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 _____другий (магістерський) рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему____Технологічні особливості позапічної обробки низьколегованих__ сталей з урахуванням теплових ефектів матеріалів та енергоносіїв_____
_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1364-мчм-з*

_Крупка В.С._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
Металургія чорних металів
(шифр і назва)

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

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

Запоріжжя - 2025 року

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

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

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

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *металургія чорних металів*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*

Ю.О. Бєлоконь

"_01_" ____05_____2025 року

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

Крупка Володимир Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Технологічні особливості позапічної обробки низьколегованих сталей з урахуванням теплових ефектів матеріалів та енергоносіїв*

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 "27" 02 2025 року № 319-с.

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *01.12.2025*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Визначити теплові ефекти феромарганцю, феросилікомарганцю, феросиліцію, феросилікохрому, тощо та внесеної електроенергії при позапічній обробці низьколегованих сталей*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина, Індивідуальне завдання, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.*

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
Літературний огляд	*Харченко О.В., доцент*		
Розрахунково-дослідницька частина	*Харченко О.В., доцент*		
Індивідуальне завдання	*Харченко О.В., доцент*		
Охорона праці та техногенна безпека	*Харченко О.В., доцент*		
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., професор*		

7. Дата видачі завдання *07.05.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*30.06.2025*	
2	*Реферат*	*30.06.2025*	
3	*Літературний огляд*	*30.06.2025*	
4	*Розрахунково-дослідницька частина*	*19.11.2025*	
5	*Індивідуальне завдання*	*26.11.2025*	
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*30.11.2025*	
7	*Висновки*	*30.11.2025*	

Студент _____ *В.С. Крупка*
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 89 с., 16 табл., 30 рис., 35 джерел.

МЕТОД ГІББСА, ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ, ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ, МАТЕРІАЛИ, ТЕПЛОВІ ЕФЕКТИ, СИСТЕМА «МЕТАЛ-ШЛАК-ГАЗ», НИЗЬКОЛЕГОВАНІ СТАЛІ, ПОЗАПІЧНА ОБРОБКА.

Об’єкт дослідження – теплові ефекти матеріалів та енергоносіїв при позапічній обробці низьколегованих сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 та 20MnSi5-5. Мета роботи – визначити теплові ефекти феромарганцю, феросилікомарганцю, феросиліцію, феросилікохрому, тощо та внесеної електроенергії при позапічній обробці низьколегованих сталей. Метод дослідження – термодинамічний аналіз системи «метал-шлак-газ» при позапічній обробці низьколегованих сталей.

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 частині ПК «Excalibur» 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 обчислювально-експериментальному розділу проведено дослідження впливу різноманітних параметрів на теплові ефекти матеріалів при позапічній обробці низьколегованих сталей. 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, та заходи з поліпшення умов праці.

ABSTRACT

Master's qualification work: 89 p., 16 tables, 30 figures, 35 sources.

GIBBS METHOD, THERMODYNAMICAL ANALYSIS, THERMAL MODEL, MATERIALS, THERMAL EFFECTS, METAL-SLAG-GAS SYSTEM, LOW-ALLOY STEELS, OUT-OF-FURNACE PROCESSING.

The object of the study is the thermal effects of materials and energy carriers during out-of-furnace processing of low-alloy steels 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 and 20MnSi5-5. The purpose of the work is to determine the thermal effects of ferromanganese, ferrosilicomanganese, ferrosilicon, ferrosilicomanganese, etc. and the input electricity during out-of-furnace processing of low-alloy steels. Research method – thermodynamic analysis of the “metal-slag-gas” system during out-of-furnace processing of low-alloy steels.

In the general part of the qualification work, 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 a thermal model are considered.

In the part of the PC “Excalibur”, 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 is considered. A full list of its functional capabilities and a conceptual block diagram are given.

In the computational and experimental section, a study of the influence of various parameters on the thermal effects of materials during out-of-furnace processing of low-alloy steels is carried out. The influence of the proportion of added ferroalloys on the thermal effects of materials is assessed, and the reasons for this influence are also investigated for further use in the metallurgical industry.

The section "Occupational Health and Safety" examines the characteristics of potentially dangerous and harmful factors affecting laboratory workers and measures to improve working conditions.

ЗМІСТ

ВСТУП……..... 9
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ…… 12
1.1 Метод Гіббса …….. 12
1.2 Використання ентальпійной теплової моделі…….. 18
1.3 Пряма задача термодинамічного аналізу з використанням теплової моделі…… 26
1.3.1 Постановка задачі……. 26
1.3.2 Вибір моделі системи “метал-шлак-газ”……... 26
1.3.3 Коефіцієнти активності в металі……. 28
1.3.4 Коефіцієнти активності в газі……. 29
1.4 Зворотна задача термодинамічного аналіза з використанням теплової моделі…….. 29
1.4.1 Постановка задачі……. 29
1.4.2 Невизначеність вихідних даних…….. 32
1.5 Висновки……. 32
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС (ПК) “EXCALIBUR” …… 34
2.1 Загальний огляд ПК “EXCALIBUR” ……. 34
2.2 Можливості та перспективи використання в металургійному виробництві…… 35
2.3 Концептуальна блок-схема……..……... 36
2.4 Висновки……... 44
РОЗДІЛ 3 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ……..,,,…… 45
3.1 Вибір об’єкту дослідження……. 45
3.1.1 Сталь 9MnSi6-3 – конструкційна низьколегована для зварних конструкцій…… 45
3.1.2 Сталь 12MnSi4-3 - конструкційна низьколегована для зварних конструкцій …… 45

3.1.3 Сталь 14MnCrSi4-3-2 - конструкційна низьколегована для зварних конструкцій…… 46

3.1.4 Сталь арматурна 20MnSi5-5 …… 46

3.2 Методика проведення обчислювального експерименту з використанням програми “Excalibur”…….. 47

3.2.1 Паспорт розкислення-легування сталі 9MnSi6-3…… 48

3.2.2 Паспорт розкислення-легування сталі 12MnSi4-3..…… 50

3.2.3 Паспорт розкислення-легування сталі 14MnCrSi4-3-2… 52

3.2.4 Паспорт розкислення-легування сталі 20MnSi5-5..…… 54

3.3 Одержані результати…… 57

3.3.1 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феромарганцю……..…….. 58

3.3.2 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікомарганцю…… 59

3.3.3 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросиліцію…….. 60

3.3.4 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ100Б……. 61

3.3.5 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ800Б……. 62

3.3.6 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікохрому ФСХ33…… 63

3.3.7 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект алюмінію вторинного АВ-87…….. 64

3.3.8 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект коксику……. 65

3.3.9 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на

термічний ефект карбіду кремнію……... 67

3.3.10 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект вапна…….. 68

3.3.11 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії……... 69

3.4 Висновки…… 69

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА…… 71

4.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії …… 71

4.2 Інженерна розробка захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи з поліпшення умов праці.. 75

4.3 Заходи з електробезпеки……... 80

4.3.1 Розрахунок захисного заземлення ……... 81

4.4 Заходи пожежної безпеки …… 83

ВИСНОВКИ……. 85

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……. 86

ВСТУП

Наявність автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП), стає нормою в сучасному сталеплавильному виробництві. У той же час, коло завдань, що вирішуються цими системами, часто обмежений автоматизацією елементарних технологічних операцій, інформаційним супроводом процесів і статистичною обробкою даних. Побудова ефективних систем управління без вирішення цих завдань, звичайно, неможливо, але можливості сучасної науки, апаратних і програмних засобів набагато ширше [1].

Потреби сучасного виробництва і можливості металургійної науки ставлять завдання оперативного моделювання процесів виплавки та обробки сталі і сталеплавильного виробництва в цілому системами управління.

Одним із актуальних завдань в сталеварінні - прогнозування хімічного складу і температури металу. Саме адекватний прогноз дозволяє ефективно вирішувати завдання безпосереднього управління, а також все коло супутніх завдань, призначених для підвищення ефективності роботи металургійного агрегату, цеху і підприємства в цілому.

Вивчення на електронних обчислювальних машинах (ЕОМ) складних фізико-хімічних моделей багатокомпонентних систем становить найбільший інтерес у наукових та практичних додатках хімічної термодинаміки як новий, перспективний засіб досліджень. Тільки через відсутність програмних комплексів універсального призначення витрачаються величезні кошти на проведення дорогих експериментальних та дослідно-технологічних робіт, які зараз можуть бути успішно, набагато швидше, і з мінімальними витратами виконані фізико-хімічним моделюванням на комп'ютерах. Машинні експерименти, що проводяться з метою відшукання оптимальних параметрів, дозволяють різко скоротити число натурних експериментів, а також скласти обгрунтований план проведення досвідчених плавок в промисловому агрегаті або на лабораторній установці. Машинні експерименти в поєднанні з

натурними особливо ефективні при введенні будь-яких змін в технологію плавки, а також при створенні абсолютно нових процесів і агрегатів. Але було б методологічною помилкою обмежувати значення фізико-хімічного моделювання тільки можливістю заміни безпосереднього експерименту експериментом на ЕОМ. Існує безліч завдань, єдино прийнятним і доступним способом постановки та вирішення яких є фізико-хімічне моделювання на ЕОМ [2].

Будь-яке управління пов'язане з необхідністю передбачення результатів тих чи інших можливих впливів на технологічний процес. У разі таких складних технологій, який є металургійна плавка, завдання передбачення є вузловою, зосереджує в собі найбільш важливі проблеми, лімітуючі розвиток таких систем управління [3].

В даний час у світовій практиці методами позапічної металургії обробляють сотні мільйонів тонн сталі. Швидке і широке поширення позапічної обробки пояснюються багатьма позитивними моментами, головними з яких є:

- отримання більш дешевими методами і у великих кількостях особливо чистої сталі з незначним вмістом небажаних домішок. Це, в свою чергу, дозволяє отримувати сталь нових марок з дуже високими показниками міцності і пластичності;

- забезпечення надійної і високопродуктивної роботи машин безперервного розливання сталі, де потрібне точне і стандартне від плавки до плавки регулювання температури і отримання металу стандартно чистого від шкідливих домішок, передусім від сірки (сьогодні практично уся сталь, що розливається на машинах безперервного розливання, заздалегідь піддається позапічній обробці);

- зміна структури і типу споживаних феросплавів і розкислювачів у бік зниження вимог до складу і відповідне їх здешевлення (використання дешевших марок ферохрому, феронікелю тощо);

- широке впровадження технології "прямого легування" з використанням природно-легованих руд, а також матеріалів з шлакових відвалів і різних відходів суміжних виробництв.

