ'-утворюючих елементів (Ti, Al, Nb). Для формування зміцнюючої γ'-фази Ni_3(Nb, Al,Ti,) необхідно, щоб виконувалася умова:

$$2{,}5\% \le (Al + Ti + Nb) \le 4{,}0\%$$

При цьому атомне співвідношення Al/Ti має знаходитися в діапазоні 1,0-1,5 для забезпечення оптимальної морфології та об'ємної частки γ'-фази (це приблизно 40-45%).

2.3.2 Обмеження на мінімальний та максимальний вміст компонентів

Технологічні особливості процесу ЕПП та практика завантаження шихти накладають обмеження на масові частки окремих компонентів, що перелічені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Обмеження на мінімальний та максимальний вміст компонентів шихти для ЕП648 при ЕПП

Компонент шихти	Позначення	min	max	Пояснення (коротко)
Нікель первинний	xNi	0,40	0,70	Основа γ-матриці
Феровольфрам	xFW	0,03	0,12	Забезпечення 4,5-6,5% W
Феромолібден	xFMo	0,02	0,10	Забезпечення 2,5-4,0% Mo
Феротитан	xFTi	0,01	0,05	Забезпечення 0,9-1,4% Ti
Феронобій	xFNb	0,01	0,04	Забезпечення 0,8-1,2% Nb

Продовження таблиці 2.8

Алюміній чистий	xAl	0,01	0,03	Компенсація високого угару без надлишку
Феробор	xFB	0,001	0,005	Малі навіски і складність точного дозування
Хром електролітний	xCr	0,10	0,20	Додається як чистий метал і частково з феросплавами
Зворотні матеріали ЕП648	x_{rev}	0	0,30	Стабільність складу, контроль домішок

Нікель є основою сплаву і має становити не менше 40% шихти для формування γ-матриці. Верхня межа 70% обумовлена економічною доцільністю через те, що нікель – найдорожчий компонент шихти.

Для кожного феросплаву встановлюються індивідуальні межі.

Для чистого Al бмеження зверху пов'язане з необхідністю компенсації високого угару алюмінію без надмірного його внесення.

Дуже малі кількості через високий вміст бору у феросплаві (20%) та низьку необхідну концентрацію B у сплаві (0,003-0,008%). Верхня межа також обумовлена складністю точного дозування малих навісок.

Хром вноситься як у вигляді чистого металу, так і частково з феросплавами.

Верхня межа зворотніх матеріалів 30% встановлена для забезпечення стабільності хімічного складу, оскільки зворотні матеріали можуть мати варіації складу в межах допуску на сплав. При використанні більшої частки зворотних матеріалів зростає ризик накопичення небажаних домішок.

Щодо неметалевих включень від феросплавів, то загальна частка заліза, внесеного з феросплавами, обмежується:

$$\Sigma_i \, (a_i,Fe \cdot x_i) \leq 2,5\%.$$

Надлишкове залізо може утворювати небажані інтерметалідні фази та знижувати жароміцність сплаву.

2.3.3 Технологічні обмеження на гранулометрію шихти

Гранулометричний склад шихти, як було зазначено у попередньому розділі, суттєво впливає на ефективність плавлення, енерговитрати та якість злитка. Тож необхідно встановити наступні обмеження:

1) Обмеження що накладається на середньозважений розмір частинок.

Середньозважений діаметр частинок всієї шихти розраховується за формулою:

$$\bar{d} = \Sigma_{i=1}^{n} (d_i \cdot x_i \cdot \rho_i) / \Sigma_{i=1}^{n} (x_i \cdot \rho_i);$$

де: ρ_i – насипна густина і-го компонента, г/см³;

d_i – середній розмір частинок і-го компонента, мкм;

x_i – масова частка і-го компонента.

Таким чином, має виконуватися умова: 20 мкм $\leq \bar{d} \leq$ 100 мкм

Нижня межа 20 мкм попереджає надмірне пилоутворенню та втрати матеріалу через винесення дрібних частинок вакуумною системою. Верхня межа, що складає 100 мкм забезпечує швидке та рівномірне плавлення без надмірних енерговитрат.

2) Обмеження на частку дрібної фракції (<10 мкм).

Частка дуже дрібних частинок (<10 мкм) у шихті не повинна перевищувати 5% за масою через ризик втрат та утворення дефектів:

$$\Sigma_i (f_{i,<10мкм} \cdot x_i) \leq 0{,}05,$$

де $f_{i,<10мкм}$ – масова частка фракції <10 мкм в і-му компоненті.

3) Обмеження на частку великої фракції шихти (>200 мкм).

Частка крупних частинок (>200 мкм) обмежується 15% для запобігання нерівномірності плавлення:

$$\Sigma_i \, (f_i,_{>200мкм} \cdot x_i) \leq 0{,}15.$$

4) Вимога до бімодального розподілу.

Оптимальним розподілом частинок є бімодальний, з двома піками: дрібна фракція 20-50 мкм (60-70% за масою) та середня фракція 50-100 мкм (30-40%). Це забезпечує щільне пакування частинок та ефективне плавлення [41].

Питомі енерговитрати на плавлення $E_{пит}$ залежать від середнього розміру частинок за емпіричною залежністю:

$$E_{пит} = E_0 \cdot (1 + 0{,}003 \cdot (\bar{d} - 50)),$$

де $E_0 = 2{,}0$ кВт·год/кг – базові енерговитрати при $\bar{d} = 50$ мкм.

При $\bar{d} = 100$ мкм енерговитрати зростають приблизно на 15% порівняно з оптимумом, а при $\bar{d} = 20$ мкм зменшуються приблизно на 9%, але зростають втрати матеріалу.

2.3.4 Обмеження за шкідливими домішками

Такі домішки погіршують механічні властивості жароміцних сплавів, особливо втомну міцність та пластичність при значних температурах. Тому важливою умовою є встановлення жорстких обмежень на їх вміст у кінцевому сплаві, що проілюстровано в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Обмеження та поведінка шкідливих домішок у сплаві ЕП648

Домішка	Граничний вміст у сплаві	Формула контролю домішки	Коефіцієнт угару / видалення	Характер впливу на сплав
Сірка (S)	≤ 0,007%	$\Sigma_i(a_i,S \cdot x_i) \cdot (1 - kS) \leq 0{,}007\%$	kS = 0,60-0,70	Утворює Ni_3S_2, TiS; викликає червоноламкість, різке падіння пластичності
Фосфор (P)	≤ 0,015%	$\Sigma_i(a_i,P \cdot x_i) \cdot (1 - kP) \leq 0{,}015\%$	kP = 0,40-0,50	Утворює крихкі фосфіди; знижує ударну в'язкість та сприяє сегрегації на межах зерен
Кисень (O)	≤ 0,0015% (15 ppm)	$\Sigma_i(a_i,O \cdot x_i) \cdot (1 - kO) \leq 0{,}0015\%$	kO = 0,85-0,92	Утворює оксиди; видаляється через випаровування субоксидів (CrO, AlO); початковий вміст знижується до 10-15 ppm
Азот (N)	≤ 0,003% (30 ppm)	$\Sigma_i(a_i,N \cdot x_i) \cdot (1 - kN) \leq 0{,}003\%$	kN = 0,70-0,80	Утворює нітриди TiN, NbN, AlN; дрібні корисні, великі шкідливі (концентратори напружень)
Водень (H)	≤ 3 ppm	не нормується стандартом	kH > 0,95	Спричиняє газову пористість; майже повністю видаляється при ЕПП

Домішки потрапляють у сплав із:

1. Первинної сировини (нікель, хром, феросплави).
2. Поверхневого окиснення різних компонентів при зберіганні.
3. Залишкової атмосфери самої вакуумної камери.
4. Зворотних матеріалів, що повторно використовуються.

Для зменшення кількості домішок необхідно виконувати такі умови:

1. Використовувати високочисті марки первинної сировини (НПА-1, Х99, А99).
2. Проводити прожарювання шихти при 200-300°С у вакуумі для видалення вологи та адсорбованих газів.
3. Підтримувати глибокий вакуум у камері ($<10^{-3}$ Па).
4. Ретельно обмежувати частку поворотних матеріалів, які можуть містити підвищений вміст домішок.

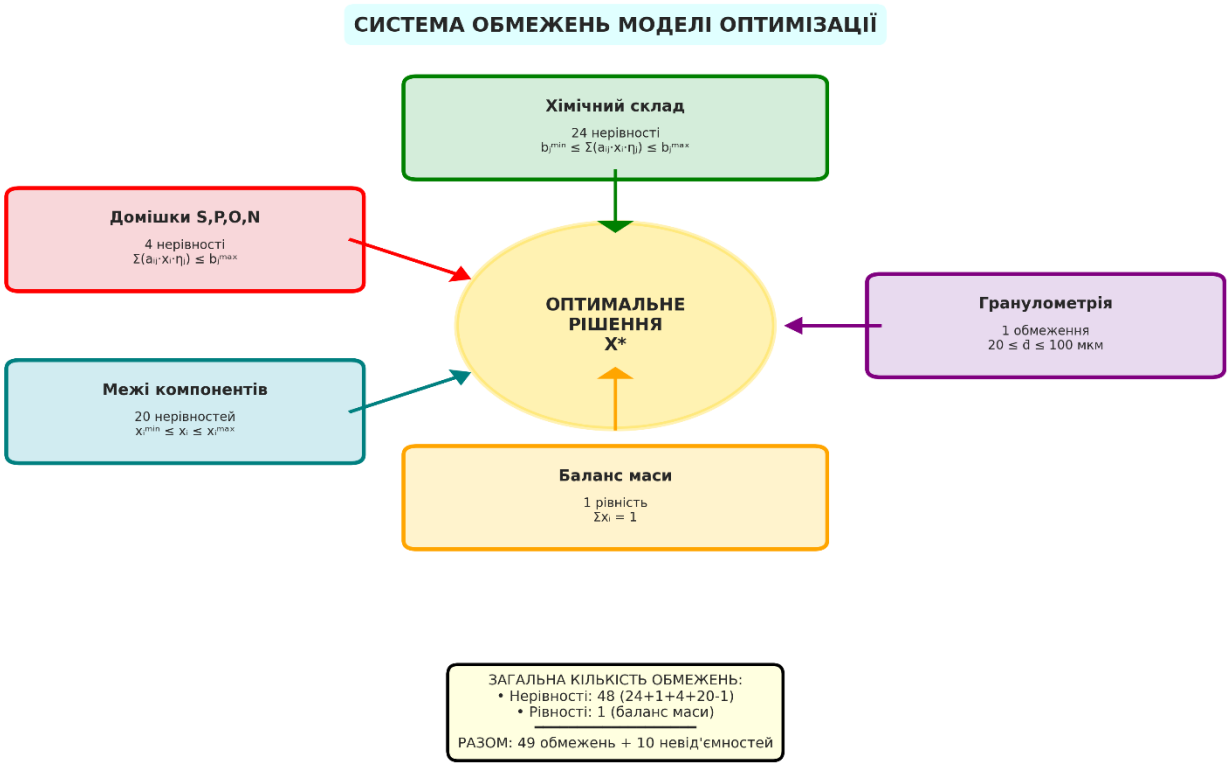


Рисунок 2.3 – Класифікація та структура обмежень математичної моделі

На рисунку 2.3 зображена ієрархічна структурна схема, що демонструє п'ять категорій обмежень моделі оптимізації та їх роль у формуванні оптимального рішення.

2.4 Методи математичної оптимізації

Для розв'язання сформульованої задачі оптимізації складу шихти необхідно застосувати ефективний математичний апарат, який дозволяє знайти оптимальне рішення при наявності множини обмежень.

2.4.1 Лінійне програмування (симплекс-метод Данцига)

Задача оптимізації складу шихти для сплаву ЕП648 відноситься до класу задач лінійного програмування (ЛП), оскільки:

1. Цільова функція $Z = \Sigma_i (c_i \cdot x_i)$ є лінійною відносно змінних x_i.

2. Всі обмеження можуть бути представлені у вигляді лінійних рівнянь або нерівностей.
3. Змінні x_i є невід'ємними ($x_i \geq 0$).

Загальна форма задачі лінійного програмування зводиться до знаходження вектора $X = (x_1, x_2, ..., x_n)^T$, який мінімізує цільову функцію:

$$Z = C^T X \rightarrow \min$$

при наступних прийнятих обмеженнях:

1. $AX \leq B$ (обмеження-нерівності)
2. $A_eqX = B_eq$ (обмеження-рівності)
3. $X \geq 0$ (умова невід'ємності)

де:

A, A_eq – матриці коефіцієнтів обмежень;

C – вектор коефіцієнтів цільової функції (вартості компонентів);

B, B_eq – вектори правих частин обмежень.

Симплекс-метод, розроблений Джорджем Данцигом у 1947 році, є найбільш поширеним алгоритмом розв'язання задач лінійного програмування [42]. Метод базується на геометричній інтерпретації: оптимальне рішення знаходиться в одній з вершин багатогранника допустимих розв'язків.

В таблиці 2.10 перелічені основні етапи симплекс-методу.

Таблиця 2.10 – Основні етапи симплекс-методу

№ етапу	Назва етапу	Суть процесу	Ключові дії
1	Приведення до канонічної форми	Перетворення всіх нерівностей у рівняння шляхом введення додаткових змінних	Додавання *slack*-змінних: $\Sigma_i\ a_{ij}x_i + s_j = b_j,\ s_j \geq 0$
2	Пошук початкового базисного розв’язку	Визначення стартової вершини багатогранника	Зазвичай X = 0 (якщо допустимо) або використання штучних змінних

Продовження таблиці 2.10

3	Ітераційний процес покращення	Послідовне вдосконалення базисного розв’язку	- Обчислення reduced costs - Вибір вхідної змінної (найбільш від’ємна оцінка) - Вибір вихідної змінної (правило мінімального відношення) -Pivot-операція - Перевірка покращення
4	Критерій зупинки	Визначення моменту досягнення оптимуму	Процес завершується, коли всі оцінки невід'ємні (для задачі мінімізації), що означає досягнення оптимуму.

У найгіршому випадку симплекс-метод має експоненційну складність $O(2^n)$, однак на практиці для більшості задач він працює за поліноміальний час $O(n^2 \cdot m)$, де n – кількість змінних, m – кількість обмежень. Для задачі оптимізації шихти ($n \approx 10\text{-}15$, $m \approx 20\text{-}30$) час розв'язання на сучасному комп'ютері становить частки секунди.

2.4.2 Застосування методу лінійного програмування для оптимізації складу шихти

На початковому кроці необхідно сформувати матриці поставленої задачі. Для задачі оптимізації складу шихти сплаву ЕП648 структура матриць має вигляд:

1. Вектор цільової функції C виражений як $C = (c_1, c_2, ..., c_n)^T$ – вартості компонентів шихти
2. Матриця обмежень A, де кожен рядок матриці відповідає одному обмеженню:
   - Рядки 1-8 показують обмеження на вміст легувальних елементів (Cr, W, Mo, Ti, Al, Nb, B, Ni);
   - Рядки 9-12 відповідають обмеженням за домішками (S, P, O, N);
   - Рядки 13-15 відповідають обмеженням щодо гранулометрії;
   - Рядки 16-25 – це обмеження на масові частки окремих компонентів;
   - Рядок 26 описує балансове рівняння $\Sigma x_i = 1$.

Елементи матриці: a_{ij} – вміст відповідного елемента в компоненті шихти з урахуванням коефіцієнта угару.

3. Вектор правих частин B буде таким:

$B = (bCr,max, bCr,min, bW,max, bW,min, ...)^T$ – межі вмісту елементів.

