**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ**

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

# Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) рівень _____
(перший (бакалаврський) рівень)

на тему_____ Дослідження теплових ефектів матеріалів при легуванні та позапічній обробці сталі _____
_____
_____

Виконав: студент __4__курсу, групи *6.1362-м*

_Борсук С.А._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
___*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
Спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
_____*Металургія*_____
(шифр і назва)

Керівник _Харченко О.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _Нестеренко Т.М._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2026 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 *перший (бакалаврський) рівень*
(перший (бакалаврський) рівень)

Спеціальність *136 Металургія*
(шифр і назва)

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
**Завідувач кафедри *МТЕТБ***

*Ю.О. Бєлоконь*

"___" _____2026 року

# З А В Д А Н Н Я
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

*Борсук Сергій Андрійович*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Дослідження теплових ефектів матеріалів при легуванні та позапічній обробці сталі*

керівник роботи (проєкту) *Харченко Олександр Вікторович к.т.н, доцент*
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" 12 2025 року № 1831-с.

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *15.05.2026*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Визначення теплових ефектів матеріалів та електроенергії при легуванні та позапічній обробці сталей 10Г2С1, 15ГС, 20ХГС, 25ГС*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина, Металургійна частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки, Перелік джерел посилань, Додатки.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
*Презентаційний матеріал на 12 слайдах*

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| *Загальна частина* | *Харченко О.В., доцент* | | |
| *Технологічна частина* | *Харченко О.В., доцент* | | |
| *Металургійна частина* | *Харченко О.В., доцент* | | |
| *Охорона праці та техногенна безпека* | *Харченко О.В., доцент* | | |
| *Нормоконтроль* | *Бєлоконь Ю.О., завідувач кафедри* | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання__*29.01.2026*_____

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1* | *Вступ* | *10.02.2026* | |
| *2* | *Реферат* | *20.02.2026* | |
| *3* | *Загальна частина* | *01.03.2026* | |
| *4* | *Технологічна частина* | *30.03.2026* | |
| *4* | *Металургійна частина* | *15.04.2026* | |
| *5* | *Охорона праці та техногенна безпека* | *30.04.2026* | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент _______ *С.А. Борсук*
( підпис ) (ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи) _____ *О.В. Харченко*
( підпис ) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер _____ *Ю.О. Бєлоконь*
(підпис) (ініціали та прізвище)

# РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 93 сторінки, 18 рисунка, 17 таблиці, 31 джерел.

МЕТОД ГІББСА, ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ, ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ, МАТЕРІАЛИ, ТЕПЛОВІ ЕФЕКТИ, СИСТЕМА «МЕТАЛ-ШЛАК-ГАЗ»

У загальній частині кваліфікаційної роботи розглянуто метод хімічних потенціалів Гіббса, термодинамічну модель конденсованої фази, пряму та зворотну задачі термодинамічного аналізу сталеплавильного процесу з використанням теплової моделі.

У технологічній частині зроблено розгляд можливості використання навчально-дослідницького програмного комплексу «Excalibur в якості інструмента обчислювально-експериментального дослідження термодинамічного моделювання системи «метал-шлак-газ». Наведено повний перелік його функціональних можливостей та концептуальну блок-схему.

У металургійному розділу проведено дослідження впливу різноманітних параметрів на тепловий ефект матеріалів при розкисленні-легуванні сталей 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА, 25ГС. Оцінено вплив частки внесених феросплавів на термічні ефекти матеріалів, а також досліджено причини цього впливу для подальшого використання в металургійній промисловості.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розглянуто характеристики потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії, інженерну розробку захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи з поліпшення умов праці, електичної та пожежної безпеки.

# ABSTRACT

The bachelor's qualification work contains 93 pages, 18 figures, 17 tables, 31 sources.

THE GIBBS METHOD, THERMODYNAMICAL ANALYSIS, THERMAL MODEL, MATERIALS, THERMAL EFFECTS, METAL-SLAG-GAS SYSTEM

The general part of the qualification work considers the Gibbs chemical potential method, the thermodynamic model of the condensed phase, the direct and inverse problems of thermodynamic analysis of the steelmaking process using the thermal model.

The technological part considers the possibility of using the educational and research software complex "Excalibur" as a tool for computational and experimental research of thermodynamic modeling of the "metal-slag-gas" system. A full list of its functional capabilities and a conceptual block diagram are provided.

In the metallurgical section, a study was conducted of the influence of various parameters on the thermal effect of materials during deoxidation-alloying of steels 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА, 25ГС. The influence of the proportion of added ferroalloys on the thermal effects of materials was assessed, and the causes of this influence were also investigated for further use in the metallurgical industry.

In the section "Occupational Health and Technogenic Safety" the characteristics of potentially dangerous and harmful factors affecting the laboratory worker, engineering development of protection against dangerous and harmful factors of the production environment and measures to improve working conditions, electrical and fire safety are considered.

# ЗМІСТ

ВСТУП ..... 9

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА ..... 12

1.1 Підхід Гіббса у термодинаміці ..... 12

1.2 Застосування ентальпійної теплової моделі ..... 19

1.3 Пряма задача термодинамічного аналізу з використанням теплової моделі . 28

1.3.1 Формування задачі ..... 28

1.3.2 Вибір моделі системи “метал-шлак-газ” ..... 29

1.3.3 Коефіцієнти активності в металі ..... 31

1.3.4 Коефіцієнти активності в шлаку ..... 31

1.3.5 Коефіцієнти активності в газі ..... 32

1.4 Зворотна задача термодинамічного аналіза з використанням теплової моделі ..... 32

1.4.1 Постанова завдання ..... 32

1.4.2 Невизначеність вихідних даних ..... 35

1.5 Висновки ..... 36

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ..... 37

2.1 Програмний комплекс “EXCALIBUR” ..... 37

2.2 Перелік можливостей і перспективи застосування в металургійному ..... 38

виробництві ..... 38

2.3 Концептуальна структурна схема ..... 40

2.4 Висновки ..... 48

РОЗДІЛ 3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА ..... 49
3.1 Визначення об’єкта дослідження ..... 49
3.1.1 Сталь 10Г2С1 – конструкційна низьколегована для зварних конструкцій ..... 49
3.1.2 Сталь 15ГС - конструкційна низьколегована для зварних конструкцій ..... 49
3.1.3 Сталь 20ХГСА - конструкційна легована хромокремнемарганцева. ..... 50
3.1.4 Сталь 25ГС – Сталь для виливків звичайна ..... 51
3.2 Методика проведення обчислювального експерименту із застосуванням програми «Excalibur» ..... 51
3.2.1 Паспорт розкислення-легування сталі 10Г2С1 ..... 53
3.2.2 Паспорт розкислення-легування сталі 15ГС ..... 55
3.2.3 Паспорт розкислення-легування сталі 20ХГСА ..... 57
3.2.4 Паспорт розкислення-легування сталі 25ГС ..... 59
3.3 Результати, отримані в ході досліджень ..... 61
3.3.1 Вивчення впливу кількості введених феросплавів на тепловий ефект феромарганцю ..... 62
3.3.2 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект силікомарганцю ..... 64
3.3.3 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросиліцію ..... 66
3.3.4 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ100Б ..... 67
3.3.5 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ800Б ..... 67

3.3.6 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікохрому ФСХ33 ..... 69

3.3.7 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект алюмінію вторинного АВ-87 ..... 70

3.3.8 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект коксику ..... 71

3.3.9 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект карбіду кремнію ..... 72

3.3.10 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект вапна ..... 73

3.3.11 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії ..... 74

3.4 Висновки ..... 75

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ..... 76

4.1 Опис потенційно небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на співробітників лабораторії ..... 76

4.2 Інженерні рішення для захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи щодо покращення умов праці ..... 80

4.3 Заходи з електробезпеки ..... 85

4.4 Заходи з пожежної безпеки ..... 87

ВИСНОВКИ ..... 89

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ..... 90

# ВСТУП

Автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП) стають невід'ємною частиною сучасного сталеплавильного виробництва. Проте їх функціональні можливості здебільшого обмежуються автоматизацією базових операцій, інформаційною підтримкою виробничих процесів та обробкою статистичних даних. Незважаючи на те, що вирішення цих задач є важливим кроком до побудови ефективних систем управління, потенціал сучасної науки, програмного забезпечення та апаратних рішень значно ширший.

Сучасні виробничі потреби та досягнення металургійної науки диктують необхідність впровадження систем управління для оперативного моделювання процесів виплавки, обробки сталі та оптимізації роботи всього сталеплавильного виробництва. Однією з ключових задач у металургії є прогнозування хімічного складу та температури металу. Точні прогнози дозволяють не лише ефективно управляти технологічними процесами, а й розв'язувати комплекс супутніх завдань, спрямованих на підвищення продуктивності й ефективності роботи як окремого агрегата, так і всього підприємства.

Комп'ютерне моделювання складних фізико-хімічних процесів у багатокомпонентних системах є надзвичайно перспективним напрямком хімічної термодинаміки. Сьогодні через відсутність універсальних програмних комплексів витрачаються значні ресурси на дорогі експериментальні дослідження та тестування технологій, які можна було б суттєво прискорити і здешевити завдяки комп'ютеризованому фізико-хімічному моделюванню. Проведення симуляцій на електронно-обчислювальних машинах дозволяє оптимізувати технологічні параметри, значно скоротити кількість реальних експериментів і розробити чіткі плани для промислових або лабораторних

плавок. Особливо ефективними машинні моделі є у випадках внесення змін до технології або створення нових процесів і обладнання.

Однак обмежувати значення фізико-хімічного моделювання лише заміною реальних експериментів віртуальними було б методологічною помилкою. Існують завдання, які можуть бути вирішені тільки через комп'ютерне моделювання, що робить його незамінним для наукових досліджень і розвитку промислових технологій.

Ефективне управління технологічними процесами неможливе без прогнозування наслідків тих чи інших дій. У випадку настільки складних процесів, як сталеплавлення, точність передбачень є критичним фактором для подальшого розвитку систем управління.

Сьогодні методи позапічної обробки сталі застосовують у масштабах сотень мільйонів тонн щороку у світі. Така популярність пояснюється низкою переваг:

1. Можливість отримання великої кількості сталі високої чистоти за доступнішими технологіями, що сприяє виробництву нових марок зі зростаючими показниками міцності та пластичності.

2. Забезпечення стабільної роботи машин безперервного розливання сталі завдяки точному регулюванню температури і досягненню високого рівня чистоти від шкідливих домішок (зокрема сірки). Практично вся сталь, що розливається безперервним методом, проходить попередню позапічну обробку.

3. Оптимізація витрат у результаті зміни вимог до складу феросплавів і розкислювачів на користь дешевших матеріалів.

4. Активне впровадження технологій прямого легування з використанням природно-легованих руд, повторна утилізація шлакових відходів та відходів суміжних виробництв.

Ці та інші переваги позапічної обробки зробили її незамінною частиною роботи сучасних сталеплавильних цехів, без яких сьогодні немислима організація сучасного та ефективного заводського виробництва.

# РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

## 1.1 Підхід Гіббса у термодинаміці

Метод Гіббса надає можливість описувати хімічні процеси в будь-яких системах без необхідності попереднього вираження їх у вигляді стехіометричних рівнянь. Феноменологічна, або класична термодинаміка Гіббса, забезпечує зручний математичний інструмент для пояснення суті будь-яких завдань виключно через величини, які можна безпосередньо вимірювати. До таких величин належать температура, тиск, хімічний склад, об'єм, маса тощо – саме ті параметри, які є основними в роботі технолога. З точки зору математичної структури термодинаміка Гіббса багато в чому співзвучна класичній механіці (зокрема статиці суцільних середовищ), але доповнює її фундаментальною відмінністю. Механіка досліджує системи, які можуть обмінюватися роботою та речовиною, тоді як термодинамічні системи також взаємодіють через теплообмін. Для цього Гіббс вводить у вихідні рівняння спеціальну змінну – ентропію, що характеризує здатність системи поглинати або віддавати тепло. Завдяки цьому термодинаміка набуває суворої математичної структури, яка узагальнює принципи класичної механіки.

Термодинаміку Гіббса можна розглядати як розширення механічних законів для опису реальних систем, чий рух завжди супроводжується тепловими явищами. При цьому багато емпіричних хімічних законів, таких як закон діючих мас, природно випливають із базисних постулатів термодинаміки у вигляді приватних випадків із строгими математичними формулюваннями. Це підтверджує хибність поширеної думки про те, що класична термодинаміка здатна описувати лише стани рівноваги і не може враховувати швидкість чи інші аспекти процесів без додаткових концепцій.

Класична механіка розглядає стан системи взаємодіючих тіл (сукупність усіх її властивостей) як цілком визначений у кожний момент часу за відсутності зовнішніх полів. Цей стан описується за умови, що відомо характер зв'язків між об'єктами системи та значення двох основних параметрів – загальної кількості речовини і здатності системи обмінюватися роботою. У найпростішому випадку це визначається масою ($m$) і об'ємом ($V$), заданими для певного моменту часу.

Математично цей постулат записується так:

$$f(V,m)=0 \tag{1.1}$$

У більш загальному випадку для опису термодинамічних систем вводять ентропію (S) – параметр, який визначає здатність системи приймати або віддавати тепло:

$$f(S,V,m)=0 \tag{1.2}$$

Цей принцип є основою технічної термодинаміки, яка аналізує речовини незмінного складу. Методики, запропоновані Гіббсом, трансформуються у хімічну термодинаміку шляхом заміни загальної маси (m) на маси k компонентів, що формують систему:

$$f(S,V,m_1,m_2,...,m_k)=0 \tag{1.3}$$

Ентропія, об'єм і маса, представлені у цих рівняннях, складають базовий набір фундаментальних понять, котрі не можуть бути інтерпретовані на рівні феноменологічної (макроскопічної) теорії. Усі інші характеристики, які досліджуються в термодинаміці, є похідними як у загальному значенні, так і в

математичному сенсі цього терміна. Вони формують унікальну мову термодинаміки, побудовану за чітко визначеною логічною структурою.

Наприклад, внутрішня енергія системи, подібно до будь-якої її властивості, залежить від характеристик та функціональних зв'язків між цими основними змінними:

$$U = U(S,V,m_1,...,m_k). \tag{1.4}$$

Її диференціал як функції кількох змінних має вигляд:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,m_i} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,m_i} dV + \sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\partial U}{\partial m_i}\right)_{S,V,m_{j\neq i}} dm_i . \tag{1.5}$$

Похідні у цьому виразі можна трактувати як означення температури, тиску та хімічних потенціалів компонентів:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,m_i} = T, \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,m_i} = -p, \left(\frac{\partial U}{\partial m_i}\right)_{S,V,m_{j\neq i}} = \mu_i . \tag{1.6}$$

Аналогічно вводяться теплоємність, модуль пружності та інші параметри термодинамічної мови. З урахуванням позначень (1.6) вираз (1.5) набуває вигляду:

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^{k} \mu_i dm_i . \tag{1.7}$$

Це рівняння є однією з форм фундаментального співвідношення, яке за конкретного виду функції (1.4) дозволяє проводити практичні розрахунки.

Шляхом перетворення (1.7) отримуємо альтернативну форму:

$$SdT - VdP + \sum_{i=1}^{k} m_i d\mu_i = 0 \tag{1.8}$$

Вирази (1.7) та (1.8) можна подати також у вигляді:

$$\frac{dU}{d\tau} = T\frac{dS}{d\tau} - P\frac{dV}{d\tau} + \sum_{i=1}^{k} \mu_i \frac{dm_i}{d\tau}, \tag{1.9}$$

$$S\frac{dT}{dx} - V\frac{dP}{dx} + \sum_{i=1}^{k} m_i \frac{d\mu_i}{dx} = 0 \tag{1.10}$$

де $\tau$ – час,

x – просторова координата.

Ці рівняння описують взаємозв'язок між узагальненими потоками і силами, що дозволяє впорядкувати задачі кінетики та термодинаміки нерівноважних процесів у рамках єдиної макроскопічної мови. Для переходу до вирішення прикладних задач необхідно уточнити конкретний вигляд функцій (1.4) для фаз, які задіяні у процесі. Це вимагає знань про властивості частинок, хімічні зв’язки, особливості існування компонентів у металі та шлаку, дифузійну рухливість тощо. Такий обсяг інформації часто має неструктурований характер і складається з великої кількості фактів, гіпотез і теоретичних пояснень.

Актуальною стає задача впорядкування цієї інформації, оскільки звичні термодинамічні категорії, такі як температура, тиск, ентропія, втрачають чітке

значення на мікрорівні. При цьому виникає проблема інтерпретації результатів мікроскопічного дослідження властивостей речовин, щоб зробити їх придатними для опису в рамках феноменологічної термодинаміки. Цим питанням займається особливий підрозділ механіки – статистична механіка.

У роботі [1] описано застосування статистичної механіки для визначення конкретних виглядів функції (1.4), особливо у контексті дослідження металургійних розплавів. Для шлакової фази було отримано суттєві відмінності порівняно з вже відомими залежностями, що можна узагальнити так:

1. Усі конденсовані фази складаються з елементів періодичної системи хімічних елементів.

2. Під час обчислення статистичної суми за основну одиницю теплового руху приймаються атомні остови хімічних елементів і вільні електрони.

3. Кількість компонентів у фазі відповідає числу хімічних елементів, що її утворюють. При цьому електрони не вважаються незалежними компонентами, а фаза загалом залишається електронейтральною.

Введення електронів як незалежних одиниць теплового руху дало змогу відмовитися від традиційного запису рівнянь реакцій у конденсованих фазах і уніфікувати підходи до опису електрохімічних та поверхневих явищ, а також процесів у фізиці напівпровідників. У цьому контексті хімічний потенціал компонента конденсованої фази визначається наступним чином:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln x_i + RT \ln \psi_i + \nu_i \mu \qquad (1.11)$$

де $x_i$ – атомна доля елементу $i$;

$\psi_i$ – коефіцієнт активності елементу $i$ без урахування електронного вкладу;

$\nu_i$ – валентність елемента $i$;

$\mu$ – хімічний потенціал електронів в шлаку (рівень Ферми), який зручно виразити, наприклад, через активність (парціальний тиск) будь-якого елементу системи, зокрема кисню:

$$\mu = \mu^0 - \frac{1}{4} RT \ln P_{O_2} \tag{1.12}$$

У металах електронний доданок $v_i \mu$ у виразі (1.11) змінюється зі складом незначно, тому для розрахунків рівноваги з достатньою точністю можна використовувати звичайне наближення:

$$\mu_{[i]} = \mu^0_{[i]} + RT \ln x_{[i]} \gamma_{[i]}, \text{ при цьому } \gamma_{[i]} = \psi_{[i]} \tag{1.13}$$

Тепер рівноважний коефіцієнт розподілу домішкового елемента *i* між металом і шлаком отримуємо з умови рівності хімічних потенціалів цього елемента в обох фазах:

$$\mu_{(i)} = \mu_{[i]} \tag{1.14}$$

Підставляючи (1.11) – (1.13) у (1.14), знаходимо для коефіцієнта розподілу елемента і*i*:

$$l_i = \frac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = K_i P_{O_2}^{v_i/4} = K_i' [O]^{v_i/2} \tag{1.15}$$

Розглянувши аналогічно розподіл сірки між шлаком і газовою фазою, приходимо до відомого рівняння сорбційної здатності шлаку відносно сірки:

$$C_s = (\%S) P_{S_2}^{-1/2} P_{O_2}^{-1/2} \tag{1.16}$$

Значно спрощується опис рівноваг для фаз складного складу, зокрема промислових розплавів. Для розрахунку кількості та складу продуктів, що утворюються під час плавлення шихти відомого складу, записують рівняння матеріальних балансів розподілу елементів між фазами (для спрощення припускаємо утворення лише двох фаз – металу та шлаку):

$$m_i = m_{[i]} + m_{(i)}, \tag{1.17}$$

де $m_i$ – маса елемента $i$ у системі, яка надійшла з шихтою (відома);

$m_{[i]}$, $m_{(i)}$, – маси елемента $i$ у металі та шлаку відповідно (підлягають визначенню).

Усього існує $k$ рівнянь, кожне з яких стосується компонентів, причому загальна кількість невідомих дорівнює $2k$ . Потім до системи додаються умови рівноваги відповідно до формул (1.14). Таким чином, утворюється система з $2k$ рівнянь та $2k$ невідомих. Окрім цього, обов'язково необхідно задавати температуру й тиск системи, оскільки ці параметри безпосередньо впливають на розрахунки хімічних потенціалів. Результатом є визначення мас компонентів металу та шлаку, що забезпечує повну характеристику складу і кількості фаз. Розділивши плавку на етапи між добавками і виконуючи поетапні розрахунки, можна простежити за змінами складу металу та шлаку протягом усього процесу плавлення в умовах рівноважного наближення. Однак реальний процес супроводжується кінетичними відхиленнями, які враховуються через адаптаційні механізми системи до конкретних умов. Це дозволяє моделювати систематичний характер відхилень, спрямованих у бік вихідного стану. На основі цих принципів було створено програмний пакет "Excalibur", призначений для моделювання процесу плавлення як у наукових дослідженнях, так і в освітніх цілях [2].

## 1.2 Застосування ентальпійної теплової моделі

Рівняння теплового балансу базується на першому та другому законах термодинаміки. Зокрема, при ізобарному процесі зміна ентальпії системи відповідає кількості теплоти $Q$, що була поглинута.

$$\Delta H\text{р} = H(T) - H_0 = Q_E - Q_L, \tag{1.18}$$

де $H(T)$ – ентальпія системи у кінцевому стані;

$H_0$ – ентальпія системи у початковому стані;

$Q_E$ – надходження тепла від енергоносіїв;

$Q_L$ – втрати теплоти.