Ці та багато інших переваг сталеплавильних технологій з використанням методів позапічної обробки привели до того, що робота сталеплавильних цехів неможлива без наявності в їх складі агрегатів позапічної обробки [4].

Об’єктом дослідження роботи є теплові ефекти матеріалів та енергоносіїв при позапічній обробці низьколегованих сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 та 20MnSi5-5 за адаптованим європейським стандартом ДСТУ EN 10027-1:2019 [5]. Мета роботи – визначити теплові ефекти феромарганцю, феросилікомарганцю, феросиліцію, феросилікохрому, тощо та внесеної електроенергії при позапічній обробці низьколегованих сталей. Метод дослідження – термодинамічний аналіз системи «метал-шлак-газ» при позапічній обробці низьколегованих сталей.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Метод Гіббса

Метод Гіббса дозволяє описувати хімічні процеси в будь-яких системах без попереднього їх представлення у вигляді стехіометричних реакцій. Більш того, феноменологічна (класична, формальна, макроскопічна) термодинаміка Гіббса дає саме ту мову, за допомогою якого можна найбільш просто пояснити сутність будь-якої задачі виключно в термінах безпосередньо вимірюваних величин, таких як температура, тиск, хімічний склад, об'єм, маса та ін., тобто величин, якими керується технолог в своїй роботі. За своєю математичною структурою термодинаміка Гіббса - це класична механіка (статика суцільних середовищ) з тією різницею, що механіка вивчає системи, здатні обмінюватися тільки роботою і речовиною, а термодинамічні системи обмінюються ще й теплом. Для цього в вихідні рівняння механіки Гіббс вводить додаткову змінну, що характеризує здатність системи віддавати або поглинати тепло - ентропію. Таким чином, термодинаміка набуває зовсім строгу математичну структуру механіки. Термодинаміку Гіббса можна розглядати як узагальнення механіки на реальні системи, рух яких завжди супроводжується тепловими явищами .

При цьому виявляється, що багато емпіричних законів і правил хімії (зокрема закон діючих мас) закономірно випливають з первинних постулатів термодинаміки у вигляді різних окремих випадків, але вже у формі строгих математичних залежностей. Стає очевидною некоректність широко поширеної думки про те, що класична термодинаміка описує лише рівноваги, а розрахунок швидкостей і інших характеристик процесів потребує особливої системи уявлень і понять.

Механіка виходить з положення, що стан (повна сукупність властивостей) системи взаємопов'язаних тіл при відсутності зовнішніх полів повністю визначено в будь-який момент її руху (існування), якщо відомий вид зв'язку між тілами, що утворюють систему, і задані значення двох параметрів, що

характеризують загальну кількість речовини системи та її здатність обмінюватися роботою - в простому випадку маса (m) и об'єм (V) — в один із моментів.

Математично цей постулат виражається рівнянням

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

При переході до більш загального випадку термодинамічних систем вводиться ентропія (S), як певний параметр, що характеризує здатність системи віддавати чи отримувати тепло

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

Цей вислів лежить в основі технічної термодинаміки, що має справу з речовиною постійного складу. Термодинаміка Гіббса стає хімічною в результаті заміни загальної маси (m) до мас k компонентів, що утворюють систему

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

Ентропія, обсяг і маса, що входять в ці вирази, представляють мінімально необхідний набір первинних понять, не інтерпретуються на рівні феноменологічної (макроскопічної) теорії. Всі інші властивості, що розглядаються в термодинаміці, є їх похідними (як у звичайному, так і математичному сенсі цього слова), утворюючи специфічну мову термодинаміки з його жорсткою логічною структурою.

Так, внутрішня енергія системи (як і будь-яка інша її властивість) є деякою функцією цих змінних

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

Диференціал внутрішньої енергії як функції декількох змінних має вигляд

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

Похідні цього виразу можуть розглядатися як визначення температури, тиску і хімічних потенціалів компонентів

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

Таким же чином визначається теплоємність $c_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$, модуль пружності $K_T = -V\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$ та інші параметри, які складають мову термодинаміки. З урахуванням позначень (1.6) вираз (1.5) приймає вигляд

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

Цей вираз являє одну із загальних форм фундаментального рівняння, яке при певному вигляді функції (1.4) дозволяє виконувати практичні розрахунки. Перетворенням рівняння (1.7) можна отримати іншу його форму

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

Вирази (1.7) і (1.8) можна представити 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 τ – час;

x — просторова координата.

Ці вирази пов'язують узагальнені потоки і сили, що дозволяє систематизувати завдання кінетики та термодинаміки необоротних процесів в термінах єдиної макроскопічної мови.

Щоб перейти до вирішення практичних завдань, потрібно визначити конкретний вид функцій (1.4) для фаз, що беруть участь в процесі. Для цього необхідно використовувати знання про властивості частинок, що утворюють речовину, хімічний зв'язок, про форми існування компонентів у металі і шлаку, дифузійну рухливість частинок і так далі, що призводить до практично необмеженого обсягу інформації, який представляє собою погано організоване безліч фактів, їх тлумачень, гіпотез, специфічних понять і ін. Знову виникає проблема систематизації мови, оскільки поняття класичної термодинаміки (температура, тиск, ентропія та ін.) у застосуванні до явищ мікросвіту позбавлені сенсу, а також проблема інтерпретації результатів мікроскопічного розгляду властивостей речовини на мові феноменологічної термодинаміки. Цю функцію виконує спеціально створений розділ механіки, названий статистичної механікою.

В роботі [13] описані особливості цього методу, враховані при отриманні конкретного виду функції (1.4) для металургійних розплавів. Істотні відмінності від відомих залежностей при цьому отримані для шлакової фази. Особливості цих функцій зводяться до наступного:

1) компонентами всіх конденсованих фаз вважаються елементи періодичної системи;

2) при підрахунку статистичної суми одиницями теплового руху вважаються атоми (кістяки) хімічних елементів, що утворюють фазу, і електрони;

3) число компонентів дорівнює кількості елементів, що утворюють фазу, - електрони не є незалежними компонентами, фаза в цілому залишається електронейтральною.

Введення електронів в якості самостійної одиниці теплового руху дозволило виключити необхідність написання рівнянь реакцій в конденсованих фазах і одноманітно описати електрохімічні, поверхневі явища, а також явища, що вивчаються в теорії напівпровідників. При цьому вираз для хімічного потенціалу компонента конденсованої фази має наступний вигляд

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

де x_i — атомна доля елементу i;

ψ_i — коефіцієнт активності елементу i без урахування електронного вкладу;

ν_i — валентність елемента i;

μ — хімічний потенціал електронів в шлаку (рівень Ферми), який зручно виразити, наприклад, через активність (парціальний тиск) будь-якого елементу системи, зокрема кисню

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

У випадку металів член $\nu_i \mu$ у виразі (1.11) - електронний вклад - мало змінюється зі складом, тому при розрахунках рівноваги з цілком достатньою точністю можна використовувати звичайне вираження

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

Тепер рівноважний коефіцієнт розподілу домішкового елемента *i* між металом і шлаком може бути отриманий з простої рівності хімічних потенціалів цього елемента в обох фазах:

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

Підставивши значення для хімічних потенціалів з (1.11) - (1.13) у вираз (1.14), отримуємо для коефіцієнта розподілу елемента *i* між металом і шлаком

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

Аналогічно розглянувши розподіл сірки між шлаком і газовою фазою, приходимо до широко відомого рівнянню сорбційної здатності шлаку по відношенню до сіри

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

Різко спрощується опис рівноваг в разі фаз складного складу, включаючи і виробничі розплави. Так, для розрахунку кількості і складу продуктів, які утворюються при проплавленні завалки відомого складу, записуються рівняння матеріальних балансів розподілу елементів по фазам, які утворюються (для простоти припустимо, що утворюються тільки дві фази - метал і шлак):

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

де m_i — маса елемента i, яка поступила з шихтою (задана);

$m_{[i]}$, $m_{(i)}$ — маси елемента i (потрібно визначити).

Всього є k (число компонентів) таких рівнянь, в яких міститься $2k$ невідомих. Записуємо далі до умов рівноваги (1.14). Таким чином, отримуємо $2k$ рівнянь і $2k$ невідомих, крім того, необхідно задати температуру і тиск системі, оскільки вони входять у вирази для хімічних потенціалів. Отримані маси компонентів металу і шлаку дають повну інформацію про склад і кількість цих фаз. Розбивши плавку на періоди між добавками і повторюючи розрахунок, можна простежити за змінами складу металу і шлаку протягом усієї плавки в рівноважному наближенні. Облік кінетичних зрушень реального процесу входить у функції системи адаптації до конкретних умов та враховує ту обставину, що відхилення від рівноваги носять систематичний характер (зміщення в бік вихідного стану). На цій основі було створено пакет прикладних програм “Excalibur”, що дозволяє імітувати плавку в наукових і навчальних цілях [7].

1.2 Використання ентальпійной теплової моделі

Рівняння теплового балансу засновано на I і II засадах термодинаміки, згідно з якими, зокрема, при ізобарному процесі зміна ентальпії системи дорівнює поглиненій кількості теплоти Q:

$$\Delta Hp = H(T) - H_0 = Q_E - Q_L, \qquad (1.18)$$

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

H_0 – ентальпія системи в початковому стані;

Q_E – прихід тепла від енергоносіїв;

Q_L – теплові втрати;

У всіх розрахунках ентальпія обчислюється одним з наступних еквівалентних способів:

1) По рівнянню Гіббса-Гельмгольца: $H = G - T(\partial G/\partial T)_P$;

2) По рівнянню Вант-Гоффа: $H = (\partial(G/T)/\partial(1/T))_P$.

Крім того, парціальну мольну ентальпію змішування можна обчислити ще двома відомими способами [11]:

3) По відомій активності: $h_i^M = -RT^2(\partial \ln a_i / \partial T^2)_P$;

4) По відомому коефіцієнту активності: $h_i^M = R(\partial \ln \gamma_i / \partial(1/T))_P$.