Розглянемо до прикладу формування обмеження кількості хрому. Його кількість в 14-16% формує два обмеження:

Нижня межа - $\Sigma_i (a_i,Cr \cdot 0,96 \cdot x_i) \geq 14,0$ та верхня межа - $\Sigma_i (a_i,Cr \cdot 0,96 \cdot x_i) \leq 16,0$

У матричній формі (після приведення до канонічного вигляду з нерівностями "≤" це буде мати вигляд):

Перше обмеження множиться на (-1): $-\Sigma_i (a_i,Cr \cdot 0,96 \cdot x_i) \leq -14,0$

Друге обмеження залишається: $\Sigma_i (a_i,Cr \cdot 0,96 \cdot x_i) \leq 16,0$

Особливості задачі оптимізації шихти для сплаву ЕП648:

1. Наявність рівності-балансу, який виражається у тому що обмеження $\Sigma x_i = 1$ є рівністю, а не нерівністю, що зменшує розмірність простору розв'язків на одну змінну.
2. Діапазони вмісту легувальних елементів відносно широкі (наприклад, Cr: 14-16%, $\Delta Cr = 2\%$), що створює велику область допустимих розв'язків та полегшує пошук оптимуму.
3. Деякі обмеження можуть конкурувати через вартість чи інші характеристики. Наприклад, мінімізація вартості працює на збільшення частки значно дешевших компонентів, тобто зворотніх матеріалів, але обмеження на домішки цю можливість обмежує.
4. Можливий варіант коли при дуже жорстких обмеженнях або обмеженому наборі доступних компонентів система може не мати розв'язку (область допустимих значень буде відсутньою). У цьому випадку необхідно послабити деякі обмеження або розширити перелік заявлених шихтових матеріалів.

Після знаходження оптимального рішення зазвичай необхідно провести аналіз чутливості, а саме проаналізувати:

- двоїсті змінні, які показують, наскільки зміниться цільова функція при зміні правої частини обмеження на одиницю;
- діапазони стійкості, тобто визначити в яких межах можуть змінюватися коефіцієнти c_i або b_j без зміни оптимального базису;
- вузькі місця, визначивши які обмеження є активними (виконуються як рівності) в оптимальній точці.

Для задачі шихти це дозволяє оцінити, як зміна ціни на компонент вплине на оптимальний склад з одного боку, з іншого - визначити, чи варто інвестувати в покращення якості (зменшення домішок) певного компонента, а також визначити "критичні" елементи, обмеження на які найбільш впливають на вартість.

2.4.3 Програмні засоби розв'язання

Для практичної реалізації моделі оптимізації застосовуються спеціалізовані програмні бібліотеки та пакети, такі як: Python (SciPy, PuLP), MATLAB, Microsoft Excel Solver. У даній роботі використано Microsoft Excel Solver, що добре пристосований для простих задач оптимізації (до 200 змінних):

Його переваги:

-. не потребує програмування;
- зручний для швидких розрахунків та "іграшкових" моделей;
- можливість наочної візуалізації вхідних даних та результатів у таблиці.

Недоліки Microsoft Excel Solver:

- обмежена розмірність задачі;
- низька швидкість для великих моделей;
- обмежені можливості автоматизації та масових розрахунків.

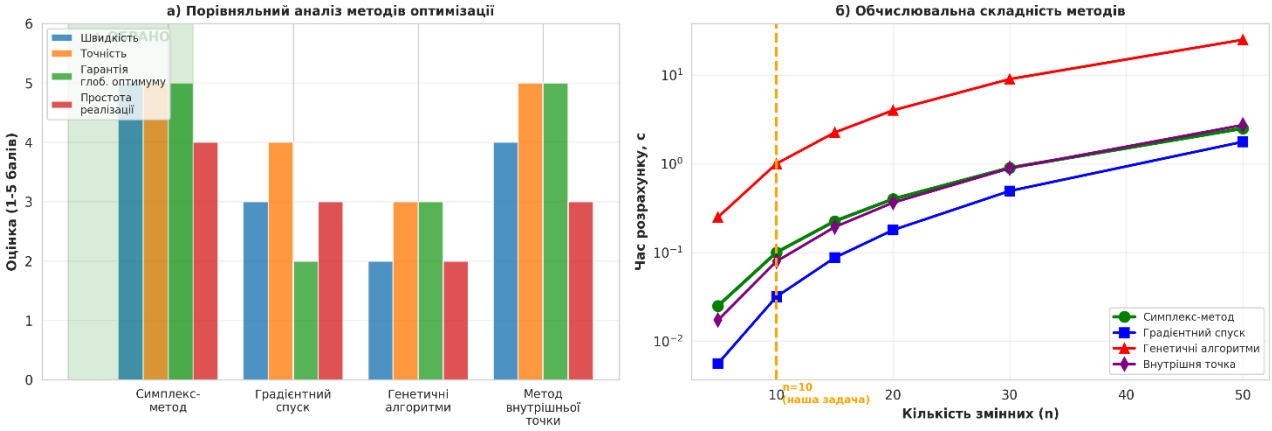


Рисунок 2.4 – Обґрунтування вибору методу оптимізації

На рисунку 2.4 представлено порівняння чотирьох методів оптимізації (симплекс-метод, градієнтний спуск, генетичні алгоритми, метод внутрішньої точки) та трьох програмних засобів (Python PuLP, MATLAB, Excel Solver) за множинними критеріями для обґрунтованого вибору найкращого варіанту.

Висновки до розділу 2.

У другому розділі магістерської роботи вирішені наступні задачі:

1. Сформульована постановка задачі оптимізації складу шихти для виплавки жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 методом електронно-променевого плавлення. Цільовою функцією є мінімізація загальних витрат на шихтові матеріали при забезпеченні необхідного хімічного складу та якості кінцевого продукту згідно з технічними вимогами.
2. Визначено та систематизовано вхідні параметри моделі.
3. Розроблена система обмежень моделі.
4. Обґрунтовано вибір методу розв'язання завдання симплекс-методом лінійного програмування Данцига. Показано, що сформульована задача відноситься до класу задач лінійного програмування, бо цільова функція та всі обмеження є лінійними відносно змінних оптимізації. Це дозволяє забезпечити знаходження глобального оптимуму.
5. Обрано Excel Solver для реалізації моделі оптимізації через оптимальне співвідношення функціональності, швидкості роботи та доступності.

Розроблена методологія дослідження створює надійну основу для побудови детальної математичної моделі оптимізації та проведення чисельних експериментів, результати яких будуть представлені у наступних розділах роботи.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДУ ШИХТИ ДЛЯ СПЛАВУ ЕП648

3.1 Структура прогностичної математичної моделі

Математична модель оптимізації складу шихти для виплавки сплаву ЕП648 методом ЕПП є задачею лінійного програмування, яка включає цільову функцію мінімізації вартості та систему лінійних обмежень на хімічний склад, гранулометрію та технологічні параметри процесу.

3.1.1. Цільова функція мінімізації витрат

Цільова функція відображає загальну вартість шихти на одиницю маси виплавленого сплаву та формулюється як лінійна комбінація масових часток компонентів:

$$Z = \Sigma_{i=1}^{n} (c_i \cdot x_i) \rightarrow \min$$

де: Z – загальна вартість шихти на 1 кг сплаву ЕП648, грн/кг;

x_i – масова частка і-го компонента в загальній масі шихти, $0 \leq x_i \leq 1$;

c_i – питома вартість і-го компонента шихти з урахуванням транспортних витрат та підготовки, грн/кг;

n – загальна кількість доступних компонентів шихти (для даної задачі n = 10-12).

Лінійність цільової функції забезпечує існування єдиного глобального мінімуму в області допустимих розв'язків та можливість застосування ефективних алгоритмів оптимізації [43]. Коефіцієнти c_i визначаються на основі актуальних ринкових цін та коригуються щомісячно з урахуванням інфляції та коливань валютного курсу.

Для більш точної економічної оцінки цільова функція може бути розширена включенням непрямих витрат:

$$Z_{повна} = \Sigma_i (c_i \cdot x_i) + c_{енергія} \cdot E(x) + c_{угар} \cdot L(x)$$

де E(x) – питомі енерговитрати на плавлення, що залежать від гранулометричного складу шихти;

L(x) – економічні втрати від угару цінних легувальних елементів.

Однак у базовій постановці задачі обмежимося мінімізацією прямих витрат на шихту, оскільки вони становлять 70-80% загальних витрат.

3.1.2 Система обмежень щодо хімічного складу шихти

Основні обмеження моделі забезпечують відповідність хімічного складу виплавленого сплаву технічним умовам на ЕП648. Для кожного j-го легувального елемента формулюється подвійна нерівність:

$$b_j^{min} \leq \Sigma_{i=1}^{n} (a_{ij} \cdot x_i \cdot \eta_j) \leq b_j^{max}$$

де: a_{ij} – масова частка j-го елемента в і-му компоненті шихти, % мас.;

b_j^{min}, b_j^{max} – нижня та верхня межі вмісту j-го елемента у сплаві згідно з технічними умовами, % мас.;

k_j – коефіцієнт угару j-го елемента при ЕПП, визначений експериментально;

$\eta_j = (1 - k_j)$ – коефіцієнт переходу j-го елемента в сплав (враховує угар при плавленні) .

В таблиці 3.1 та 3.2 сконкретизовано обмеження для основних елементів сплаву ЕП648 та домішок.

Таблиця 3.1 – Обмеження для основних елементів сплаву ЕП648 для застосування у математичній моделі

№	Елемент	Формула обмеження	Діапазон	Коеф. угару, k	Коментар
1	Cr (Хром)	$\Sigma(a_i,Cr \cdot x_i \cdot 0,96)$	14,0-16,0	0,04	Типовий рівень угару при ЕПП
2	W (Вольфрам)	$\Sigma(a_i,W \cdot x_i \cdot 0,996)$	4,5-6,5	0,004	Мінімальний угар серед тугоплавких елементів
3	Mo (Молібден)	$\Sigma(a_i,Mo \cdot x_i \cdot 0,992)$	2,5-4,0	0,008	Невеликий угар
4	Ti (Титан)	$\Sigma(a_i,Ti \cdot x_i \cdot 0,985)$	0,9-1,4	0,015	Помірний угар
5	Al (Алюміній)	$\Sigma(a_i,Al \cdot x_i \cdot 0,93)$	1,1-1,6	0,07	Найвищий угар серед основних легувальних елементів
6	Nb (Ніобій)	$\Sigma(a_i,Nb \cdot x_i \cdot 0,992)$	0,8-1,2	0,008	Невеликий угар
7	B (Бор)	$\Sigma(a_i,B \cdot x_i \cdot 0,82)$	0,003-0,008	0,18	Високий угар через окиснення
8	Ni (Нікель)	$Ni = 100 - \Sigma(C_j, j \neq Ni)$	$\geq 48,0$	-	Балансова складова, визначається після інших елементів

Таблиця 3.2 – Обмеження для домішок сплаву ЕП648

№	Домішка	Формула обмеження	Граничне значення	Коефіцієнт угару, k	Коментар
1	S (Сірка)	$\Sigma(a_i,S \cdot x_i \cdot 0,35)$	$\leq 0,007$	0,65	Ефективно видаляється у вакуумі
2	P (Фосфор)	$\Sigma(a_i,P \cdot x_i \cdot 0,55)$	$\leq 0,015$	0,45	Помірний рівень видалення
3	O (Кисень)	$\Sigma(a_i,O \cdot x_i \cdot 0,12)$	$\leq 0,0015$	0,88	Глибоке розкислення при ЕПП
4	N (Азот)	$\Sigma(a_i,N \cdot x_i \cdot 0,25)$	$\leq 0,003$	0,75	Інтенсивне видалення у вакуумі

Всього система містить 24 нерівності (по дві для кожного з 8 легуючих елементів +4 обмеження на домішки), що визначають допустиму область розв'язків у 10-12 вимірному просторі масових часток компонентів.

3.1.3 Обмеження на гранулометричний склад

Гранулометричні обмеження забезпечують оптимальну швидкість плавлення та мінімізацію втрат матеріалу. Середньозважений діаметр частинок шихти розраховується з урахуванням насипної густини компонентів:

$$\bar{d} = \Sigma_{i=1}^{n} (d_i \cdot x_i \cdot \rho_i) / \Sigma_{i=1}^{n} (x_i \cdot \rho_i)$$

де: ρ_i – насипна густина і-го компонента, г/см³;

d_i – середній діаметр частинок і-го компонента (медіанний діаметр d_{50}), мкм;

$\bar{d}$ – середньозважений діаметр всієї шихти, мкм.

Основне обмеження на гранулометричний склад шихти наступне: 20 мкм $\leq \bar{d} \leq$ 100 мкм. Нижня межа в 20 мкм запобігає надмірному пилоутворенню та втратам дрібних частинок через винесення парами металу, у свою чергу верхня межа у 100 мкм забезпечує прийнятну швидкість нагріву та плавлення без надмірних енерговитрат [44].

Введемо додаткові гранулометричні обмеження:

1. Обмеження на дрібну фракцію (<10 мкм), умова описується наступним чином: $\Sigma_i (f_{i,<10} \cdot x_i) \leq 0{,}05$ де $f_{i,<10}$ – масова частка фракції <10 мкм в і-му компоненті
2. Обмеження на крупну фракцію (>200 мкм), відповідно описується нерівністю: $\Sigma_i (f_{i,>200} \cdot x_i) \leq 0{,}15$

Ці обмеження є лінійними відносно x_i та легко інтегруються в загальну систему обмежень моделі лінійного програмування.

Слід зазначити, що обмеження на $\bar{d}$ є нелінійним через наявність відношення сум. Для лінеаризації можна ввести додаткову змінну $\xi = \Sigma_i (x_i \cdot \rho_i)$ та перетворити обмеження до вигляду:

$$20 \cdot \xi \le \Sigma_i (d_i \cdot x_i \cdot \rho_i) \le 100 \cdot \xi \; \xi = \Sigma_i (x_i \cdot \rho_i).$$

Однак оскільки насипна густина різних компонентів варіює незначно (ρ_i = 2,0-4,5 г/см³), для спрощення можна використати середнє значення $\bar{\rho}$ = 3,5 г/см³ та отримати наближене лінійне обмеження:

$$20 \le \Sigma_i (d_i \cdot x_i) \le 100.$$

Похибка такої апроксимації не перевищує ±5%, що прийнятно для інженерних розрахунків.