У будь-яких розрахунках ентальпію визначають одним із наведених нижче рівносильних способів:

1) За рівнянням Гіббса–Гельмгольца:

$$H = G - T(\partial G/\partial T)_P ;$$

2) За рівнянням Вант-Гоффа:

$$H = (\partial(G/T)/\partial(1/T))_P .$$

Крім того, парціальну мольну ентальпію змішування можна знайти двома іншими поширеними методами [3]:

3) Через відому активність:

$$h_i^M = -RT^2(\partial \ln a_i / \partial T^2)_P;$$

4) Через відомий коефіцієнт активності:

$$h_i^M = R(\partial \ln \gamma_i / \partial(1/T))_P.$$

Теплоємності (як стандартні, так і теплоємності змішування) обчислюють за формулою:

$$C_p(T) = -T\frac{\partial^2 G(T)}{\partial T^2} = \frac{\partial H(T)}{\partial T} \quad (1.19)$$

Ентальпійна теплова модель є невід'ємним елементом кожної термодинамічної моделі, яка формується на основі принципів рівноважних розрахунків та базується на методі хімічних потенціалів Гіббса. Ця концепція забезпечує узгоджений підхід до аналізу теплових процесів у складних системах.

У вихідному стані розглянута система може складатися з розплавленої суміші "метал-шлак" та додаткових матеріалів, що завантажуються під час процесу: металевого брухту, чавуну, вапна, феросплавів тощо. Залежно від стадії технологічного процесу, ці матеріали можуть вноситися як під час початкового завантаження, так і на етапі плавки чи випуску з печі. Додатково, у систему потрапляють речовини з футеровки печі або ковша, об'єм яких визначається шляхом статистичної оцінки. Наприкінці процесу система досягає певної температури T і в загальному випадку складається з рідких компонентів (металу та шлаку) та газової фази.

Енергію, яку вносять у систему, доцільно розглядати окремо. Її можна інтерпретувати як умовний "матеріал" із нульовою масою, але з фіксованою

стандартною ентальпією, яка дорівнює кількості тепла в джоулях, переданого системі на кожну 1 кВт·год. Якщо електроенергія постачається через графітові електроди, деяка кількість вуглецю також додається до системи. Це дає підставу трактувати "матеріал електроенергія" не лише як джерело енергії, але і як носій вуглецю. Подібний підхід можна застосувати й до інших джерел енергії.

На будь-якому етапі процесу, після надходження матеріалів або енергії, система розглядається як закрита з точки зору матеріального балансу, але відкрита для обміну енергією: як для її внесення, так і для теплових втрат. У разі безперервного введення матеріалів та енергії весь процес поділяється на короткі часові інтервали, протягом яких відбувається проплавлення внесених компонентів. Кожний із цих інтервалів розглядається як перехід системи із початкового стану до кінцевого.

З огляду на визначення енергоносіїв як специфічних "матеріалів", рівняння теплового балансу може бути записане в адаптованій формі й описуватиме динаміку термодинамічних змін у системі.

$$F(T) = H(T)-H_0+Q_L = 0 \qquad (1.20)$$

Оскільки система «метал – шлак – газ» є гетерогенною, виникає необхідність у встановленні єдиного стандартного стану для коректного вираження термодинамічних функцій у різних фазах. У стандартному стані "рідкий метал" енергія Гіббса системи набуває такого вигляду [4]:

$$G = \sum_{i=1}^{k} n_i \mu^{\circ}_{[i]} + RT \sum_{i=1}^{k} [n_{[i]} \ln x_{[i]}\gamma_{[i]} + n_{(i)}(\ln x_{(i)}\gamma_{(i)} - \ln K_{(i)}) + n_{\{i\}}(\ln x_{\{i\}}\gamma_{\{i\}} - \ln K_{\{i\}})] \qquad (1.21)$$

де $n_i$, $n_{[i]}$, $n_{(i)}$, $n_{\{i\}}$ – числа молей $i$-го елементу в системі, в металі, шлаку і газі;

$x_{[i]}$ , $x_{(i)}$ , $x_{\{i\}}$ – мольні долі *i*-го елемента в металі, шлаку і газі;

$g_{[i]}$ , $g_{(i)}$ , $g_{\{i\}}$ – коефіцієнти активності *i*-го елементу в металі, шлаку і газі, які розраховуються у відповідних термодинамічних моделях фаз.

Величини ln K[i} та ln K[i) визначаються так:

$$\ln K_{[i\}} = (\mu^{\circ}_{[i]} - \mu^{\circ}_{\{i\}}) / RT$$
$$\ln K_{[i)} = (\mu^{\circ}_{[i]} - \mu^{\circ}_{(i)}) / RT \qquad \text{(1.22 і 1.23)}$$

де $\mu^{\circ}_{[i]}, \mu^{\circ}_{(i)}, \mu^{\circ}_{\{i\}}$ - стандартні мольні енергії Гіббса *i*-го елемента в металі, шлаку і газі.

У разі використання єдиного стандарту енергії Гіббса, який характеризує перехід атомів із різних фаз до фази, прийнятої за стандарт, відповідні параметри автоматично включаються у функції змішування. При цьому повні (абсолютні) активності елементів у стандартному стані, визначеному як "рідкий метал", описуються таким чином:

$$\ln a_{[i]} = \ln x_{[i]}\gamma_{[i]}; \qquad (1.24)$$

$$\ln a_{(i)} = \ln x_{(i)}\gamma_{(i)} - \ln K_{[i)}; \qquad (1.25)$$

$$\ln a_{\{i\}} = \ln x_{\{i\}}\gamma_{\{i\}} - \ln K_{[i\}}. \qquad (1.26)$$

Отже, за будь-якого вибору стандартного стану енергія Гіббса системи у термінах повних (абсолютних) активностей матиме вигляд:

$$G = \sum_{i=1}^{k} n_i \mu_i^0 + RT \sum_{i=1}^{k} (n_{[i]} \ln a_{[i]} + n_{(i)} \ln a_{(i)} + n_{\{i\}} \ln a_{\{i\}}), \qquad (1.27)$$

де $\mu_i^\circ$ - мольна енергія Гіббса *i*-го елемента у вибраному стандартному стані.

Після вибору єдиного стандарту виконуються такі співвідношення, що спрощують формалізм:

$$\mu_{[i]}^\circ = \mu_{(i)}^\circ = \mu_{\{i\}}^\circ = \mu_i^\circ \quad (1.28)$$

$$h_{[i]}^\circ = h_{(i)}^\circ = h_{\{i\}}^\circ = h_i^\circ \quad (1.29)$$

З аналізу наведених рівнянь випливає, що принципової різниці у виборі єдиного стандарту немає, якщо розглядати виключно систему "метал-шлак-газ" за високих температур, де всі компоненти перебувають у стані розплаву: метал, шлак і газова фаза. Однак традиційно в якості єдиного стандарту вибирають рідкий метал, оскільки саме він є домінуючим елементом і кінцевим продуктом будь-якого процесу сталеплавлення.

У завершеному стані система "метал-шлак-газ" при температурі T характеризується інтегральною ентальпією.

$$H(T) = H°(T)+H^M(T) = H_m(T)+H_s(T)+H_g(T) \quad (1.30)$$

де $H°(T)$ – стандартна інтегральна ентальпія системи;

$H^M(T)$ – інтегральна ентальпія змішення системи;

$H_m(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевого метала;

$H_s(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевого шлаку;

$H_g(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевого газу.

Ентальпії металу, шлаку та газу складаються зі стандартних ентальпій та ентальпій змішування:

$$H_m(T) = H_m^{\circ}(T) + H_m^M(T); \tag{1.31}$$

$$H_s(T) = H_s^{\circ}(T) + H_s^M(T); \tag{1.32}$$

$$H_g(T) = H_g^{\circ}(T) + H_g^M(T); \tag{1.33}$$

де $H_m^{\circ}(T), H_s^{\circ}(T), H_g^{\circ}(T)$ - інтегральні ентальпії фаз у стандартному стані;

$H_m^M(T), H_s^M(T), H_g^M(T)$ - інтегральні ентальпії змішення фаз.

Інтегральні ентальпії, в свою чергу, обчислюються через парціальні величини. Відповідно з єдиним стандартом $h_{[i]}^{\circ} = h_{(i)}^{\circ} = h_{\{i\}}^{\circ} = h_i^{\circ}$, тому

$$H^{\circ}(T) = H_m^{\circ}(T) + H_s^{\circ}(T) + H_g^{\circ}(T) = \sum_{i=1}^{k}[n_{[i]}h_{[i]}^{\circ}(T) + n_{(i)}h_{(i)}^{\circ}(T) + n_{\{i\}}h_{\{i\}}^{\circ}(T)] = \sum_{i=1}^{k} n_i h_i^{\circ}(T), \tag{1.34}$$

де $h_{[i]}^{\circ}(T), h_{(i)}^{\circ}(T), h_{\{i\}}^{\circ}(T)$ - парціальні стандартні ентальпії в металі, шлаку і газу при температурі *T*;

$h_i^{\circ}(T)$ - парціальні стандартні ентальпії *i*-го елементу в будь-якій фазі, яка прийнята за стандарт.

Інтегральна ентальпія змішування системи дорівнює сумі ентальпій змішування фаз і виражається через парціальні величини:

$$H^M(T) = H_m^M(T) + H_s^M(T) + H_g^M(T) = \sum_{i=1}^{k}[n_{[i]}h_{[i]}^M(T) + n_{(i)}h_{(i)}^M(T) + n_{\{i\}}h_{\{i\}}^M(T). \quad (1.35)$$

У початковому стані система «метал – шлак – матеріали» має інтегральну ентальпію:

$$H_0 = H_0^\circ + H_0^M = H_{ms0}(T_0) + \sum_{j=1}^{M} H_j(T_j). \quad (1.36)$$

де $H_0^\circ$ - інтегральна стандартна ентальпія системи в початковому стані;

$H_0^M$ - інтегральна ентальпія змішування системи в початковому стані;

$H_{ms0}(T_0)$ - інтегральна ентальпія підсистеми вихідних металу і шлаку, які мають температуру $T_0$;

$H_j(T_j)$ - інтегральна ентальпія *j*-го матеріалу, що має температуру $T_j$.

Під час оцінки термодинамічних характеристик початкового стану підсистема "метал-шлак", а також кожен окремий матеріал зазвичай розглядаються як незалежні термодинамічні системи, що включають метал, шлак і газ. Ці системи можуть перебувати у стані, який суттєво відрізняється від рівноважного. У певних випадках зручніше трактувати початковий метал і шлак як визначені речовини з фіксованою масою.

Розрахунок термодинамічних параметрів для первинного металу та шлаку виконується аналогічно до їхнього аналізу у фінальному стані, але за умови, що температура $T_0$ є відомою. Формула для визначення інтегральної стандартної ентальпії підсистеми "метал-шлак" подається в наступному вигляді:

$$H^{\circ}_{ms0}(T_0) = H^{\circ}_{m0}(T_0) + H^{\circ}_{s0}(T_0) = \sum_{i=1}^{k}[n_{[i]0}h^{\circ}_{[i]}(T_0) + n_{(i)0}h^{\circ}_{(i)}(T_0)] = \sum_{i=1}^{k} n_{i0}h^{\circ}_{i}(T_0). \qquad (1.37)$$

Інтегральна ентальпія змішування цієї підсистеми дорівнює:

$$H^{M}_{ms0}(T_0) = H^{M}_{m0}(T_0) + H^{M}_{s0}(T_0) = \sum_{i=1}^{k}[n_{[i]0}h^{M}_{[i]}(T_0) + n_{(i)0}h^{M}_{(i)}(T_0)]. \qquad (1.38)$$

Якщо довільний матеріал перебуває в рідкому, газоподібному або змішаному стані, його стандартна ентальпія становить:

$$H^{\circ}_{j} = \sum_{i=1}^{k}[n_{[ij]}h^{\circ}_{[i]}(T_j) + n_{(ij)}h^{\circ}_{(i)}(T_j) + n_{\{ij\}}h^{\circ}_{\{i\}}(T_j)] = \sum_{i=1}^{k} n_{ij}h^{\circ}_{i}(T_j). \qquad (1.39)$$

де $n_{[ij]}, n_{(ij)}, n_{\{ij\}}, n_{ij}$ - число молей *i*-го елемента в *j*-ом матеріалі, відповідно в металевій частині, неметалевій частині, в газовій фазі і в цілому.

Інтегральна ентальпія змішування довільного j-го матеріалу (твердого, рідкого, газоподібного чи гетерогенного) дорівнює:

$$H^{M}_{j} = \sum_{i=1}^{k}[n_{[ij]}h^{M}_{[i]}(T_j) + n_{(ij)}h^{M}_{(i)}(T_j) + n_{\{ij\}}h^{M}_{\{i\}}(T_j)]. \qquad (1.40)$$

Для твердого матеріалу стандартна ентальпія обчислюється як:

$$H_j^{\circ} = \sum_{i=1}^{k} [n_{[ij]} h_{[i]}^{\infty}(T_j) + n_{(ij)} h_{(i)}^{\infty}(T_j)] = \sum_{i=1}^{k} n_{ij} h_i^{\infty}(T_j), \quad (1.41)$$

де $h_{[i]}^{\infty}(T_j), h_{(i)}^{\infty}(T_j)$ - парціальні стандартні ентальпії *i*-го елемента в металевої та неметалевої частинах.

тобто без газової складової.

Термодинамічні функції елементів у стандартному стані беруть із баз даних

«Астра» [5].

Функції змішування для багатокомпонентної конденсованої фази обчислюють згідно з модифікованою моделлю Кольрауша–Ейнштейна (МКЕ) [6].

Для шлакової фази використовують параметризацію [4]:

$$\varepsilon_{(ij)} = (\sqrt{k_i} - \sqrt{k_j})^2, \quad (1.42)$$

де $k_i$ – атомні енергетичні параметри, що мають розмірність кДж/моль.

У принципі, можна застосовувати будь-яку іншу термодинамічну модель фази, яка забезпечує виконання граничного закону Рауля, рівнянь Гіббса–Дюгема та Гіббса–Гельмгольца.

Тепловий ефект хімічних реакцій, узгоджений із термодинамічною моделлю, дорівнює зміні ентальпії змішування системи зі зворотним знаком:

$$Q_r = -\Delta H^M = H_0^M - H^M(T). \quad (1.43)$$

Використовуючи формули (1.35), (1.38) та (1.40), тепловий ефект хімічних реакцій можна виразити у явній формі. Проте важливо враховувати, що такий вираз доступний для розрахунку лише за умови, що відомі кінцевий склад системи та її температура T, тобто лише після розв'язання прямої рівноважної задачі [7].

У багатьох теплових моделях тепловий ефект хімічних реакцій визначався шляхом підсумовування ефектів реакцій окиснення, розглядаючи це як окремий елемент теплового балансу. Такий підхід усуває потребу не лише в явному записі окремих хімічних реакцій, але й у виділенні параметра Qr, який фактично враховується неявно в рівнянні теплового балансу (1.20).

## 1.3 Пряма задача термодинамічного аналізу з використанням теплової моделі

### 1.3.1 Формування задачі

У загальному вигляді пряма задача термодинамічного аналізу зводиться до розв’язання системи рівнянь відносно рівноважних мас елементів, що розподіляються між металом, шлаком і газовою фазою:

$$F(m, \overline{m}_{[]}, \overline{m}_{()}, \overline{m}_{\{\}}, p, T) = 0 \qquad (1.44)$$

де $m$ – вектор мас елементів в системі;

$\overline{m}_{[]}, \overline{m}_{()}, \overline{m}_{\{\}}$ – шукані вектори рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газу;

$p$, $T$ – тиск і температура в системі.

Джерелами надходження мас елементів m є: початкові рідкі метал і шлак, футеровка печі або ковша, а також різноманітні матеріали, що завантажуються

до агрегату, зокрема брухт, чавун, феросплави, лігатури, вапно, кокс, кисневе дуття тощо [3].

### 1.3.2 Вибір моделі системи “метал-шлак-газ”

Як основу для термодинамічного моделювання системи "метал-шлак-газ" (1.44) було обрано детерміновану фізико-хімічну модель колективізованих електронів (МКЕ) [8], яка відзначається високою точністю в описі процесів, що протікають у сталеплавильному агрегаті. Важливою особливістю цієї моделі є включення електронного внеску в хімічний потенціал елементів, присутніх у шлаковій фазі.

Відповідно до принципів МКЕ, стан рівноваги у термодинамічній системі досягається за умови рівності хімічних потенціалів компонентів у всіх фазах. Таким чином, рівновага системи "метал-шлак-газ" математично описується системою рівнянь виду $2k + 1$, де $k$ відповідає кількості хімічних елементів у системі.

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\mu_e\nu_i\right), i = 1..k \\ \dfrac{x_{\{i\}}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i\}}\gamma_i}{\lambda_i}, i = 1..k \\ \sum\limits_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \tag{1.45}$$

де $x_{(i)}$ – мольні долі елементів в шлаку;

$x_{[i]}$ – мольні долі елементів в металі;

$x_{\{i\}}$ – мольні долі елементів в газі;

$K_{[i)}$ – константи рівоваги “метал-шлак”;

$K_{[i\}}$ – константи рівноваги “метал-газ”;

$\gamma_i$ – коефіцієнти активності елементів в металі;

$\psi_i$ – коефіцієнти активності елементів в шлаку;

$\lambda_i$ – коефіцієнти активності елементів в газі;

$\nu_i$ – валентності елементів в шлаку;

$\mu_e$ – рівень Ферми електронів в шлаку;

$T$ – температура в системі;

$R$ – універсальна газова постійна.

Ця система $2k + 1$ нелінійних рівнянь може бути еквівалентно зведена до системи трьох нелінійних рівнянь [1]:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Y\right)\left[1+\exp\left(-Z\right)\right]} = 0 \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i - Y - \mu\nu_i\right)\right]\exp\left(Z - B_i\right)} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Z\right)\left[1+\exp\left(-Y\right)\right]} = 0 \end{cases} \quad (1.46)$$

де $A_i = \ln(K_{[i)}\gamma_i / \psi_i)$ – логарифм консолідированої константи рівноваги “метал-шлак”;

$B_i = \ln(K_{[i\}}\gamma_i / \lambda_i)$ – логарифм консолідированої константи рівноваги “метал-газ”;

$n_i$ – числа молей $i$-го елемента в системі;

$Y = \ln(N_m / N_s)$ – логарифм величини, зворотньої мольної кратності шлаку;

$Z = \ln(N_m / N_g)$ – логарифм величини, зворотньої мольної кратності газу;

Розв’язування нелінійної системи (1.46) дає набір значень $\mu_e$, $Y$, $Z$ за якими визначаються рівноважні вмісти (кількості молей) елементів у шлаку, газі та металі:

$$\begin{aligned} n_{(i)} &= \frac{n_i}{1+\exp(-A_i+Y+\mu_e\nu_i)[1+\exp(B_i-Z)]}; \\ n_{\{i\}} &= \frac{n_i}{1+\exp(-A_i-Y-\mu_e\nu_i)[1+\exp(Z-B_i)]}; \\ n_{[i]} &= n_i - n_{(i)} - n_{\{i\}} \end{aligned} \qquad (1.47)$$

### 1.3.3 Коефіцієнти активності в металі

Коефіцієнти активності елементів у металі, які беруть участь у рівняннях (1.45–1.46), обчислюються на основі моделі нескінченно розбавленого розчину. Це спрощене припущення є цілком достатнім для коректного опису рівноважного стану системи.

### 1.3.4 Коефіцієнти активності в шлаку

Атомні коефіцієнти активності в шлаку, що фігурують у рівняннях (1.45–1.46), обчислюють відповідно до моделі шлаку, прийнятої в МКЕ:

$$\frac{1}{\psi_i} = \sum_{j=1}^{k} x_{(j)} \exp\left(-\frac{(\sqrt{k_i}-\sqrt{k_j})^2}{RT}\right), \qquad (1.48)$$

де $k_i$ – атомний енергетичний параметр $i$-го елемента [13].

### 1.3.5 Коефіцієнти активності в газі

Коефіцієнти активності елементів у газовій фазі визначаються на основі законів Дальтона та Сівертса з урахуванням рівноваги в системі "метал-газ". Підхід, який використовує елементний склад газу $x_{\{i\}}$, відповідні константи рівноваги для системи "метал-газ" $K_{\{i\}}$ і коефіцієнти активності елементів у газі $\lambda_i$, дозволяє стандартизувати представлення хімічних потенціалів і активностей компонентів у газовій фазі. Цей метод також дає змогу одночасно обчислювати парціальні тиски всіх молекулярних та атомарних складових газової фази, забезпечуючи більш універсальний і точний підхід до аналізу [10].

## 1.4 Зворотна задача термодинамічного аналіза з використанням теплової моделі

### 1.4.1 Постанова завдання

Існує безліч варіантів здійснення плавки, позапічної обробки, легування та розкислення сталі. Кожен із методів покликаний забезпечити необхідний хімічний склад напівфабрикату або готової сталі, дотримуючи температурного і шлакового режиму, рівня газонасиченості металу, а також враховуючи технічні характеристики металургійного обладнання, таких як агрегати, дозатори, фурми тощо. Серед цього різноманіття можливих рішень, що відрізняються за своїми кількісними та якісними параметрами, важливо обрати найбільш економічно вигідний спосіб, який би водночас відповідав усім технологічним вимогам.

За наявності адекватної моделі системи "метал-шлак-газ" теоретично можна реалізувати принцип "що буде, якщо". Це передбачає перебір значної кількості варіантів з метою досягнення рішення, яке задовольняло б усім заданим технологічним обмеженням і водночас було б найменш затратним.

Однак повний перебір усіх можливих варіантів є практично неможливим через обмеженість як обчислювальних ресурсів, так і часу. Частковий же перебір не гарантує, що отримане рішення зворотного завдання буде оптимальним.

Революцію у вирішенні зворотних завдань здійснив Л. В. Канторович у 1939 році, запропонувавши симплекс-метод лінійного програмування. Цей підхід став універсальним для широкого кола задач, у яких залежність вихідних параметрів Y від незалежних змінних X є лінійною:

$$Y = K + LX, \tag{1.49}$$

де $K$ – вектор констант; $L$ – лінійний оператор.