Теплоємності (у тому числі стандартна і змішання) обчислюються за рівнянням:

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

Таким чином, ентальпійна теплова модель є невід'ємною і узгодженою частиною будь-якої термодинамічної моделі, що лежить в основі рівноважних розрахунків і заснована на методі хімічних потенціалів Гіббса.

У початковому стані система може складатися з розплавленої системи “метал-шлак” і будь-яких завантажуваних шихтових і легуючих матеріалів (брухту, чавуну, вапна, феросплавів і т. д.). У процесі плавки або на випуску з печі, або тільки з завантажуваних шихтових матеріалів - на початку плавки. Крім того, в систему потрапляє матеріал футеровки печі або ковша, кількість якого визначається статистично. В кінцевому стані система має температуру T і в загальному випадку складається з розплавлених металу, шлаку і газової фази.

Електроенергію, яка вноситься зручно вважати матеріалом з нульовою масою, але зі стандартною ентальпією, рівної кількості внесених в систему джоулів тепла на 1 кВт * год Для більш точних розрахунків можна також врахувати, що, якщо електроенергія надходить через графітові електроди, то в систему вноситься деяка кількість вуглецю, тобто матеріал “електроенергія” містить вуглець і власне енергію. Аналогічно можна поступити і з іншими енергоносіями.

У кожен момент часу, або по завершенню якої-небудь операції введення матеріалів та енергії, система вважається закритою з матеріального балансу, але відкритою для енергії, яка надходить та теплових втрат. При безперервному введенні матеріалів та енергії загальний час розбивається на короткі періоди, протягом яких відбувається проплавлення матеріалів, які надійшли. При цьому розглядається послідовність початкових і кінцевих станів системи.

З урахуванням визначення енергоносіїв як специфічних матеріалів, рівняння теплового балансу запишеться наступним чином:

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

З огляду на те, що розглянута система “метал-шлак-газ” є гетерогенною, існує проблема вибору єдиного стандарту для вираження термодинамічних функцій в різних фазах. Енергія Гіббса системи в стандартному стані “рідкий метал” має вигляд [6]:

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

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 $\ln K_{[i\}}$, $\ln K_{[i)}$ визначені наступним чином:

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

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

При використанні єдиного стандарту енергії Гіббса переходу атомів з інших фаз в фазу, прийняту за стандарт, необхідним чином стають частиною функцій змішання. При цьому повні (абсолютні) активності елементів в стандартному стані "рідкий метал" виражаються наступним чином:

$$\ln a_{[i]} = \ln x_{[i]}\gamma_{[i]}; \tag{1.24}$$

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

$$\ln a_{\{i\}} = \ln x_{\{i\}}\gamma_{\{i\}} - \ln K_{[i]}. \tag{1.26}$$

Таким чином, при виборі будь-якого стандартного стану енергія Гіббса системи в термінах повних (абсолютних) активностей буде мати вигляд:

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

де μ°_i - мольна енергія Гіббса *i*-го елемента у вибраному стандартному стані.

З моменту вибору єдиного стандартного стану будуть виконуватися наступні співвідношення, що спрощують термодинамічний формалізм:

$$\mu^{\circ}_{[i]} = \mu^{\circ}_{(i)} = \mu^{\circ}_{\{i\}} = \mu^{\circ}_i \tag{1.28}$$

$$h^{\circ}_{[i]} = h^{\circ}_{(i)} = h^{\circ}_{\{i\}} = h^{\circ}_i \tag{1.29}$$

З наведених рівнянь зрозуміло, що не існує принципової різниці у виборі єдиного стандарту, якщо розглядається тільки система "метал-шлак-газ" при

високій температурі у вигляді розплаву металу, шлаку та газової фази. Традиційно в якості єдиного стандарту вибирають рідкий метал, так як саме метал є переважаючим і кінцевим продуктом будь-якого сталеплавильного процесу.

В кінцевому стані система “метал-шлак-газ” з температурою T має інтегральну ентальпію:

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

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 і газу складаються з ентальпій в стандартному стані і ентальпій змішування:

$$H_m(T) = H_m^\circ(T) + H_m^M(T); \quad (1.31)$$

$$H_s(T) = H_s^\circ(T) + H_s^M(T); \quad (1.32)$$

$$H_g(T) = H_g^\circ(T) + H_g^M(T); \quad (1.33)$$

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

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

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

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

Аналогічно, інтегральна ентальпія змішування системи дорівнює сумі ентальпій змішування фаз і виражається через відповідні парціальні величини:

$$H^M(T) = H^M_m(T) + H^M_s(T) + H^M_g(T) = \sum_{i=1}^{k}[n_{[i]}h^M_{[i]}(T) + n_{(i)}h^M_{(i)}(T) + n_{\{i\}}h^M_{\{i\}}(T). \quad (1.35)$$

У початковому стані система “метал-шлак-матеріали” має інтегральну ентальпію:

$$H_0 = H^{\circ}_0 + H^M_0 = H_{ms0}(T_0) + \sum_{j=1}^{M} H_j(T_j). \quad (1.36)$$

де H°_0 - інтегральна стандартна ентальпія системи в початковому стані;

H^M_0 - 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.

При обчисленні термодинамічних функцій початкового стану підсистема “метал-шлак” і кожен матеріал розглядаються в загальному випадку як незалежні термодинамічні системи “метал-шлак-газ”, які не обов'язково знаходяться в рівновазі. Іноді буває зручно вихідні метал і шлак представити в якості особливого матеріалу з фіксованою масою.

Термодинамічні функції вихідних металу і шлаку обчислюються так само, як і для кінцевого стану, але при відомій температурі T_0. Для інтегральної стандартної ентальпії підсистеми “метал-шлак” маємо:

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

Інтегральна ентальпія змішування підсистеми “метал-шлак” дорівнює:

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

Якщо довільний матеріал знаходиться в рідкому, газоподібному або змішаному стані, його стандартна ентальпія дорівнює:

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

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.

Тут парціальні стандартні ентальпії мають таке ж значення, що і для підсистеми “метал-шлак”.

Інтегральна ентальпія змішування довільного j-го матеріалу у твердому, рідкому, газоподібному або гетерогенному стані дорівнює:

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

Для j-го матеріалу в твердому стані стандартна ентальпія обчислюється таким чином:

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

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

Термодинамічні функції елементів в стандартному стані обчислюються відповідно до баз даних Астра [8].

Термодинамічні функції змішування багатокомпонентної конденсованої фази обчислюються відповідно до модифікованої МКЕ [9].

Стосовно до шлакової фазі використовується параметризація у вигляді [6]:

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

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

В принципі можна використовувати будь-яку іншу термодинамічну модель фази, що забезпечує виконання граничного закону Рауля, рівнянь Гіббса-Дюгема і Гіббса-Гельмгольца.

Тепловий ефект хімічних реакцій, узгоджений з термодинамічною моделлю. Цей ефект дорівнює зміни ентальпії змішування системи із зворотним знаком:

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

Скориставшись формулами (1.35), (1.38) і (1.40), можна отримати тепловий ефект хімічних реакцій в явному вигляді. Проте слід мати на увазі, що отриманий вираз можна обчислити тільки при відомому кінцевому складі і

температурі системи *T*, тобто не до, а після рішення прямої рівноважної задачі [10].

У багатьох теплових моделях тепловий ефект хімічних реакцій обчислювався за сумою реакцій окиснення як окрема стаття теплового балансу. В рамках даного підходу відсутня необхідність не тільки записувати окремі хімічні реакції, але й особливо виділяти величину *Qr*, яка неявно входить в рівняння теплового балансу (1.20).

1.3 Пряма задача термодинамічного аналізу з використанням теплової моделі

1.3.1 Постановка задачі

В загальному вигляді пряме завдання формулюється у вигляді системи рівнянь щодо рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газу:

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

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.

Постачальником мас елементів m в систему є рідкі метал і шлак, футеровка печі або ковша, а також різні матеріали, що завантажуються в піч або ківш, в тому числі брухт, чавун, феросплави, лігатури, вапно, кокс, кисневе дуття і т.д. [11].

1.3.2 Вибір моделі системи “метал-шлак-газ”

В якості термодинамічної моделі системи “метал-шлак-газ” (1.44) використовується детермінована фізико-хімічна модель колективізованих електронів МКЕ [12], яка найбільш точно описує процеси, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті. Суттєвою характерною особливістю даної моделі є врахування електронного вкладу в хімічний потенціал елементів в шлаку.

Згідно МКЕ, рівновага в термодинамічній системі забезпечується рівністю хімічних потенціалів компонентів у всіх фазах. У системі “металл-шлак-газ” рівновага може бути описана системою рівнянь $2k$ +1 (k - число елементів):

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

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”;

γ_i – коефіцієнти активності елементів в металі;

ψ_i – коефіцієнти активності елементів в шлаку;

λ_i – коефіцієнти активності елементів в газі;

ν_i – валентності елементів в шлаку;

μ_e – рівень Ферми електронів в шлаку;

T – температура в системі;

R – універсальна газова постійна.

Дана система $2k+1$ нелінійних рівнянь допускає еквівалентне перетворення до системи трьох нелінійних рівнянь [13]:

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

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;

Результатом рішення нелінійної системи (1.46) являється набір величин μ_e, Y, Z, по яким визначаються рівноважні змісту (числа молей) елементів в шлаку, газ і металі:

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

1.3.3 Коефіцієнти активності в металі

Коефіцієнти активності елементів в металі, що входять в рівняння (1.45-1.46), розраховуються відповідно до моделі розведеного розчину. Цього цілком достатньо для адекватного опису рівноважного стану системи.

1.3.4 Коефіцієнти активності в шлаку

Атомні коефіцієнти активності в шлаку, що входять в рівняння (1.45-1.46) розраховувати 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 [14].

1.3.4 Коефіцієнти активності в газі

Коефіцієнти активності елементів в газі розраховуються на підставі законів Дальтона і Сівертса по рівновазі в підсистемі “метал-газ”. Підхід з використанням елементного складу газу $x_{\{i\}}$,відповідних констант рівноваги “метал-газ” $K_{[i\}}$ і коефіцієнтів активності елементів в газі λ_i дозволяє уніфікувати подання хімічних потенціалів і активностей елементів в газі і дає можливість одночасно обчислювати парціальні тиски всіх молекулярних і атомарних складових газової фази [15].