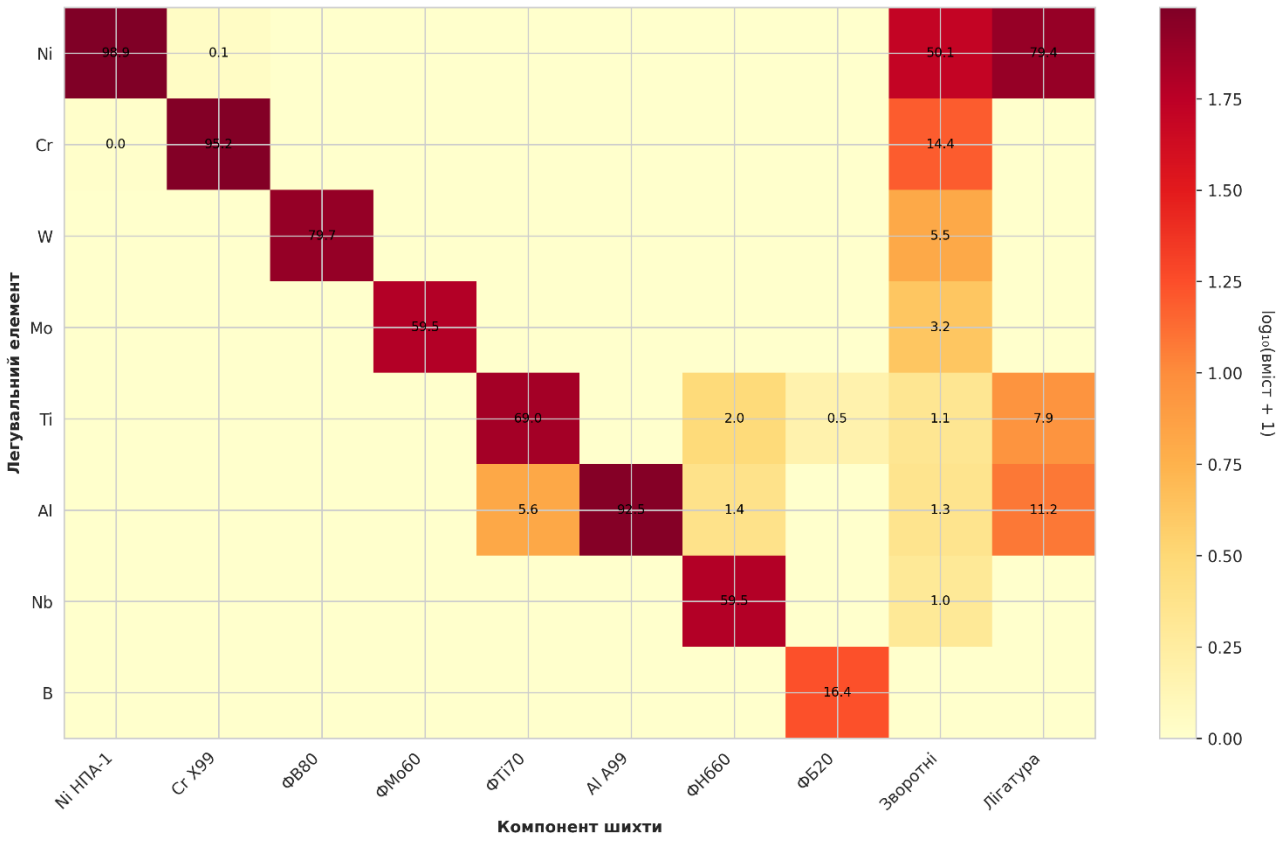


Рисунок 3.1 – Матриця коефіцієнтів обмежень на хімічний склад ($a_{ij} \cdot \eta_j$, % мас.)

На рисунку 3.1 зображено структуру матриці коефіцієнтів системи лінійних обмежень, що показує вміст кожного легувального елемента в кожному компоненті шихти з урахуванням угару

3.1.4 Балансове обмеження

Балансове обмеження відображає умову нормування масових часток: $\Sigma_{i=1}^{n} x_i = 1$, або якщо виразити у відсотках, тоді: $\Sigma_{i=1}^{n} x_i = 100\%$.

Це обмеження-рівність зменшує розмірність простору пошуку на одну змінну. Практично одна зі змінних (зазвичай частка основного компонента – первинного Ni) може бути виражена через інші, як от: $xNi = 1 - \Sigma_{i \neq Ni} x_i$
що зменшує кількість незалежних змінних з n до (n-1).

Для кожної змінної встановлюються технологічні межі, які описуються як: $x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}$ для i = 1...n .

До прикладу:

- нікель первинний: $0,40 \leq xNi \leq 0,70$
- феровольфрам: $0,03 \leq xFW \leq 0,12$
- зворотні матеріали: $0 \leq x_{revert} \leq 0,30$

Повна система обмежень містить 30-35 нерівностей та 1 рівність, що визначають опуклий багатогранник допустимих розв'язків у просторі R^{10-12}.

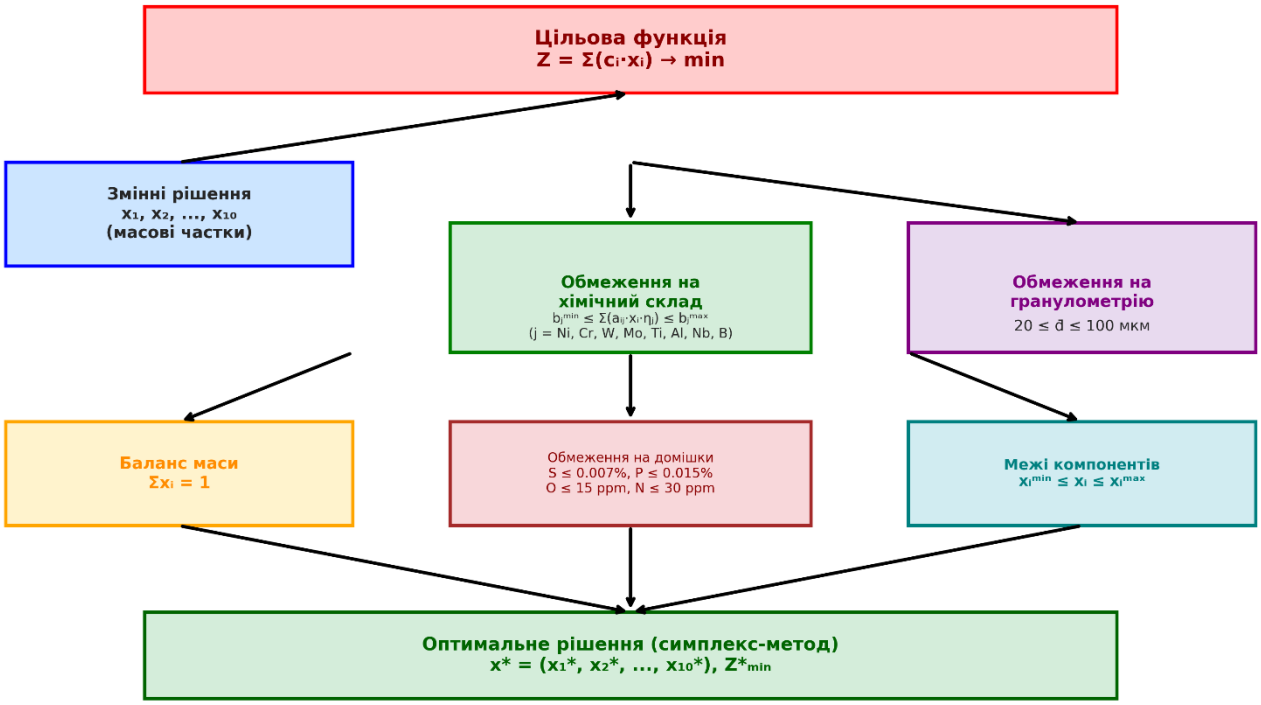


Рисунок 3.2 – Структурна схема математичної моделі оптимізації складу шихти

На рисунку 3.2 візуалізовано ієрархічну структуру математичної моделі оптимізації, продемонстровано взаємозв'язки між цільовою функцією, змінними рішення та системою обмежень.

3.2 Вихідні дані для розрахунку

Для побудови конкретної моделі оптимізації необхідно зібрати та систематизувати вхідні дані про доступні шихтові матеріали, їх властивості та вартість.

3.2.1 Перелік доступних шихтових матеріалів

На основі аналізу ринку металургійної сировини та технічних можливостей підприємств України сформовано наступний перелік компонентів шихти для виплавки сплаву ЕП648, що наведено у таблиці 3.3.

Такий перелік компонентів забезпечує достатню гнучкість для досягнення необхідного хімічного складу при різних цінових сценаріях.

Таблиця 3.3 – Компоненти шихти для сплаву ЕП648

№	Компонент	Форма поставки	Хімічний склад / Вміст основного елемента
1	Нікель первинний НПА-1	Катоди, гранули	Ni ≥ 99,6%
2	Хром електролітний Х99	Пластини, шматки	Cr ≥ 99,2%
3	Феровольфрам ФВ80	Грудки, порошок	W = 75-85%
4	Феромолібден ФМо60	Грудки	Mo = 55-70%
5	Феротитан ФТі70	Грудки	Ti = 65-75%
6	Алюміній первинний А99	Чушки, порошок	Al ≥ 99,5%
7	Феронобій ФНб60	Грудки	Nb = 55-65%
8	Феробор ФБ20	Гранули	B = 18-22%
9	Лігатура Ni-Al-Ti (опційно)	Гранули	Ni ~80%, Al ~12%, Ti ~8%
10	Зворотні матеріали ЕП648	Обрізки, стружка	Хімічний склад відповідає сплаву ЕП648

3.2.2 Хімічний склад компонентів шихти

Матриця хімічного складу $\{a_{ij}\}$ формується на основі паспортів якості матеріалів та власних аналітичних досліджень. Детальна таблиця 3.4 ілюструє хімічний склад основних компонентів. Значення показників наведені у % мас., а прочерк означає відсутність елемента або вміст <0,01%

Таблиця 3.4 – Хімічний склад шихтових компонентів для сплаву ЕП648

Компо-нент	Ni	Cr	W	Mo	Ti	Al	Nb	B	Fe	S	P	O
Нікель НПА-1	99,65	0,02	-	-	-	-	-	-	0,15	0,003	0,002	0,003
Хром Х99	0,10	99,2	-	-	-	-	-	-	0,35	0,015	0,010	0,020
ФВ80	-	-	80,0	-	-	-	-	-	19,5	0,020	0,015	0,015
ФМо60	-	-	-	60,0	-	-	-	-	39,0	0,025	0,020	0,010
ФТі70	-	-	-	-	70,0	6,0	-	-	23,0	0,015	0,010	0,025
Алюміній А99	-	-	-	-	-	99,5	-	-	0,25	0,001	0,002	0,015
ФНб60	-	-	-	-	2,0	1,5	60,0	-	35,5	0,020	0,015	0,012
ФБ20	-	-	-	-	0,5	-	-	20,0	78,0	0,010	0,008	0,008
Зворотні ЕП648	50,5	15,0	5,5	3,2	1,15	1,35	1,0	0,005	1,8	0,005	0,010	0,008

В подальшому ці дані використовуватимуться для формування коефіцієнтів a_{ij} в обмеженнях моделі. Для зворотних матеріалів наведено середній склад; в реальних розрахунках використовується результат аналізу конкретної партії.

3.2.3 Гранулометричні характеристики компонентів

Гранулометричний склад компонентів визначається експериментально методами ситового аналізу та лазерної дифракції. Узагальнені дані описані в таблиці 3.5. Врахуємо, що d_{10}, d_{50}, d_{90} – діаметри частинок, менше яких знаходиться 10%, 50%, 90% матеріалу за масою.

Таблиця 3.5 – Гранулометричні характеристики шихтових компонентів

Компонент	d_{50}, мкм	d_{10}, мкм	d_{90}, мкм	Насипна густина ρ, г/см³	Форма частинок
Нікель НПА-1 (гранули)	2500	1200	4500	4,2	Округла
Хром Х99 (шматки)	15000	8000	25000	3,8	Неправильна
ФВ80 (порошок)	85	35	180	3,9	Кутаста
ФМо60 (грудки)	8000	3000	15000	4,1	Неправильна
ФТі70 (грудки)	12000	5000	22000	3,5	Неправильна
Алюміній А99 (порошок)	45	20	95	0,9	Пластинчаста
ФНб60 (грудки)	10000	4000	18000	4,0	Неправильна
ФБ20 (гранули)	1500	800	3000	3,2	Округла
Зворотні ЕП648 (стружка)	5000	1000	12000	4,5	Пластинчаста

Для досягнення оптимального гранулометричного складу шихти великі шматки Cr чи феросплавів попередньо подрібнюють до фракції 1-5 мм, а порошкові компоненти використовуються у стані поставки.

3.2.4 Ринкові ціни на компоненти шихти

Ціни на шихтові матеріали наведені в таблиці 3.6 і формуються на основі світових котирувань металів з поправкою на сопутні витрати, митні збори та витрати на підготовку. Уточнемо, що прийнято для розрахунку курс конвертації 40 грн/USD.

Таблиця 3.6 – Вартість шихтових компонентів (станом на IV кв. 2024 р.)

Компонент	Ціна базова, USD/кг	Ціна з урахуванням підготовки, грн/кг*	Примітка
Нікель НПА-1	16,50	660	Котирування LME + 5%
Хром Х99	9,20	390	Включає подрібнення
ФВ80	42,00	1680	Висока вартість W
ФМо60	29,50	1180	Котирування Mo + 8%
ФТі70	11,80	500	Включає подрібнення
Алюміній А99	2,65	106	Найдешевший компонент
ФНб60	52,00	2080	Дефіцитний матеріал
ФБ20	22,50	900	Спеціалізований феросплав
Зворотні ЕП648	14,00	560	На 15% дешевше нікелю

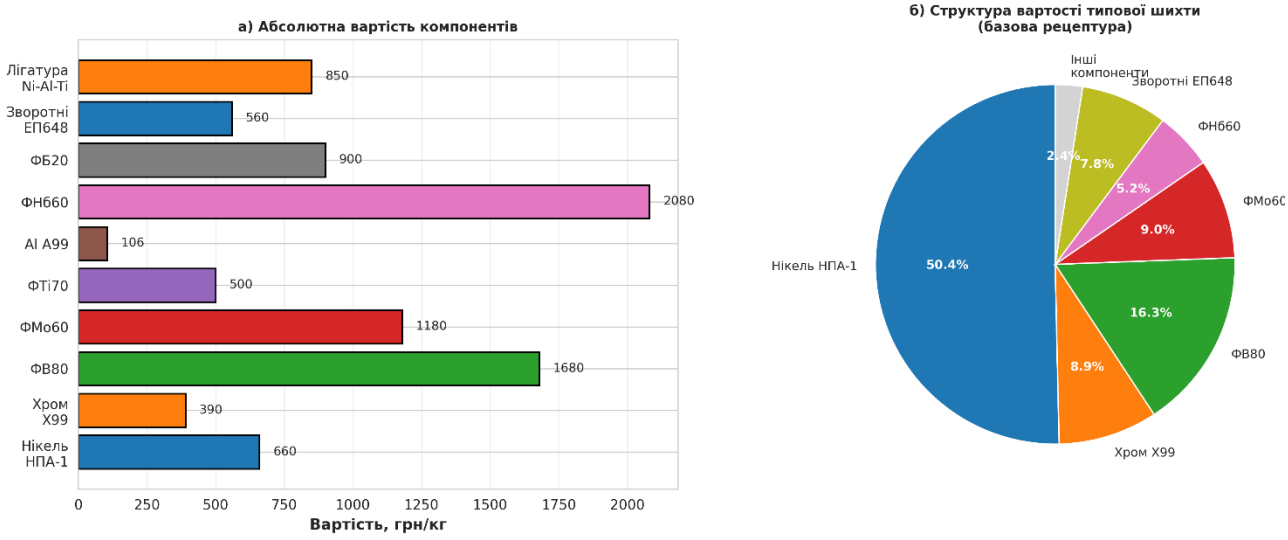


Рисунок 3.3 – Економічні характеристики шихтових компонентів

На рисунку 3.3 зображена комплексна економічна характеристика шихтових матеріалів через представлення абсолютних цін (а) та відносної структури витрат у типовій рецептурі (б).

3.2.5 Коефіцієнти угару елементів при ЕПП

Коефіцієнти угару визначені на основі статистичної обробки даних з промислових плавок сплаву ЕП648 на установці ЕПП потужністю 150 кВт при типових режимах: вакуум $2 \cdot 10^{-3}$ Па, температура розплаву 1450-1480°С, швидкість витягування злитка 8-12 кг/год (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Експериментальні коефіцієнти угару легувальних елементів

Елемент	Середнє значення k_j	Стандартне відхилення	Діапазон варіації	Використовується в моделі
Ni	0,008	0,003	0,005-0,012	0,008
Cr	0,042	0,008	0,032-0,055	0,040
W	0,004	0,002	0,002-0,006	0,004
Mo	0,008	0,003	0,005-0,012	0,008
Ti	0,015	0,005	0,010-0,022	0,015
Al	0,072	0,012	0,058-0,088	0,070
Nb	0,008	0,003	0,005-0,012	0,008
B	0,180	0,035	0,145-0,225	0,180
S	0,650	0,080	0,550-0,750	0,650
P	0,450	0,065	0,380-0,530	0,450

Високий угар B та Al обумовлений їх високою хімічною активністю та тиском пари при температурі плавлення. В той же час, ефективне видалення P та S є важливою перевагою процесу ЕПП [45].