Оптимальний вектор X визначається за допомогою стандартного алгоритму симплекс-методу, враховуючи всі можливі обмеження, які стосуються векторів X, Y та їхніх лінійних комбінацій. Основний критерій оптимальності в цьому випадку полягає у забезпеченні мінімуму або максимуму лінійного функціонала $C^TX$, що можна інтерпретувати як вартість варіанта X, якщо вектор C представляє собою значення цін.

У низці досліджень [11, 12, 13, 14] було зроблено спроби застосування методів лінійного програмування для вирішення задачі забезпечення гарантованого хімічного складу сталі. Це реалізувалося за умови мінімізації витрат на розкислювачі та легуючі матеріали. Суть задачі полягала у формулюванні системи нерівностей стосовно необхідного вектора мас шихтових матеріалів (ШМ) X.

$$F^H \le P+(1/M_{ж})UBX \le F^B \tag{1.50}$$

де $F^н$, $F^в$ – вектори заданого хімічного складу (верхня і нижня межі);

$P$ – вектор вихідного складу напівпродукту;

$M_{ж}$ – маса рідкої сталі;

$U$ – діагональна матриця коефіцієнтів засвоєння елементів в металі;

$B$ – матриця елементного складу ШМ.

Розв’язання цієї системи нерівностей здійснювалось із використанням симплекс-методу, при цьому коефіцієнти засвоєння (КЗ) елементів у металі визначалися на основі середньостатистичних значень, характерних для конкретних умов плавлення, початкового і заданого хімічного складу сталі, температури, рівня окислення металу, а також кількості та складу шлаків у печі або ковші.

Однак у реальних системах типу "метал–шлак–газ" відбуваються складні хімічні взаємодії між елементами, через що коефіцієнти засвоєння не є постійними величинами. Вони значно залежать від названих вище факторів, доповнюючись перехресним впливом додатків одних елементів на утримання інших. Будь-яка термодинамічна модель системи "метал–шлак–газ", що враховує хімічні взаємодії складових, за своєю суттю є нелінійною. Це робить її непридатною для розв'язання обернених задач засобами лінійного програмування.

У свою чергу, методи нелінійного програмування, хоча й мають потенціал вирішувати подібні задачі, на сучасному етапі розвитку залишаються радше мистецтвом, ніж повноцінно відпрацьованою системою алгоритмів. Як правило, такі алгоритми розробляють для конкретних завдань із залученням комбінацій методик напрямів градієнту, штрафних функцій, множників Лагранжа чи підходів Куна-Таккера. Проте всі ці методи ефективні лише за відносно невеликої розмірності задачі. Так звана "прокляття багатовимірності", детально описана Е. С. Вентцелем у джерелі [15], часто унеможливлює розв'язання складних задач через нестабільність алгоритмів у багатовимірних (зокрема

багатозв'язних) просторах параметрів або надмірні обчислювальні витрати, які стають недоцільними для виробничих умов.

Водночас реалістичні моделі складних систем "метал–шлак–газ", що враховують хімічні взаємодії елементів, потребують щонайменше 10 змінних відповідно до кількості хімічних елементів. Крім того, кількість різновидів сировинних матеріалів може досягати десятків і навіть сотень, що ще більше ускладнює математичну постановку і розв'язання таких задач.

### 1.4.2 Невизначеність вихідних даних

У дійсності кожна вихідна величина супроводжується похибкою, яка спричиняє варіативність вихідних показників, таких як підсумковий хімічний склад і маса фаз. Додатково є фактори, які або не підлягають прямому вимірюванню, або процес їх визначення супроводжується значними труднощами. Зокрема, це стосується початкових мас металу та шлаку в металургійному агрегаті; маси футеровки ковша, яка зношується під час випуску рідкого металу; ступеня зносу льотки та небажаного потрапляння надмірної кількості пічного шлаку в ківш тощо. Середні значення таких параметрів, а також їхній діапазон змін оцінюються шляхом статистичного аналізу.

В межах розробленого методу вирішення оберненої задачі всі зазначені вище змінні, за винятком шуканого вектора **X**, класифіковані на дві групи: нижню (із позначенням "н") і верхню (з індексом "в"). Таке групування здійснюється відповідно до реальних діапазонів значень цих параметрів. Завдяки цьому підходу, працюючи з довірчими інтервалами на вході, можна отримати довірчі інтервали для прогнозованих значень хімічного складу та мас фаз на виході. Такий методичний підхід забезпечує гарантію дотримання

необхідних технологічних параметрів виключно в межах заданих допустимих значень.

## 1.5 Висновки

1. Метод Гіббса виявився універсальним інструментом для опису хімічних процесів у будь-яких системах, не потребуючи попереднього зображення цих процесів у вигляді стехіометричних реакцій. Ба більше, його феноменологічна термодинаміка – класична, формальна та макроскопічна – надає найзручнішу мову для пояснення суті задач в термінах безпосередньо вимірюваних фізичних характеристик, таких як температура, тиск, хімічний склад, об'єм, маса тощо. Саме ці величини найчастіше використовуються технологами у повсякденній роботі.

2. Встановлено, що на початковому етапі система може складатися з розплаву “метал-шлак” і різноманітних завантажуваних матеріалів, таких як брухт, чавун, вапно, феросплави тощо. У ході плавлення ці матеріали або додаються в процесі, або завантажуються з самого початку. До того ж у систему може потрапляти матеріал футеровки печі чи ковша, кількість якого визначається статистично. У фінальній стадії система досягає певної температури T і загалом складається з трьох основних компонентів: розплавленого металу, шлаку та газової фази.

# РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

## 2.1 Програмний комплекс “EXCALIBUR”

Даний програмний комплекс розроблений для моделювання металургійних процесів на основі термодинамічних розрахунків системи "метал-шлак-газ", з урахуванням ентальпійного теплового балансу.

При розгляданні сталеплавильного агрегату його можна представити як систему, на вхід якої подаються незалежні керуючі параметри **X** (наприклад, витрати матеріалів, енергоносіїв, тиск та температура), а на виході отримується залежний вектор змінних **Y** – як-от метал, шлак і газ певного складу та маси. У цьому контексті пряма задача термодинамічного моделювання означає обчислення функції **Y(X)**. Зворотна задача, своєю чергою, полягає у визначенні набору **X(Y)**. Основна відмінність між ними полягає в тому, що пряма задача має єдине рішення, тоді як зворотна задача допускає нескінченну кількість рішень.

Унікальність програми “Excalibur” полягає у повній реалізації як прямої, так і зворотної задачі, які працюють у тандемі. Алгоритм розв’язання прямої задачі базується на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази та її модифікаціях (згідно з роботами [16–18]), а також використовує ентальпійний тепловий баланс [19, 20] та враховує кінетичну затримку [21]. Для розв’язання зворотної задачі впроваджений універсальний метод фазових операторів [22], одним з прикладних варіантів якого є диференційні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) для металу [23].

Програма “Excalibur” є продовженням розвитку інформаційно-технологічних систем “Форвард” [24] та “Оракул” [25], в розробці яких брали участь автори. Один із її варіантів реалізації – система керування плавкою та

позапічною обробкою “Гіббс” [26, 27] – знайшла промислове застосування на Білоруському металургійному заводі у 2004 році.

## 2.2 Перелік можливостей і перспективи застосування в металургійному виробництві

Програмне забезпечення “Excalibur” значно перевершує раніше створені аналоги для термодинамічного моделювання системи “метал-шлак-газ” завдяки своїм розширеним функціоналам. Нижче наведено ключові переваги цієї програми, які виділяють її серед інших подібних розробок:

- Проведення термодинамічних розрахунків рівноваги для багатокомпонентних гетерогенних систем “метал-шлак-газ”, із врахуванням теплових ефектів хімічних реакцій.

- Інтеграція термодинамічного підходу для визначення фінальної температури системи на основі ентальпійного теплового балансу.

- Точне врахування встановленого зовнішнього тиску та розрахунок парціальних тисків усіх атомних і молекулярних компонентів газової фази.

- Розрахунок та відображення інтегральних і парціальних термодинамічних функцій компонентів системи, включно з різними фазами та хімічними елементами, за єдиним стандартом.

- Детальний облік теплових параметрів енергоносіїв, теплових втрат, температури та агрегатного стану матеріалів.

- Моделювання та візуалізація кінетики взаємодії фаз у процесі сталеплавлення із застосуванням принципів нерівноважної термодинаміки та розв’язання динамічних диференціальних рівнянь.

- Комплексний розрахунок усіх стадій плавки в дуговій сталеплавильній печі (ДСП): динаміка плавлення брухту, зміни маси та складу шлаку, металу і газів, контроль температури протягом процесу. Врахування кінетичного

відставання, скачування шлаку, теплових втрат та геометричних параметрів печі.

- Проведення розрахунків для широкого діапазону компонентів і температур з можливістю застосування у феросплавному та доменному виробництві.

Крім того, програма “Excalibur” здатна якісно та точно вирішувати зворотні задачі термодинамічного моделювання, забезпечуючи:

- Оптимізацію маси використаних легуючих і шихтових матеріалів (в будь-якому агрегатному стані) та витрат енергоносіїв з врахуванням мінімізації загальної вартості або максимізації продуктивності сталеплавильного виробництва.

- Постановку та дотримання набору односторонніх і двосторонніх обмежень щодо хімічного складу і маси металу, шлаку, газу, шихтових матеріалів, витрат енергоносіїв, а також кінцевої температури системи.

- Використання матричної алгебри фазових операторів разом із високопродуктивними алгоритмами, зокрема двоїчним симплекс-методом.

- Аналіз перехресного впливу складу окремих елементів на ступінь їхнього засвоєння в кожній з фаз.

- Створення консолідованої матриці залежностей між домішками матеріалів, енергоносіями, масою фаз та складом системи, а також температурами процесу.

- Можливість врахування невизначеності вихідних і розрахункових показників завдяки встановленню довірчих інтервалів “нижня межа - верхня межа”.

- Реалізацію концепції ситуаційного управління виробничими процесами через формування альтернативних сценаріїв легування, розкислення та позапічної обробки сталі у разі неможливості вирішення вихідної задачі у стандартному вигляді.

## 2.3 Концептуальна структурна схема

На ілюстрації 2.1 зображено концептуальну блок-схему програми "Excalibur". Після запуску програма автоматично завантажує файли з даними проекту, константами, параметрами Вагнера, а також інформацію, що стосується газів, матеріалів і специфіки завдань. Опрацювання матеріалів стартує з останнього активного завдання.

Для виконання розрахунків прямого чи зворотного завдання користувач може скористатися відповідними кнопками інструментальної панелі або пунктами меню. Результати прямих розрахунків включають визначення мас та складу металу, шлаку й газової фази, парціальних тисків складників газу та фінальної температури системи. Фазові склади подаються в декількох формах: масові або мольні відсотки, кілограми чи кіломолі. Крім того, програма обчислює об’єм виділеного газу, основність шлаку, окислювально-відновний потенціал системи, хімічні потенціали, парціальні ентальпії змішування елементів у всіх фазах і тепловий ефект хімічних реакцій. Для кожного розрахованого показника надається довірчий інтервал із зазначенням його мінімальних і максимальних значень.

У зворотному завданні додатково виконується визначення оптимальних мас матеріалів, які забезпечують дотримання заданих обмежень для процесу плавки. Обидва типи задач вирішуються надзвичайно швидко: прямі та зворотні зазвичай займають лише 0,01–1 секунду. Завданням кінетики, моделюванню плавки в дугових сталеплавильних печах (ДСП) або пошуку альтернатив у зворотному завданні потрібно більше часу – від 0,01 до 2 хвилин. Більшість розрахункових результатів відображаються на основному екрані програми для зручності перегляду.

Інтерфейс програми спроектовано таким чином, щоб бути інтуїтивно зрозумілим навіть для користувачів з мінімальною підготовкою в галузі чорної

металургії або інформатики. Маніпуляції з файлами і друком результатів здійснюються за допомогою звичних інструментів: стандартних кнопок панелі інструментів, комбінацій клавіш або пунктів меню. У таблицях з характеристиками матеріалів, елементів та газів передбачено контекстні спливаючі меню для спрощення роботи.

У випадку перевищення вмісту певного елемента в металі чи шлаку, що виходить за межі встановлених обмежень завдання на плавку, відповідні значення в таблиці виділяються червоним кольором для привертання уваги користувача до відхилення від норми.

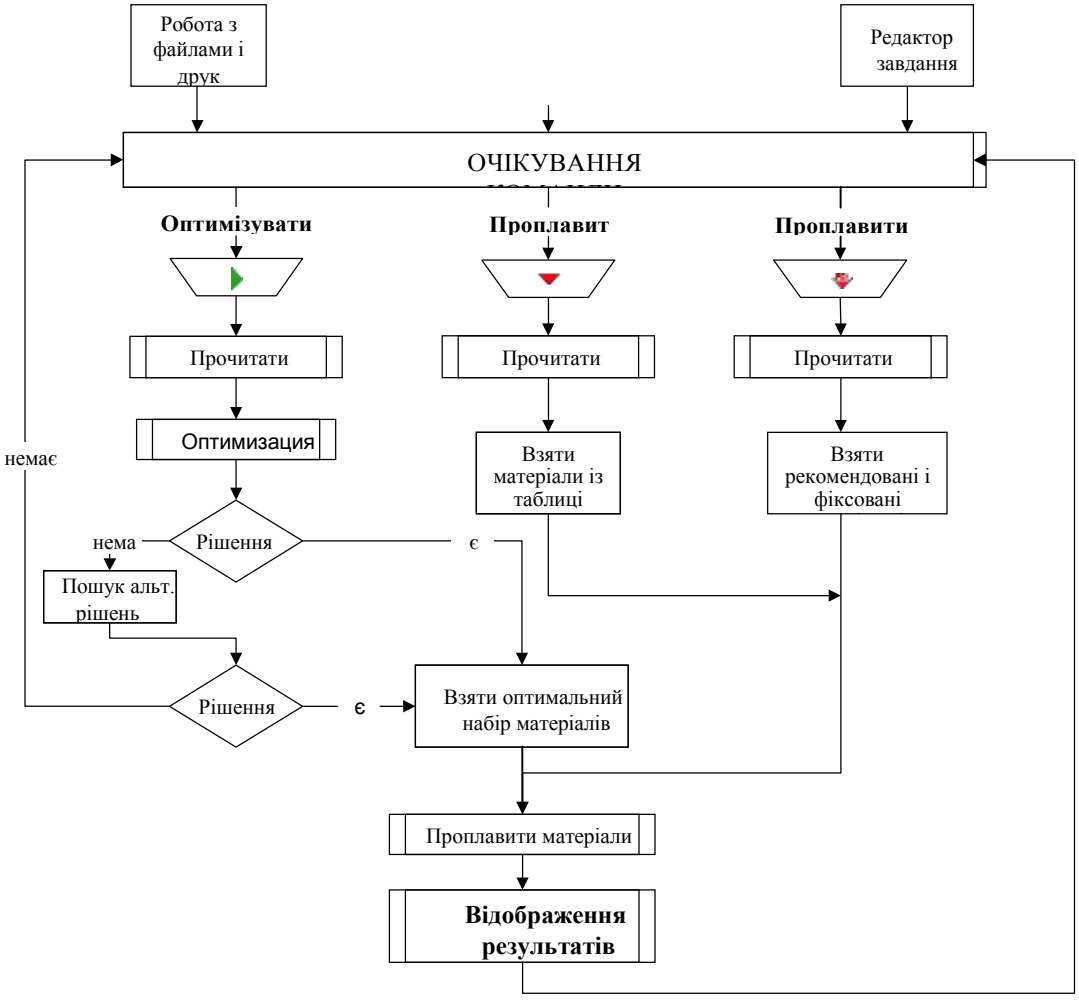



Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема ключових режимів функціонування програми «Excalibur»

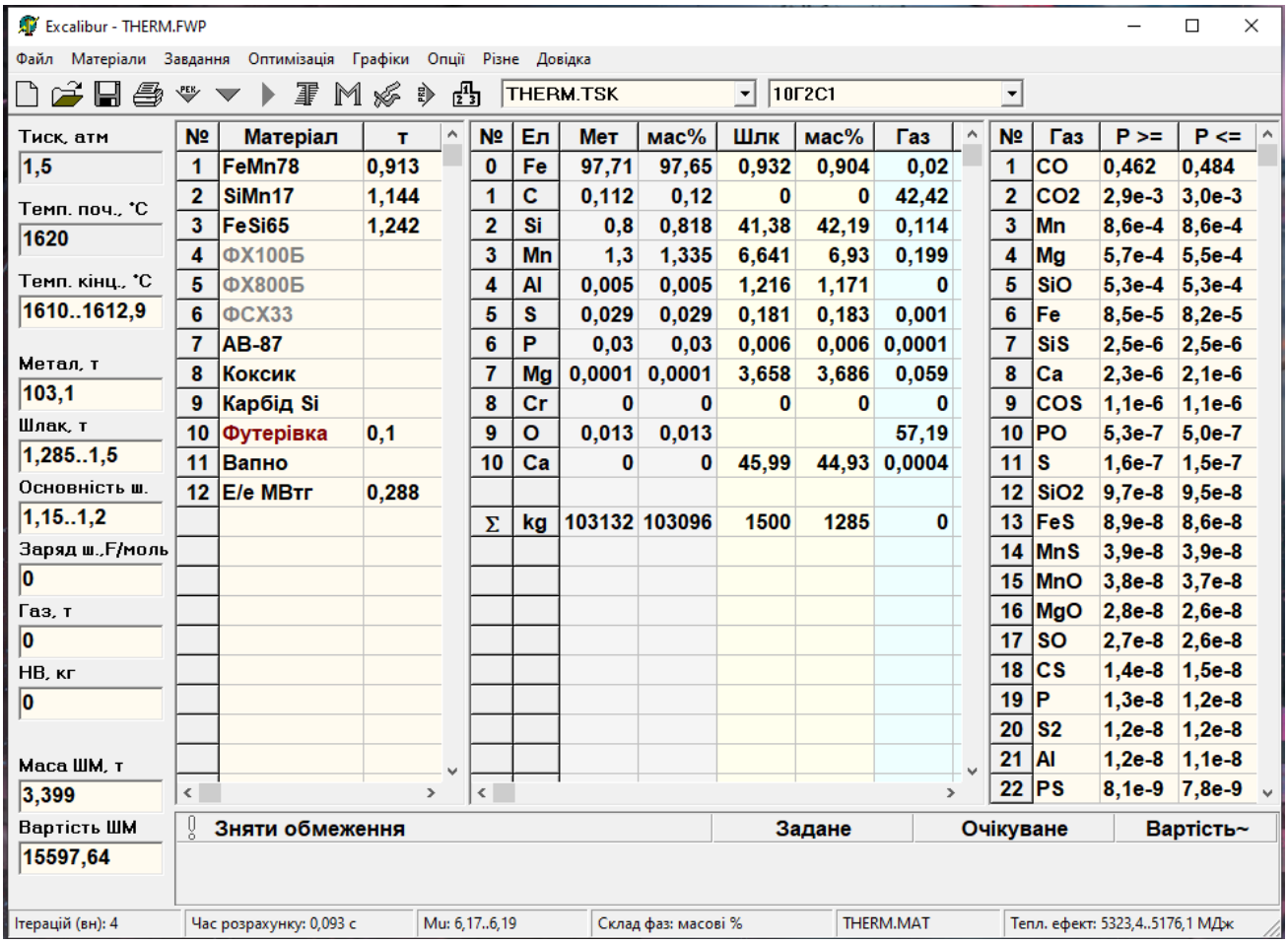



Рисунок 2.2 – Інтерфейс головного вікна програми «Excalibur»

У будь-якому режимі функціонування системи "Excalibur" головна увага спрямована на управління завданням плавки, яке включає як пряме, так і зворотне моделювання процесу. У зв’язку з цим надзвичайно важливу роль відіграє редактор завдання плавки. Для спрощення та оптимізації роботи з ним була створена спеціалізована форма (рис. 2.3), що дозволяє користувачам зручно налаштовувати параметри завдання.

На цій формі за допомогою інтерактивних таблиць і полів можна вводити будь-які необхідні вихідні дані та задавати оптимізаційні обмеження (як односторонні, так і двосторонні) для металу, шлаку, газу, а також для всіх доступних або недоступних матеріалів і енергоносіїв. Серед параметрів, які

можна встановлювати, передбачено хімічний склад і масовий діапазон вихідного металу та шлаку, початкову температуру, температуру довкілля, бажаний склад металу та шлаку, необхідну їх масу, кінцеву температуру металу, а також величину теплових втрат, виражену в мегаджоулях.