1.4 Зворотна задача термодинамічного аналіза з використанням теплової моделі

1.4.1 Постановка задачі

Існує нескінченно багато способів ведення плавки, позапічної обробки, легування і розкислення сталі. Кожен з них повинен забезпечувати заданий склад напівпродукту або готової сталі, температурний і шлаковий режим, газонасиченості металу, а також враховувати допустимі параметри металургійного агрегату, дозаторів, фурм і т.д. З усього різноманіття можливих способів досягнення поставленої мети, що відрізняються як кількісними, так і якісними характеристиками, бажано обрати єдиний спосіб, який був би найменш дорогим.

Якщо існує адекватна модель системи "метал-шлак-газ", то в принципі можливо, діючи за принципом "що, якщо?", Шляхом перебору величезної кількості варіантів прийти до деякого рішення, яке б відповідало заданим технологічним обмеженням і було найдешевшим з числа розглянутих. На жаль, перебрати всі можливі варіанти немислимо через обмеженість обчислювальних ресурсів і часу.

Неповний же перебір не дає ніякої гарантії, що знайдене рішення оберненої задачі є оптимальним.

Революційний крок у вирішенні зворотних завдань був зроблений в 1939 році Л. В. Канторовичем [16], який запропонував симплекс-метод лінійного програмування для широкого класу задач, в яких вектор вихідних

параметрів Y лінійно залежить від вектора незалежних змінних X:

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

де K – вектор констант;

L – лінійний оператор.

За допомогою стандартного алгоритму симплекс-методу знаходиться оптимальний вектор X з урахуванням всіляких обмежень, що накладаються на вектори X, Y і будь-які лінійні комбінації їх компонентів. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум (максимум) лінійного функціоналу

C^TX, який можна ототожнити з вартістю варіанту X, якщо C має сенс вектора цін.

У низці робіт [17, 18, 19, 20] робилися спроби застосувати на практиці лінійне програмування для розв'язання задачі гарантованого забезпечення хімічного складу готової сталі при мінімальній вартості розкислювачів і легуючих матеріалів. Завдання зводилося до складання системи нерівностей щодо шуканого вектора мас шихтових матеріалів (ШМ)X:

$$F^H \le P + (1/M_ж)UBX \le F^B \qquad (1.50)$$

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.

Далі ця система нерівностей вирішувалася симплекс-методом. При цьому коефіцієнти засвоєння (КЗ) елементів в металі задавалися, виходячи із середньостатистичних величин, характерних для даних умов плавки, вихідного і заданого хімічного складу сталі, температури і окислення металу, кількості і складу пічного (ковшевого) шлаку.

Проте в реальних системах “метал-шлак-газ” реалізуються хімічні взаємодії між елементами, в силу яких КЗ фактично не є постійними величинами, а істотно залежать від усіх перерахованих факторів. При цьому існують перехресні ефекти впливу добавок одних елементів на утримання інших. Будь-яка термодинамічна модель системи “метал-шлак-газ”, що враховує хімічні взаємодії елементів, в загальному випадку є нелінійною і тому непридатною для розв'язку зворотної задачі засобами лінійного програмування. Нелінійне програмування, яке могло б прийти “на виручку”, поки ще швидше мистецтво, ніж чітко розроблена система алгоритмів. Як правило, ці алгоритми складаються для конкретних задач з використанням комбінацій методів

можливих напрямів, штрафних функцій, множників Лагранжа з умовами Куна-Таккера. Всі вони працюють при не занадто великий розмірності вихідної задачі. Так зване “прокляття багатовимірності”, описане Е. С. Вентцелем в роботі [21], зводить нанівець зусилля розробника алгоритмів або нестійкістю роботи в багатовимірних (і найчастіше багатозв'язних) областях зміни параметрів, або непомірно великими обчислювальними витратами, несумісними із застосуванням даного алгоритму в реальних виробничих умовах. Але як раз адекватні моделі реальних систем “метал-шлак-газ” з хімічною взаємодією повинні мати розмірність не менше 10 за кількістю елементів. А кількість видів шихтових матеріалів може вимірюватися десятками і сотнями.

1.4.2 Невизначеність вихідних даних

У реальності всі вихідні величини мають похибку, яка є причиною розкиду вихідних параметрів, таких, як кінцевий хімічний склад і маса фаз. Крім того, існують величини, які безпосередньо або не вимірюються, або їх вимір пов'язано зі значними труднощами. Це - вихідні маси металу і шлаку в металургійному агрегаті; маса футеровки ковша, розмивається в ході випуску рідкого металу, знос льотки і пов'язане з цим потрапляння надлишкової кількості пічного шлаку в ківш і т. п. Середні значення таких величин і діапазон їх зміни доводиться оцінювати статистично.

В рамках розробленого методу розв'язання оберненої задачі всі згадані раніше змінні, за винятком шуканого вектора *X*, поділяються на два класи: нижній (з індексом “н”) і верхній (з індексом “в”), відповідно до реального діапазоном їх зміни. В результаті, оперуючи довірчими інтервалами значень на вході, отримуємо довірчі інтервали (тобто “вилки”) по очікуваним хімічним складом і масам фаз на виході. Такий підхід дозволяє гарантувати отримання необхідних технологічних параметрів строго в заданих межах.

1.5 Висновки

1. Встановлено, що метод Гіббса дозволяє описувати хімічні процеси в будь-яких системах без попереднього їх представлення у вигляді стехіометричних реакцій. Більш того, феноменологічна (класична, формальна, макроскопічна) термодинаміка Гіббса дає саме ту мову, за допомогою якого можна найбільш просто пояснити сутність будь-якої задачі виключно в термінах безпосередньо вимірюваних величин, таких як температура, тиск, хімічний склад, об'єм, маса та ін., тобто величин, якими керується технолог в своїй роботі.

2. Показано, що у початковому стані система може складатися з розплавленої системи “метал-шлак” і будь-яких завантажуваних шихтових і легуючих матеріалів (брухту, чавуну, вапна, феросплавів і т. д.). У процесі плавки або на випуску з печі, або тільки з завантажуваних шихтових матеріалів - на початку плавки. Крім того, в систему потрапляє матеріал футеровки печі або ковша, кількість якого визначається статистично. В кінцевому стані система має температуру T і в загальному випадку складається з розплавлених металу, шлаку і газової фази.

РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС (ПК) “EXCALIBUR”

2.1 Загальний огляд ПК “EXCALIBUR”

Програмний комплекс “Excalibur” призначений для розрахунків металургійних процесів на основі термодинамічного моделювання системи “метал-шлак-газ” з урахуванням ентальпійного теплового балансу.

Якщо сталеплавильний агрегат представити у вигляді системи, на вході якої задано вектор незалежних керуючих змінних X (як: витратні матеріали, енергоносії, тиск та температура), а на виході - вектор залежних змінних Y, таких як метал, шлак і газ певного складу і маси, то пряму задачу термодинамічного моделювання подібної системи можна визначити як функція Y (X). Відповідно, зворотна задача визначається функцією X (Y). Суттєва їх відмінність полягає в тому, що пряма задача має єдине рішення, а зворотна - нескінченну безліч рішень.

В програмі “Excalibur” вперше в повному обсязі реалізуються пряма і зворотна задачі, що працюють в тандемі. Алгоритм прямої задачі базується на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази [22] та її подальших модифікацій [23, 24], ентальпійному тепловому балансі [25, 26] та обліку кінетичної затримки [27]. В алгоритмі зворотного завдання реалізовано універсальний метод фазових операторів [28], окремим випадком яких є диференційні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) в металі [29].

Програма “Excalibur” є розвитком інформаційно-технологічної системи “Форвард” [30] та програми “Оракул” [31], в створенні яких автори приймали безпосередню участь. Промислова реалізація одного з варіантів програми - система керування плавкою та позапічною обробкою “Гіббс” [32, 33] - впроваджена на Білоруському металургійному заводі у 2004 році.

2.2 Перелік можливостей та перспективи використання в металургійному виробництві

По своїм можливостям “Excalibur” значно перевершує раніше створені програми термодинамічного моделювання системи “Металл-шлак-газ”. Нижче перечислені основні переваги програми “Excalibur”, що відрізняють її від інших програмних продуктів аналогічного призначення:

- Термодинамічний розрахунок рівноваги в багатокомпонентній гетерогенній системі “метал-шлак-газ” з урахуванням тепла хімічних реакцій;

- Інтегрований термодинамічний розрахунок кінцевої температури системи на основі ентальпійного теплового балансу;

- Точний облік заданого зовнішнього тиску. Розрахунок парціальних тисків всіх атомних і молекулярних компонентів газової фази;

- Обчислення і відображення всіх інтегральних і парціальних термодинамічних функций компонентів системи, включаючи усі фази і окремі хімічні елементи, на основі єдиного стандарту;

- Точний облік тепла енергоносіїв та теплових втрат, температури та агрегатного стану матеріалів;

- Обчислення та наочний показник кінетики взаємодії фаз в сталеплавильному агрегаті на основі принципів нерівноважної термодинаміки та рішення динамічної системи диференціальних рівнянь;

- Повний розрахунок плавки в ДСП, в тому числі: динаміки плавлення брухту, маси та хімічного складу металу, шлаку та газу, температури по ходу плавки. Облік кінетичного відставання, скачування шлаку, теплових втрат та геометричних параметрів печі;

- Термодинамічні розрахунки в широкому діапазоні компонентів і температур; принципіальна можливість використання програми в феросплавному та доменному виробництві.