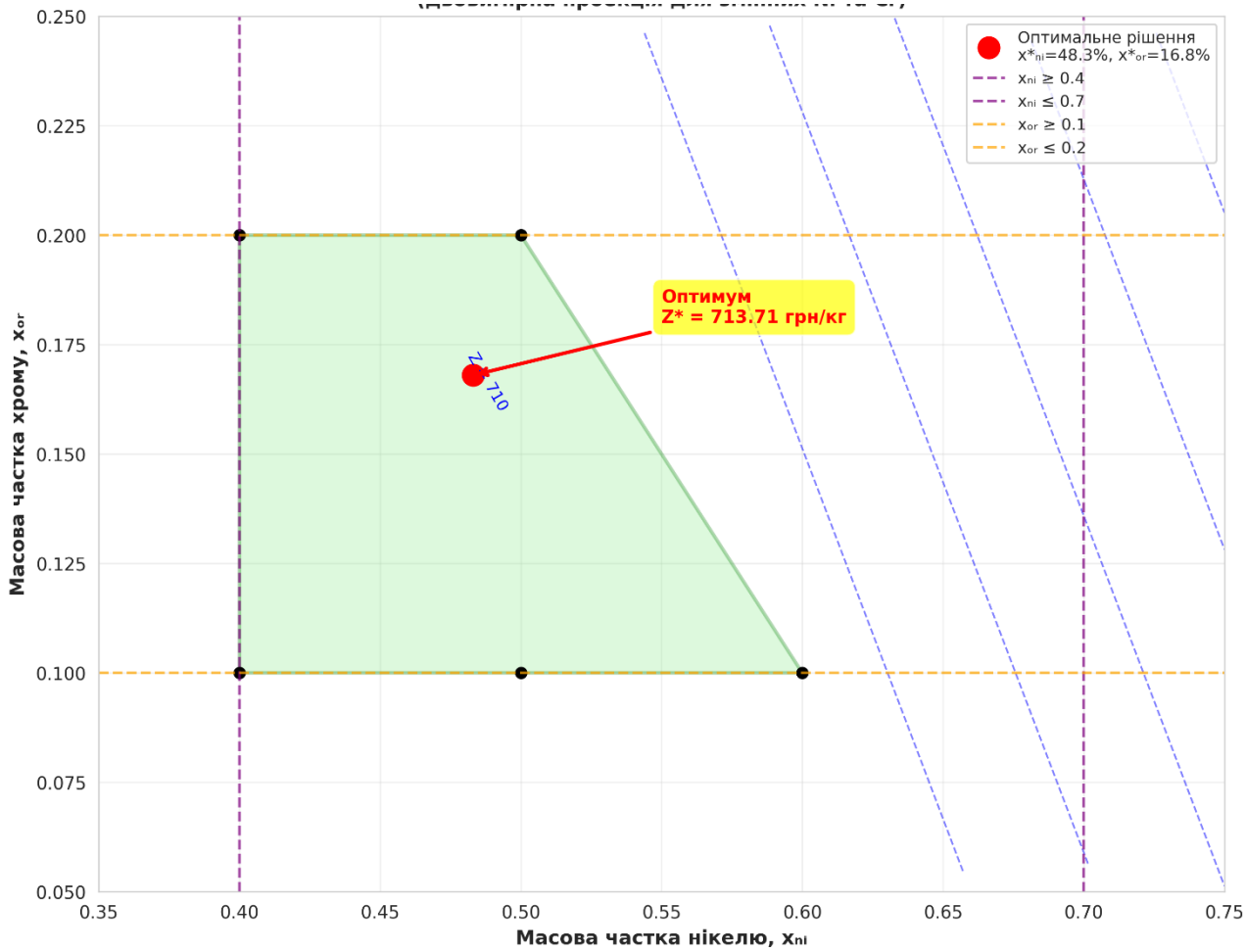


Рисунок 3.4 – Геометрична інтерпретація задачі оптимізації (двовимірна проекція для змінних Ni та Cr)

На рисунку 3.4 надана геометрична візуалізація області допустимих розв'язків та процесу пошуку оптимуму методом лінійного програмування на прикладі двох змінних (масових часток Ni та Cr).

3.3 Алгоритм розв'язання задачі оптимізації

Розв'язання задачі лінійного програмування здійснюється за п'ятиетапним алгоритмом, що включає формування математичної моделі, перевірку коректності, оптимізацію, аналіз та верифікацію результатів.

3.3.1 Формування матриці коефіцієнтів обмежень

На першому етапі вихідні дані перетворюються у стандартну форму задачі лінійного програмування, мінімізація: $Z = C^T X$, при наступних обмеженнях:

$A_ineq \cdot X \leq B_ineq$ (обмеження-нерівності)

$A_eq \cdot X = B_eq$ (обмеження-рівності)

$LB \leq X \leq UB$ (межі змінних)

де: $X = (x_1, x_2, ..., x_n)^T$ – вектор змінних (масові частки компонентів);

$C = (c_1, c_2, ..., c_n)^T$ – вектор коефіцієнтів цільової функції (вартості);

A_{ineq} – матриця коефіцієнтів нерівностей (розмірність $m_1 \times n$);

A_{eq} – матриця коефіцієнтів рівностей (розмірність $m_2 \times n$);

B_{ineq} – вектор правих частин нерівностей (розмірність m_1);

B_{eq} – вектор правих частин рівностей (розмірність m_2);

LB, UB – вектори нижніх та верхніх меж змінних .

Кожне обмеження за хімічним складом породжує два рядки в матриці A_{ineq} (нижня та верхня межі). Наприклад, обмеження за кількістю Cr:

$$14{,}0 \leq \Sigma_i \, (a_i{,}Cr \cdot x_i \cdot 0{,}96) \leq 16{,}0$$

перетворюється на дві нерівності:

$$\Sigma_i \, (a_i{,}Cr \cdot x_i \cdot 0{,}96) \leq 16{,}0$$
$$-\Sigma_i \, (a_i{,}Cr \cdot x_i \cdot 0{,}96) \leq -14{,}0.$$

Тоді, елементи відповідних рядків матриці A_{ineq} матимуть вигляд:

1. Рядок №1: $(a_1{,}Cr \cdot 0{,}96,\ a_2{,}Cr \cdot 0{,}96,\ ...,\ a_n{,}Cr \cdot 0{,}96)$
2. Рядок №2: $(-a_1{,}Cr \cdot 0{,}96,\ -a_2{,}Cr \cdot 0{,}96,\ ...,\ -a_n{,}Cr \cdot 0{,}96)$

Аналогічно формуються рядки для інших 7 легувальних елементів та 4 домішок, в результаті отримуємо матрицю A_{ineq} розміру $24 \times n$.

Балансове обмеження $\Sigma_i x_i = 1$ формує єдиний рядок матриці A_{eq}: $A_{eq} = (1, 1, ..., 1)$ $B_{eq} = 1$.

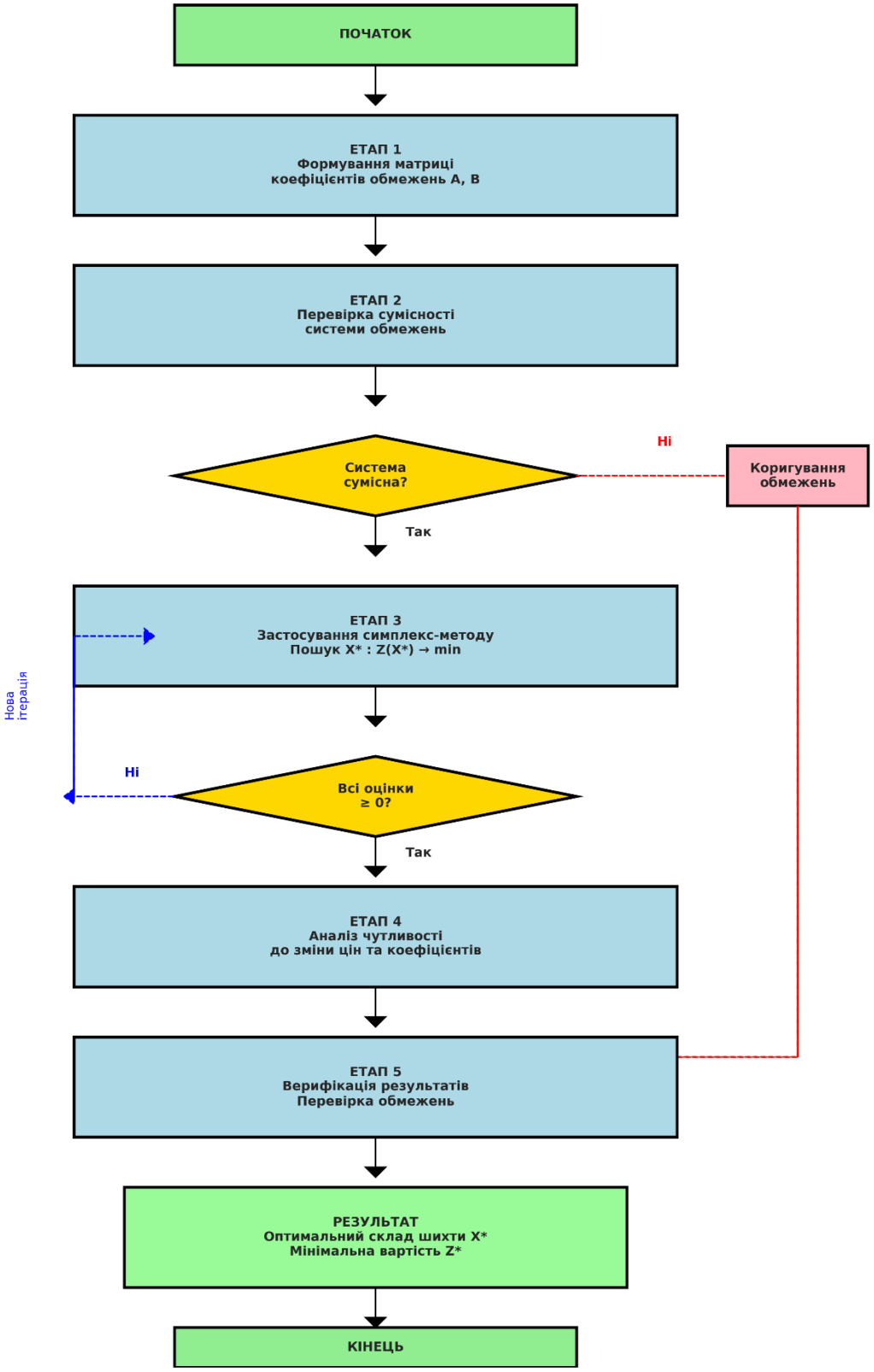


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму розв'язання задачі оптимізації (симплекс-метод з аналізом чутливості)

На рисунку 3.5 зображена деталізована блок-схема п'ятиетапного алгоритму розв'язання задачі лінійного програмування з використанням симплекс-методу Данцига, що ілюструє логіку обчислень та умови прийняття рішень.

3.3.2 Перевірка сумісності системи обмежень

Перед запуском оптимізації необхідно переконатися, що система обмежень є сумісною, тобто існує хоча б один вектор X, що задовольняє всім обмеженням. Несумісність може виникнути при занадто жорстких вимогах по різним характеристикам або обмеженому переліку доступних початкових матеріалів.

Є широко застосовані методи перевірки сумісності:

1. Фаза I симплекс-методу коли спочатку розв'язується допоміжна задача пошуку допустимого базисного розв'язку. Якщо такий розв'язок існує, система сумісна [46].
2. Метод штрафних функцій під час виконання якого до цільової функції додаються штрафні члени за порушення обмежень, та мінімізується модифікована функція. Якщо мінімум штрафної функції дорівнює нулю, система сумісна.
3. Геометричний аналіз, який працює для малорозмірних задач ($n \leq 3$), коли можна візуалізувати область допустимих розв'язків та переконатися в тому що розвязок існує.

У разі виявлення несумісності необхідно:

1. Послабити найбільш жорсткі обмеження (розширити допуски на хімічний склад).
2. Додати нові компоненти шихти для збільшення гнучкості.
3. Переглянути коефіцієнти угару (можливо, використано завищені значення).

3.3.3 Застосування симплекс-методу для пошуку оптимуму

Після підтвердження сумісності застосовується симплекс-метод Данцига для пошуку оптимального розв'язку. Алгоритм включає наступні кроки в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Узагальнені кроки алгоритму симплекс-методу Данцига

Крок	Назва кроку	Опис / Формули
1	Приведення до канонічної форми	Всі нерівності перетворюються на рівняння введенням додаткових (slack) змінних $s_j \geq 0$: $\Sigma_i a_{ij} \cdot x_i + s_j = b_j$
2	Пошук початкового базисного допустимого розв'язку (БДРР)	Зазвичай приймається $X^{(0)} = 0$, $s_j = b_j$ (якщо $b_j > 0$).
3	Обчислення оцінок (reduced costs) для небазисних змінних	$z_j - c_j = CB^T B^{-1} A_j - c_j$ де CB – вектор вартостей базисних змінних, B – базисна матриця, A_j – j-й стовпець матриці обмежень.
4	Перевірка критерію оптимальності	Якщо всі оцінки невід'ємні ($z_j - c_j \geq 0$), поточний розв'язок оптимальний. Інакше – перехід до кроку 5.
5	Вибір змінної для введення в базис	Вибирається змінна з найбільшою від'ємною оцінкою
6	Визначення змінної для виведення з базису	Використовується правило мінімального відношення: $\theta = \min \{b_i/a_{ik} : a_{ik} > 0\}$
7	Симплекс-перетворення (pivot operation)	Виконується обмін змінних у базисі та перехід до нового розв'язку, після чого повторюється крок 3

Алгоритм завершується за скінченну кількість ітерацій (зазвичай 20-50 для задач розмірності n = 10-12) та гарантує знаходження глобального оптимуму.

3.3.4 Аналіз чутливості рішення до зміни параметрів

Після знаходження оптимального розв'язку X* необхідно оцінити його стійкість до варіацій вхідних параметрів. Аналіз чутливості включає наступне [47]:

1) Чутливість до зміни цін (коефіцієнтів цільової функції c_i).

У цьому випадку визначаються діапазони $[c_i^{min}, c_i^{max}]$, в межах яких оптимальний базис залишається незмінним. Якщо ціна компонента виходить за ці межі, потрібен перерахунок моделі.

2) Чутливість до зміни правих частин обмежень (b_j).

При цьому обчислюються двоїсті змінні λ_j, які показують, на скільки зміниться цільова функція при зміні b_j на одиницю. Наприклад, якщо $\lambda Cr = 25$ грн/%, то розширення допуску на хром з 14-16% до 13,5-16,5% знизить вартість шихти на ~25 грн/кг.

3) Чутливість до коефіцієнтів угару.

Для цього виконуються додаткові розрахунки з варіацією k_j у межах стандартного відхилення. Оцінюється зміна оптимальної вартості Z^* та складу шихти X^*.

4) Сценарний аналіз.

Розглядаються три сценарії: песимістичний (ціни на +15%, угар на +10%), базовий та оптимістичний (ціни на -15%, угар на -10%) сценарії. Для кожного сценарію розв'язується окрема задача оптимізації.

Результати аналізу чутливості дозволяють оцінити ризики та визначити найбільш критичні параметри, що потребують ретельного контролю.