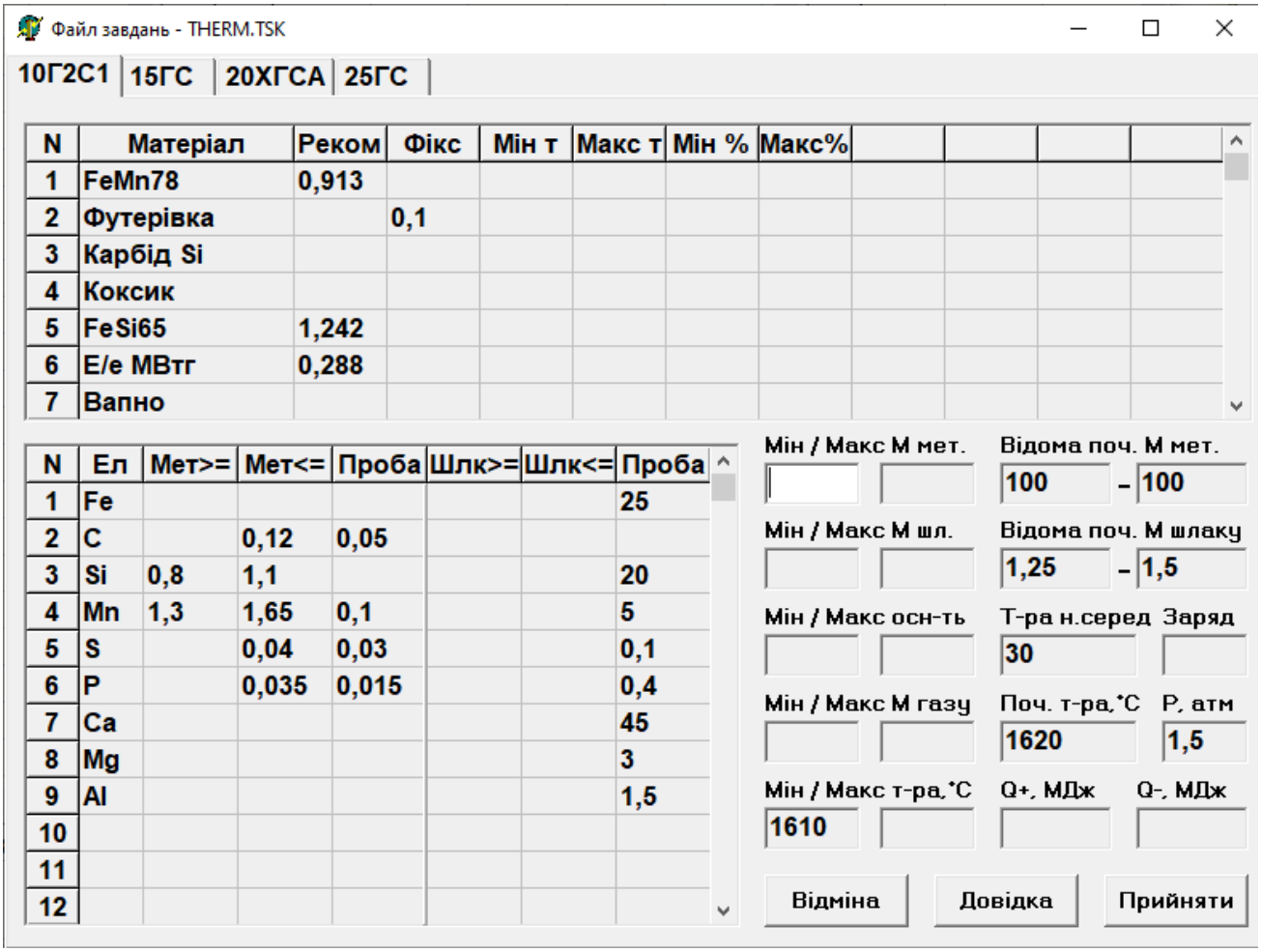



Рисунок 2.3 – Вікно редактора параметрів плавильного завдання

Кожному матеріалу в системі можна задавати рекомендовану масу, фіксовану (обов’язкову) масу, а також встановлювати верхні й/або нижні межі його використання як у тоннах, так і у відсотках від загальної маси всіх матеріалів.

Редактор завдань підтримує роботу з до 100 різними завданнями для плавки, які можуть бути збережені у спеціальному файлі. В межах редактора управляти файлами завдань і окремими завданнями дозволяє контекстне меню (рис. 2.4). На головній формі (рис. 2.2) для швидкого перемикання між файлами завдань і конкретними завданнями передбачено два випадаючі списки у верхній частині інтерфейсу.

Для моделювання процесу плавки металу в дуговій електропечі (ДСП) створена окрема форма, яка в режимі реального часу візуалізує всі ключові параметри цього технологічного процесу. Схематичний вигляд форми представлений на рис. 2.5.

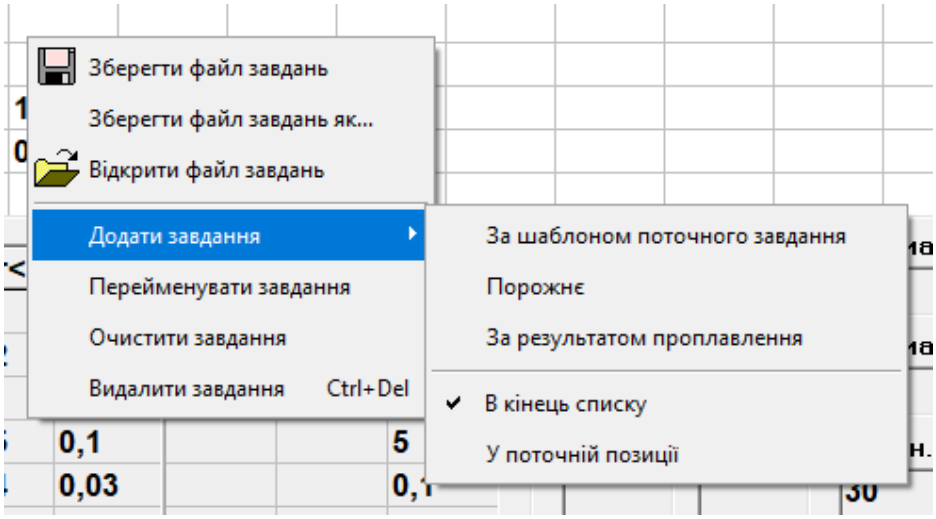



Рисунок 2.4 – Контекстне меню форми редагування плавильного завдання

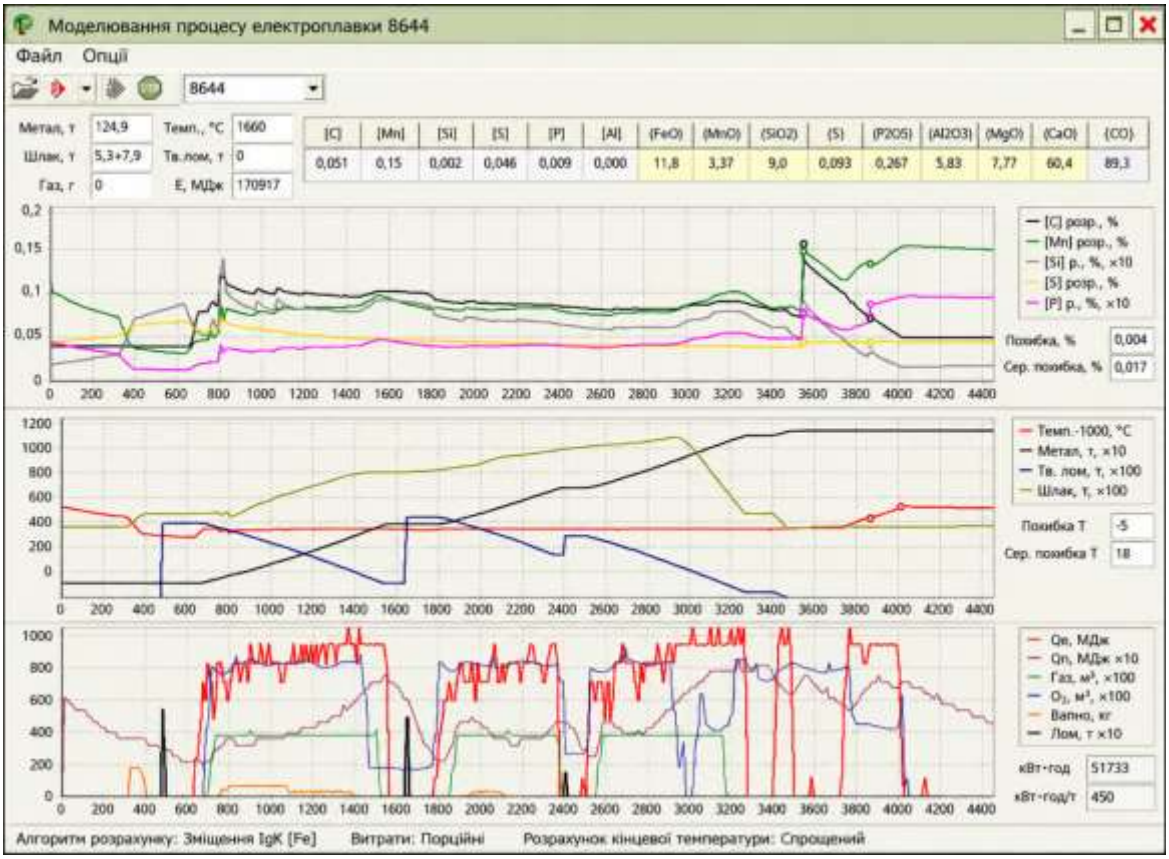



Рисунок 2.5 – Вікно імітаційного моделювання плавильного процесу в дуговій сталеплавильній печі

Під час моделювання процесу електроплавки використовуються додаткові файли, в яких враховуються дані про подачу сировини та енергоносіїв у піч, а також теплові втрати. Завдяки застосуванню розроблених алгоритмів прямої та зворотної задач, які беруть до уваги тепло хімічних реакцій та ентальпійний тепловий баланс, можна значно підвищити ефективність проектування технологій для електросталеплавильного виробництва. Ці алгоритми фактично становлять інтелектуальне ядро верхнього рівня систем управління технологічними процесами дугових сталеплавильних печей (ДСП).

У таблиці 2.1 наводиться приклад використання зворотної задачі для оптимізації легування сталі марки 12ГС під час її випуску в ківш. Для цієї сталі необхідно забезпечити такі параметри складу: вміст вуглецю повинен становити

0,09-0,15%, марганцю – 0,8-1,2%, кремнію – 0,5-0,8%, сірки – не більше 0,040%, фосфору – не більше 0,035%.

Розглянемо перший варіант легування, що не є результатом оптимізації. У цьому випадку максимальна сумарна вартість матеріалів становить 8809 грн, однак спостерігається надмірний вміст марганцю в сталі, тоді як вміст кремнію може бути нижчим за допустимий рівень.

Для здійснення оптимізації матеріалів користувач може використати один із трьох способів, доступних на головній формі програми – наприклад, натиснувши функціональну клавішу F10. Обчислювальний процес триває лише частки секунди. Для отримання сталі заданого складу система запропонує набір матеріалів – 1,952 т SiMn (феросилікомарганець), 0,72 т FeSi65 (феросиліцій із вмістом 65% кремнію) і 0,398 т карбіду кремнію. Загальна вартість такого набору становитиме вже 7111 грн (варіант II).

За допомогою контекстного меню таблиці матеріалів, яке викликається через натискання правої кнопки миші, користувач може поступово виключати певні матеріали зі списку доступних. Наприклад, видаливши карбід кремнію, феросиліцій або феромарганець, після чого повторно проводиться оптимізація. У міру введення кожного нового обмеження загальна вартість легування збільшується (варіанти III-V), але при цьому система забезпечує мінімальну вартість для кожного конкретного набору умов.

Подальше виключення доступних матеріалів змусить алгоритм шукати альтернативні рішення. Проте такі варіанти вже можуть не повністю відповідати заданим вимогам до складу сталі.

Таблиця 2.1 – Вхідні параметри та результати обчислень для різних варіантів легування сталі марки 12ГС

| **Матеріали** | **Ціна за 1 т, грн.** | **Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** |
| FeMn | 2375 | 2 | | 1,496 | 1,5 | нет |
| SiMn | 2550 | | 1,952 | | | 1,955 |
| FeSi45 | 1955 | | | | 2,394 | 1,668 |
| FeSi65 | 2300 | 1,5 | 0,72 | 1,647 | нет | нет |
| АВ-87 | 6085 | 0,1 | | | | |
| Коксик | 140 | | | | | 0,079 |
| Карбид Si | 1200 | | 0,398 | нет | нет | нет |
| **Вартість легування, грн.** | | **8809** | **7111** | **7341** | **8243** | **8257** |

| **Склад металу, %** | **На випускі** | **Завдан-ня** | **Метал в ковші** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [C] | 0,05 | 0,09-0,15 | 0,12-0,14 | 0,13-0,15 | 0,10-0,12 | 0,10-0,12 | 0,09-0,11 |
| [Si] | | 0,50-0,80 | 0,48-0,57 | 0,50-0,59 | 0,50-0,59 | 0,50-0,59 | 0,50-0,59 |
| [Mn] | 0,05 | 0,80-1,20 | 1,03-1,10 | 0,80-0,83 | 0,80-0,85 | 0,80-0,86 | 0,80-0,83 |
| [S] | 0,038 | ≤ 0,040 | 0,015-0,016 | 0,015-0,017 | 0,015-0,017 | 0,015-0,016 | 0,015-0,016 |
| [P] | 0,015 | ≤ 0,035 | 0,025-0,028 | 0,023-0,027 | 0,023-0,026 | 0,023-0,027 | 0,024-0,027 |
| Маса металу, т | 147-151 | | 150,4-154,5 | 149,9-154 | 150,0-154,1 | 150,7-154,8 | 150,5-154,6 |
| **Склад шлаку, %** | **На випуску** | **Завдан-ня** | **Шлак в ковші** | | | | |
| (FeO) | 23 | | 0,20-0,23 | 0,21-0,23 | 0,22-0,24 | 0,21-0,22 | 0,21-0,23 |
| ($SiO_2$) | 16 | | 34,6-34,7 | 39,8-43,9 | 39,7-43,8 | 39,8-43,9 | 39,8-43,9 |
| (MnO) | 5 | | 2,35-2,43 | 1,97-1,98 | 1,99-2,07 | 1,96-2,04 | 1,97-1,99 |
| ($Al_2O_3$) | 1,5 | | 6,93-11,2 | 1,74-1,76 | 1,74-1,76 | 1,74-1,75 | 1,74-1,75 |
| (CaO) | 50 | ≤ 55 | 45,8-50,8 | 46,5-51,2 | 46,8-51,2 | 46,4-51,2 | 46,4-51,2 |
| (MgO) | 4 | | 4,30-4,41 | 4,43-4,32 | 4,43-4,32 | 4,43-4,31 | 4,43-4,31 |
| (S) | 0,1 | | 1,29-2,78 | 1,29-2,77 | 1,28-2,77 | 1,31-2,83 | 1,30-2,87 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ($P_2O_5$) | 0,4 | | 0,003-0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Маса шлаку, т | 1,25-2,5 | ≤ 3,0 | 1,4-2,49 | 1,38-2,47 | 1,38-2,47 | 1,38-2,47 | 1,38-2,47 |
| Темпера-тура, С | 1625 | ≥ 1570 | 1581-1594 | 1583-1596 | 1586-1599 | 1578-1592 | 1582-1595 |

Примітка. Для спрощеного варіанту І оптимізація не виконувалася.

## 2.4 Висновки

Програма “Excalibur” представляє собою високотехнологічний продукт, в якому втілено найсучасніші досягнення теорії металургійних процесів за останні тридцять років. Вона надає детальні відповіді на будь-які запитання, що виникають у процесі термодинамічного моделювання системи "метал-шлак-газ", враховуючи ентальпійний тепловий баланс. Даний інструмент є незамінним для дослідників і технологів, даючи змогу впроваджувати інноваційні технологічні рішення, моделювати різноманітні варіанти ходу плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурації та дефосфорації сталі. Крім того, “Excalibur” може успішно використовуватися як навчальна платформа для студентів, які спеціалізуються на металургії. Я особисто неодноразово користувався нею під час свого навчання і маю тільки позитивні враження.

# РОЗДІЛ 3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА

## 3.1 Визначення об’єкта дослідження

У межах дипломної роботи об'єктом дослідження обрано чотири марки сталі: 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА та 25ГС.

### 3.1.1 Сталь 10Г2С1 – конструкційна низьколегована для зварних конструкцій

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 10Г2С1, згідно ГОСТ 5520-79 [28], мас. %

| C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | As | N | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ≤0,12 | 0,8-1,1 | 1,3 -1,65 | ≤0,04 | ≤0,035 | ≤0,30 | ≤0,30 | ≤0,08 | ≤0,008 | ≤0,30 |

Сталь 10Г2С1 в гарячекатаному та нормалізованому стані знаходить широке застосування в будівництві, хімічній галузі, мостобудуванні та вагонобудуванні. З листового прокату часто виготовляють деталі та елементи корпусної обшивки котельних установок, трубопровідних ліній парового та гарячого водопостачання та іншого обладнання, що працює під тиском і при температурах в інтервалі від -70 до +475 °С.

### 3.1.2 Сталь 15ГС - конструкційна низьколегована для зварних конструкцій

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сталі 15ГС, згідно ТУ 14-3Р-55-2001 [29], мас. %

| C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,12 - 0,18 | 0,7 -1 | 0,9 -1,3 | ≤0,025 | ≤0,035 | ≤0,3 | ≤0,3 | ≤0,3 |

Основним призначенням цієї марки є виготовлення безшовних гарячедеформованих труб, а також листового та фасонного прокату. Матеріал зберігає стабільні механічні властивості в діапазоні температур від -40 °С до +400 °С, що дозволяє використовувати його у відповідальних конструкціях, які працюють під тиском.

### 3.1.3 Сталь 20ХГСА - конструкційна легована хромокремнемарганцева.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сталі 20ХГСА, згідно ГОСТ 4543-71[30], мас. %

| C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,17 - 0,23 | 0,9 -1,2 | 0,8 -1,1 | ≤0,025 | ≤0,025 | 0,8-1,1 | ≤0,30 | ≤0,3 |

Сталь 20ХГСА - це конструкційна легована хромокремнемарганцева сталь, яка використовується для відповідальних деталей, що працюють під високими навантаженнями. Відрізняється високою міцністю, в'язкістю, зносостійкістю та здатністю до загартування. Застосовується для осей, валів, гвинтів, що працюють в умовах зносу і знакозмінних навантажень.

### 3.1.4 Сталь 25ГС – Сталь для виливків звичайна

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сталі 25ГС, згідно ГОСТ 8479 – 70 [31], мас. %

| C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,22 - 0,26 | 0,6 -0,9 | 1 -1,3 | ≤0,035 | ≤0,04 | ≤0,3 | ≤0,3 | ≤0,3 |

Сталь 25ГС належить до групи низьколегованих конструкційних сталей, призначених для виготовлення зварних металоконструкцій, поковок та деталей трубопровідної арматури, що працюють під тиском. Завдяки високій зварюваності (сталь відноситься до категорії «без обмежень зварювана», не потребує попереднього підігріву та наступної термообробки) та достатній міцності (вміст вуглецю 0,20-0,26% та марганцю 1,00-1,30%), сталь 25ГС широко використовується в загальному машинобудуванні, будівництві та при виробництві деталей, що експлуатуються під тиском.

## 3.2 Методика проведення обчислювального експерименту із застосуванням програми «Excalibur»

Для отримання масиву даних, необхідного для подальшого аналізу впливу різних теплоенергетичних параметрів плавки, було сформовано паспорти розкислення та легування. Для кожної досліджуваної марки сталі, а також для кожного значення температури й тиску ці паспорти містять таку інформацію:

1) Основні показники:

- тиск, атм

- температура навколишнього середовища, ºС
- початкова температура, ºС
- задана температура, ºС
- кінцева температура, ºС
- початкова маса металу, т
- задана маса металу, т
- кінцева маса металу, т
- початкова маса шлаку, т
- задана маса шлаку, т
- кінцева маса шлаку, т
- задана основність шлаку, т
- кінцева основність шлаку, т
- задана маса газу, т
- кінцева маса газу, т
- кінцевий об’єм газу, $м^3$
- фактична маса матеріалів, т
- фактична вартість матеріалів, у.е.

2) Матеріали. По кожному із материалів приводилися наступні дані:

- фактична маса, т;
- оптимальна маса, т;
- рекомендована маса, т;
- обов’язкова маса, т;
- мінімальна маса, %;
- максимальна маса, %.

3) Система “метал-шлак-газ”. По кожному елементу в кожній з трьох фаз приводяться наступні дані:

- початковий вміст, %;
- заданий мінімальний, максимальний, середній вміст,%;

- кінцевий мінімальний, максимальний , середній вміст %;
- кінцевий мінімальний, максимальний і середній вміст, кг.