В рамках повного і точного розв'язання зворотної задачі термодинамічного моделювання програма “Excalibur” забезпечує:

- Оптимізацію мас всіляких легуючих і шихтових матеріалів (в будь-якому агрегатному стані) і витрати енергоносіїв за критеріями їх сумарної мінімальної вартості або максимальної продуктивності сталеплавильного агрегату;

- Завдання і гарантоване виконання комплексу односторонніх і двосторонніх оптимізаційних обмежень за хімічним складом і масами кінцевих металу, шлаку і газу, масами матеріалів, витратами енергоносіїв, кінцевою температурою системи;

- Застосування матричної алгебри фазових операторів і швидкодіючого алгоритму двоїчного симплекс-методу;

- Розрахунок і облік перехресного впливу вмісту одних елементів на засвоєння інших в кожній з фаз;

- Розрахунок консолідованої матриці впливу домішок матеріалів і енергоносіїв на масу і склад фаз, а також температуру системи;

- Облік невизначеності вихідних і розрахункових даних шляхом завдання відповідних довірчих інтервалів “нижня межа - верхня межа”;

- Практичну реалізацію принципу ситуаційного управління процесами на основі оперативного вироблення альтернативних варіантів легування, розкислення і позапічної обробки сталі при відсутності рішення зворотної задачі в початковому вигляді.

2.3 Концептуальна блок-схема

На рисунку 2.1 показана концептуальна блок-схема програми “Excalibur”. При запуску програма зчитує файли проекту, констант, параметрів Вагнера, газів, матеріалів і завдань і проплавляє набір матеріалів з останнього відкритого завдання. Запуск прямого і зворотного завдань проводиться шляхом натискання кнопок на панелі інструментів або вибором відповідних пунктів меню. Результатом всіх розрахунків прямої задачі є маси і склади металу, шлаку і газу, парціальні тиски всіх складових газової фази і кінцева температура

системи. Склади фаз можуть відображатися у вигляді масових відсотків, мольних відсотків, кілограмів і кіломолей. Крім того, обчислюються обсяг газу, що виділився, основність шлаку, окислювально-відновний потенціал системи (рівень Фермі електронів в шлаку), хімічні потенціали і парціальні ентальпії змішування всіх елементів у всіх фазах, тепловий ефект хімічних реакцій. Всі розрахункові величини мають довірчий інтервал “нижня межа” - “верхня межа”. У зворотній задачі додатково розраховуються і відображаються оптимальні маси матеріалів, що забезпечують гарантоване виконання всіх оптимізаційних обмежень, зазначених у завданні на плавку. Розрахунки прямої і зворотної задач проводиться дуже швидко, як правило, протягом 0,01 - 1 секунд. Завдання кінетики, моделювання плавки в ДСП і пошуку альтернативних рішень в зворотній задачі розраховуються за 0,01 - 2 хвилини. Кінцевий підсумок більшості розрахунків відображається на головній формі.

Програма має інтуїтивний дружній інтерфейс (рис. 2.2), що дозволяє користувачам ефективно працювати з нею, спираючись на мінімальну теоретичну підготовку в галузі металургії чорних металів та інформатики. Робота з файлами і друк результатів проводяться за допомогою стандартних кнопок панелі інструментів, поєднань “гарячих клавіш” або шляхом вибору відповідних пунктів меню. Таблиці матеріалів, елементів і газів мають контекстні спливаючі меню, що робить роботу з програмою ще зручніше. Якщо в результаті розрахунку прямої або зворотної задачі зміст будь-якого елементу в металі або шлаку виходить за межі, визначені в завданні на плавку, то відповідна величина в таблиці елементів маркується червоним кольором.

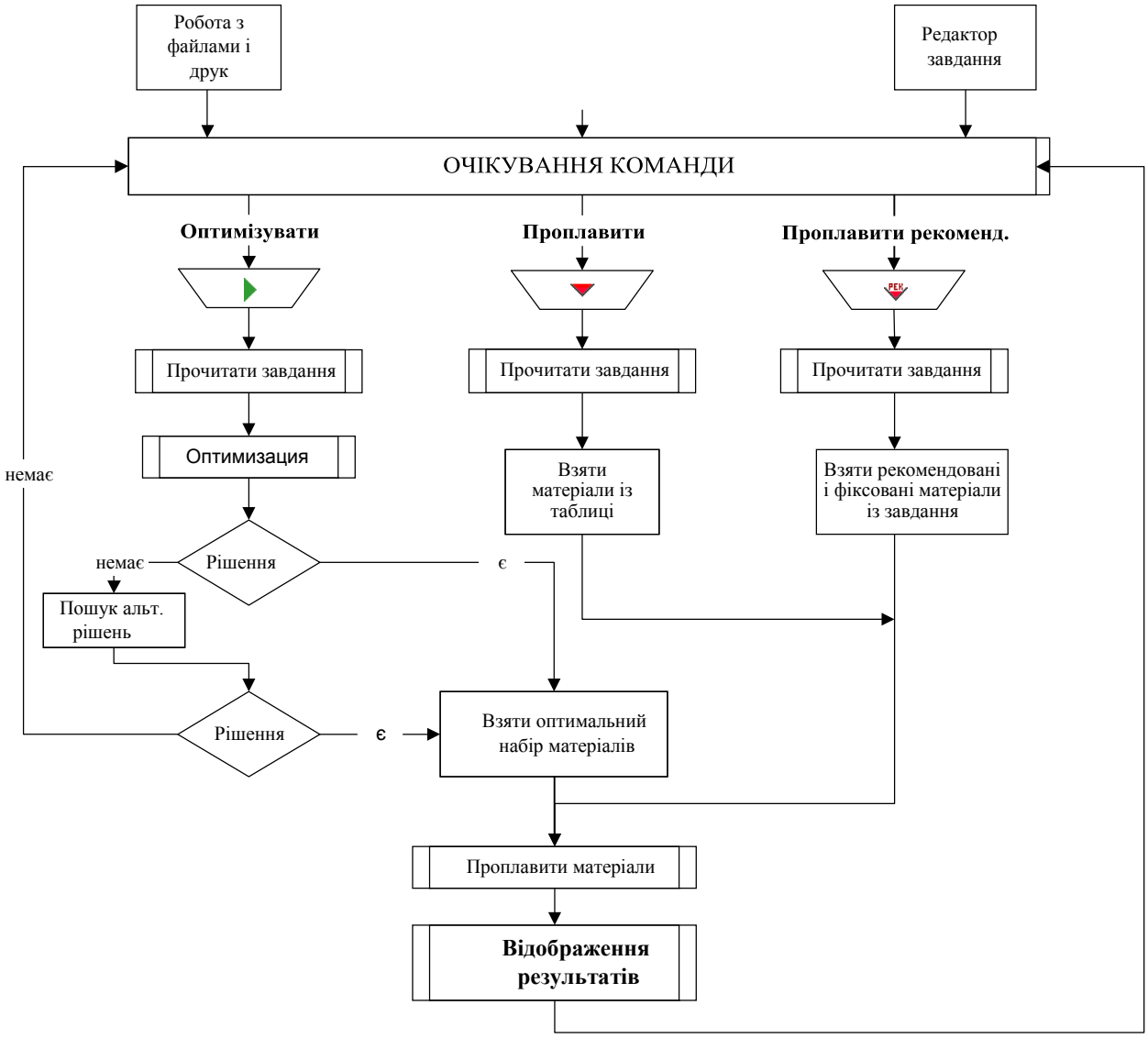


Рисунок 2.1 - Концептуальна блок-схема основних режимів роботи програми “Excalibur”

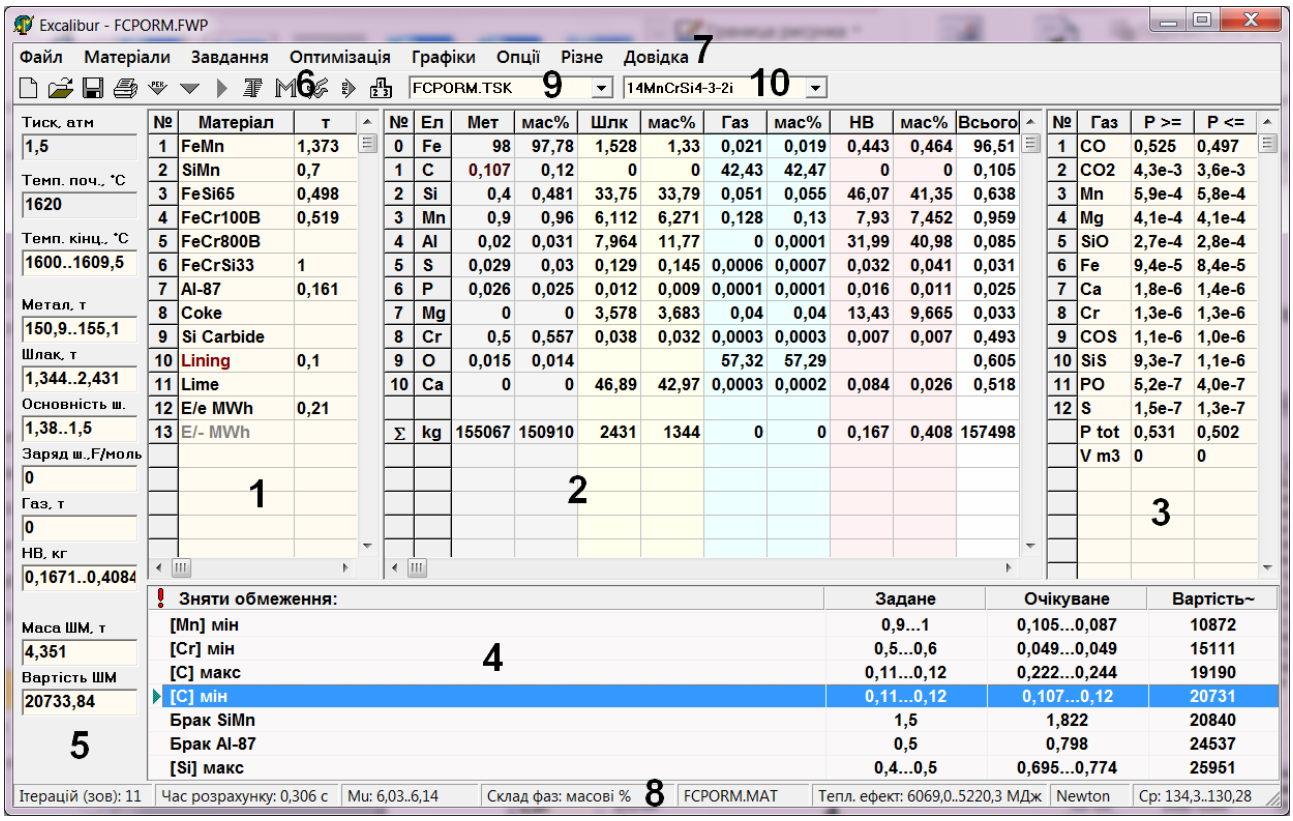


Рисунок 2.2 - Загальний вигляд головної форми “Excalibur”

Оскільки в будь-якому режимі роботи “Excalibur” звертається до завдання на плавку, яке по суті є специфікацією як прямої, так зворотної задачі, особливе значення надається редактору завдання на плавку, для якого була створена окрема форма (рис. 2.3). На цій формі користувач за допомогою редагованих таблиць і полів може задати будь-які вихідні дані і оптимізаційні обмеження (односторонні і двосторонні) стосовно до металу, шлаку і газу, а також до всіх доступних і недоступних матеріалів і енергоносіїв. Зокрема, тут можна задати хімічний склад і інтервал мас вихідних металу і шлаку, початкову температуру, температуру навколишнього середовища, необхідний склад металу і шлаку, необхідні маси металу, шлаку і газу, обмеження по кінцевій температурі металу, а також вказати величину теплових втрат в МДж.