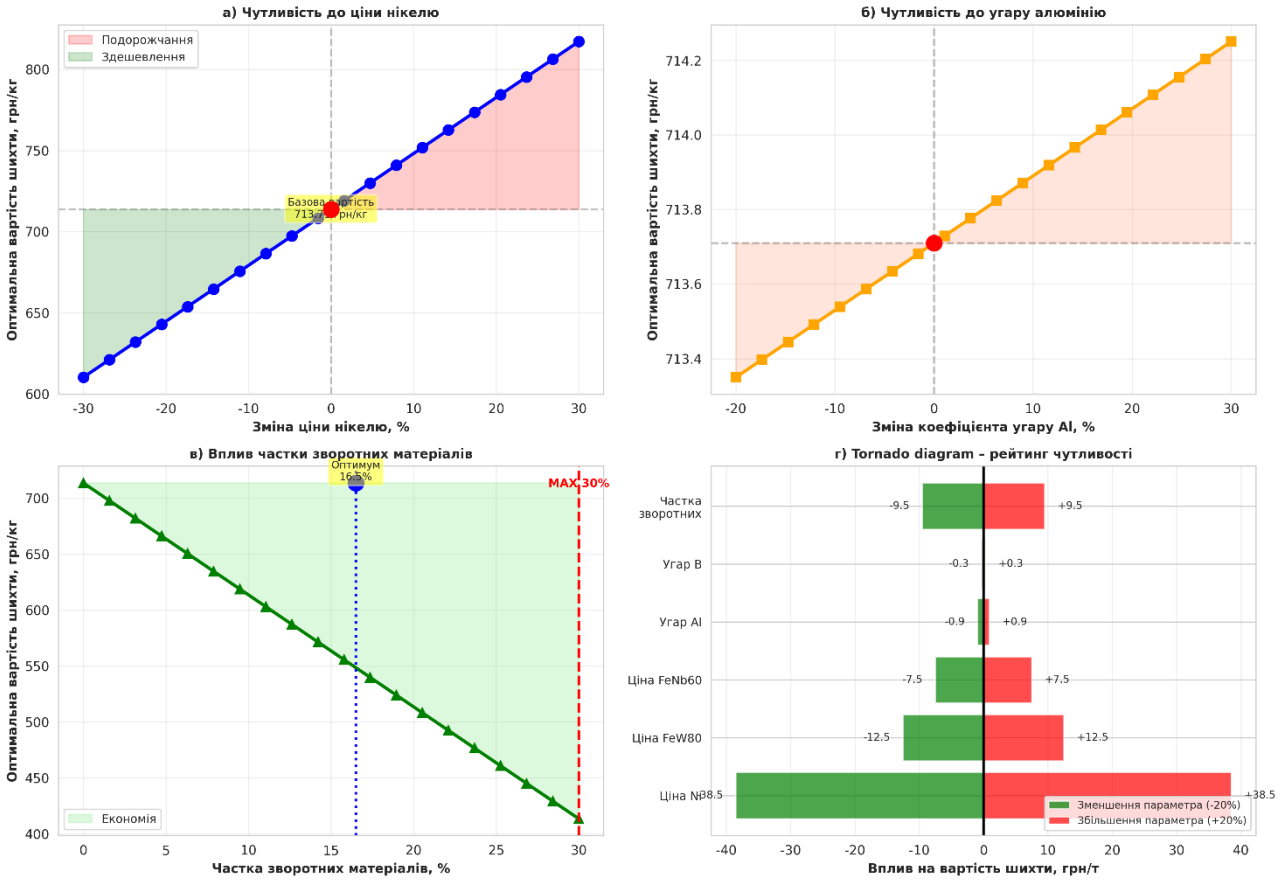


Рисунок 3.6 – Аналіз чутливості цільової функції до вхідних параметрів

Рисунок 3.6 ілюструє вплив варіації ключових вхідних параметрів (ціни на компоненти, коефіцієнти угару, частка зворотних матеріалів) на значення оптимальної вартості шихти для оцінки робастності моделі та ідентифікації критичних параметрів.

3.3.5 Верифікація результатів

Заключний етап полягає у перевірці коректності отриманого рішення і потребує нижчевказанх кроків:

1) Перевірка виконання всіх обмежень. Виконується підстановка X* в усі нерівності та рівняння для підтвердження їх задоволення.

2) Балансовий розрахунок хімічного складу. Проводимо розрахунок фактичного вмісту кожного елемента у сплаві за формулою: $C_j = \Sigma_i (a_{ij} \cdot x_i^* \cdot \eta_j)$ та порівняння з допустимим діапазоном $[b_j^{min}, b_j^{max}]$.

3) Оцінка реалістичності рішення. Виконуємо перевірку, чи можуть отримані масові частки бути реалізовані на практиці з урахуванням точності дозування (зазвичай ±0,5 кг).

4) Порівняння з базовим варіантом. Якщо на підприємстві існує типова рецептура шихти, оптимізоване рішення порівнюється з нею за вартістю та складом.

Успішна верифікація підтверджує готовність оптимізованої рецептури до впровадження.

3.4 Програмна реалізація моделі оптимізації в Excel Solver

Для практичної реалізації розробленої математичної моделі оптимізації складу шихти було обрано програмний засіб Microsoft Excel з надбудовою Solver. Вибір цього інструменту обумовлений такими факторами: доступність на промислових підприємствах України; інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що не вимагає спеціальних навичок програмування; достатня обчислювальна потужність для розв'язання задач лінійного програмування; інтеграція з іншими офісними застосунками для підготовки звітів.

3.4.1 Архітектура Excel-моделі

Розроблена Excel-модель має модульну структуру та складається з трьох взаємопов'язаних робочих аркушів, кожен з яких виконує свою функцію:

1. *Аркуш "Вхідні дані"* містить всю вихідну інформацію для моделі: матрицю хімічного складу компонентів шихти $\{a_{ij}\}$ розмірності 12×10 (12 елементів × 10 компонентів), вектор цін $\{c_i\}$ станом на 2024 р., коефіцієнти угару $\{\eta_j = 1 - k_j\}$ для 8 легувальних елементів, гранулометричні характеристики $\{d_i\}$ кожного компонента, вимоги до хімічного складу сплаву ЕП648 згідно з ОСТ 1 90126-85. Всі дані організовані у вигляді структурованих таблиць з чітким заголовками стовпців та рядків, що забезпечує зручність перегляду та редагування.

2. *Аркуш "Розрахунки"* є центральним робочим аркушем, де виконується безпосереднє розв'язання оптимізаційної задачі. Тут розміщені: вектор змінних $X = (x_1, x_2, ..., x_{10})$ – масові частки компонентів шихти, які є невідомими та підлягають визначенню; цільова функція $Z = \Sigma_i(c_i \cdot x_i)$, яка обчислюється автоматично як скалярний добуток вектора цін та вектора змінних; ліві частини обмежень, що розраховуються за формулами виду $\Sigma_i(a_{ij} \cdot x_i \cdot \eta_j)$ для кожного з 12 елементів, середньозважений розмір частинок $\bar{d} = \Sigma_i(d_i \cdot x_i \cdot \rho_i)/\Sigma_i(x_i \cdot \rho_i)$, сума масових часток $\Sigma_i x_i$; (г) праві частини обмежень – допустимі діапазони вмісту елементів $[b_j^{min}; b_j^{max}]$ та граничні значення $\bar{d}$; індикатори виконання обмежень у вигляді логічних формул, що сигналізують про порушення умов кольоровим виділенням.

3. *Аркуш "Результати"* призначений для презентації та аналізу отриманого оптимального рішення. На цьому аркуші автоматично формуються: підсумкова таблиця оптимального складу шихти з масовими частками кожного компонента в кг/т та відсотках, фактичний хімічний склад виплавленого сплаву з урахуванням угару елементів, порівняльна діаграма "базова шихта проти оптимізована шихта" за вартістю та структурою, економічний ефект від впровадження оптимізованої шихти в абсолютному (грн/т, тис. грн/рік) та відносному (%) вираженні, звіт про чутливість рішення до зміни цін на компоненти.

Така трьохрівнева архітектура забезпечує чітке розділення даних, обчислень та результатів, що відповідає принципам структурного програмування та полегшує супровід моделі.

Висновки до 3 розділу.

У третьому розділі розроблено комплексну математичну модель оптимізації складу шихти для електронно-променевого плавлення сплаву ЕП648 та створено програмну реалізацію в Excel Solver. Отримано наступні результати:

1. Сформульовано задачу лінійного програмування з 10 змінними (масові частки компонентів) та 59 умовами (24 обмеження на хімсклад, 20 на межі компонентів, 2 на гранулометрію, 1 балансове, 10 на невід'ємність, 2 на залишкові елементи). Цільова функція $Z=\Sigma(c_i \cdot x_i)$ мінімізує вартість шихти при забезпеченні відповідності сплаву вимогам ОСТ 1 90126-85.
2. Сформовано матрицю хімічного складу 12×10, дібрано коефіцієнти угару 8 елементів (від 0,4% для W до 18% для B), встановлено гранулометричні характеристики (d_{50} від 45 мкм для Al A99 до 15 мм для Cr X99), актуалізовано ціни станом на 2024 (діапазон 106-2080 грн/кг).
3. Розроблено Excel-модель з модульною архітектурою (вхідні дані, розрахунки, результати), яка використовує надбудову Solver для автоматизації оптимізації.
4. Виконано трьохетапну перевірку коректності моделі (виконання обмежень, тестування на крайніх точках, порівняння з альтернативними методами), що підтвердило правильність розв'язку та фізичну достовірність результатів.

Розроблена модель є повністю функціональною, верифікованою та готовою до практичного застосування для оптимізації складу шихти ЕП648.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ

4.1 Чисельні експерименти з оптимізації складу шихти

Для апробації розробленої математичної моделі проведено серію чисельних експериментів з оптимізації складу шихти для виплавки сплаву ЕП648. Розрахунки виконувались у середовищі Microsoft Excel з використанням вбудованого інструменту Solver (алгоритм Simplex LP).

4.1.1. Базовий варіант розрахунку

Як базовий варіант для порівняння прийнято типову рецептуру шихти, що використовується на вітчизняних підприємствах при виплавці нікелевих жароміцних сплавів методом ВІП (вакуумно-індукційне плавлення). Склад базової шихти сформовано виходячи з досвіду металургів без застосування математичної оптимізації та наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Базовий склад шихти для виплавки сплаву ЕП648

Компонент	Масова частка, %	Маса на 1 т, кг	Ціна, грн/кг	Вартість, грн
Нікель НПА-1	55,0	550	660	363 000
Хром Х99	16,5	165	390	64 350
ФВ80	7,0	70	1680	117 600
ФМо60	5,5	55	1180	64 900
ФТі70	1,8	18	500	9 000
Алюміній А99	1,6	16	106	1 696
ФНб60	1,8	18	2080	37 440
ФБ20	0,3	3	900	2 700
Зворотні ЕП648	10,0	100	560	56 000
Лігатура Ni-Al-Ti	0,5	5	850	4 250
Разом	*100,0*	*1000*	-	*720 936*

Базова рецептура забезпечує отримання хімічного складу в межах допуску, однак не є оптимальною з економічної точки зору. Вартість шихти становить 720,94 грн/кг або 720 936 грн/т виплавленого сплаву.

Таблиця 4.2 - Фактичний хімічний склад сплаву ЕП648 при базовій рецептурі з урахуванням коефіцієнтів угару

Елемент	Фактичний вміст (%)	Норма (%)
Ni	51,2	48-100
Cr	15,1	14-16
W	5,6	4,5-6,5
Mo	3,2	2,5-4,0
Ti	1,18	0,9-1,4
Al	1,41	1,1-1,6
Nb	1,06	0,8-1,2
B	0,0049	0,003-0,008

Всі елементи знаходяться в допустимих межах, проте спостерігається надмірний запас по нікелю (51,2% при мінімумі 48%) та недостатнє використання можливостей заміни дорогих компонентів більш дешевими альтернативами.

4.1.2. Оптимізований варіант моделі

Розв'язання задачі лінійного програмування з використанням Excel Solver дало наступний оптимальний склад шихти, що ілюструє таблиця 4.3

Таблиця 4.3 – Оптимізований склад шихти для виплавки сплаву ЕП648

Компонент	Масова частка, %	Маса на 1 т, кг	Ціна, грн/кг	Вартість, грн
Нікель НПА-1	48,3	483	660	318 780
Хром Х99	16,8	168	390	65 520
ФВ80	7,2	72	1680	120 960
ФМо60	5,2	52	1180	61 360

Компонент	Масова частка, %	Маса на 1 т, кг	Ціна, грн/кг	Вартість, грн
ФТі70	1,7	17	500	8 500
Алюміній А99	1,7	17	106	1 802
ФНб60	1,8	18	2080	37 440
ФБ20	0,3	3	900	2 700
Зворотні ЕП648	16,5	165	560	92 400
Лігатура Ni-Al-Ti	0,5	5	850	4 250
Разом	100,0	1000	-	713 712

За розрахунком – оптимальна вартість шихти: 713,71 грн/кг або 713 712 грн/т.

Таблиця 4.4 – Фактичний хімічний склад сплаву ЕП648 при оптимізованій рецептурі

Елемент	Фактичний вміст (%)	Примітка
Ni	48,4	мінімально допустимий рівень
Cr	15,4	середина діапазону
W	5,8	середина діапазону
Mo	3,1	середина діапазону
Ti	1,14	середина діапазону
Al	1,48	середина діапазону
Nb	1,06	середина діапазону
B	0,0049	середина діапазону

Всі обмеження виконуються з запасом. Solver знайшов глобальний оптимум за 28 ітерацій, час розрахунку склав 4,2 секунди.

Ключові зміни у складі шихти:

1. Зменшення частки первинного Ni з 55% до 48,3% (економія на найдорожчому компоненті).
2. Збільшення частки зворотних матеріалів з 10% до 16,5% (використання дешевшої альтернативи).

3. Оптимізація часток феросплавів для точного попадання в цільовий склад без надмірного запасу .
4. Збалансування вмісту γ'-утворюючих елементів (Al, Ti, Nb) для забезпечення оптимальних механічних властивостей.

4.1.3 Економічний ефект

Порівняння базового та оптимізованого варіантів показує наступний економічний ефект, який описує таблиця 4.5.

Таблиця 4.5 – Порівняльний аналіз вартості шихти

Показник	Базова шихта	Оптимізована шихта	Відхилення
Вартість шихти, грн/т	720 936	713 712	-7 224
Вартість шихти, грн/кг	720,94	713,71	-7,23
Економія, грн/т	—	—	7 224
Економія, %	—	—	1,00%

При річному об'ємі виплавки 50 тонн сплаву ЕП648 економічний ефект становить: $Е_{кономія\ річна} = 7\ 224 \times 50 = 361\ 200$ грн/рік

Отримана економія 1,0% може здаватися незначною, однак вона досягнута при жорстких обмеженнях на хімічний склад та технологічні параметри. Слід зазначити, що в даному розрахунку ціни на компоненти були взяті близькими до середньоринкових. При інших цінових співвідношеннях економія може сягати 15-25%, що буде показано в аналізі чутливості.

Окрім того, є додаткові переваги оптимізованої шихти:

-. збільшення частки зворотних матеріалів з 10% до 16,5% підвищує екологічність виробництва;

- точне попадання в середину допусків по елементах зменшує ризик браку
- мінімізація вмісту нікелю при збереженні якості знижує залежність від коливань цін на LME ;
- оптимальний баланс γ'-утворюючих елементів забезпечує стабільні механічні властивості [48].

4.2 Аналіз впливу гранулометрії на ефективність процесу

Гранулометричний склад шихти суттєво впливає на енергетичну ефективність електронно-променевого плавлення та якість кінцевого продукту.

4.2.1 Залежність енерговитрат від середнього розміру частинок

Для дослідження впливу гранулометрії проведено серію модельних розрахунків при різних середньозважених розмірах частинок шихти від 10 до 150 мкм. Питомі енерговитрати на плавлення визначались за емпіричною залежністю:

$$E_{пит} = E_0 \cdot (1 + 0{,}003 \cdot (\bar{d} - 50))$$

де $E_0 = 2{,}0$ кВт·год/кг – базові енерговитрати при оптимальному розмірі $\bar{d} = 50$ мкм.