### 3.2.1 Паспорт розкислення-легування сталі 10Г2С1

Таблиця 3.5 – Основні показники

| № | Показник | Од.вим. | Мінімум | Максимум | Середнє |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Тиск** | атм | | | 1,5 |
| 2 | **Температура навк. серед.** | °C | | | |
| 3 | **Температура початкова** | °C | | | 1620 |
| 4 | **Температура задана** | °C | 1610 | | |
| 5 | **Температура кінцева** | °C | 1610 | 1612,9 | 1611 |
| 6 | **Маса металу початкова** | т | 100 | 100 | 100 |
| 7 | **Маса металу задана** | т | | | |
| 8 | **Маса металу кінцева** | т | | | 103,1 |
| 9 | **Маса шлаку початкова** | т | 1,25 | 1,5 | 1,375 |
| 10 | **Маса шлаку задана** | т | | | |
| 11 | **Маса шлаку кінцева** | т | 1,285 | 1,5 | 1,39 |
| 12 | **Основність шлаку задана** | т | | | |
| 13 | **Основність шлаку кінцева** | т | 1,15 | 1,2 | 1,18 |
| 14 | **Маса газу задана** | т | | | |
| 15 | **Маса газу кінцева** | т | | | 0 |
| 16 | **Об'єм газу кінцевий** | $м^3$ | | | 0 |
| 17 | **Маса матеріалів факт** | т | | | 3,399 |
| 18 | **Вартість матеріалів факт** | у.о. | | | 15597,64 |

Таблиця 3.6 – Метал-шлак-газ

**Метал**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 97,65 | 97,71 | 97,68 | 100674 | 100771 | 100723 |
| 2 | **C** | 0,05 | | 0,12 | | 0,112 | 0,12 | 0,116 | 115,49 | 123,7 | 119,59 |
| 3 | **Si** | | 0,8 | 1,1 | 0,95 | 0,7998 | 0,8185 | 0,8091 | 824,81 | 843,84 | 834,32 |
| 4 | **Mn** | 0,1 | 1,3 | 1,65 | 1,475 | 1,3 | 1,335 | 1,317 | 1340,58 | 1376,09 | 1358,34 |
| 5 | **Al** | | | | | 0,00473 | 0,00501 | 0,00487 | 4,871 | 5,163 | 5,017 |
| 6 | **S** | 0,03 | | 0,04 | | 0,02879 | 0,02891 | 0,02885 | 29,69 | 29,8 | 29,75 |
| 7 | **P** | 0,015 | | 0,035 | | 0,02965 | 0,03006 | 0,02985 | 30,57 | 31 | 30,78 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | **Mg** | | | | | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 | 0,06898 | 0,07079 | 0,06988 |
| 9 | **Cr** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | 0,01291 | 0,01305 | 0,01298 | 13,31 | 13,46 | 13,39 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,00007 | 0,00008 | 0,00008 |

**Шлак**

| № | Компо-ненты | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий (оксид.), % | | | Кінцевий (оксид.), кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **FeO** | 25 | | | | 0,9042 | 0,9324 | 0,9183 | 11,62 | 13,98 | 12,8 |
| 2 | **C** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | **SiO2** | 20 | | | | 41,38 | 42,19 | 41,78 | 542,13 | 620,51 | 581,32 |
| 4 | **MnO** | 5 | | | | 6,641 | 6,93 | 6,785 | 89,04 | 99,59 | 94,31 |
| 5 | **Al2O3** | 1,5 | | | | 1,171 | 1,216 | 1,193 | 15,04 | 18,24 | 16,64 |
| 6 | **S** | 0,1 | | | | 0,1815 | 0,1835 | 0,1825 | 2,357 | 2,721 | 2,539 |
| 7 | **P2O5** | 0,4 | | | | 0,00578 | 0,00608 | 0,00593 | 0,07432 | 0,09116 | 0,08274 |
| 8 | **MgO** | 3 | | | | 3,658 | 3,686 | 3,672 | 47,36 | 54,86 | 51,11 |
| 9 | **Cr2O3** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | | | | | | |
| 11 | **CaO** | 45 | | | | 44,93 | 45,99 | 45,46 | 577,25 | 689,71 | 633,48 |

**Газ**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 0,01889 | 0,02009 | 0,01949 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | **C** | | | | | 42,42 | 42,43 | 42,42 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | **Si** | | | | | 0,108 | 0,1136 | 0,1108 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | **Mn** | | | | | 0,195 | 0,1991 | 0,1971 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | **Al** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | **S** | | | | | 0,00111 | 0,00114 | 0,00112 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | **P** | | | | | 0,00012 | 0,00013 | 0,00013 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | **Mg** | | | | | 0,05549 | 0,05877 | 0,05713 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | **Cr** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | 57,19 | 57,19 | 57,19 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0,00035 | 0,0004 | 0,00037 | 0 | 0 | 0 |

Таблиця 3.7 – Матеріали

| № | Матеріал | Факт, т | Оптим,т | Реком,т | Обов, т | Мін, т | Макс, т | Мін, % | Макс,% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **FeMn78** | 0,913 | | 0,913 | | | | | |
| 2 | **SiMn17** | 1,144 | | 1,144 | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | **FeSi65** | 1,242 | | 1,242 | | | | | |
| 4 | **ФХ100Б** | | | | 0 | | | | |
| 5 | **ФХ800Б** | | | | 0 | | | | |
| 6 | **ФСХ33** | | | | 0 | | | | |
| 7 | **АВ-87** | | | | | | | | |
| 8 | **Коксик** | | | | | | | | |
| 9 | **Карбід Si** | | | | | | | | |
| 10 | **Футерівка** | 0,1 | | | 0,1 | | | | |
| 11 | **Вапно** | | | | | | | | |
| 12 | **Е/е МВтг** | 0,288 | | 0,288 | | | | | |

### 3.2.2 Паспорт розкислення-легування сталі 15ГС

Таблиця 3.8 – Основні показники

| № | Показник | Од.вим. | Мінімум | Максимум | Середнє |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **Тиск** | **атм** | | | **1,5** |
| **2** | **Температура навк. серед.** | **°С** | | | |
| **3** | **Температура початкова** | **°С** | | | **1620** |
| **4** | **Температура задана** | **°С** | **1610** | | |
| **5** | **Температура кінцева** | **°С** | **1610** | **1613,2** | **1612** |
| **6** | **Маса металу початкова** | **т** | **100** | **100** | **100** |
| **7** | **Маса металу задана** | **т** | | | |
| **8** | **Маса металу кінцева** | **т** | | | **102,4** |
| **9** | **Маса шлаку початкова** | **т** | **1,25** | **1,5** | **1,375** |
| **10** | **Маса шлаку задана** | **т** | | | |
| **11** | **Маса шлаку кінцева** | **т** | **3,016** | **3,228** | **3,122** |
| **12** | **Основність шлаку задана** | **т** | | | |
| **13** | **Основність шлаку кінцева** | **т** | **3,34** | **3,55** | **3,45** |
| **14** | **Маса газу задана** | **т** | | | |
| **15** | **Маса газу кінцева** | **т** | | | **0** |
| **16** | **Об'єм газу кінцевий** | **$м^3$** | | | **0** |
| **17** | **Маса матеріалів факт** | **т** | | | **4,369** |
| **18** | **Вартість матеріалів факт** | **у.о.** | | | **11897,74** |

Таблиця 3.9 – Метал-шлак-газ

**Метал**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 98,09 | 98,16 | 98,12 | 100447 | 100554 | 100500 |
| 2 | **C** | 0,05 | 0,12 | 0,18 | 0,15 | 0,168 | 0,18 | 0,174 | 172,1 | 184,29 | 178,2 |
| 3 | **Si** | | 0,7 | 1 | 0,85 | 0,6999 | 0,724 | 0,712 | 716,97 | 741,41 | 729,19 |
| 4 | **Mn** | 0,1 | 0,9 | 1,3 | 1,1 | 0,8999 | 0,9384 | 0,9192 | 921,87 | 960,98 | 941,42 |
| 5 | **Al** | | | | | 0,01151 | 0,01192 | 0,01171 | 11,79 | 12,21 | 12 |
| 6 | **S** | 0,03 | | 0,025 | | 0,02484 | 0,025 | 0,02492 | 25,44 | 25,61 | 25,52 |
| 7 | **P** | 0,015 | | 0,035 | | 0,02574 | 0,02615 | 0,02594 | 26,36 | 26,79 | 26,57 |
| 8 | **Mg** | | | | | 0,00015 | 0,00016 | 0,00016 | 0,1569 | 0,1662 | 0,1616 |
| 9 | **Cr** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | 0,0069 | 0,00748 | 0,00719 | 7,07 | 7,666 | 7,368 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,00024 | 0,00025 | 0,00025 |

**Шлак**

| № | Компо-ненты | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий (оксид.), % | | | Кінцевий (оксид.), кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **FeO** | 25 | | | | 0,6858 | 0,7397 | 0,7127 | 20,68 | 23,88 | 22,28 |
| 2 | **C** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | **SiO2** | 20 | | | | 21,14 | 22,15 | 21,65 | 637,67 | 715,14 | 676,41 |
| 4 | **MnO** | 5 | | | | 1,516 | 1,616 | 1,566 | 45,72 | 52,15 | 48,94 |
| 5 | **Al2O3** | 1,5 | | | | 1,318 | 1,372 | 1,345 | 39,75 | 44,3 | 42,02 |
| 6 | **S** | 0,1 | | | | 0,2295 | 0,2431 | 0,2363 | 7,332 | 7,408 | 7,37 |
| 7 | **P2O5** | 0,4 | | | | 0,00191 | 0,00229 | 0,0021 | 0,05758 | 0,07405 | 0,06582 |
| 8 | **MgO** | 3 | | | | 4,193 | 4,238 | 4,215 | 127,82 | 135,34 | 131,58 |
| 9 | **Cr2O3** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | | | | | | |
| 11 | **CaO** | 45 | | | | 69,69 | 70,86 | 70,27 | 2137,13 | 2249,7 | 2193,42 |

**Газ**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 0,02129 | 0,0219 | 0,0216 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | **C** | | | | | 42,53 | 42,54 | 42,54 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | **Si** | | | | | 0,06262 | 0,06507 | 0,06384 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | **Mn** | | | | | 0,1495 | 0,1539 | 0,1517 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | **Al** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | **S** | | | | | 0,00105 | 0,00108 | 0,00106 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | **P** | | | | | 0,00007 | 0,00008 | 0,00008 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | **Mg** | | | | | 0,1464 | 0,1564 | 0,1514 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | **Cr** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | 57,06 | 57,08 | 57,07 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0,00146 | 0,00152 | 0,00149 | 0 | 0 | 0 |

Таблиця 3.10 – Матеріали

| № | Матеріал | Факт, т | Оптим,т | Реком,т | Обов, т | Мін, т | Макс, т | Мін, % | Макс,% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **FeMn78** | 1,146 | | 1,146 | | | | | |
| 2 | **SiMn17** | | | | | | | | |
| 3 | **FeSi65** | 1,16 | | 1,16 | | | | | |
| 4 | **ФХ100Б** | | | | 0 | | | | |
| 5 | **ФХ800Б** | | | | 0 | | | | |
| 6 | **ФСХ33** | | | | 0 | | | | |
| 7 | **АВ-87** | | | | | | | | |
| 8 | **Коксик** | | | | | | | | |
| 9 | **Карбід Si** | 0,208 | | 0,208 | | | | | |
| 10 | **Футерівка** | 0,1 | | | 0,1 | | | | |
| 11 | **Вапно** | 1,755 | | 1,755 | | | | | |
| 12 | **Е/е МВтг** | 0,877 | | 0,877 | | | | | |

### 3.2.3 Паспорт розкислення-легування сталі 20ХГСА

Таблиця 3.11 – Основні показники

| № | Показник | Од.вим. | Мінімум | Максимум | Середнє |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Тиск** | атм | | | 1,5 |
| 2 | **Температура навк. серед.** | °C | | | |
| 3 | **Температура початкова** | °C | | | 1620 |
| 4 | **Температура задана** | °C | 1610 | | |
| 5 | **Температура кінцева** | °C | 1610 | 1616,7 | 1613 |
| 6 | **Маса металу початкова** | т | 100 | 100 | 100 |
| 7 | **Маса металу задана** | т | | | |
| 8 | **Маса металу кінцева** | т | | | 103,6 |
| 9 | **Маса шлаку початкова** | т | 1,25 | 1,5 | 1,375 |
| 10 | **Маса шлаку задана** | т | | | |
| 11 | **Маса шлаку кінцева** | т | 2,421 | 2,63 | 2,53 |
| 12 | **Основність шлаку задана** | т | | | |
| 13 | **Основність шлаку кінцева** | т | 2,65 | 2,82 | 2,74 |
| 14 | **Маса газу задана** | т | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 | **Маса газу кінцева** | т | | | 0 |
| 16 | **Об'єм газу кінцевий** | $м^3$ | | | 0 |
| 17 | **Маса матеріалів факт** | т | | | 5,024 |
| 18 | **Вартість матеріалів факт** | у.о. | | | 16689,46 |

Таблиця 3.12 – Метал-шлак-газ

**Метал**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 96,98 | 97,22 | 97,1 | 100483 | 100758 | 100620 |
| 2 | **C** | 0,06 | 0,17 | 0,23 | 0,2 | 0,2126 | 0,2299 | 0,2212 | 220,3 | 238,22 | 229,26 |
| 3 | **Si** | | 0,9 | 1,2 | 1,05 | 0,8999 | 0,9837 | 0,9418 | 932,65 | 1019,23 | 975,94 |
| 4 | **Mn** | 0,1 | 0,8 | 1,1 | 0,95 | 0,7998 | 0,8416 | 0,8207 | 828,93 | 872,03 | 850,48 |
| 5 | **Al** | | | | | 0,01122 | 0,01425 | 0,01274 | 11,63 | 14,77 | 13,2 |
| 6 | **S** | 0,03 | | 0,025 | | 0,02497 | 0,025 | 0,02498 | 25,87 | 25,91 | 25,89 |
| 7 | **P** | 0,015 | | 0,025 | | 0,02398 | 0,02413 | 0,02405 | 24,85 | 25 | 24,92 |
| 8 | **Mg** | | | | | 0,00016 | 0,00018 | 0,00017 | 0,1679 | 0,1815 | 0,1747 |
| 9 | **Cr** | 0,05 | 0,8 | 1,1 | 0,95 | 0,7999 | 0,8914 | 0,8457 | 829,07 | 923,57 | 876,32 |
| 10 | **O** | | | | | 0,00794 | 0,0089 | 0,00842 | 8,232 | 9,229 | 8,73 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,00026 | 0,00027 | 0,00027 |

**Шлак**

| № | Компо-ненты | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий (оксид.), % | | | Кінцевий (оксид.), кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **FeO** | 25 | | | | 0,5557 | 0,644 | 0,5998 | 13,45 | 16,94 | 15,2 |
| 2 | **C** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | **SiO2** | 20 | | | | 25,25 | 26,38 | 25,81 | 611,21 | 693,89 | 652,55 |
| 4 | **MnO** | 5 | | | | 1,347 | 1,503 | 1,425 | 32,61 | 39,54 | 36,07 |
| 5 | **Al2O3** | 1,5 | | | | 1,223 | 1,378 | 1,301 | 32,16 | 33,37 | 32,76 |
| 6 | **S** | 0,1 | | | | 0,2493 | 0,2782 | 0,2638 | 6,558 | 6,735 | 6,646 |
| 7 | **P2O5** | 0,4 | | | | 0,00125 | 0,00169 | 0,00147 | 0,03021 | 0,04438 | 0,03729 |
| 8 | **MgO** | 3 | | | | 4,156 | 4,204 | 4,18 | 101,77 | 109,3 | 105,54 |
| 9 | **Cr2O3** | 1 | | | | 0,01493 | 0,01767 | 0,0163 | 0,3615 | 0,4647 | 0,4131 |
| 10 | **O** | | | | | | | | | | |
| 11 | **CaO** | 44 | | | | 65,82 | 66,97 | 66,4 | 1621,23 | 1731,38 | 1676,3 |

**Газ**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | Fe | | | | | 0,01923 | 0,02011 | 0,01967 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | C | | | | | 42,56 | 42,56 | 42,56 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Si | | | | | 0,07924 | 0,08104 | 0,08014 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Mn | | | | | 0,1212 | 0,1262 | 0,1237 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Al | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | S | | | | | 0,00115 | 0,00129 | 0,00122 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | P | | | | | 0,00005 | 0,00006 | 0,00006 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Mg | | | | | 0,1377 | 0,1534 | 0,1455 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Cr | | | | | 0,00049 | 0,00053 | 0,00051 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | O | | | | | 57,05 | 57,08 | 57,07 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | Ca | | | | | 0,00131 | 0,00138 | 0,00134 | 0 | 0 | 0 |

Таблиця 3.13 – Матеріали

| № | Матеріал | Факт, т | Оптим,т | Реком,т | Обов, т | Мін, т | Макс, т | Мін, % | Макс,% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | FeMn78 | 1,002 | | 1,002 | | | | | |
| 2 | SiMn17 | | | | | | | | |
| 3 | FeSi65 | 0,361 | | 0,361 | | | | | |
| 4 | ФХ100Б | | | | | | | | |
| 5 | ФХ800Б | | | | | | | | |
| 6 | ФСХ33 | 2,024 | | 2,024 | | | | | |
| 7 | АВ-87 | | | | | | | | |
| 8 | Коксик | | | | | | | | |
| 9 | Карбід Si | 0,348 | | 0,348 | | | | | |
| 10 | Футерівка | 0,1 | | | 0,1 | | | | |
| 11 | Вапно | 1,189 | | 1,189 | | | | | |
| 12 | Е/е МВтг | 1,112 | | 1,112 | | | | | |

### 3.2.4 Паспорт розкислення-легування сталі 25ГС

Таблиця 3.14 – Основні показники

| № | Показник | Од.вим. | Мінімум | Максимум | Середнє |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Тиск | атм | | | 1,5 |
| 2 | Температура навк. серед. | °С | | | |
| 3 | Температура початкова | °С | | | 1620 |
| 4 | Температура задана | °С | 1610 | | |
| 5 | Температура кінцева | °С | 1610 | 1613,1 | 1612 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | **Маса металу початкова** | т | 100 | 100 | 100 |
| 7 | **Маса металу задана** | т | | | |
| 8 | **Маса металу кінцева** | т | 102,3 | 102,4 | 102,4 |
| 9 | **Маса шлаку початкова** | т | 1,25 | 1,5 | 1,375 |
| 10 | **Маса шлаку задана** | т | | | |
| 11 | **Маса шлаку кінцева** | т | 1,256 | 1,478 | 1,367 |
| 12 | **Основність шлаку задана** | т | | | |
| 13 | **Основність шлаку кінцева** | т | 1,2 | 1,23 | 1,22 |
| 14 | **Маса газу задана** | т | | | |
| 15 | **Маса газу кінцева** | т | | | 0 |
| 16 | **Об'єм газу кінцевий** | $м^3$ | 0,001625 | 0,001664 | 0,001645 |
| 17 | **Маса матеріалів факт** | т | | | 2,53 |
| 18 | **Вартість матеріалів факт** | у.о. | | | 10527 |

Таблиця 3.15 – Метал-шлак-газ

**Метал**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 97,99 | 98,07 | 98,03 | 100286 | 100390 | 100338 |
| 2 | **C** | 0,1 | 0,22 | 0,26 | 0,24 | 0,2459 | 0,2601 | 0,253 | 251,71 | 266,21 | 258,96 |
| 3 | **Si** | | 0,6 | 0,9 | 0,75 | 0,6002 | 0,6243 | 0,6123 | 614,42 | 638,9 | 626,66 |
| 4 | **Mn** | 0,1 | 1 | 1,3 | 1,15 | 1 | 1,045 | 1,023 | 1023,66 | 1069,68 | 1046,67 |
| 5 | **Al** | | | | | 0,00415 | 0,00427 | 0,00421 | 4,248 | 4,375 | 4,311 |
| 6 | **S** | 0,035 | | 0,035 | | 0,03361 | 0,03371 | 0,03366 | 34,4 | 34,5 | 34,45 |
| 7 | **P** | 0,015 | | 0,04 | | 0,02572 | 0,02613 | 0,02592 | 26,32 | 26,74 | 26,53 |
| 8 | **Mg** | | | | | 0,00006 | 0,00006 | 0,00006 | 0,06218 | 0,06225 | 0,06222 |
| 9 | **Cr** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | 0,01494 | 0,01529 | 0,01511 | 15,29 | 15,65 | 15,47 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 |

**Шлак**

| № | Компо-ненты | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий (оксид.), % | | | Кінцевий (оксид.), кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **FeO** | 20 | | | | 1,065 | 1,118 | 1,092 | 13,38 | 16,52 | 14,95 |
| 2 | **C** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | **SiO2** | 25 | | | | 41,04 | 41,57 | 41,3 | 522,16 | 606,5 | 564,33 |
| 4 | **MnO** | 5 | | | | 5,944 | 6,144 | 6,044 | 77,17 | 87,85 | 82,51 |
| 5 | **Al2O3** | 1,5 | | | | 1,291 | 1,335 | 1,313 | 16,22 | 19,73 | 17,97 |
| 6 | **S** | 0,1 | | | | 0,182 | 0,1868 | 0,1844 | 2,347 | 2,69 | 2,518 |
| 7 | **P2O5** | 0,4 | | | | 0,00745 | 0,00816 | 0,0078 | 0,0936 | 0,1206 | 0,1071 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | **MgO** | 3 | | | | 3,712 | 3,772 | 3,742 | 47,37 | 54,87 | 51,12 |
| 9 | **Cr2O3** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | | | | | | |
| 11 | **CaO** | 45 | | | | 45,96 | 46,67 | 46,31 | 577,24 | 689,71 | 633,48 |

**Газ**

| № | Ел-ти | Поч., % | Задано, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. | Мін | Макс | Сер. |
| 1 | **Fe** | | | | | 0,01202 | 0,01263 | 0,01233 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | **C** | | | | | 42,6 | 42,6 | 42,6 | 0,00101 | 0,00102 | 0,00102 |
| 3 | **Si** | | | | | 0,03641 | 0,03713 | 0,03677 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | **Mn** | | | | | 0,09534 | 0,09627 | 0,0958 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | **Al** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | **S** | | | | | 0,0006 | 0,0006 | 0,0006 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | **P** | | | | | 0 | 0,00005 | 0,00005 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | **Mg** | | | | | 0,03133 | 0,03181 | 0,03157 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | **Cr** | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | **O** | | | | | 57,22 | 57,23 | 57,22 | 0,00136 | 0,00137 | 0,00137 |
| 11 | **Ca** | | | | | 0,0002 | 0,00021 | 0,0002 | 0 | 0 | 0 |

Таблиця 3.16 – Матеріали

| № | Матеріал | Факт, т | Оптим,т | Реком,т | Обов, т | Мін, т | Макс, т | Мін, % | Макс,% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **FeMn78** | 1,333 | | 1,333 | | | | | |
| 2 | **SiMn17** | | | | | | | | |
| 3 | **FeSi65** | 0,818 | | 0,818 | | | | | |
| 4 | **ФХ100Б** | | | | 0 | | | | |
| 5 | **ФХ800Б** | | | | 0 | | | | |
| 6 | **ФСХ33** | | | | 0 | | | | |
| 7 | **АВ-87** | | | | | | | | |
| 8 | **Коксик** | | | | | | | | |
| 9 | **Карбід Si** | 0,279 | | 0,279 | | | | | |
| 10 | **Футерівка** | 0,1 | | | 0,1 | | | | |
| 11 | **Вапно** | | | | | | | | |
| 12 | **Е/е МВтг** | 0,447 | | 0,447 | | | | | |

## 3.3 Результати, отримані в ході досліджень

### 3.3.1 Вивчення впливу кількості введених феросплавів на тепловий ефект феромарганцю

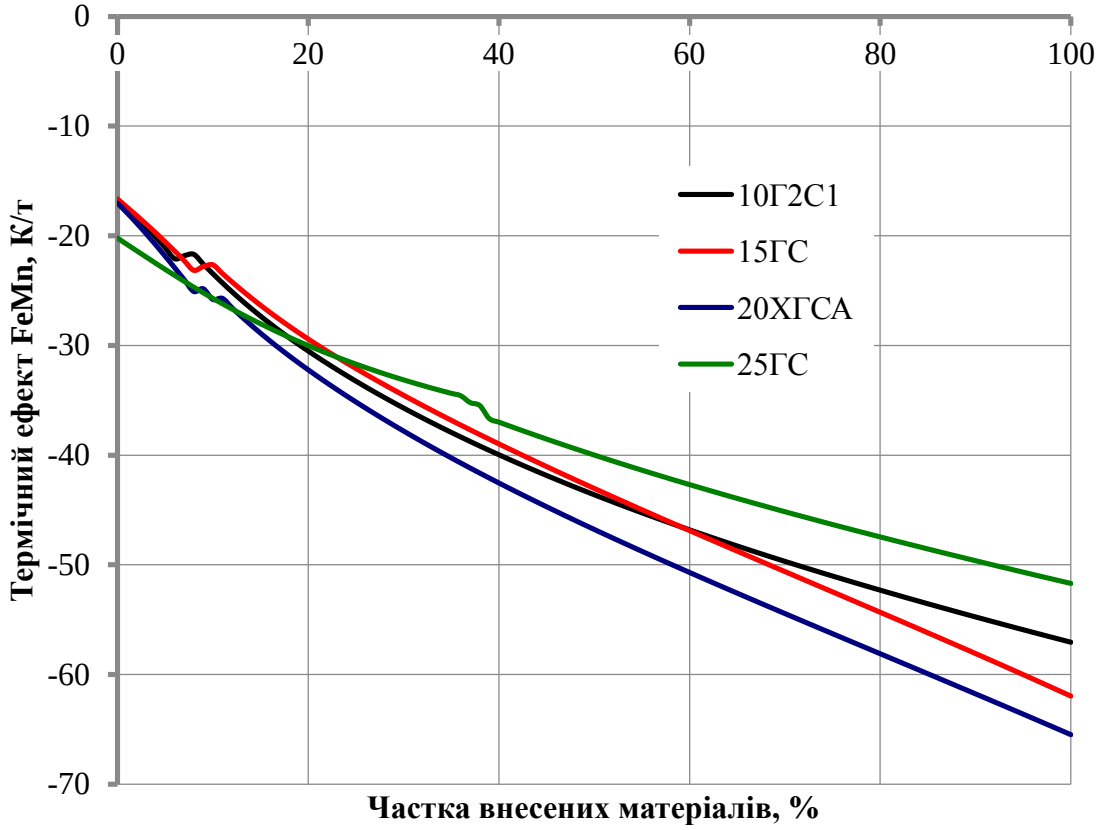



Рисунок 3.1 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект феромарганцю

Дослідження термічного ефекту феромарганцю показало зниження величини $\Delta T$ при збільшенні долі внесених феросплавів для наданих сталей. Найбільш помітний ефект зниження $\Delta T$ виявився для сталі 10Г2С1. Найбільше схильна зниженню термічного ефекту сталь10Г2С1, яка має найбільше окислення в порівнянні з перерахованими сталями (рисунок 3.2).