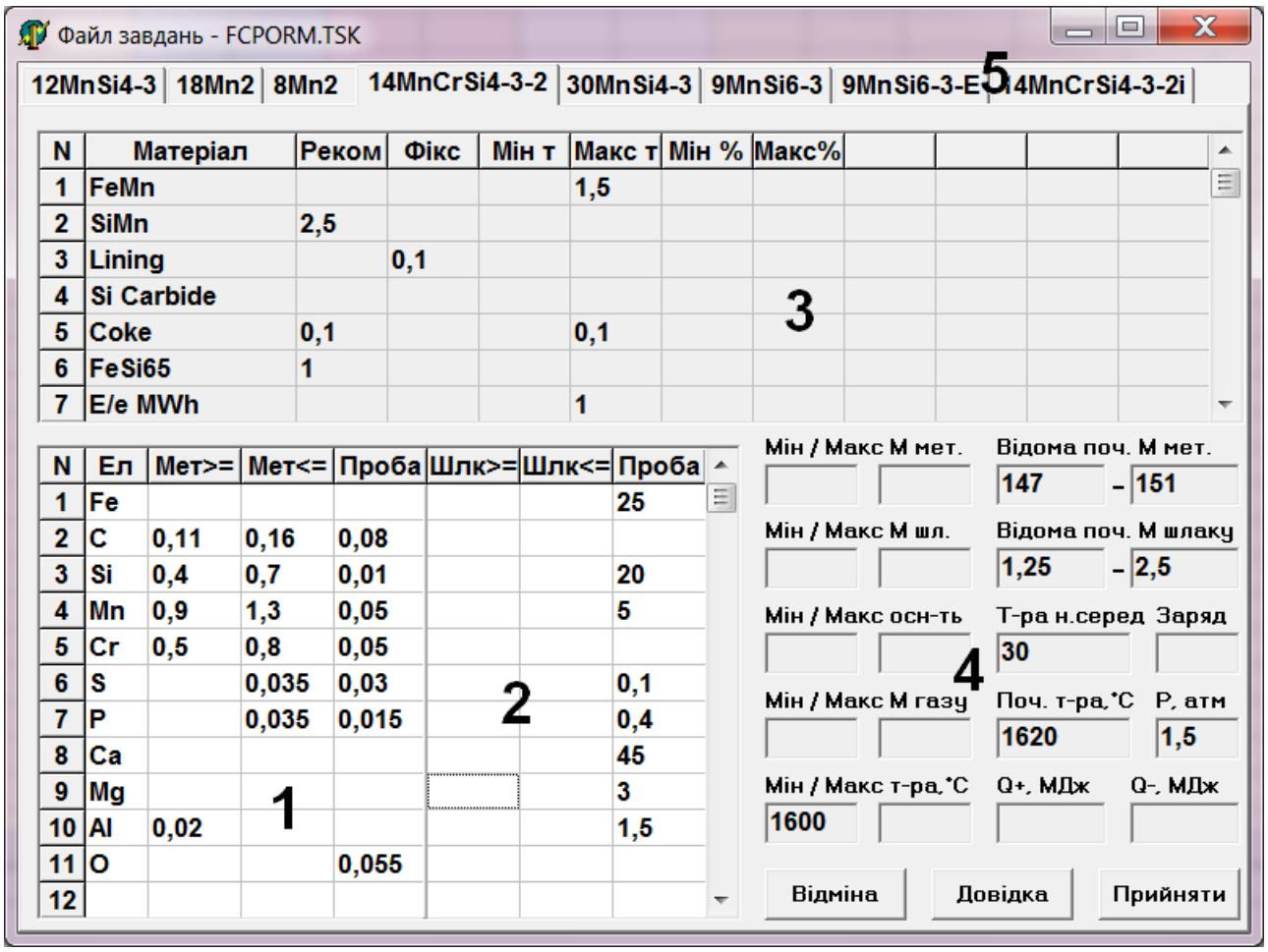


Рисунок 2.3 Форма редактора завдання на плавку

Крім того, по кожному матеріалу можна вказати рекомендовані маси, фіксовані (обов'язкові) маси і поставити верхній і / або нижній межі використання даного матеріалу в тоннах і / або відсотках від загальної маси всіх матеріалів.

Редактор завдань допускає введення до 100 різних завдань на плавку, які можуть бути збережені в файлі. У межах форми редактора робота з файлами завдань і окремими завданнями проводиться за допомогою контекстного меню (рис. 2.4). На головній формі (рис. 2.2) швидке перемикання між файлами завдань і окремими завданнями проводиться за допомогою двох випадаючих списків у верхній частині форми.

Для моделювання плавки металу в дуговій електропечі (ДСП) розроблена спеціальна форма, на якій в реальному масштабі часу відображаються всі

ключові характеристики даного процесу. Типовий вид форми наведено на рис. 2.5.

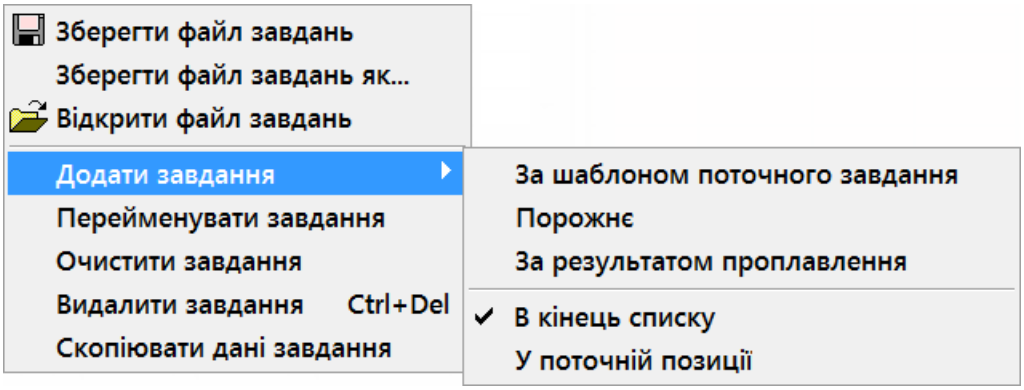


Рисунок 2.4 - Контекстне меню редактора завдання на плавку



Рисунок 2.5 - Форма моделювання плавки в дуговій електропечі

При моделюванні електроплавки використовуються додаткові файли протоколів віддачі матеріалів і енергоносіїв в піч, а також теплових втрат.

Моделювання процесів в ДСП на основі розроблених алгоритмів прямої і зворотної задачі з урахуванням тепла хімічних реакцій і ентальпійного теплового балансу дозволяє підняти проектування технологій електросталеплавильного виробництва на якісно новий рівень. Ці алгоритми по суті є інтелектуальним ядром верхнього рівня систем управління технологічними процесами ДСП.

У таблиці 2.1 наведено типовий приклад застосування зворотної задачі для оптимізації легування сталі 12MnSi4-3 при випуску металу в ківш.

Для цієї марки сталі необхідно забезпечити вміст вуглецю 0,09-0,15%, марганцю 0,8-1,2%, кремнію 0,5-0,8%, не більше 0,040% сірки і не більш як 0,035% фосфору.

Варіант легування I, який не є результатом будь-якої оптимізації, має максимальну сумарну вартість матеріалів 8809 грн. У цьому варіанті отримуємо надмірний вміст марганцю в сталі, тоді як вміст кремнію може вийти за нижню межу.

Одним з трьох способів, доступних користувачеві на головній формі, наприклад, за допомогою функціональної клавіші F10, включимо оптимізацію матеріалів. Час рахунку становить частки секунди. В результаті для отримання сталі заданого складу досить задати в ківш набір матеріалів: 1,952т SiMn, 0,72т FeSi65 і 0,398т карбіду Si загальною вартістю 7111 грн. (Варіант II).

За допомогою контекстного меню таблиці матеріалів (активованого натисканням правої кнопки миші) зі списку доступних матеріалів послідовно прибираємо карбід кремнію, феросиліцій, феромарганець і включаємо оптимізацію. З введенням кожного нового обмеження вартість легування незмінно підвищується (варіанти III-V), залишаючись, однак, мінімальної для даних умов.

Подальша заборона доступних матеріалів призведе до спрацьовування алгоритму пошуку альтернативних рішень з неповною відповідністю заданим обмеженням.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані і результати розрахунків різних варіантів легування стали 12MnSi4-3

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**	**Завдання**	**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**	**Завдання**	**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
Температура, С	1625	≥ 1570	1581-1594	1583-1596	1586-1599	1578-1592	1582-1595

Примітка. За спрощеним варіантом І оптимізація не проводилась.

2.4 Висновки

Програма “Excalibur” є наукомістким продуктом, в якому реалізовані найбільш передові досягнення теорії металургійних процесів останніх трьох десятиліть. Вона дає вичерпну відповідь на будь-яке питання, яке можна поставити при термодинамічному моделюванні системи “метал-шлак-газ” з урахуванням ентальпійного теплового балансу. Програма служить потужним інструментом дослідника і технолога, що дозволяє розробляти нові технології, програвати різні варіанти ведення плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурації і дефосфорації сталі. “Excalibur” може використовуватися також як навчальна програма для студентів металургійних спеціальностей.