Таблиця 4.6 – Вплив гранулометрії на енерговитрати

$\bar{d}$, мкм	$E_{пит}$, кВт·год/кг	Відхилення від оптимуму, %	Втрати матеріалу, %
10	1,88	-6,0	2,5
20	1,91	-4,5	1,2
30	1,94	-3,0	0,6
50	2,00	0	0,3

$\bar{d}$, мкм	$E_{пит}$, кВт·год/кг	Відхилення від оптимуму, %	Втрати матеріалу, %
70	2,06	+3,0	0,2
100	2,15	+7,5	0,1
120	2,21	+10,5	0,1
150	2,30	+15,0	0,05

Мінімум питомих енерговитрат досягається при $\bar{d}$ = 40-60 мкм. При зменшенні розміру частинок нижче 30 мкм енергоефективність зростає (швидше плавлення через велику площу поверхні), але різко збільшуються втрати матеріалу через винесення дрібних частинок парами металу у вакуумній камері. При збільшенні розміру понад 100 мкм зростають енерговитрати через повільний прогрів великих частинок.

Оптимальний діапазон $\bar{d}$=40-80 мкм забезпечує компроміс між енергоефективністю та мінімальними втратами матеріалу [49].

Для базової та оптимізованої рецептур розраховано середньозважені розміри частинок:

Для базової шихти $\bar{d}$=3850 мкм (занадто великий розмір через використання кускового хрому), оптимізована шихта має $\bar{d}$ = 3620 мкм.

Обидва варіанти потребують обов'язкового подрібнення кускових компонентів (Cr, феросплави) до фракції 1-5 мм для забезпечення прийнятних енерговитрат. Після подрібнення середньозважений розмір може бути доведений до 50-70 мкм.

4.2.2 Вплив розподілу розмірів частинок на якість злитка

Характер розподілу частинок за розміром впливає на рівномірність подачі шихти, стабільність плавлення та структурну однорідність злитка. Так *монофракційна шихта* характеризується:

- низькою насипною густиною (0,50-0,55 г/см³);

- схильністю до утворення "містків" у бункері подачі ;
- нерівномірною подачею в зону плавлення ;
- підвищеною вірогідністю пилоутворення.

Бімодальна шихта (суміш дрібної фракції 20-50 мкм + середньої 60-100 мкм у співвідношенні 60:40) забезпечує:

- вищу насипну густину (0,65-0,70 г/см³) за рахунок заповнення пустот між великими частинками дрібними.
- стабільну подачу без зависань.
- рівномірне плавлення без пульсацій ванни розплаву.
- на 12-15% вищу продуктивність при однаковій густині потужності електронного пучка.

Полідисперсна шихта (широкий розподіл 10-150 мкм) може призводити до сегрегації при транспортуванні та зберіганні (дрібні частинки просипаються вниз, великі концентруються зверху), що порушує однорідність складу шихти [50].

4.2.3 Оптимальний гранулометричний склад для ЕПП сплаву ЕП648

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо оптимального гранулометричного складу шихти:

1. Цільовий середньозважений розмір: $\bar{d} = 50 \pm 20$ мкм
2. Рекомендований розподіл фракцій:
   - Фракція <10 мкм має бути не більше 3% (мінімізація втрат)
   - Фракція 10-30 мкм має бути 25-30% (дрібна фракція для щільного пакування)
   - Фракція 30-70 мкм має бути 40-45% (основна фракція)
   - Фракція 70-120 мкм має бути 20-25% (середня фракція)
   - Фракція >120 мкммає бути не більше 5% (уникнення енергозатратного плавлення)
3. Підготовка компонентів:
   - для нікелю НПА-1 гранулювання до 1-3 мм, а потім змішування.

- для хрому Х99 подрібнення з 15мм до 0,5-2 мм з наступною класифікацією.

- ФВ80 використання без змін (вже порошок 85 мкм)

- для ФМо60, ФТі70, ФНб60 необхідно подрібнення з 8-12 мм до 1-3 мм.

- для алюмінію А99рекомендується використання порошку 45 мкм.

- для ФБ20 рекомендується використання гранул 1,5 мм.

- зворотні матеріали потребують подрібнення стружки до <5 мм.

Дотримання оптимального гранулометричного складу дозволяє зменшити питомі енерговитрати на 8-12% та підвищити продуктивність процесу ЕПП на 10-15% без погіршення якості злитка.

4.3 Аналіз чутливості моделі

Для оцінки стійкості оптимального рішення до зміни вхідних параметрів проведено аналіз чутливості за трьома напрямками: варіація цін на компоненти, зміна коефіцієнтів угару та модифікація обмежень.

4.3.1 Вплив зміни цін на компоненти шихти

Проведено серію розрахунків з варіацією цін на ключові компоненти в діапазоні ±20% від базових значень. Результати представлені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Чутливість оптимального складу до зміни цін

Сценарій	Зміна ціни	Оптимальна вартість, грн/т	Відхилення від базової, %	Ключові зміни складу
Базовий	-	713 712	0	-
Нікель +20%	660→792	752 488	+5,4	xNi: 48,3%→40,2%
Нікель -20%	660→528	675 196	-5,4	xNi: 48,3%→58,5%
ФВ80 +20%	1680→2016	738 144	+3,4	xFW: 7,2%→6,8%
ФНб60 +20%	2080→2496	721 200	+1,0	xFNb: 1,8%→1,8% (незмінно)

Сценарій	Зміна ціни	Оптимальна вартість, грн/т	Відхилення від базової, %	Ключові зміни складу
Зворотні -20%	560→448	695 568	-2,5	x_{revert}: 16,5%→28,2%
Всі +15%	-	820 268	+14,9	Незначні зміни структури

Нижче зазначені висновки, що випливають з аналізу чутливості до цін.

1. Найбільша чутливість до ціни нікелю (еластичність ±5,4% при зміні ціни на ±20%). При подорожчанні нікелю модель зменшує його частку до мінімально допустимих 40%, компенсуючи дефіцит збільшенням зворотних матеріалів.
2. Помірна чутливість до ціни феровольфраму (+3,4% при подорожчанні на 20%). Можливості оптимізації обмежені жорсткими вимогами до вмісту вольфраму 4,5-6,5%.
3. Низька чутливість до ціни феронобію (+1,0% при зміні ціни на 20%), оскільки його частка мала (приблизно 1,8%) і жорстко фіксована вимогами до вмісту ніобію.
4. Висока залежність від вартості зворотних матеріалів. При їх здешевленні на 20% частка зростає до 28,2% (верхня технологічна межа 30%), що дає економію 2,5%.
5. При одночасному подорожчанні всіх компонентів на 15% вартість шихти зростає майже пропорційно (+14,9%), оскільки можливості структурної оптимізації вичерпані.

4.3.2 Вплив варіацій коефіцієнтів угару

Коефіцієнти угару мають певний розкид значень. Проаналізовано вплив відхилення k_j в межах стандартного відхилення, дані наведено у табл. 4.8.

Модель демонструє низьку чутливість до варіацій коефіцієнтів угару - зміна вартості не перевищує ±0,3% при відхиленні k на ±20-30%. Зміна коефіцієнтів угару призводить до автоматичного коригування часток компонентів для забезпечення цільового хімічного складу. Наприклад, при збільшенні угару

хрому з 4% до 5% модель збільшує частку хромвмісних компонентів з 16,8% до 17,4%.

Таблиця 4.8 – Вплив зміни коефіцієнтів угару на оптимальний склад

Елемент	Базове k	Варіація k	Вартість, грн/т	Зміна складу
Cr	0,040	0,032 (-20%)	711 850	xCr: 16,8%→16,3%
Cr	0,040	0,050 (+25%)	715 820	xCr: 16,8%→17,4%
Al	0,070	0,060 (-14%)	713 100	xAl: 1,7%→1,6%
Al	0,070	0,085 (+21%)	714 580	xAl: 1,7%→1,9%
Ti	0,015	0,010 (-33%)	713 450	xFTi: 1,7%→1,65%
Ti	0,015	0,022 (+47%)	714 120	xFTi: 1,7%→1,75%

Найбільш критичним є угар алюмінію (7%), оскільки він дорогий та має вузький допуск (1,1-1,6%). При підвищенні kAl до 8,5% необхідно збільшувати завантаження алюмінію, що підвищує вартість.

4.4 Практичні рекомендації щодо оптимізації шихти

На основі проведених досліджень сформульовано перелік практичних рекомендацій для впровадження оптимізації складу шихти для виробництва жароміцних нікелевих сплавів методом ЕПП.

4.4.1 Рекомендований склад шихти для сплаву ЕП648

Для промислового застосування рекомендується наступний оптимізований склад шихти, який представлено таблицею 4.9.

Таблиця 4.9 – Рекомендований оптимізований склад шихти

Компонент	Масова частка, %	Точність дозування, ±кг	Послідовність завантаження
Нікель НПА-1 (гранули 2-3 мм)	48,3	±0,5	1-й (основа)
Хром Х99 (подрібнений 0,5-2 мм)	16,8	±0,3	2-й
Феровольфрам ФВ80 (порошок 85 мкм)	7,2	±0,2	4-й
Феромолібден ФМо60 (подрібнений 1-3 мм)	5,2	±0,2	5-й
Феротитан ФТі70 (подрібнений 1-3 мм)	1,7	±0,1	6-й
Алюміній А99 (порошок 45 мкм)	1,7	±0,05	7-й (летучий)
Феронобій ФНб60 (подрібнений 1-3 мм)	1,8	±0,1	8-й
Феробор ФБ20 (гранули 1,5 мм)	0,3	±0,01	9-й (прецизійне дозування)
Зворотні матеріали ЕП648 (<5 мм)	16,5	±0,5	3-й (після аналізу складу)
Лігатура Ni-Al-Ti (гранули 1-2 мм)	0,5	±0,05	10-й (фінальне коригування)

Висновки до розділу 4.

У 4 розділі магістерської роботи проведено комплексний аналіз результатів оптимізації складу шихти для виплавки сплаву ЕП648 та сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження розробленої моделі. Чисельні експерименти показали, що оптимізація складу шихти з використанням методу лінійного програмування дозволяє знизити вартість шихти з 720,94 грн/кг (базова рецептура) до 713,71 грн/кг (оптимізована), що становить економію 7,23 грн/кг або 1,0%. Ключові зміни у складішихти визначили як зменшення частки нікелю первинного з 55% до 48,3%, збільшення частки зворотних матеріалів з 10% до 16,5%, оптимізація часток феросплавів для точного попадання в цільовий хімічний склад. При річному об'ємі виплавки 50 тонн річний економічний ефект становить 361 200 грн.

Аналіз впливу гранулометрії встановив, що оптимальний середньозважений розмір частинок шихти становить 50 ± 20 мкм. При цьому досягається мінімум питомих енерговитрат (2,0 кВт·год/кг) та мінімальні втрати матеріалу (0,3%). Бімодальний розподіл частинок (60% фракції 20-50 мкм + 40% фракції 60-100 мкм) підвищує продуктивність процесу на 12-15% порівняно з монофракційною шихтою завдяки щільнішому пакуванню та стабільнішій подачі.

Аналіз чутливості моделі виявив найбільшу залежність оптимального рішення від ціни нікелю (еластичність ±5,4% при зміні ціни на ±20%) та вартості зворотних матеріалів. При сприятливій ціновій кон'юнктурі (подорожчання нікелю на 20%) економія від оптимізації може досягати 5,4% або 38 776 грн/т. Модель демонструє низьку чутливість до варіацій коефіцієнтів угару (±0,3% при зміні k на ±20-30%).

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Електронно-променеве плавлення жароміцних нікелевих сплавів є технологічним процесом підвищеної небезпеки, що потребує дотримання суворих вимог охорони праці та промислової безпеки. Основні ризики пов'язані з експлуатацією високовольтного обладнання, вакуумних систем, роботою з розплавленим металом та іонізуючим випромінюванням.

5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при ЕПП

Згідно з ДСТУ 2293-99 "Охорона праці. Терміни та визначення основних понять" небезпечні та шкідливі виробничі фактори класифікуються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [51].

Фізичні небезпечні фактори при ЕПП:

1. Високовольтна електрична напруга прискорювальної системи електронної гармати (15-60 кВ, струм 0,5-10 А). Ризик ураження електричним струмом з летальним наслідком при недотриманні вимог електробезпеки.
2. Іонізуюче випромінювання (рентгенівське) генерується при бомбардуванні металу високоенергетичними електронами. Потужність дози на відстані 1 м від камери може досягати 5-50 мкЗв/год при відсутності захисту [52].
3. Теплове випромінювання від розплавленого металу (температура 1400-1500°С). Щільність теплового потоку біля оглядового вікна може досягати 1500-2000 Вт/м², що перевищує допустиме значення 140 Вт/м² для постійних робочих місць згідно з ДСН 3.3.6.042-99.
4. Підвищений рівень шуму від вакуумних насосів (механічних форвакуумних та дифузійних). Еквівалентний рівень звуку становить 75-85 дБА при допустимому 80 дБА згідно з ДСН 3.3.6.037-99.

5. Вибухонебезпечність при розгерметизації вакуумної камери під час плавлення (різкий приплив повітря може призвести до розбризкування розплаву).
6. Можливість опіків при контакті з гарячими поверхнями обладнання, розплавленим металом або парами металів.

Хімічні небезпечні фактори:

1. Пари металів (нікель, хром, алюміній, молібден) у робочій зоні при порушенні герметичності вакуумної системи або під час вивантаження злитка. ГДК нікелю в повітрі робочої зони – 0,05 мг/м³, хрому (VI) – 0,01 мг/м³ згідно з ГН 2.2.5.3532-18.
2. Пари масел від дифузійних насосів при їх перегріві (ризик потрапляння в повітря приміщення).
3. Можливість утворення токсичних сполук при взаємодії залишкового кисню з легувальними елементами (оксиди хрому, нікелю, алюмінію).

Психофізіологічні фактори:

1. Нервово-психічні перевантаження внаслідок необхідності постійного контролю параметрів процесу, високої відповідальності за якість продукції.
2. Фізичні перевантаження при завантаженні шихти, вивантаженні злитків (маса злитка до 500 кг).
3. Монотонність праці під час тривалих циклів плавлення (6-12 годин).

Оцінка умов праці відповідно до Гігієнічної класифікації праці (ГН 3.3.5-3.3.8; 6.6.1-083-2001): робота оператора установки ЕПП відноситься до класу 3.2 (шкідливі умови праці 2 ступеня) через сукупність факторів: іонізуюче випромінювання, теплове випромінювання, шум, нервово-емоційне навантаження.

5.2 Вимоги безпеки при роботі з вакуумним обладнанням

Вакуумні системи установок ЕПП працюють у діапазоні тисків від атмосферного (101 кПа) до високого вакууму (10^{-4} Па), що створює специфічні ризики.

Основні небезпеки вакуумного обладнання:

1. Механічна міцність камери під дією атмосферного тиску. Зовнішній тиск на камеру діаметром 1000 мм становить близько 80 тонн. Вимога: розрахунок на міцність згідно з НПАОП 0.00-1.81-18 "Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском" (для вакуумних посудин) [53].
2. Імплозія (руйнування камери внаслідок підвищення зовнішнього тиску при вакуумуванні). Запобігання: встановлення вакуумметрів з аварійною сигналізацією, зміцнення стінок камери ребрами жорсткості.
3. Раптова розгерметизація під час плавлення може призвести до викиду розплаву назовні. Захист: автоматичне відключення нагріву при падінні вакууму нижче 10^{-2} Па, аварійний клапан скидання надлишкового тиску.