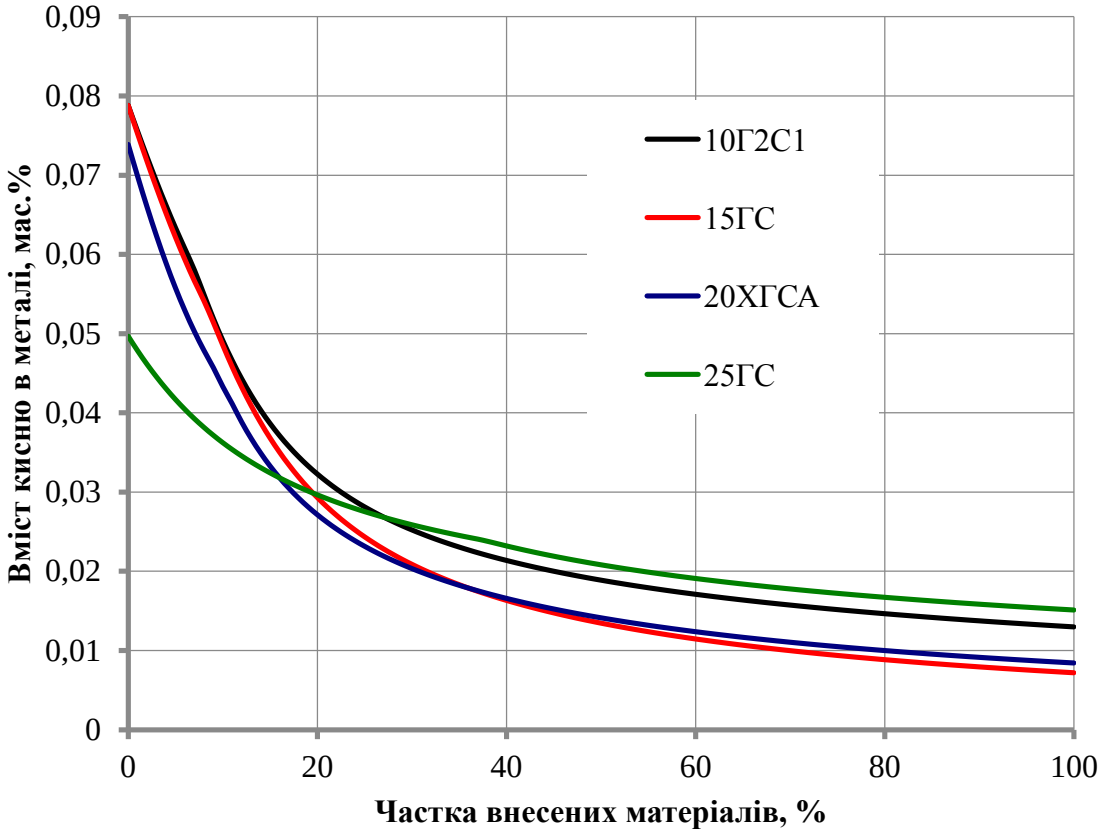
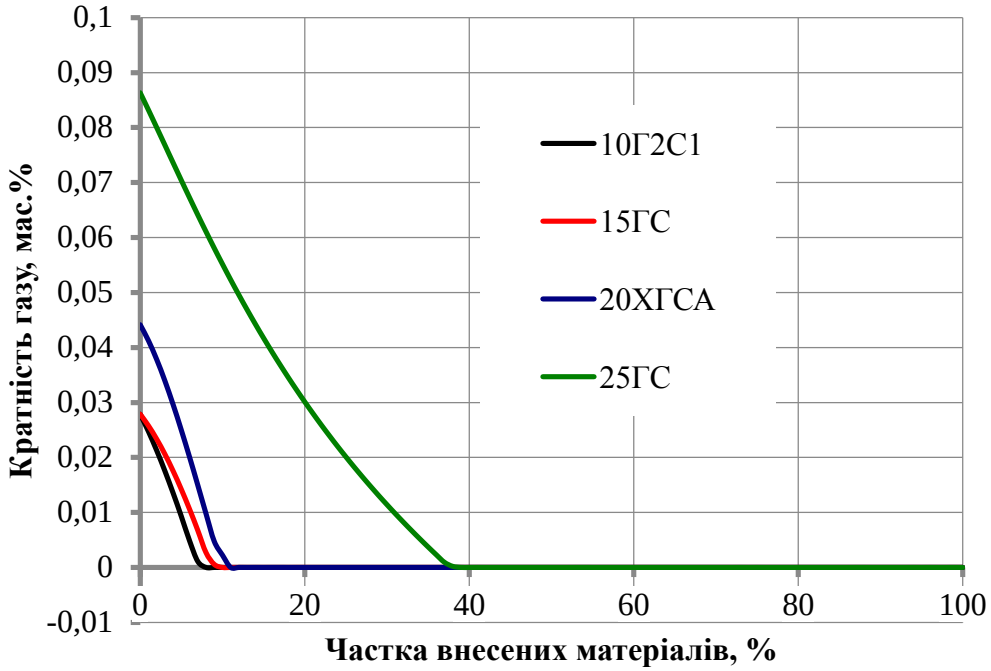



Рисунок 3.2 – Вплив частки внесених феросплавів на вміст кисню

За рисунком 3.2 спостерігається, що найменше розкислення має сталь 25ГС, тому термічний ефект цієї сталі зменшується повільніше, ніж у інших




сталей.

Рисунок 3.3 – Вплив частки внесених феросплавів на кратність газу

З рисунку 3.3 видно, що для сталі 25ГС підвищується кратність газу, а для інших сталей газова фаза не виділяється. Це впливає на термічний ефект матеріалів.

### 3.3.2 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект силікомарганцю

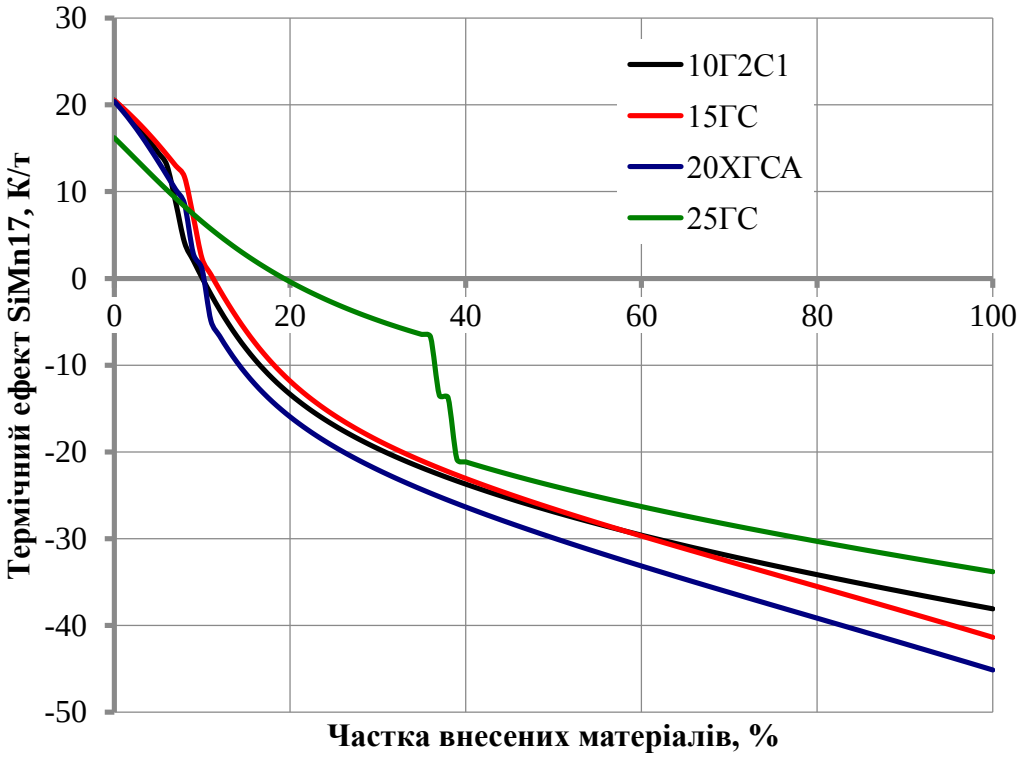



Рисунок 3.4 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект силікомарганцю

Дослідження впливу масової частки феросплавів, що вводяться, на тепловий ефект силікомарганцю свідчить про поступове зменшення цього показника зі збільшенням кількості внесених феросплавів для всіх досліджуваних марок сталі.

Це явище пояснюється тим, що в міру додавання феросплавів вміст кисню в металі поступово знижується (рисунок 3.2). Відповідно, зменшується частка кремнію у складі цього феросплаву, яка могла б вступати в реакцію з киснем із виділенням тепла (екзотермічний ефект).

### 3.3.3 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросиліцію

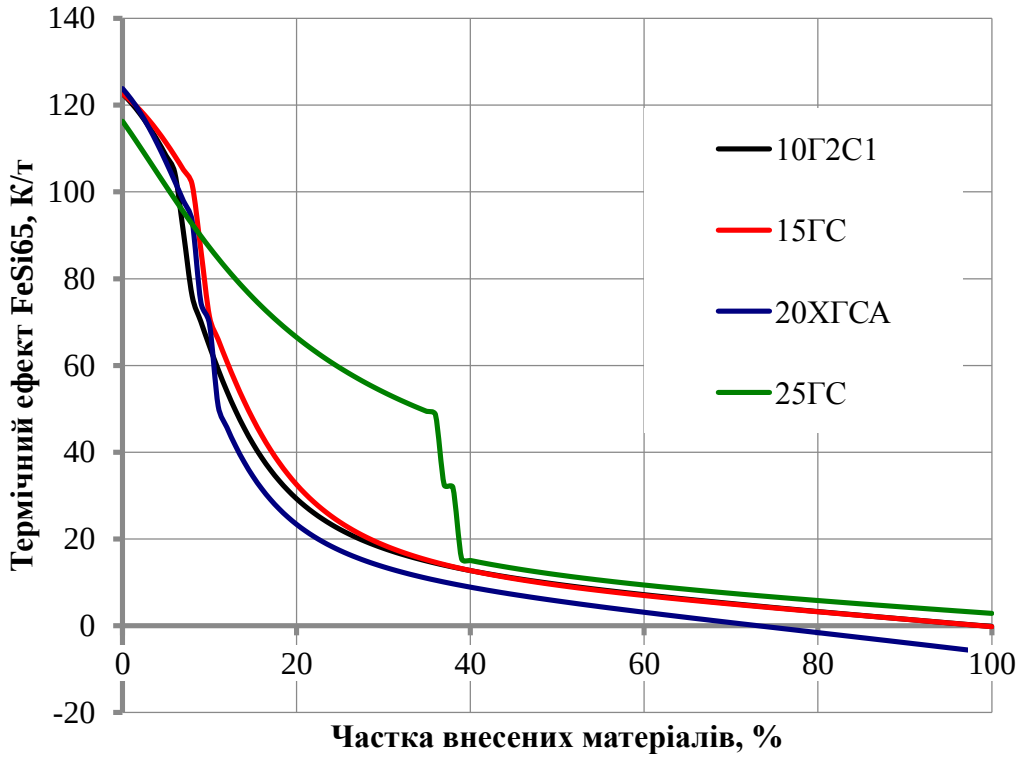



Рисунок 3.5 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект FeSi65

Дослідження впливу масової частки феросплавів, що додаються, на тепловий ефект феросиліцію демонструє зменшення цього показника зі зростанням кількості внесених феросплавів.

Це пояснюється тим, що в процесі додавання феросплавів концентрація кисню в металі знижується, а отже, зменшується відносна частка кремнію в складі цих сплавів, здатного реагувати з киснем з екзотермічним ефектом. При цьому величина теплового ефекту феросиліцію в точці, що відповідає нульовій кількості внесених феросплавів, для всіх досліджуваних сталей визначається вмістом кремнію та відрізняється несуттєво.

### 3.3.4 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ100Б

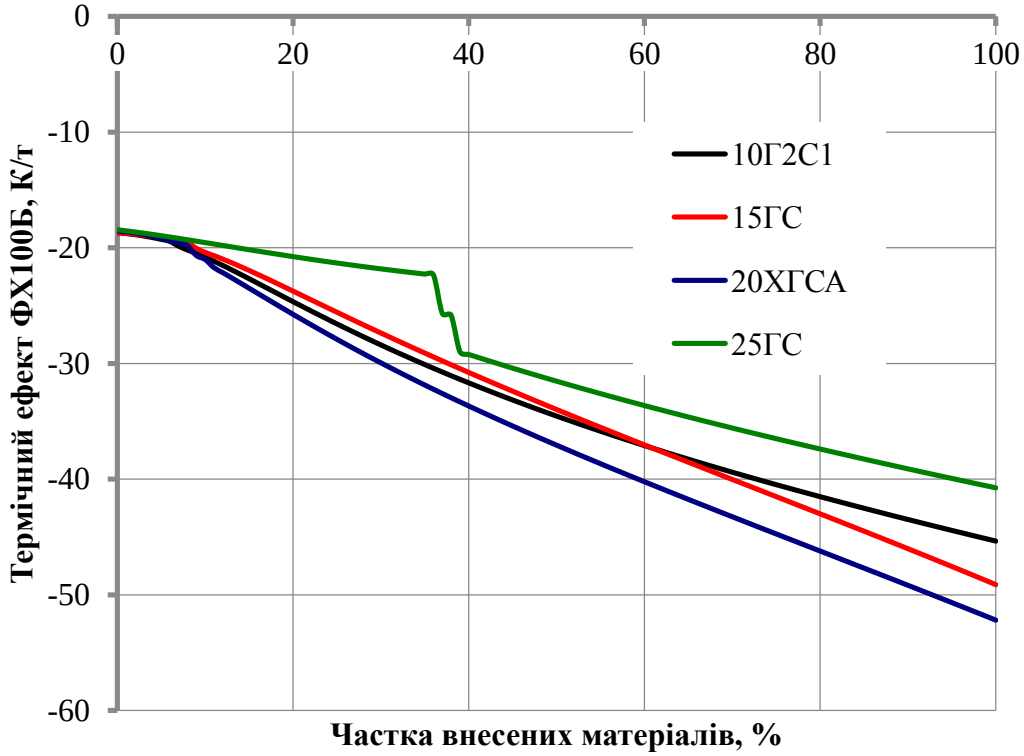



Рисунок 3.6 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ100Б

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ100Б показує зниження величини $\Delta T$ при збільшенні долі внесених феросплавів для сталей 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА та 25ГС.

### 3.3.5 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ800Б

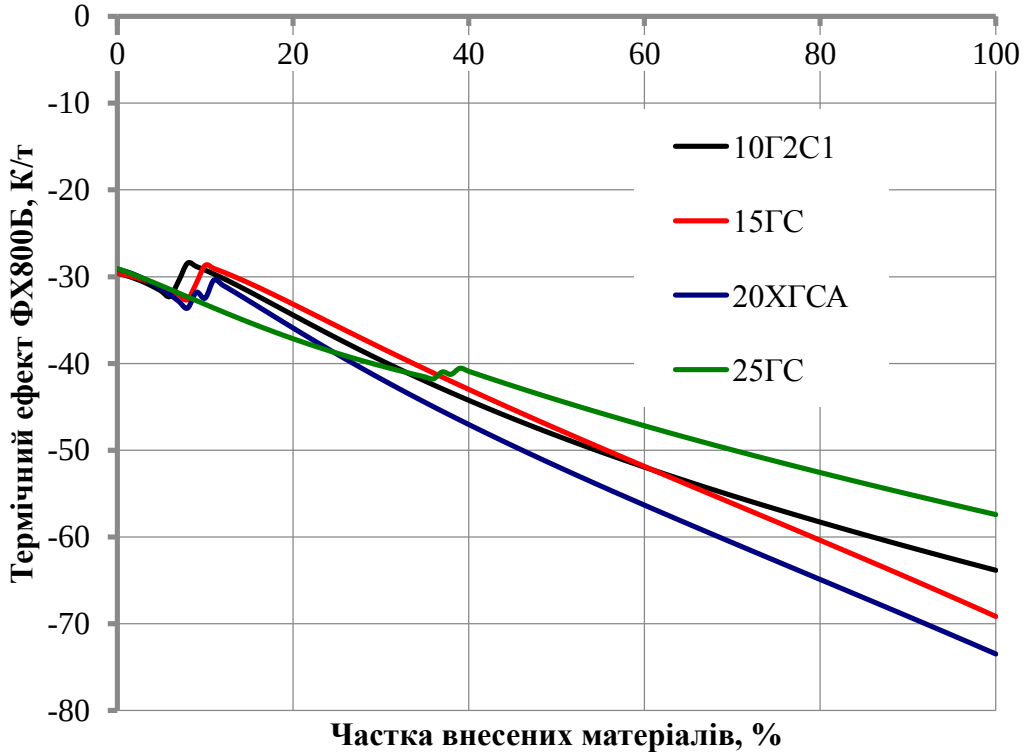



Рисунок 3.7 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ800Б

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на тепловий ефект ферохрому марки ФХ100Б показує, що для сталей 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА та 25ГС величина ΔТ знижується зі збільшенням кількості доданих феросплавів.

Відмінність у теплових ефектах між ферохромом ФХ100Б та ФХ800Б зумовлена різницею хімічного складу цих матеріалів.

### 3.3.6 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікохрому ФСХ33

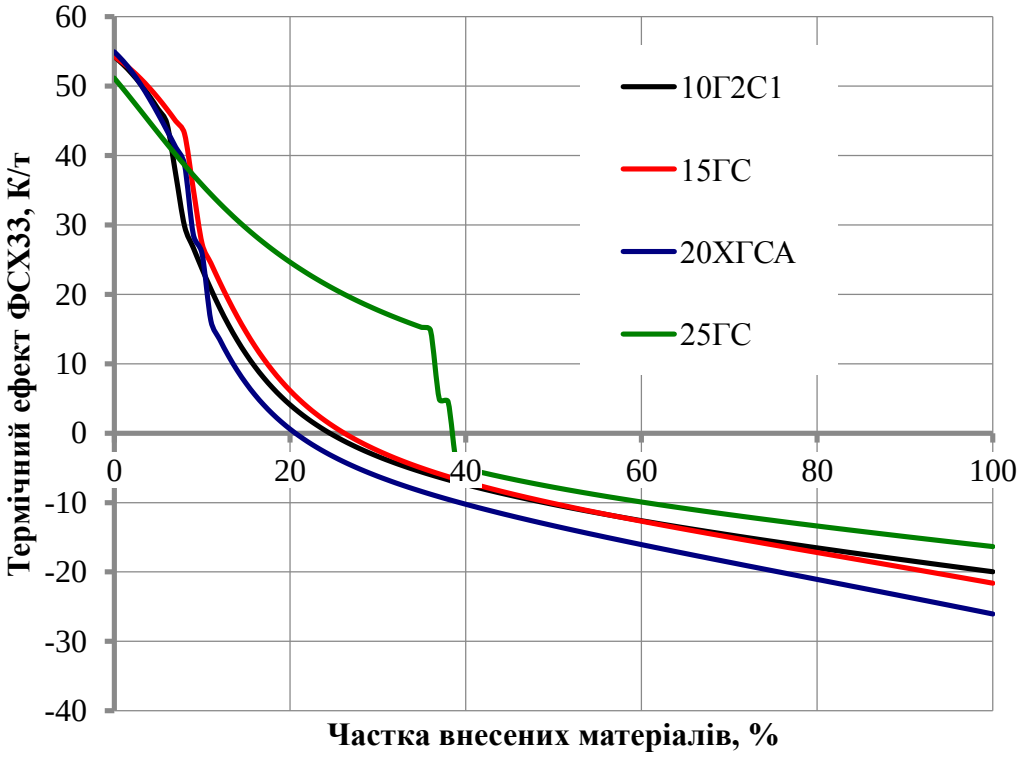



Рисунок 3.8 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект ФСХ33

Дослідження впливу частки доданих феросплавів на тепловий ефект феросилікохрому свідчить про поступове зменшення цього показника зі зростанням кількості внесених феросплавів для всіх досліджуваних марок сталі. Це пояснюється тим, що в процесі додавання феросплавів вміст кисню в металі поступово знижується (рисунок 3.2). Відповідно, зменшується частка кремнію у складі цього сплаву, яка могла б реагувати з киснем із виділенням тепла.