РОЗДІЛ 3 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

3.1 Вибір об’єкту дослідження

В дипломній роботі об’єктом дослідження є чотири марки сталі: 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 та 20MnSi5-5.

3.1.1 Сталь 9MnSi6-3 – конструкційна низьколегована для зварних конструкцій

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 9MnSi6-3, згідно ДСТУ 8541:2015 [34], мас. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	As	N	Cu
≤0,12	0,5-0,8	1,3 -1,7	≤0,040	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,08	≤0,008	≤0,30

Застосовується для стійок ферм, верхніх обв'язок вагонів, хребтових балок, двотаврів та інших деталей вагонобудування, деталей екскаваторів, елементів зварних металоконструкцій і інших деталей, що працюють при температурах від - 40 до +450 С.

3.1.2 Сталь 12MnSi4-3 - конструкційна низьколегована для зварних конструкцій

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сталі 12MnSi4-3, згідно ДСТУ 8541:2015 [34], мас. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	As	N	Cu
0,09 - 0,15	0,5 - 0,8	0,9 - 1,2	≤0,040	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,080	≤0,008	≤0,30

Застосовується для виробництва деталей, виготовлених методами витяжки, кування і штампування; зварювального дроту. Сталь 12MnSi4-3 забезпечує клас міцності листового, широкосмугового універсального прокату і гнутих профілів КП 315 при товщині прокату до 10 мм без застосування додаткової зміцнюючої обробки.

3.1.3 Сталь 14MnCrSi4-3-2 - конструкційна низьколегована для зварних конструкцій

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сталі 14MnCrSi4-3-2, згідно ДСТУ 8541:2015 [34], мас. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	As	Cu
0,11 - 0,16	0,4 -0,7	0,9 -1,3	≤0,040	≤0,035	0,50 - 0,80	≤0,30	≤0,080	≤0,30

Застосовується для електрозварних труб магістральних газопроводів високого тиску; зварних конструкцій, листових, клапанних конструктивних деталей.

3.1.4 Сталь арматурна 20MnSi5-5

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сталі 20MnSi5-5, згідно ДСТУ ГОСТ 10884 – 94 [35], мас. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,17-0,22	1,00-1,50	1,00-1,50	≤0,040	≤0,040	≤0,30	≤0,30	≤0,30

Застосовується для виготовлення валів гідротурбін, циліндрів гідропресів, термічно або термомеханічно зміцненого прокату періодичного профілю для армування залізобетонних конструкцій.

3.2 Методика проведення обчислювального експерименту з використанням програми “Excalibur”

З метою формування масиву даних для подальшого їх використання при аналізі впливу різних теплоенергетичних параметрів плавки формувалися паспорти розкислення-легування. Для кожної марки сталі, кожної температури і тиску паспорти розкислення-легування містять наступну 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 9MnSi6-3

Таблиця 3.5 – Основні показники

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	**Тиск**	Ат			1,5
2	**Температура навк. Середи**	С			
3	**Температура початкова**	С			1620
4	**Температура задана**	С	1610		
5	**Температура кінцева**	С	1610	1617,1	1614
6	**Маса металу початкова**	Т	147	151	149
7	**Маса металу задана**	Т			
8	**Маса металу кінцева**	Т	150,8	155	153
9	**Маса шлаку початкова**	Т	1,25	2,5	1,875
10	**Маса шлаку задана**	Т			
11	**Маса шлаку кінцева**	Т	3,167	4,248	3,708
12	**Основність шлаку задана**	Т			
13	**Основність шлаку кінцева**	Т	2,84	3,53	3,19
14	**Маса газу задана**	Т			
15	**Маса газу кінцева**	Т			0
16	**Об’єм газу кінцевий**	м3			0
17	**Маса матеріалів факт.**	Т			6,119
18	**Вартість матеріалів факт.**	у.є.			21054,72

Таблиця 3.6 – Метал-шлак-газ

Метал										

№	Ел-ти	Почат., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	**Fe**					97,9	98	97,9	147625	151910	149767
2	**C**	0,05		0,12		0,11	0,12	0,115	170,9	181	176
3	**Si**		0,5	0,8	0,65	0,5	0,557	0,529	775	840,7	807,8
4	**Mn**	0,12	1,3	1,7	1,5	1,3	1,37	1,33	2015,1	2064,1	2039,6
5	**Al**					0,0078	0,0088	0,0083	12,1	13,3	12,7
6	**S**	0,03		0,03		0,0284	0,03	0,0292	42,8	46,5	44,7
7	**P**	0,015		0,035		0,0286	0,0289	0,0288	43,2	44,8	44
8	**Mg**					0,0001	0,0001	0,0001	0,165	0,198	0,182
9	**Cr**					0	0	0	0	0	0
10	**O**					0,0075	0,0097	0,0086	11,4	15	13,2
11	**Ca**					0	0	0	0,0003	0,0003	0,0003
Шлак											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**FeO**	25				0,658	0,815	0,736	20,8	34,6	27,7
2	**C**					0	0	0	0	0	0
3	**SiO2**	20				9,81	11,4	10,6	310,6	484,9	397,8
4	**MnO**	5				2,12	2,82	2,47	67,2	119,6	93,4
5	**Al2O3**	1,5				0,661	0,755	0,708	20,9	32,1	26,5
6	**S**	0,3				0,197	0,224	0,211	7,09	8,38	7,74
7	**P2O5**	0,2				0,0014	0,0023	0,0019	0,0448	0,0996	0,0722
8	**MgO**	3				2,4	2,51	2,46	79,4	102,1	90,8
9	**Cr2O3**					0	0	0	0	0	0
10	**O**								1078,7	1481,7	1280,2
11	**CaO**	45				46,7	50	48,3	1581,8	1984,4	1783,1
Газ											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Мін**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Мін**	**Макс**	**Макс**	**Сред.**
1	**Fe**					0,0241	0,0242	0,0242	0	0	0
2	**C**					42,5	42,5	42,5	0	0	0
3	**Si**					0	0	0	0	0	0
4	**Mn**					0,235	0,258	0,246	0	0	0
5	**Al**					0	0	0	0	0	0

6	**S**					0	0	0	0	0	0
7	**P**					0,0001	0,0001	0,0001	0	0	0
8	**Mg**					0,107	0,144	0,125	0	0	0
9	**Cr**					0	0	0	0	0	0
10	**O**					57,1	57,2	57,1	0	0	0
11	**Ca**					0,0011	0,0014	0,0013	0	0	0

Таблиця 3.7 – Матеріали

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	**FeMn**	1,341	1,341	0,5					
2	**SiMn**	1,697	1,697	3,5					
3	**FeSi65**	1,144	1,144	0,5					
4	**ФХ100Б**				0				
5	**ФХ800Б**				0				
6	**ФСХ33**				0				
7	**АВ-87**			0,1			0,5		
8	**Коксик**				0				
9	**Карбід Si**								
10	**Футерівка**	0,1	0,1		0,1				
11	**Вапно**	1,837	1,837	0,2			2		
12	**Е/е МВтг**	1,342	1,342	0,3			2		

3.2.2 Паспорт розкислення-легування сталі 12MnSi4-3

Таблиця 3.8 – Основні показники

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	**Тиск**	ат			1
2	**Температура навк. середи**	C			
3	**Температура початкова**	C			1621
4	**Температура задана**	C	1610		
5	**Температура кінцева**	C	1610	1617,7	1614
6	**Маса металу початкова**	т	147	151	149
7	**Маса металу задана**	т			
8	**Маса металу кінцева**	т	150	154,2	152
9	**Маса шлаку початкова**	т	1,25	2,5	1,875
10	**Маса шлаку задана**	т			
11	**Маса шлаку кінцева**	т	1,239	2,314	1,777
12	**Основність шлаку задана**	т			
13	**Основність шлаку кінцева**	т	1,21	1,35	1,28
14	**Маса газу задана**	т			
15	**Маса газу кінцева**	т	0,001269	0,003365	0,002317

16	**Об'єм газу кінцевий**	м3	0,008093	0,02155	0,014822
17	**Маса матеріалів факт.**	т			3,237
18	**Вартість матеріалів факт.**	у.є.			13890,13

Таблиця 3.9 – Метал-шлак-газ

Метал											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**Fe**					98,4	98,5	98,4	147540	151846	149693
2	**C**	0,06	0,09	0,15	0,12	0,137	0,15	0,144	211,8	225,1	218,4
3	**Si**		0,5	0,8	0,65	0,5	0,566	0,533	771,1	849,7	810,4
4	**Mn**	0,05	0,8	1,2	1	0,8	0,855	0,827	1233,4	1282,3	1257,8
5	**Al**					0,0034	0,004	0,0037	5,11	6,12	5,61
6	**S**	0,035		0,04		0,034	0,0343	0,0342	51,4	52,5	52
7	**P**	0,015		0,035		0,0239	0,025	0,0245	35,9	38,6	37,2
8	**Mg**					0,0001	0,0001	0,0001	0,0842	0,0884	0,0863
9	**Cr**					0	0	0	0	0	0
10	**O**					0,0145	0,0153	0,0149	21,7	23,7	22,7
11	**Ca**					0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001
Шлак											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**FeO**	25				0,896	1,01	0,954	11,1	23,4	17,3
2	**C**					0	0	0	0	0	0
3	**SiO2**	20				18,3	19,5	18,9	241,1	423,9	332,5
4	**MnO**	5				3,94	4,26	4,1	52,8	91,1	72
5	**Al2O3**	1,5				0,624	0,72	0,672	7,73	16,6	12,2
6	**S**	0,1				0,16	0,169	0,165	2,09	3,71	2,9
7	**P2O5**	0,4				0,0036	0,0045	0,004	0,0445	0,104	0,074
8	**MgO**	3				2,21	2,31	2,26	28,6	51,2	39,9
9	**Cr2O3**					0	0	0	0	0	0
10	**O**								482,9	888,8	685,9
11	**CaO**	45				33,3	35,2	34,3	412,9	815,1	614
Газ											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**Fe**					0,0189	0,021	0,0199	0	0	0