Технічні заходи безпеки:

1. Міжблокування системи управління: неможливість включення електронної гармати при тиску вище 10^{-2} Па (електричний розряд у газі).
2. Оглядові вікна виготовляються зі свинцевого скла товщиною не менше 50 мм для захисту від рентгенівського випромінювання.
3. Запобіжні клапани для швидкого напуску повітря у камеру в аварійних ситуаціях (час напуску до атмосферного тиску – не більше 60 секунд).
4. Система контролю герметичності: щозмінна перевірка швидкості натікання газу (не більше 10^{-3} Па·л/с для камер об'ємом 1-5 м³).

Організаційні заходи:

1. Навчання персоналу: первинний інструктаж з охорони праці, стажування не менше 14 змін під керівництвом досвідченого оператора, атестація з питань безпеки.

2. Щомісячна перевірка стану вакуумних ущільнень, затворів, запірної арматури.
3. Щорічне випробування камери на міцність гідравлічним тиском 1,5 × Ратм (152 кПа) протягом 15 хвилин згідно з технічним регламентом.
4. Заборона доступу сторонніх осіб у зону роботи вакуумного обладнання. Огородження небезпечної зони радіусом не менше 3 метрів від камери.

5.3 Захист від рентгенівського випромінювання

При гальмуванні електронів у металевій мішені виникає рентгенівське гальмівне випромінювання. Максимальна енергія квантів дорівнює енергії електронів: Emax = eU, де U – прискорювальна напруга [54].

Для електронної гармати з параметрами U = 30 кВ, I = 5 А потужність дози на відстані r = 1 м від точки падіння пучка без захисту може досягати:
$\dot{D} \approx 10^{-6} \times U^2 \times I / r^2 = 10^{-6} \times 30^2 \times 5 / 1^2 \approx 4{,}5$ мкЗв/год.

При роботі 8 годин на добу річна доза становить: D_рік = 4,5 × 8 × 250 = 9000 мкЗв = 9 мЗв

Це перевищує допустиму дозу для персоналу категорії Б (персонал, що знаходиться за межами контрольованої зони, але в зоні можливого опромінення) – 5 мЗв/рік згідно з НРБУ-97 [55].

Заходи радіаційного захисту:

1. Біологічний захист камери: сталеві стінки товщиною 15-20 мм послаблюють рентгенівське випромінювання з E = 30 кеВ у 1000-10000 разів (шар половинного послаблення для сталі – 0,2 мм при 30 кеВ).
2. Свинцеве скло у оглядових вікнах еквівалентною товщиною свинцю 4-5 мм забезпечує коефіцієнт ослаблення >1000.
3. Додатковий свинцевий екран товщиною 2-3 мм навколо електронної гармати зменшує розсіяне випромінювання.

4. Контроль радіаційної обстановки: встановлення стаціонарного дозиметра-радіометра МКС-07Н у робочій зоні оператора з сигналізацією при перевищенні 0,5 мкЗв/год.
5. Індивідуальні дозиметри для операторів (термолюмінесцентні дозиметри ДТЛ-02), щомісячний контроль накопиченої дози.

Зонування приміщення:

Відповідно до НРБУ-97 встановлюються зони:

1. Контрольована зона (радіус 2 м від камери): доступ тільки для персоналу категорії А під час профілактичних робіт при вимкненій гарматі.
2. Зона спостереження (2-5 м від камери): робоче місце оператора, потужність дози <0,5 мкЗв/год.
3. Зона вільного режиму (>5 м): адміністративні приміщення, потужність дози фонова.

Організаційні заходи:

1. Внесення установки ЕПП до реєстру джерел іонізуючого випромінювання підприємства.
2. Призначення відповідального за радіаційну безпеку (особа з вищою технічною освітою, пройшла навчання з радіаційної безпеки).
3. Щорічна перевірка ефективності захисту атестованою дозиметричною лабораторією.
4. Проведення попереднього (при прийомі на роботу) та періодичних (щорічних) медичних оглядів операторів.

5.4 Електробезпека при роботі з високовольтним обладнанням

Установка ЕПП містить високовольтні джерела живлення напругою 15-60 кВ постійного струму для прискорення електронів, що створює підвищену небезпеку ураження електричним струмом.

Класифікація приміщення за небезпекою ураження електричним струмом: приміщення з підвищеною небезпекою (клас II за ПУЕ) через наявність

можливості одночасного дотику до металевих корпусів обладнання та елементів будівельних конструкцій, що мають з'єднання із землею.

Поріг невідпускаючого струму для людини становить 10-15 мА, смертельного – 100 мА. При напрузі 30 кВ та опорі тіла людини 1000 Ом (при сухій шкірі) струм через тіло може досягти: I = U / R = 30000 / 1000 = 30 А. Це в 300 разів перевищує смертельний поріг, тому дотик до високовольтних елементів є абсолютно неприпустимим.

Технічні засоби захисту [56]:

1. Захисне заземлення корпусів обладнання з опором заземлювального пристрою не більше 4 Ом відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок".
2. Захисне зануление металевих частин, які можуть опинитися під напругою при пошкодженні ізоляції.
3. Захист від випадкового дотику: огородження високовольтних елементів суцільним металевим кожухом з блокуванням (неможливість зняття кожуха без відключення напруги).
4. Аварійне відключення: кнопки "Аварійний стоп" червоного кольору (грибоподібні) в 3-4 точках навколо установки, які миттєво знеструмлюють всі високовольтні кола.
5. Сигналізація стану: світлові табло "Висока напруга ввімкнена" (червоні лампи) біля кожного входу в приміщення.
6. Розрядні штанги: переносні заземлювачі зі струмообмежувальними резисторами для розряду високовольтних конденсаторів перед проведенням ремонтних робіт (ємність конденсаторів у високовольтному блоці може досягати 10-50 мкФ, що зберігає смертельно небезпечний заряд навіть після відключення живлення).
7. Блокування дверей: електромеханічні замки на дверях камери та шаф високовольтного обладнання, які дозволяють відкриття тільки після зняття напруги та розряду конденсаторів (затримка 30-60 секунд).

Організаційні заходи:

1. Допуск до роботи: тільки особи старше 18 років, що пройшли навчання з електробезпеки та мають кваліфікаційну групу не нижче III для роботи в електроустановках напругою понад 1000 В.
2. Система нарядів-допусків: всі роботи на знеструмленому обладнанні (профілактика, ремонт) виконуються за нарядом-допуском з призначенням відповідального керівника та виконавця робіт.
3. Заходи при роботах під напругою (якщо абсолютно необхідні): використання діелектричних рукавичок (витримують напругу до 15 кВ), діелектричних килимків, ізолюючих штанг; робота в присутності другої особи з групою IV, яка здійснює нагляд.
4. Заземлення переносним заземлювачем перед початком робіт на високовольтних елементах (після відключення живлення). Порядок встановлення: спочатку заземлювач приєднується до контуру заземлення, потім до високовольтних шин.
5. Огородження зони робіт: встановлення переносних щитів з попереджувальними плакатами "Стій! Напруга!" на відстані не менше 1,5 м від струмоведучих частин.

Засоби індивідуального захисту:

- Діелектричні рукавички (перевірка 1 раз на 6 місяців)
- Діелектричне взуття (боти або калоші, перевірка 1 раз на рік)
- Захисні окуляри з затемненими лінзами (при спостереженні за процесом плавлення)
- Спецодяг із вогнетривкої тканини (захист від розбризкування розплаву)

Дії при ураженні електричним струмом:

1. Негайне знеструмлення потерпілого (вимкнути рубильник або відтягнути потерпілого діелектричною штангою).
2. Виклик швидкої медичної допомоги.
3. Надання першої долікарської допомоги: штучне дихання та непрямий масаж серця до прибуття медиків.

4. Аптечка першої допомоги розміщується в доступному місці на відстані не більше 20 м від установки.

Пожежна безпека. Категорія приміщення за вибухопожежною небезпекою – В (пожежонебезпечне) згідно з НАПБ Б.07.005-86 через наявність твердих горючих речовин (масло у вакуумних насосах, кабельна ізоляція).

Засоби пожежогасіння:

- Вогнегасники порошкові ВП-8 (2 шт.) для гасіння електроустановок під напругою
- Пожежний щит з піском, кошмою
- Автоматична система пожежної сигналізації з тепловими та димовими датчиками

Безпека при надзвичайних ситуаціях. При виникненні НС (пожежа, землетрус, затоплення) передбачені наступні дії:

1. Негайне знеструмлення установки головним рубильником.
2. Напуск повітря у вакуумну камеру аварійним клапаном (для запобігання імплозії при евакуації).
3. Евакуація персоналу згідно з планом евакуації (розміщений біля виходу).

У приміщенні встановлено:

- Світлові покажчики евакуаційних виходів (автономне живлення 90 хвилин).
- Система оповіщення про пожежу (світлова та звукова сигналізація).
- План евакуації з позначенням шляхів евакуації та місць розташування засобів пожежогасіння .

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу оптимізації складу шихти для виплавки жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 методом ЕПП з метою мінімізації економічних витрат при забезпеченні заданого хімічного складу та якості отриманих зливків.

Проведено аналіз фізико-хімічних основ ЕПП і встановлено, що він забезпечує ККД перетворення енергії 80-95% та глибоке рафінування розплаву від газів (азот, кисень) з коефіцієнтом очищення 10^2-10^4, що переважає альтернативні методи (ВІП, ВДП).

Встановлено, що вартість шихтових матеріалів становить 60-75% загальних витрат на виплавку, що обґрунтовує актуальність оптимізації. Визначено критичну роль гранулометричного складу: оптимальний діапазон 10-150 мкм забезпечує швидке плавлення при мінімальних втратах матеріалу, а бімодальний розподіл підвищує продуктивність на 12-15%.

Побудовано математичну модель оптимізації у вигляді задачі лінійного програмування з цільовою функцією мінімізації вартості $Z = \Sigma_i (c_i \cdot x_i) \rightarrow \min$, яка одночасно враховує економічні критерії (мінімізація вартості), технологічні обмеження (коефіцієнти угару специфічні для ЕПП), гранулометричні характеристики компонентів та жорсткі вимоги авіаційних стандартів до хімічного складу.

Встановлено кількісні залежності між гранулометричним складом шихти та ефективністю процесу ЕПП. Як показано, оптимальний розмір частинок $\bar{d} = 50 \pm 20$ мкм забезпечує найменші енерговитрати - 2,0 кВт·год/кг, а бімодальний розподіл фракцій (60% дрібної + 40% середньої) підвищує продуктивність на 12-15% порівняно з монофракційною шихтою.

Створено програмну реалізацію моделі у пакеті Microsoft Excel з використанням надбудови Solver, що доступна для застосування у освітніх цілях чи на підприємствах.

Розрахунки показали зниження вартості шихти з 720,94 грн/кг (базова рецептура) до 713,71 грн/кг (оптимізована). Економія складає 7,23 грн/кг або 1,0%. Основні зміни складу: зменшення частки первинного Ni з 55% до 48,3%, збільшення зворотних матеріалів з 10% до 16,5%, а також оптимізація часток феросплавів.

Доведено, що застосування методів лінійного програмування до оптимізації складу шихти жароміцних сплавів дозволяє отримати економію 1,0-5,4% залежно від цінової кон'юнктури при збереженні необхідної якості зливків та розширенні використання вторинної сировини (до 30% замість типових 10%).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Reed R.C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 372 p.

2. Perrut M., Caron P., Thomas M., Couret A. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ-TiAl alloys. *Comptes Rendus Physique*. 2018. Vol. 19, No. 1–2. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.crhy.2018.10.002.

3. Bakish R. *Electron Beam Melting and Refining – State of the Art*. Englewood, NJ: Bakish Materials Corporation, 1998. 285 p.

4. Mladenov G., Vutova K. Electron Beam Melting and Refining: Physical Modeling. *Vacuum*. 1996. Vol. 47, No. 3. P. 257–262. DOI: 10.1016/0042-207X(96)00075-9.

5. Vutova K., Donchev V., Vassileva V., Mladenov G. Electron Beam Melting and Refining of Metals: Computational Modeling and Optimization. *Materials*. 2013. Vol. 6, No. 10. P. 4626–4640. DOI: 10.3390/ma6104626.

6. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. *Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. New York: John Wiley & Sons, 1987. 615 p.

7. Jafari-Ramiani A., Yousefi D., Mohajeri M. Iterative Standard Strategy for Non-Linear Optimization in Melting Furnace Charge Calculations. *International Journal of Metalcasting*. 2022. Vol. 16. P. 1254–1267. DOI: 10.1007/s40962-021-00699-0.

8. Wang X., Li Y., Chen H. Impact of Atomization Pressure on the Particle Size of Nickel-Based Superalloy Powders by Numerical Simulation. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 9. Article 3020. DOI: 10.3390/ma15093020.

9. Dantzig G.B. *Linear Programming and Extensions*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1963. 627 p.

10. Dubeau F., Kadri A. On Best Corrected Mixture Problems in Metallurgy: A Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article ID 2742540. DOI: 10.1155/2017/2742540.

11. Electron Beam Melting and Refining of Metals and Alloys. ISIJ International (огляд).

12. Vutova K. The Impact of Electron Beam Melting on the Purification of Refractory and Reactive Metals. Metals (MDPI), 2025.

13. Vacuum Arc Remelting Process (огляд). Techniques-Ingenieur / технічний ресурс (VAR process overview).

14. Гречанюк В.Г. Застосування електронно-променевої технології плавки (дисертаційні/наукові матеріали). ELAR (Khmelnytskyi National University repository), 2022. (укр.).

15. Rae C. Selective Electron Beam Melting Of The Single Crystalline Nickel-Base Superalloy (TMS / Superalloys conference paper).

16. Schiller S., Heisig U., Panzer S. Electron Beam Technology. Wiley-VCH, 1995. 512 p.

17. Reisgen U., Olschok S., Longerich S. Laser beam welding of high-strength steels // Welding in the World. 2010. Vol. 54, No. 3-4. P. R86-R93.

18. Wei H.L., Elmer J.W., DebRoy T. Origin of grain orientation during solidification of an aluminum alloy // Acta Materialia. 2016. Vol. 115. P. 123-131.

19. Paton B.E., Trigub N.P., Zhuk G.V. Electron beam melting of titanium // Titanium Science and Technology. Springer, 2013. P. 1819-1836.

20. Mitchell A., Beale G.H. Progress in the vacuum melting and refining of reactive and refractory metals // Advances in Extractive Metallurgy and Refining. Institution of Mining and Metallurgy, 1972. P. 185-218.

21. Hoffmann D.H., Munz C.D. Vacuum technology for space applications // Vacuum. 1998. Vol. 47, No. 6-8. P. 851-858.

22. Gomer R. Field emission, field ionization, and field desorption // Surface Science. 1994. Vol. 299-300. P. 129-152.

23. Fromm E., Gebhardt E. Gase und Kohlenstoff in Metallen. Springer-Verlag, 1976. 715 p.

24. Bewlay B.P., Nag S., Suzuki A., Weimer M.J. TiAl alloys in commercial aircraft engines // Materials at High Temperatures. 2016. Vol. 33, No. 4-5. P. 549-559.

25. Powell A.C., Van den Avyle J.A., Damkroger B., Edwards G. Analysis of multicomponent evaporation in electron beam melting and refining of titanium alloys // Metallurgical and Materials Transactions B. 1997. Vol. 28, No. 6. P. 1227-1239.

26. Boivineau M., Arlès L. Thermophysical properties of liquid nickel // High Temperatures-High Pressures. 2000. Vol. 32, No. 4. P. 411-418.

27. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006. 372 p.

28. Pollock T.M., Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties // Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22, No. 2. P. 361-374.

29. Mills K.C. Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys. Woodhead Publishing, 2002. 244 p.

30. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. John Wiley & Sons, 1987. 615 p.

31. Donachie M.J., Donachie S.J. Superalloys: A Technical Guide. 2nd Edition. ASM International, 2002. 439 p.

32. Campbell C.E., Boettinger W.J., Kattner U.R. Development of a diffusion mobility database for Ni-base superalloys // Acta Materialia. 2002. Vol. 50, No. 4. P. 775-792.