Найменша зміна теплового ефекту спостерігається для сталі марки 25ГС, що також пов’язано з найменшим ступенем розкислення.

### 3.3.7 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект алюмінію вторинного АВ-87

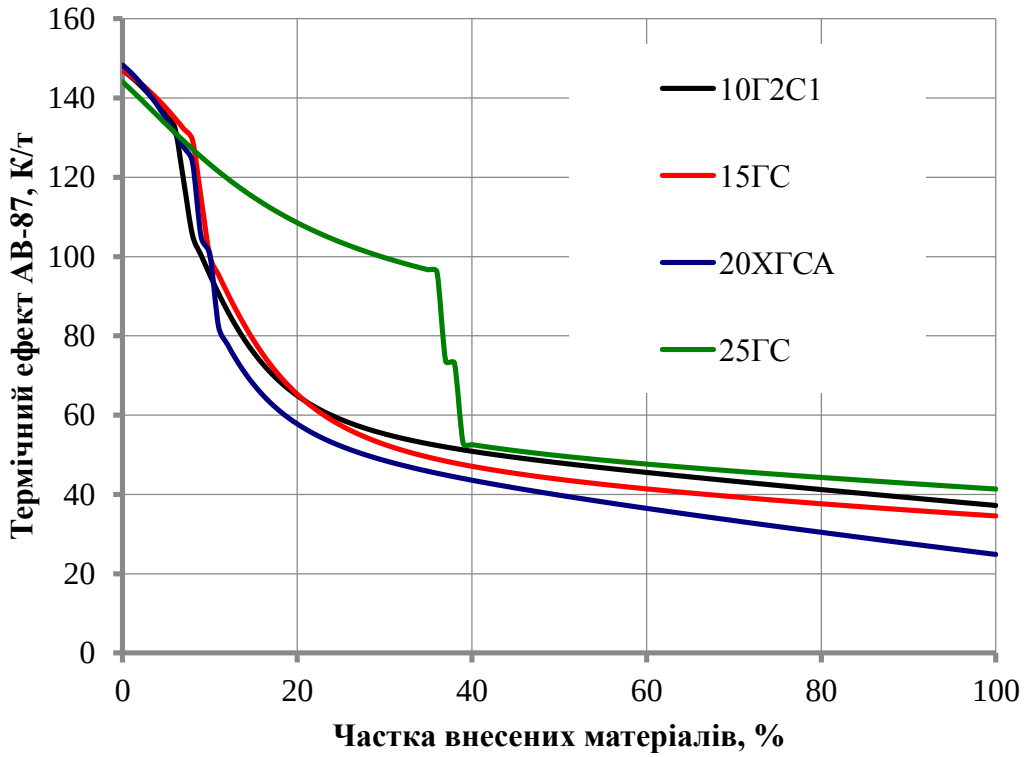



Рисунок 3.9 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект АВ-87

Під час дослідження впливу частки внесених феросплавів на тепловий ефект вторинного алюмінію спостерігається закономірне зниження цього показника для всіх марок сталі. Різке падіння теплового ефекту (в межах 36–40%) для сталі 25ГС пояснюється припиненням утворення газової фази. При цьому тепловий ефект вторинного алюмінію завжди залишається додатним, що

зумовлено високим вмістом алюмінію, який забезпечує позитивний внесок у тепловий баланс.

### 3.3.8 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект коксику

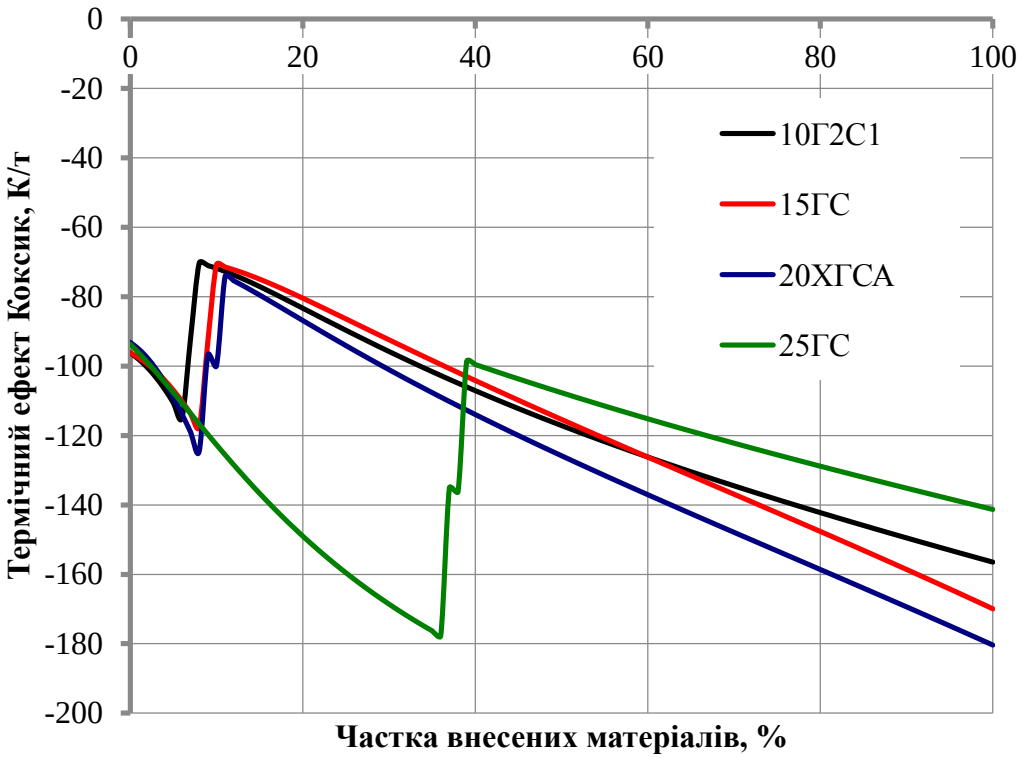



Рисунок 3.10 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект коксику

Зі збільшенням частки доданих феросплавів відбувається інтенсивне окиснення вуглецю, який міститься як у металі, так і в розкислювачах, що супроводжується утворенням значної кількості газової фази, переважно з оксиду вуглецю (CO). Цей процес має ендотермічний характер. Крім того,

додавання коксику завжди дає негативний тепловий ефект, оскільки спричиняє збільшення газоутворення, що традиційно супроводжується поглинанням тепла.

Значне підвищення теплового ефекту для сталей 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА та 25ГС пов’язане з припиненням виділення газової фази в цих марок.

### 3.3.9 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект карбіду кремнію

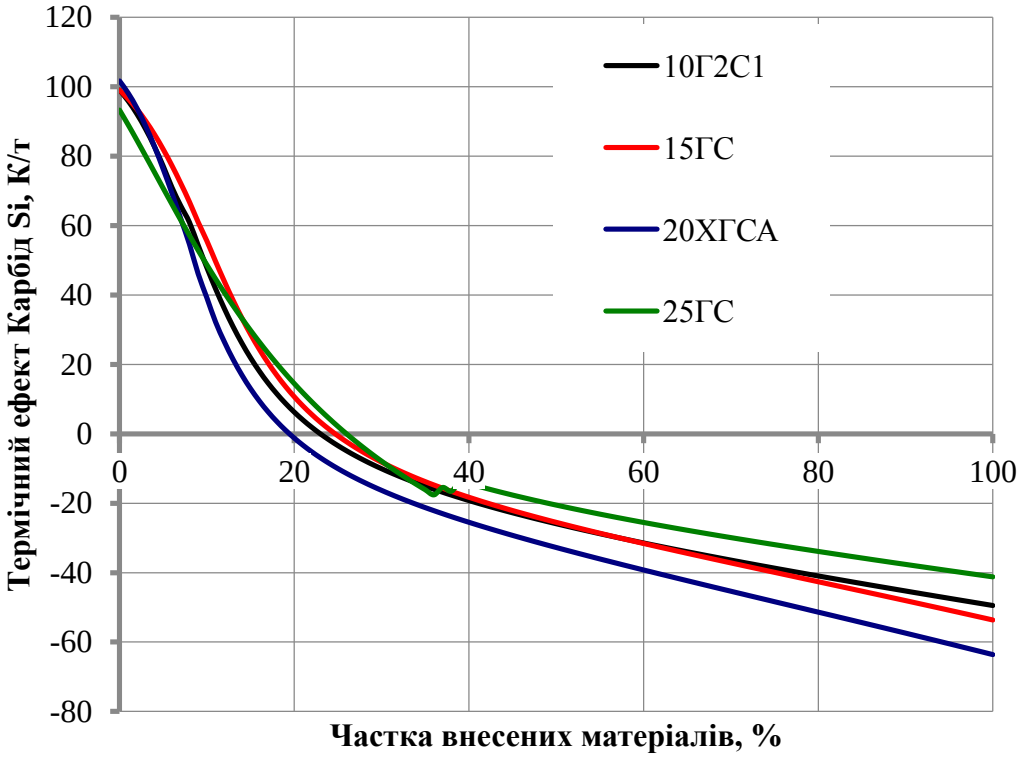



Рисунок 3.11 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект карбіду кремнію

Дослідження впливу масової частки доданих феросплавів на тепловий ефект карбіду кремнію свідчить про поступове зменшення цього показника зі зростанням кількості внесених феросплавів.

Це пояснюється тим, що в процесі додавання феросплавів концентрація кисню в металі поступово знижується. Відповідно, зменшується частка кремнію в складі цих сплавів, яка могла б реагувати з киснем з екзотермічним ефектом. При цьому початковий рівень теплового ефекту карбіду кремнію є значно вищим за величину ΔT феросилікохрому завдяки більшому вмісту кремнію. Крім того, перехід вуглецю з твердої фази в металевий розчин супроводжується негативним тепловим ефектом.

### 3.3.10 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект вапна

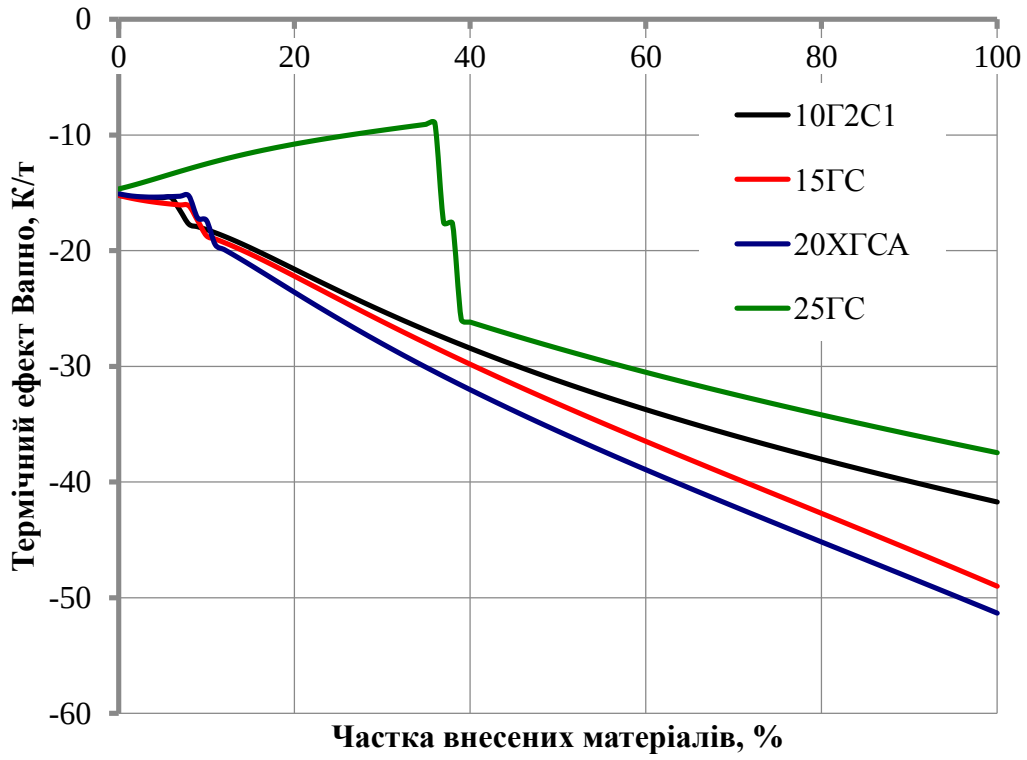



Рисунок 3.12 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект вапна

Дослідження теплового ефекту вапна під час позапічної обробки сталей показало зменшення величини ΔТ зі збільшенням частки внесених феросплавів для марок 10Г2С1, 15ГС та 20ХГСА. Зі зростанням газоутворення підвищується і тепловий ефект. Коли кратність газу знижується до нуля і виділення газової фази припиняється, тепловий ефект починає падати. Для сталі марки 25ГС тепловий ефект зростає разом із збільшенням частки внесених феросплавів, що пов'язано з підвищенням кратності газу при додаванні феросплавів, але потім знову падає.

### 3.3.11 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії

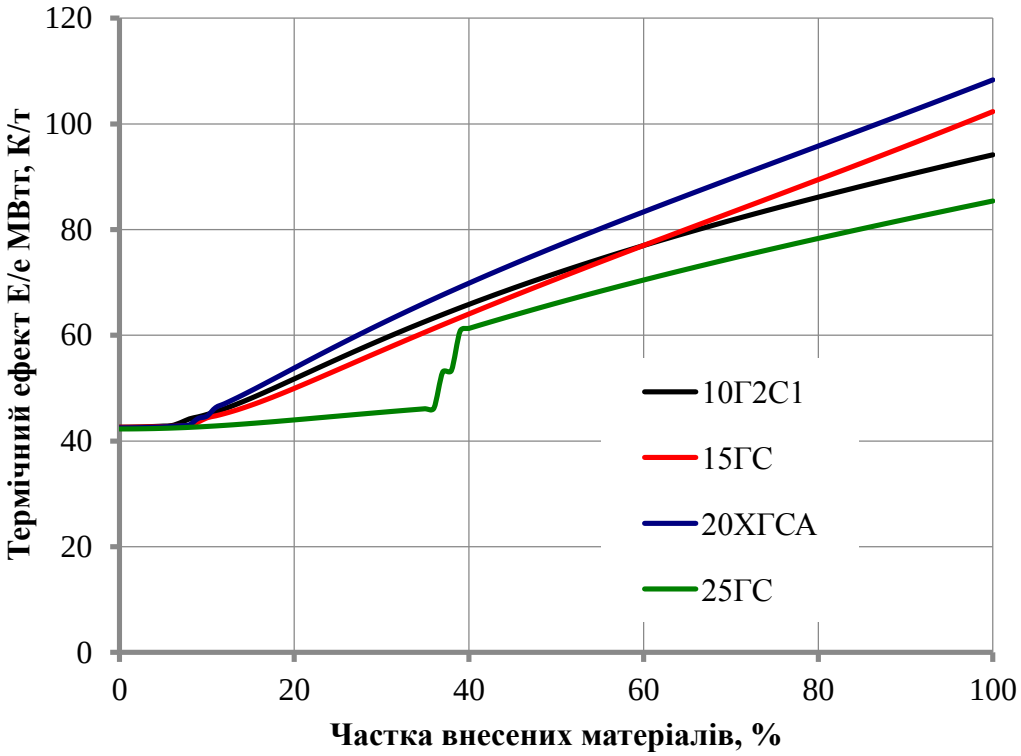



Рисунок 3.13 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект системи

Дослідження впливу масової частки доданих феросплавів на тепловий ефект системи під час позапічної обробки сталей свідчить про те, що зі збільшенням кількості внесених феросплавів питома теплоємність системи знижується.

### 3.4 Висновки

Отже, встановлені взаємозв'язки між теплоенергетичними параметрами позапічної обробки та кількістю введених феросплавів дають змогу коректно враховувати об'єм цих матеріалів. Це своєю чергою забезпечує оптимальне використання та економію дорогих феросплавів.

Моделювання з використанням програмного середовища Excalibur дозволило отримати такі результати щодо теплових явищ під час розкислення та легування сталі:

1. Аналіз впливу масової частки феросплавів на теплові ефекти показав, що зменшення тепловиділення пов'язане зі зниженням концентрації кисню в металі та частки FeO у шлаку, що призводить до ослаблення екзотермічних реакцій.
2. Підвищення частки феросплавів спричиняє активне окиснення вуглецю, присутнього як у металі, так і в розкислювачах, із формуванням значного об'єму газової фази, переважно чадного газу (CO). Цей процес супроводжується поглинанням тепла (ендотермічний ефект).
3. Вивчення впливу кількості феросплавів на тепловий баланс системи свідчить, що додавання феросплавів знижує питому теплоємність системи.

# РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 4.1 Опис потенційно небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на співробітників лабораторії

Усі види негативних впливів, що виникають під час проведення досліджень, поділяються на дві основні категорії: фізичні та хімічні.

До фізичних факторів належать такі небезпечні умови та явища, як рухомі машини та механізми, транспортовані вироби, заготовки та матеріали, підвищені рівні шуму і вібрації, надмірна запиленість та загазованість повітря у робочій зоні. Також сюди входять високі температури поверхонь устаткування й матеріалів, вплив електромагнітного випромінювання, недостатня освітленість, підвищений рівень статичної електрики, а також високі показники напруги в електричних мережах та інші подібні явища.

Хімічні фактори включають різноманітні речовини й сполуки у різних агрегатних станах, які можуть мати токсичну, подразнювальну, канцерогенну або мутагенну дію на людський організм. Ці речовини також можуть негативно впливати на репродуктивну функцію людини.

У лабораторії основними шкідливими чинниками при виконанні дослідів є загазованість приміщення та ризик ураження електричним струмом.

Оскільки лабораторія належить до приміщень із легкою категорією фізичного навантаження (виконуються переважно легкі фізичні роботи), необхідно дотримуватися наступних вимог для забезпечення безпеки та комфорту праці:

- оптимальна температура повітря – 22 $^{o}$C (допустима – 20-24 $^{o}$C);
- оптимальна відносна вологість – 40-60% (допустима – не більше 75%);
- швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с;
- допустимий рівень звукового тиску 80 дБ(а);

- загальне освітлення 50 лк;
- категорія важкості праці – легка;
- категорія напруженості праці - мало напружена.

Загазованість повітря.

Основну небезпеку становить оксид вуглецю – безбарвний газ, позбавлений запаху та подразливих властивостей. Його токсичність пояснюється здатністю зв’язуватися з гемоглобіном крові значно міцніше, ніж кисень, утворюючи карбоксигемоглобін. Це блокує перенесення кисню в організмі та порушує клітинне дихання, викликаючи кисневе голодування (гіпоксію або аноксію).

Згідно з ГОСТ 12.1.005-88, гранично допустима концентрація (ГДК) оксиду вуглецю становить 20 мг/м³.

Токсична дія оксиду вуглецю може проявлятися як у вигляді гострих, так і хронічних отруєнь. Як правило, симптоми отруєння виникають одразу після впливу. Їх вираженість залежить від тривалості дії шкідливої речовини (експозиції) та концентрації газу в повітрі. Чим більша концентрація, тим швидше проявляються наслідки і важчий їхній перебіг.

Наприклад, при вдиханні монооксиду вуглецю ефекти будуть такими:

- при $C \times t < 350$ – дія непомітна;
- при $C \times t = 700$ – незначна дія;
- при $C \times t = 1000$ – виникають головний біль і нудота;
- при $C \times t = 1700$ – тяжке отруєння.

Тут C – концентрація оксиду вуглецю (мг/м³), t – тривалість впливу (години).

На токсичність також впливають умови навколишнього середовища. За підвищених температур посилюється виділення поту, розширюються судини шкіри, частішає дихання та збільшується хвилинний об’єм серця, що сприяє

швидшому проникненню отруйної сполуки в організм. Крім того, висока температура підвищує випаровуваність речовини та ризики її потрапляння в повітря. Вологість повітря також посилює токсичну дію речовин, що збільшує небезпеку отруєння, особливо в спекотну пору року.

Для підтримання нормативної якості повітряного середовища згідно з санітарними нормами необхідно забезпечити регулярний повітрообмін у приміщенні. Це передбачає систематичне видалення забрудненого, так званого "відпрацьованого" повітря та заміну його чистим зовнішнім повітрям. Завдання очищення повітря виконується за допомогою витяжної вентиляції.

Теплове випромінювання.

Основним джерелом тепла у виробничому приміщенні є піч Тамана. Надлишкові тепловиділення, що утворюються в процесі її роботи, становлять серйозну проблему, яка часто трапляється на виробництві. Під час експлуатації в початковий період після розігріву печі частина виробленого тепла витрачається на прогрів її маси, тоді як решта тепла надходить у приміщення, провокуючи появу надлишкової теплоти. Ця зайва теплота може бути усунута за допомогою вентиляційних систем. Навіть після зупинки печі вона продовжує виділяти тепло в повітря приміщення до моменту, коли обладнання охолоне до температури навколишнього середовища. Таким чином, процес тепловиділення печі Тамана має змінний характер у часі.