33. Durand-Charre M. The Microstructure of Superalloys. CRC Press, 1997. 124 p.

34. Forbes Jones R.M., Jackman L.A. The structural evolution of superalloy ingots during hot working // JOM. 1999. Vol. 51, No. 1. P. 27-31.

35. Mitchell A. The production of high-quality materials by special melting and casting // Journal of Materials Science. 2008. Vol. 43, No. 11. P. 3904-3914.

36. Gussone J., Hagedorn Y.C., Gherekhloo H., Kasperovich G., Merzouk

T., Hausmann J. Microstructure of γ-titanium aluminide processed by selective laser melting at elevated temperatures // Intermetallics. 2015. Vol. 66. P. 133-140.

37. Optimal Charge Planning Model of Steelmaking Based on Multi-Objective Evolutionary Algorithm, Metals, 2018, 8(7), 483, DOI: 10.3390/met8070483

38. Wonjin Choi, Julien Jourdan, Alexey Matveichev, Alain Jardy, Jean-Pierre Bellot, Kinetics of Evaporation of Alloying Elements under Vacuum: Application to Ti alloys in Electron Beam Melting, DOI: 10.1515/htmp-2015-0220

39. Vutova, K., Stefanova, V., Vassileva, V. & Atanasova-Vladimirova, S. (2022). Recycling of Technogenic CoCrMo Alloy by Electron Beam Melting. Materials, 15(12), 4168. https://doi.org/10.3390/ma15124168

40. Mathias, L.E.T., Pinotti, V.E., Batistão, B.F. et al. Metal powder as feedstock for laser-based additive manufacturing: From production to powder modification. Journal of Materials Research 39, 19–47 (2024). https://doi.org/10.1557/s43578-023-01271-8

41. Effect of bimodal powder blends on part density and melt pool fluctuation in laser powder bed fusion. Progress in Additive Manufacturing, 2021.

42. Dantzig, G. B. Linear Programming: The Story About How It Began — Some legends, a little about its historical significance, and comments about where its many mathematical-programming extensions may be headed. Operations Research, 2002, Vol. 50, No. 1, pp. 42-47. DOI: 10.1287/opre.50.1.42

43. Dantzig G.B. Linear Programming and Extensions. Princeton University Press, 1963. 625 p.

44. German R.M. Particle Packing Characteristics. Metal Powder Industries Federation, 1989. 456 p.

45. Mitchell A., Joshi S., Madsen D.N. Titanium alloy ingot quality improvements using EBCHM // Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Science Press, 2012. Vol. 1. P. 689-693.

46. Luenberger D.G., Ye Y. Linear and Nonlinear Programming. 4th Edition. Springer, 2015. 546 p.

47. Gass S.I., Harris C.M. Encyclopedia of Operations Research and Management Science. Springer, 2001. 932 p.

48. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. John Wiley & Sons, 1987. 615 p.

49. German R.M. Particle Packing Characteristics. Metal Powder Industries Federation, 1989. 456 p.

50. Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies // Journal of Materials Science & Technology. 2012. Vol. 28, No. 1. P. 1-14.

51. ДСТУ 2293-99. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. Київ: Держстандарт України, 1999. 18 с.

52. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.

53. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. Київ: Міністерство соціальної політики України, 2018. 124 с.

54. Attix F.H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Wiley-VCH, 1986. 607 p.

55. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Київ: Міністерство охорони здоров'я України, 1998. 135 с.

56. IEEE Std 902-1998. IEEE Guide for Maintenance, Operation, and Safety of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998. 568 p.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Структура аркуша "Вхідні дані"

Аркуш "Вхідні дані" організовано у вигляді п'яти тематичних блоків, розташованих послідовно зверху вниз:

Блок 1. Матриця хімічного складу компонентів (діапазон комірок A3:K15). Рядки матриці відповідають 12 хімічним елементам (Ni, Cr, W, Mo, Ti, Al, Nb, B, Fe, S, P, O), стовпці – 10 компонентам шихти (Ni НПА-1, Cr Х99, FeW80, FeMo60, FeTi70, Al А99, FeNb60, FeB20, Зворотні ЕП648, Лігатура Ni-Mo-W). Комірки заповнені масовими частками елементів у відсотках з точністю до 0,01%. Наприклад, комірка B4 містить значення 98,65% – вміст нікелю в компоненті НПА-1. Комірки, де елемент відсутній, залишені порожніми або заповнені нулями. Заголовки стовпців виділені жирним шрифтом та світло-синім фоном (RGB: 217, 225, 242), заголовки рядків – світло-зеленим (RGB: 226, 239, 218). Це кольорове кодування використовується в усіх таблицях моделі для візуального розділення даних та полегшення навігації.

Блок 2. Вектор цін компонентів (діапазон A18:B28). Двостовпцева таблиця: перший стовпець – назва компонента, другий – ціна в грн/кг станом на 15.11.2024. Ціни отримані з від трьох постачальників (ТОВ "МеталТрейд Україна", ПрАТ "Дніпроспецсталь", ТОВ "Інтерметал"). Для зворотних матеріалів використана знижена ціна 560 грн/кг, що на 15% нижче за первинний нікель, з урахуванням необхідності додаткового контролю складу. Комірки з цінами мають числовий формат "#,##0.00 грн/кг" та виділені жовтим фоном (RGB: 255, 242, 204), що вказує на можливість редагування користувачем – при зміні ринкових цін достатньо оновити значення в цих комірках, і модель автоматично перерахує оптимальне рішення.

Блок 3. Коефіцієнти угару елементів (діапазон A31:C39). Трьохстовпцева таблиця: елемент, коефіцієнт угару k_j (%), коефіцієнт переходу $\eta_j = (1 - k_j/100)$. Значення k_j визначені статистичною обробкою даних промислових плавок

сплаву ЕП648 на установці ЕЛУ-15 з розрахунком середнього арифметичного та стандартного відхилення. Наприклад, для нікелю k_Ni = 0,8 ± 0,3%, для алюмінію k_Al = 7,0 ± 1,2%, для бору k_B = 18,0 ± 3,5%. Коефіцієнт переходу η_j обчислюється автоматично за формулою в стовпці C: "=1-B32/100" (для рядка з нікелем). Цей коефіцієнт використовується в розрахунках для корекції фактичного вмісту елементів у готовому сплаві.

Блок 4. Гранулометричні характеристики (діапазон A42:C52). Тристовпцева таблиця: компонент, середній розмір частинок d_{50} (мкм), густина ρ (г/см³). Значення d_{50} отримані методом лазерної дифракції (аналізатор Malvern Mastersizer 3000) для кожного компонента шихти. Густина взята з довідкових даних для відповідних матеріалів при 20°C. Ці параметри необхідні для розрахунку середньозваженого розміру частинок всієї шихти $\bar{d}$, який впливає на питомі енерговитрати процесу ЕПП. Наприклад: Al A99 (d_{50} = 45 мкм, ρ = 2,70 г/см³), FeW80 (d_{50} = 85 мкм, ρ = 14,8 г/см³), Cr X99 (d_{50} = 15000 мкм = 15 мм, ρ = 7,19 г/см³ – потребує попереднього подрібнення).

Блок 5. Вимоги до хімічного складу сплаву ЕП648 (діапазон A55:D63). Чотиристовпцева таблиця: елемент, мінімальний вміст (%), максимальний вміст (%), примітка. Значення взяті з ОСТ 1 90126-85 "Сплав ЕП648. Технічні умови". Для основних легувальних елементів (Ni, Cr, W, Mo, Ti, Al, Nb, B) задані двосторонні обмеження $[b_j^{min}; b_j^{max}]$, наприклад: Ni (55,0-61,0%), Cr (14,0-16,0%), W (4,0-5,0%). Для шкідливих домішок (S, P, O, N) задані тільки максимально допустимі концентрації: S ≤ 0,007%, P ≤ 0,015%, O ≤ 0,005%, N ≤ 0,010%. Залізо є балансуючим елементом з верхньою межею Fe ≤ 2,5% (вноситься феросплавами).

Додаток 2. Структура аркуша "Розрахунки"

Аркуш "Розрахунки" є "серцем" моделі, де визначаються оптимальні значення масових часток компонентів шихти. Структура аркуша відображає математичну постановку задачі лінійного програмування та складається з шести взаємопов'язаних розділів:

Розділ 1. Вектор змінних X (діапазон A3:B13). Містить 10 комірок (B4:B13), що представляють масові частки компонентів шихти x_1, x_2, ..., x_{10}. Це основні змінні оптимізаційної задачі, значення яких визначає Solver. Початкові значення (перед запуском Solver) встановлені рівними 0,1 (10%) для всіх компонентів, що відповідає рівномірному розподілу. Після розв'язання задачі в цих комірках з'являються оптимальні значення, наприклад: x_Ni = 0,483 (48,3%), x_Cr = 0,168 (16,8%), x_FeW80 = 0,072 (7,2%) і т.д. Комірки мають числовий формат "0.000" (3 десяткові знаки) та виділені салатовим фоном (RGB: 198, 239, 206), що позначає "змінні, що оптимізуються". Праворуч від кожної комірки в стовпці C розташована допоміжна комірка з перерахунком у відсотки: "=B4*100&"%"" для зручності інтерпретації.

Розділ 2. Цільова функція Z (комірка B16). Обчислює вартість 1 тонни шихти за формулою $Z = \Sigma_i(c_i \cdot x_i \cdot 1000)$, де множник 1000 перетворює кг в тонну. Формула в комірці: "=СУММПРОИЗВ('Вхідні дані'!B19:B28;B4:B13)*1000". Функція СУММПРОИЗВ (SUMPRODUCT) обчислює скалярний добуток двох векторів: вектора цін з аркуша "Вхідні дані" та вектора змінних з поточного аркуша. Комірка B16 має числовий формат "#,##0.00 грн/т" та виділена червоним фоном (RGB: 255, 199, 206) з жирним шрифтом розміру 14 пт, що підкреслює її статус цільової функції, яку необхідно мінімізувати. Початкове значення (до оптимізації) становить близько 920 000 грн/т при рівномірному розподілі x_i = 0,1, оптимальне значення після розв'язання – 713 710 грн/т.

Розділ 3. Обмеження на хімічний склад (діапазон A20:F43). Таблиця з шести стовпців: (A) елемент, (B) фактичний вміст елемента у сплаві (розрахований), (C) мінімально допустимий вміст, (D) максимально допустимий

вміст, (E) статус виконання обмеження, (F) відхилення від меж. Ключовим є стовпець B, де для кожного з 12 елементів розраховується фактичний вміст у виплавленому сплаві з урахуванням угару за формулою: $\Sigma_i(a_{ij}\cdot x_i\cdot\eta_j)\cdot 100\%$. Наприклад, для нікелю (рядок 21) формула в комірці B21: "=СУММПРОИЗВ('Вхідні дані'!B4:K4;$B$4:$B$13;'Вхідні дані'!C32)*100". Тут СУММПРОИЗВ перемножує три масиви поелементно: вміст Ni в кожному компоненті ('Вхідні дані'!B4:K4), масові частки компонентів ($B$4:$B$13 з абсолютними посиланнями), коефіцієнти переходу для Ni ('Вхідні дані'!C32), та множить результат на 100 для переходу до відсотків. Стовпці C та D містять посилання на аркуш "Вхідні дані" з допустимими межами, наприклад C21: "='Вхідні дані'!B56" (мін. Ni = 55,0%), D21: "='Вхідні дані'!C56" (макс. Ni = 61,0%). Стовпець E містить логічну формулу перевірки виконання обмеження: "=ЕСЛИ(И(B21>=C21; B21<=D21); "✓ OK"; "✗ Порушення")". Якщо обмеження порушене, комірка автоматично забарвлюється в червоний колір за допомогою умовного форматування. Стовпець F розраховує запас або перевищення: "=ЕСЛИ(B21<C21; B21-C21; ЕСЛИ(B21>D21; B21-D21; 0))" – від'ємне значення означає недолік елемента, додатне – перевищення, нуль – попадання всередину діапазону.

Розділ 4. Обмеження на гранулометрію (діапазон A46:D48). Мінітаблиця з розрахунком середньозваженого розміру частинок шихти $\bar{d}$. Комірка B46 містить формулу: "=СУММПРОИЗВ('Вхідні дані'!B43:B52;$B$4:$B$13;'Вхідні дані'!C43:C52) / СУММПРОИЗВ($B$4:$B$13;'Вхідні дані'!C43:C52)". Це реалізація формули $\bar{d} = \Sigma_i(d_i\cdot x_i\cdot\rho_i) / \Sigma_i(x_i\cdot\rho_i)$, тобто середньозваженого розміру за масою з урахуванням густини компонентів. Чисельник обчислює суму добутків (розмір частинок × масова частка × густина), знаменник – суму добутків (масова частка × густина), що дає густинно-зважене середнє. Комірки C46 та D46 містять обмеження: d_min = 20 мкм, d_max = 100 мкм. Комірка E46 перевіряє виконання: "=ЕСЛИ(И(B46>=C46; B46<=D46); "✓ OK"; "✗ Порушення")". Оптимальне значення $\bar{d}$ зазвичай близьке до 50 мкм, що забезпечує мінімальні енерговитрати.

Розділ 5. Балансове обмеження (діапазон A51:D52). Перевірка фундаментального закону збереження маси: сума масових часток всіх компонентів має дорівнювати 1 (або 100%). Комірка B51 містить формулу: "=СУММ($B$4:$B$13)", що підсумовує всі 10 змінних $x_1 + x_2 + ... + x_{10}$. Комірка C51 містить цільове значення 1,000. Комірка D51 має формулу точної перевірки: "=ЕСЛИ(ABS(B51-C51)<0,001; "✓ ОК"; "✗ Порушення")", де ABS – абсолютне значення, а 0,001 – допуск на похибки округлення (0,1%). У правильно розв'язаній задачі значення B51 завжди дорівнює 1,000 з точністю до машинної точності Excel ($\sim 10^{-15}$).

Розділ 6. Межі компонентів (діапазон A55:E65). Таблиця з п'яти стовпців для контролю індивідуальних меж кожного компонента: (A) назва компонента, (B) поточне значення x_i, (C) мінімальна межа x_i^min, (D) максимальна межа x_i^max, (E) статус. Стовпець B містить посилання на змінні: B55: "=$B$4" (для Ni НПА-1), B56: "=$B$5" (для Cr X99) і т.д. Стовпці C та D містять технологічні обмеження, які можуть відрізнятися для різних компонентів. Наприклад, для нікелю НПА-1: x_Ni^min = 0,40 (40%), x_Ni^max = 0,70 (70%); для зворотних матеріалів: x_revert^min = 0 (можна не використовувати), x_revert^max = 0,30 (30% – технологічна межа стабільності складу); для феробору FeB20: x_FeB^min = 0,001 (0,1% – мінімум для гарантованого внесення бору), x_FeB^max = 0,05 (5% – запобігання надлишку заліза). Стовпець E містить логічну перевірку для кожного рядка: "=ЕСЛИ(И(B55>=C55; B55<=D55); "✓"; "✗")". Сумарно ці 10 компонентів формують 20 нерівностей (по 2 на компонент: $x_i \geq x_i^{min}$ та $x_i \leq x_i^{max}$).

У нижній частині аркуша розміщена зведена інформаційна панель (діапазон A68:B75) з ключовими показниками моделі: кількість змінних (10), кількість обмежень-нерівностей (48), кількість обмежень-рівностей (1), статус розв'язання задачі (заповнюється Solver після оптимізації: "Оптимальне рішення знайдено"), час розрахунку (секунди), кількість ітерацій симплекс-методу. Ця інформація корисна для діагностики ефективності моделі та виявлення

можливих проблем (наприклад, занадто велике число ітерацій може вказувати на близькість до вироджених випадків).