Однак визначення величини тепловиділень печі є непростою задачею, оскільки багато факторів впливають на цей показник: це і змінний режим роботи обладнання, і ступінь його зношеності, і відмінності в конструктивних особливостях кожної одиниці печей.

Електрична травматизація

Основними причинами виникнення нещасних випадків, пов'язаних з впливом електричного струму, виступають такі чинники:

- Випадковий дотик або наближення на небезпечну дистанцію до струмоведучих частин, що перебувають під напругою.

- Поява напруги на металевих елементах електроустаткування через пошкодження ізоляції або інших технічних несправностей.

- Помилкове ввімкнення електроустановки під час роботи на відключених струмоведучих частинах системи.

- Виникнення крокової напруги на поверхні землі через замикання проводу на грунт.

На рівень електротравматизму впливають численні фактори, серед яких можна виділити недоліки конструкції та монтажу обладнання, помилки в експлуатації, неналежна організація робочих місць, недостатнє забезпечення інструктажу тощо.

Проходячи крізь організм, електричний струм має комплексний вплив, який проявляється термічними, електролітичними, механічними і біологічними ефектами. Термічний вплив спричиняє опіки на окремих ділянках тіла, перегрів кровоносних судин, нервових закінчень та інших тканин. Електролітична дія провокує розкладання крові та інших рідин організму, що може порушувати їхній фізико-хімічний склад. Механічний вплив виявляється у розривах тканин.

Біологічна дія є унікальною для живих організмів і полягає в подразненні та порушенні функцій тканин організму. Це супроводжується судомами м’язів і збоями внутрішніх біоелектричних процесів, безпосередньо пов’язаними із життєзабезпеченням. Наслідком такого впливу можуть бути серйозні порушення життєво важливих функцій, зокрема проблеми з диханням та кровообігом, аж до їх повного припинення.

Подразнююча дія струму на тканини організму може реалізовуватися двома шляхами: прямим, коли струм проникає через самі тканини, і рефлекторним – через центральну нервову систему, коли струм проходить поза ними.

Цей спектр впливу електроструму нерідко спричиняє електротравми, які умовно поділяються на два основних типи: місцеві електротравми (опіки, електричні знаки, металізацію шкіри, механічні ушкодження) і загальні електротравми (електричні удари).

Важкість наслідків електротравм значною мірою залежить від багатьох факторів: умов зовнішнього середовища та фізіологічних параметрів людського організму. Важливу роль відіграють спосіб контакту тіла з електричним колом, сила струму, його напруга та тривалість впливу. Зовнішні чинники, такі як підвищена температура чи вологість середовища, можуть суттєво посилити наслідки ураження. Відчутну роль у впливі також відіграють стан здоров’я та рівень фізичного виснаження людини.

Тривалість впливу струму відіграє критичну роль у глибині ураження. Змінюється опір тіла на електричний розряд – підвищується нагрівання тканин і проривається роговий шар шкіри. При короткочасному проходженні струму через тіло виникає небезпека залежно від фаз роботи серця. Наприклад, якщо струм проходить крізь серце в момент його розслаблення (приблизно 0,1 секунди між циклами скорочення та розширення), ризик летального результату відчутно зростає.

## 4.2 Інженерні рішення для захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи щодо покращення умов праці

Забруднене повітря в приміщенні видаляють за допомогою витяжної вентиляції. Найвищий ефект досягається шляхом видалення шкідливих речовин безпосередньо з місця їхнього утворення, адже це дозволяє уникнути забруднення великих обсягів повітря. При такому способі можна зменшити загальний обсяг віддаленого повітря, зберігаючи ефективність видалення

шкідливих речовин. Цей метод вентилювання називається місцевою витяжною вентиляцією.

Шкідливі речовини у місцях їх утворення локалізуються завдяки спеціальним місцевим відсмоктувачам. Вони запобігають поширенню забруднення по всьому приміщенню, забезпечуючи максимальний ефект при мінімальному рівні повітрообміну і скорочених капітальних витратах. Застосування таких пристроїв вирішує основну задачу вентиляційних систем – забезпечення санітарно-гігієнічних умов.

Конструкція місцевих відсмоктувачів визначається характером забруднення та специфікою технологічного процесу. Якщо відсмоктувач розміщується над джерелом шкідливих речовин або збоку від нього, його конструкція часто виконана у формі витяжного зонта. Витяжний зонт являє собою металевий ковпак, що розташовується безпосередньо над джерелом забруднення. Його всмоктувальний отвір має форму, що відповідає горизонтальній проекції місця виділення шкідливостей. Зонт повинен уловлювати весь потік повітря, який до нього надходить.

Чим далі приймальна частина зонта від джерела шкідливих речовин, тим більший обсяг повітря потрібно видалити. Через зонт повинно видалятися не лише те повітря, яке виходить з джерела забруднення, але й додатковий об'єм повітря, що захоплюється по дорозі до зонта. Недостатній обсяг видаленого повітря призводить до переповнення зонта та повернення частини забруднення назад у приміщення. Тому потрібно забезпечити достатню швидкість всмоктування в просторі між джерелом шкідливостей і приймальним отвором зонта для ефективного захоплення газів.

Швидкість всмоктування повинна бути рівномірною по всьому вхідному перетину зонта, а об’єм видаленого повітря перевищувати кількість підстікаючого потоку. Для ефективного уловлювання забрудненого нагрітого повітря необхідно правильно визначити його обсяг на рівні зонта, враховуючи

закономірності конвективних (теплових) струменів. Зонт найбільш продуктивний при стабільних конвективних потоках із осьовою швидкістю щонайменше 1 м/с поблизу його всмоктувального отвору.

Ключовим фактором ефективності зонта є кут розкриття його поверхні: рівномірну швидкість всмоктування можна забезпечити лише за умови кута розкриття до 60°. Головна вимога до конструкції зонта – максимально захоплювати шкідливі речовини за мінімальної витрати повітря, не створюючи перешкод для виконання технологічних процесів.

У лабораторних умовах для захисту працюючих від небезпечних і шкідливих виробничих факторів застосовують спеціальні засоби захисту. Вибір цих засобів у кожному окремому випадку здійснюють відповідно до встановлених норм безпеки для конкретного типу робіт.

Засоби колективного захисту працівників класифікуються залежно від їх функціонального призначення на кілька класів:

1. Засоби захисту від механічних факторів:

- Огороджувальні, запобіжні та гальмівні пристрої;

- Автоматичні системи контролю, сигналізації та дистанційного керування;

- Знаки безпеки.

Огороджувальні пристрої спрямовані на запобігання доступу людини до небезпечних зон. За конструкцією вони поділяються на:

- Стаціонарні: закріплюються для виконання допоміжних операцій;

- Рухливі: взаємозалежні з робочими елементами обладнання, забезпечують закриття доступу до небезпечної зони під час роботи механізму;

- Переносні: використовуються для тимчасового захисту під час ремонтних та налагоджувальних робіт. Вони запобігають випадковим травмам, опікам і дотику до струмоведучих частин.

Запобіжні пристрої унеможливлюють виникнення небезпечних виробничих ситуацій під час перевищення допустимих параметрів. Вони нормалізують процес або автоматично відключають обладнання.

Гальмівні пристрої забезпечують безпеку роботи таких механізмів, як верстати чи преси. Їхню справність визначають за вибігом небезпечних частин після відключення пристрою (регламентований час зазначають у нормативній документації). Основні типи гальм: колодкові, дискові, конічні та клинові. Всі вони вбудовуються в конструкцію машин під час їх виробництва.

Пристрої автоматичного контролю та сигналізації призначені для моніторингу роботи обладнання та виявлення небезпечних факторів. Використовуються різноманітні датчики та прилади, а системи сигналізації поділяються на:

- Оперативну: інформує про хід технологічного процесу;
- Попереджувальну: сигналізує про потенційну загрозу;
- Розпізнавальну: виділяє найбільш ризиковані елементи та зони.

2. Засоби нормалізації повітряного середовища:

- Опалення, вентиляція, очищення та кондиціонування повітря;
- Локалізація шкідливих факторів;
- Прилади контролю та сигналізації.

Вентиляція, тобто організований обмін повітря, забезпечує комфортний мікроклімат і видаляє шкідливі речовини. Основні типи вентиляції:

- Природна (аерація);
- Механічна;
- Місцева.

Кондиціонування забезпечує спрямований потік повітря з певними параметрами (температура, вологість, швидкість). Підтримання оптимальних температурних умов у приміщенні здійснюється завдяки опаленню. У приміщеннях із тепловими надходженнями від технологічного обладнання

застосовується резервне опалення. Воно підтримує мінімальну температуру 5 °С у холодний період року.

3. Засоби захисту від інфрачервоного випромінювання: Включають герметизуючі, теплозахисні пристрої та автоматизовані системи контролю. Для захисту використовують екрани, які блокують теплове випромінювання на джерелі або перегороджують доступ до нього на робочому місці.

4. Засоби захисту від шуму:

- Огороджувальні, звукопоглинальні та звукоізоляційні конструкції;
- Глушники шуму.

Звукопоглинання знижує рівень шуму через часткове поглинання енергії звукової хвилі огородженим матеріалом.

Засоби захисту від ураження електричним струмом включають прилади автоматичного контролю і сигналізації, ізолюючі пристрої та покриття, а також засоби захисного заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів і захисного відключення.

Для захисту від впливу високих і низьких температур використовують термоізолюючі та відгороджуючі пристрої, а також засоби радіаційного обігріву або охолодження.

Нормалізація освітлення у виробничих приміщеннях і на робочих місцях забезпечується за допомогою джерел світла, освітлювальних приладів, світлових пройм, світлозахисних пристроїв та фільтрів.

До засобів індивідуального захисту належать пристрої для захисту органів дихання, зору, слуху, а також голови, рук, ніг та шкіри. Спеціальний одяг розроблений для зниження негативного впливу виробничого середовища та небезпечних факторів на працівника, при цьому він не повинен перешкоджати нормальному функціонуванню організму. Для теплозахисного спецодягу найчастіше застосовуються льняні тканини.

Захист рук здійснюється за допомогою рукавиць.

Для захисту очей від енергетичного впливу випромінювання використовуються окуляри зі світлофільтрами.

Органи дихання захищають респіратори, серед яких найбільш ефективним вважається респіратор "пелюсток". При виборі таких засобів важливо зважати на малий опір диханню, який не повинен перевищувати 50 Н/м².

Для захисту слуху застосовуються зовнішні і внутрішні противошуми. До зовнішніх засобів належать шумозахисні навушники, що покривають вушну раковину, а внутрішні представлені заглушками і вкладишами, які вставляються у слуховий прохід.

### 4.3 Заходи з електробезпеки

Навіть із впровадженням розвинених систем захисту неможливо гарантувати абсолютну безпеку. У будь-якому випадку вкрай важливо забезпечити високу якість монтажу та експлуатації електричних установок, проводити регулярний контроль їхнього технічного стану, підтримувати належний рівень ізоляції, дотримуватися дисципліни серед персоналу та виконувати вимоги правил безпеки.

Конструкція та експлуатація електроустановок повинні відповідати обов’язковим нормам, а саме Правилам улаштування електроустановок (ПУЕ) та правилам технічної експлуатації й безпеки обслуговування електроустановок на промислових підприємствах.

Безпечна робота електротехнічного обладнання суттєво залежить від умов експлуатації, зокрема характеристик навколишнього середовища, доступності електроустановок та рівня напруги струму. Основні заходи захисту від ураження електричним струмом включають:

- Забезпечення ізоляції, встановлення захисних огороджень та блокувальних пристроїв для струмопровідних частин. Ці заходи запобігають

випадковому опиненню людини в небезпечній зоні або контакту зі струмопровідними елементами. Електричне блокування виконує функцію автоматичного вимкнення установки при відкриванні дверей, знятті огороджувальних панелей чи виконанні інших дій, які створюють ризик контакту зі струмом.

- Використання низької напруги (до 42 В). Таке обладнання застосовується для ручних інструментів та переносного або локального освітлення як у приміщеннях, так і назовні.

- Захисне заземлення корпусів обладнання. Це досягається зниженням напруги дотику й напруги кроку до безпечного рівня шляхом використання провідників із малим опором. Заземлення використовують у мережах змінного і постійного струму з ізольованою нейтраллю джерела живлення або трансформатора.

- Захист через автоматичне відключення живлення за час не більше 0,2 с при виникненні загрози ураження струмом. Пристрій захисного відключення (ПЗВ) оснащений чутливими елементами, які реагують на зміни контрольованих параметрів, і відключають відповідну частину мережі для уникнення небезпеки.

- Занулення корпусів електрообладнання в мережах із глухозаземленою нейтраллю. Це способи створення умисного з’єднання з нульовим захисним кабелем. Використовуються плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі, які забезпечують захист споживачів енергії від коротких замикань.

- Вирівнювання потенціалів корпусів електроустаткування. Ця міра застосовується як додатковий засіб безпеки за наявності занулення чи заземлення, особливо в умовах підвищеної небезпеки або в специфічних приміщеннях.

- Використання засобів індивідуального та колективного захисту. До таких засобів відносять ізолювальні інструменти, огороджувальні конструкції,

переносні пристрої та інші допоміжні приладдя. Вони призначені для захисту персоналу від можливого ураження струмом.

Дотримання зазначених заходів є ключовим для забезпечення повноцінної безпеки роботи з електроустановками та захисту життя і здоров’я персоналу.

### 4.4 Заходи з пожежної безпеки

Будівлю, де розташована лабораторія, можна класифікувати як приміщення категорії Д за критеріями вибухової та пожежної небезпеки. У лабораторії знаходяться горючі матеріали, такі як книги, документи й меблі, а також важкоспалимі елементи, наприклад, різноманітне лабораторне обладнання. Ці предмети здатні горіти при контакті з вогнем, однак ризик вибуху виключено. Конструктивно об’єкт належить до будівель із несучими та огороджувальними елементами з природних чи штучних кам’яних матеріалів, бетону або залізобетону. Для перекриттів допускається використання дерев'яних конструкцій, що мають захисний шар штукатурки чи негорючого облицювання зі спеціальних листових або плиткових матеріалів. Таким чином, ступінь вогнестійкості споруди визначається як третя (III).

Основними причинами можливого виникнення пожеж у лабораторії є такі фактори:

- несправності електропроводки, розеток і вимикачів, що можуть спричинити коротке замикання або пробій ізоляції;

- використання пошкоджених чи несправних електричних приладів;

- експлуатація електронагрівальних пристроїв із відкритими нагрівальними елементами;

- ураження будівлі блискавкою;

- зовнішні дії, які можуть спричинити займання;

- нехтування правилами користування відкритим вогнем або заходами пожежної безпеки.

Для ліквідації можливих пожеж у лабораторії передбачено вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-5 і ручний пожежний інструмент, такий як гаки, ломи, сокири, відра, лопати та ножиці для різання металу. Усе спорядження розміщено на стендах і щитах у добре видимих і доступних місцях.

Для своєчасного виявлення осередку пожежі та повідомлення про нього встановлено автоматичну пожежну сигналізацію (АДС) із димовими сповіщувачами та автоматичну систему пожежогасіння. Засоби зв’язку включають стаціонарні телефони, радіотелефони й інші комунікаційні пристрої, доступні у навчальному закладі.

Особливу увагу приділяють безпечній евакуації людей із приміщення. Для цього створюються заздалегідь розроблені плани евакуації, а схеми розташовуються в місцях, доступних для огляду.

## ВИСНОВКИ

1. У роботі проаналізовано сучасні теоретичні аспекти теплових ефектів матеріалів та енергоносіїв, які виникають під час розкислення та легування сталі.

2. Вивчено потенціал і перспективи застосування програми “Excalibur” та обґрунтовано її вибір для проведення досліджень.

3. Проведено дослідження теплових ефектів матеріалів у процесі розкислення та легування сталей типів 10Г2С1, 15ГС, 20ХГСА та 25ГС. Встановлено залежність теплових ефектів від частки внесених феросплавів для цих металів:

- Зменшення теплового ефекту пояснюється зниженням вмісту кисню в металі та одночасним зменшенням концентрації FeO у шлаку, що зумовлює зменшення екзотермічного ефекту.

- Зі збільшенням частки внесених феросплавів спостерігається інтенсивне окислення вуглецю, який міститься у металі та розкислювачах, із утворенням значної кількості газової фази, переважно CO. Це супроводжується ендотермічним ефектом.

- Аналіз впливу частки введених феросплавів на загальний тепловий ефект показав зниження питомої теплоємності системи.

4. Отримані результати створюють підґрунтя для проєктування нових і вдосконалення існуючих процесів розкислення та легування сталі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Диференціальні коефіцієнти засвоєння в комп'ютерних системах управління плавкою та позапечною обробкою сталі. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2002. №10. С. 131–137.

2. Lupis C. H. P. Chemical Thermodynamics of Materials. Prentice Hall, 1993. 602 p. ISBN-13 978-0444007797.

3. Харченко О. В., Пономаренко А. Г. Експериментальні основи термодинамічної моделі колективізованих електронів. Зб. наукових праць ДонНТУ. Серія: Металургія. Вип. 66. 2003. С. 17–24.

4. Харченко О. В., Пономаренко А. Г. Термодинамічний моделювання системи метал-шлак-газ з урахуванням тепла хімічних реакцій. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2004. №8. С. 40-43.

5. Трусов Б. Г. Астра–4/рс, версія 1.07. [Електронний ресурс]. 1991.

6. Харченко О. В., Пономаренко А. Г., Корзун Є. Л. Термодинамічна модель багатокомпонентної конденсованої фази. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2004. №8. С. 135–139.

7. Пономаренко А. Г., Мавренова Е. П. Питання термодинаміки фаз змінного складу, що мають колективну електронну систему. Оцінка енергетичних параметрів. ЖФХ. 1974. Т.48. № 7. С. 1672–1674.

8. Скрябін В. Г., Скрябін Д. В. Модель розрахунку середньої температури металу в надпотужній ДСП та її застосування в АСУТП. Матеріали 2–й межд. науково–практичній конференції «Автоматизовані пічні агрегати та енергозберігаючі технології у металургії» (3–5 грудня 2002 р). С. 466–468.

9. Пономаренко А. Г. Питання термодинаміки фаз змінного складу, що мають колективну електронну систему. Основні співвідношення. ЖФХ. 1974. Т.48. № 8. С. 950–958.

10. Довгонюк С. В., Пономаренко А. Г. Коефіцієнти активності елементів у газовій фазі. Зб. праць ДонНТУ. 2003. С. 25-28.

11. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Термодинамічний аналіз фізико-хімічних процесів в високотемпературній реакційній зоні рідкої сталеплавильної ванни. Частина 1. Системи залізо-кисень, залізо-кисень-вуглець. Метал та лиття України. Том 30. 2022. №1. С. 28–34.

12. Kharchenko O. V. Thermodynamic analysis of physical and chemical processes in the high-temperature reaction zone of a liquid steelmaking bath. Part 2. Removal of impurities. Метал та лиття України. Том 30. 2022. №4. С. 30–35.

13. Євченко В. Г., Корнаущенко І. І., Корольова М. К. Впровадження системи оптимального розрахунку шихти при виплавці легованої сталі. Зб. праць ДонНТУ. 2006. №3. С. 55–58.

14. Вентцель Є. С. Дослідження операцій. Завдання, принципи, методологія. К. : Вища школа. 2001. 208 с.

15. Смірнов А. П. Методи оптимізації. Київ : Вища школа. 2002. 135 с.

16. Харченко О. В., Щетінін В. О. Економія феросплавів з використанням технології ВЕЛР. Матеріали XVIII науково-технічної конференції студ., магістр. і викл. ЗДІА. 2013. Том І. С. 12.

17. Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Вторинне легування та рафінування стали в установках піч-ківш. Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія. 2012. С. 17–22.

18. Синяков Р. В., Харченко О. В. Автоматизоване проектування та управління киснево-конвертерною плавкою. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2018. №3. С. 14–26.

19. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп’ютерна програма «Excalibur». Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022 р.

20. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи “метал-шлак-газ” з урахуванням ентальпійного теплового балансу. Метал та лиття України. 2005. №6. С. 13-17.

21. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Про кінетику міжфазного масопереносу в металургійних агрегатах. Метал та лиття України. 2002. №12. С. 41-42.

22. Харченко О. В. Оптимізація позапічної обробки та легування стали на основі вирішення зворотного завдання термодинамічного аналізу. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2004. №8. С. 115-120.

23. Харченко О. В., Синяков Р. В., Воденніков С. А. Спосіб позапічної обробки сталі. Патент України №132087, зареєстрований в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 11.02.2019.

24. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп’ютерна програма «Excalibur». Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022 р.

25. Храпко С. А., Іноземцева Є. А., Харченко О. В. Термодинамічна модель системи метал-шлак-газ та інтегрована система "Оракул": використання для прогнозних розрахунків та управління у складі АСУТП та розробки сталеплавильних процесів. У кн. "Тези доповідей конф. "Моделювання фізико-хімічних систем та технологічних процесів у металургії". Київ. 1991. С. 222–223.

26. Пономаренко А. Г., Синяков Р. В., Довгонюк С. В. Розвиток інтелектуальних систем управління технологічними процесами виплавки сталі. Праці сьомого конгресу сталеплавильників, 15-17 жовтня. Київ. 2003. С. 293–297.

27. Синяков Р. В., Гуляєв М. П., Мартинов Р. Н. Промислове освоєння системи управління позапічною обробкою сталі (піч-ківш - вакууматор) ГІББС на БМЗ. Метал та лиття України. 2005. №3–4. С. 98–100.

28. ГОСТ 5520–79. Прокат листовий із вуглецевої низьколегованої сталі для котлів і посудин, що працюють під тиском. Технічні умови.

29. ТУ 14-3Р-55-2001. Труби сталеві безшовні для парових котлів і трубопроводів. Технічні умови.

30. ГОСТ 4543–71. Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови.

31. ГОСТ 8479–70. Поковки з конструкційної вуглецевої та легованої сталі. Загальні технічні умови.