2	**C**					42,6	42,6	42,6	0,0005	0,0014	0,001
3	**Si**					0	0	0	0	0	0
4	**Mn**					0,125	0,125	0,125	0	0	0
5	**Al**					0	0	0	0	0	0
6	**S**					0	0	0	0	0	0
7	**P**					0,0001	0,0001	0,0001	0	0	0
8	**Mg**					0,0457	0,0477	0,0467	0	0	0
9	**Cr**					0	0	0	0	0	0
10	**O**					57,2	57,2	57,2	0,0007	0,0019	0,0013
11	**Ca**					0,0003	0,0004	0,0003	0	0	0

Таблиця 3.10 – Матеріали

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	**FeMn**	1,644	1,644	1,7					
2	**SiMn**								
3	**FeSi65**	1,385	1,385	1,5					
4	**ФХ100Б**				0				
5	**ФХ800Б**				0				
6	**ФСХ33**				0				
7	**АВ-87**			0,05					
8	**Коксик**								
9	**Карбід Si**	0,108	0,108	0,1					
10	**Футерівка**	0,1	0,1		0,1				
11	**Вапно**								
12	**Е/е МВтг**	0,255	0,255	0,25					

3.2.3 Паспорт розкислення-легування сталі 14MnCrSi4-3-2

Таблиця 3.11 – Основні показники

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	**Тиск**	ат			1
2	**Температура навк. середи**	С			
3	**Температура початкова**	С			1620
4	**Температура задана**	С	1610		
5	**Температура кінцева**	С	1610	1618,9	1614
6	**Маса металу початкова**	т	147	151	149
7	**Маса металу задана**	т			
8	**Маса металу кінцева**	т	150,9	155	153
9	**Маса шлаку початкова**	т	1,25	2,5	1,875
10	**Маса шлаку задана**	т			
11	**Маса шлаку кінцева**	т	1,22	2,302	1,76

12	**Основність шлаку задана**	т			
13	**Основність шлаку кінцева**	т	1,3	1,42	1,36
14	**Маса газу задана**	т			
15	**Маса газу кінцева**	т	0,001351	0,003469	0,00241
16	**Об'єм газу кінцевий**	м3	0,009672	0,02333	0,016501
17	**Маса матеріалів факт.**	т			4,13
18	**Вартість матеріалів факт.**	у.є.			18342,02

Таблиця 3.12 – Метал-шлак-газ

Метал											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**Fe**					97,7	98	97,9	147442	151891	149667
2	**C**	0,08	0,11	0,16	0,135	0,145	0,16	0,153	225,5	241,4	233,4
3	**Si**	0,01	0,4	0,7	0,55	0,4	0,493	0,447	619,9	744,3	682,1
4	**Mn**	0,05	0,9	1,3	1,1	0,9	0,966	0,933	1395,2	1456,9	1426,1
5	**Al**					0,0036	0,0047	0,0042	5,63	7,11	6,37
6	**S**	0,03		0,04		0,0294	0,0296	0,0295	44,6	45,5	45,1
7	**P**	0,015		0,035		0,0247	0,0254	0,0251	37,3	39,5	38,4
8	**Mg**					0,0001	0,0001	0,0001	0,0839	0,0853	0,0846
9	**Cr**	0,05	0,5	0,8	0,65	0,5	0,571	0,535	775,1	861,1	818,1
10	**O**					0,0154	0,0172	0,0163	23,3	26,6	25
11	**Ca**					0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001
Шлак											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**FeO**	25				0,963	1,16	1,06	11,7	26,8	19,3
2	**C**					0	0	0	0	0	0
3	**SiO2**	20				17,5	18,4	18	224,6	403,6	314,1
4	**MnO**	5				4,82	4,85	4,83	59,2	110,9	85
5	**Al2O3**	1,5				0,744	0,9	0,822	11	17,1	14,1
6	**S**	0,1				0,125	0,139	0,132	1,69	2,87	2,28
7	**P2O5**	0,4				0,004	0,0057	0,0049	0,0487	0,131	0,0901
8	**MgO**	3				2,22	2,34	2,28	28,6	51,2	39,9
9	**Cr2O3**					0,0265	0,0307	0,0286	0,324	0,707	0,515
10	**O**								469,5	873,7	671,6
11	**CaO**	45				33,9	35,4	34,6	412,9	815,1	614
Газ											

№	Ел-ти	Почат., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	**Fe**					0,0183	0,02	0,0192	0	0	0
2	**C**					42,6	42,6	42,6	0,0006	0,0015	0,001
3	**Si**					0	0	0	0	0	0
4	**Mn**					0,134	0,138	0,136	0	0	0
5	**Al**					0	0	0	0	0	0
6	**S**					0	0	0	0	0	0
7	**P**					0,0001	0,0001	0,0001	0	0	0
8	**Mg**					0,0423	0,0447	0,0435	0	0	0
9	**Cr**					0,0003	0,0003	0,0003	0	0	0
10	**O**					57,2	57,2	57,2	0,0008	0,002	0,0014
11	**Ca**					0,0003	0,0003	0,0003	0	0	0

Таблиця 3.13 – Матеріали

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	**FeMn**	1,5	1,5				1,5		
2	**SiMn**	0,529	0,529	2,5					
3	**FeSi65**	0,123	0,123	1					
4	**ФХ100Б**			1,5					
5	**ФХ800Б**								
6	**ФСХ33**	1,843	1,843						
7	**АВ-87**				0		0,15		
8	**Коксик**			0,1			0,1		
9	**Карбід Si**	0,035	0,035						
10	**Футерівка**	0,1	0,1		0,1				
11	**Вапно**				0				
12	**Е/е МВтг**	0,876	0,876				1		

3.2.4 Паспорт розкислення-легування сталі 20MnSi5-5

Таблиця 3.14 – Основні показники

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	**Тиск**	ат			1
2	**Температура навк. середи**	С			
3	**Температура початкова**	С			1625
4	**Температура задана**	С	1610	1615	1612,5
5	**Температура кінцева**	С	1610	1611,9	1611
6	**Маса металу початкова**	т	147	151	149
7	**Маса металу задана**	т			
8	**Маса металу кінцева**	т	149,7	153,8	151,8
9	**Маса шлаку початкова**	т	1,25	2,5	1,875

10	**Маса шлаку задана**	т			
11	**Маса шлаку кінцева**	т	0,9906	2,011	1,5008
12	**Основність шлаку задана**	т			
13	**Основність шлаку кінцева**	т	2,47	2,7	2,59
14	**Маса газу задана**	т			
15	**Маса газу кінцева**	т	216,7	287,5	252,1
16	**Об'єм газу кінцевий**	м3	1855	2461	2158
17	**Маса матеріалів факт.**	т			2,828
18	**Вартість матеріалів факт.**	у.є.			10715,92

Таблиця 3.15 – Метал-шлак-газ

Метал											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**Fe**					98,2	98,3	98,3	147000	151246	149123
2	**C**	0,1	0,17	0,22	0,20	0,285	0,327	0,306	438,5	489,2	463,9
3	**Si**		1,0	1,5	1,25	1,0	1,022	1,011	769	825,1	797,1
4	**Mn**	0,05	1,0	1,5	1,25	1,0	1,047	1,023	1230,6	1252,6	1241,6
5	**Al**					0,0052	0,0059	0,0056	7,79	9,12	8,45
6	**S**	0,038		0,04		0,0361	0,0366	0,0364	54,8	55,6	55,2
7	**P**	0,015		0,04		0,0228	0,024	0,0234	34,1	36,8	35,5
8	**Mg**					0,0001	0,0002	0,0001	0,199	0,24	0,22
9	**Cr**					0	0	0	0	0	0
10	**O**					0,0099	0,0109	0,0104	14,8	16,7	15,7
11	**Ca**					0	0	0	0,0002	0,0002	0,0002
Шлак											
№	**Ел-ти**	**Почат., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**FeO**	20				0,671	0,767	0,719	6,65	15,4	11
2	**C**					0	0	0	0	0	0
3	**SiO2**	20				12,1	12,8	12,5	119,9	257,7	188,8
4	**MnO**	5				1,71	1,95	1,83	16,9	39,2	28,1
5	**Al2O3**	1,5				0,5	0,669	0,584	4,95	13,5	9,2
6	**S**	0,1				0,235	0,271	0,253	2,68	4,73	3,7
7	**P2O5**	0,4				0,0016	0,0022	0,0019	0,0154	0,0434	0,0294
8	**MgO**	4				3,25	3,57	3,41	35,4	65,3	50,4
9	**Cr2O3**					0	0	0	0	0	0
10	**O**								350,9	719,9	535,4
11	**CaO**	50				44,5	45,7	45,1	453,2	895,7	674,4

Газ											
№	**Ел-ти**	**Початк., %**	**Заданий, %**			**Кінцевий, %**			**Кінцевий, кг**		
			Мін	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**	**Мін**	**Макс**	**Сер.**
1	**Fe**					0,0163	0,0167	0,0165	0,0353	0,0481	0,0417
2	**C**					42,7	42,7	42,7	92,5	122,7	107,6
3	**Si**					0	0	0	0	0	0
4	**Mn**					0,102	0,104	0,103	0,226	0,292	0,259
5	**Al**					0	0	0	0	0	0
6	**S**					0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001
7	**P**					0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001
8	**Mg**					0,0926	0,115	0,104	0,249	0,266	0,257
9	**Cr**					0	0	0	0	0	0
10	**O**					57,1	57,1	57,1	123,7	164,3	144
11	**Ca**					0,0006	0,0007	0,0007	0,0015	0,0018	0,0016

Таблиця 3.16 – Матеріали

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	**FeMn**	1,311	1,311	1,5					
2	**SiMn**								
3	**FeSi65**	1,652	1,652	1,5					
4	**ФХ100Б**								
5	**ФХ800Б**								
6	**ФСХ33**								
7	**АВ-87**			0,1					
8	**Коксик**			0,2					
9	**Карбід Si**	0,143	0,143						
10	**Футерівка**	0,1	0,1		0,1				
11	**Вапно**				0				
12	**Е/е МВтг**	0,373	0,373	1			2		

3.3 Одержані результати

3.3.1 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феромарганцю

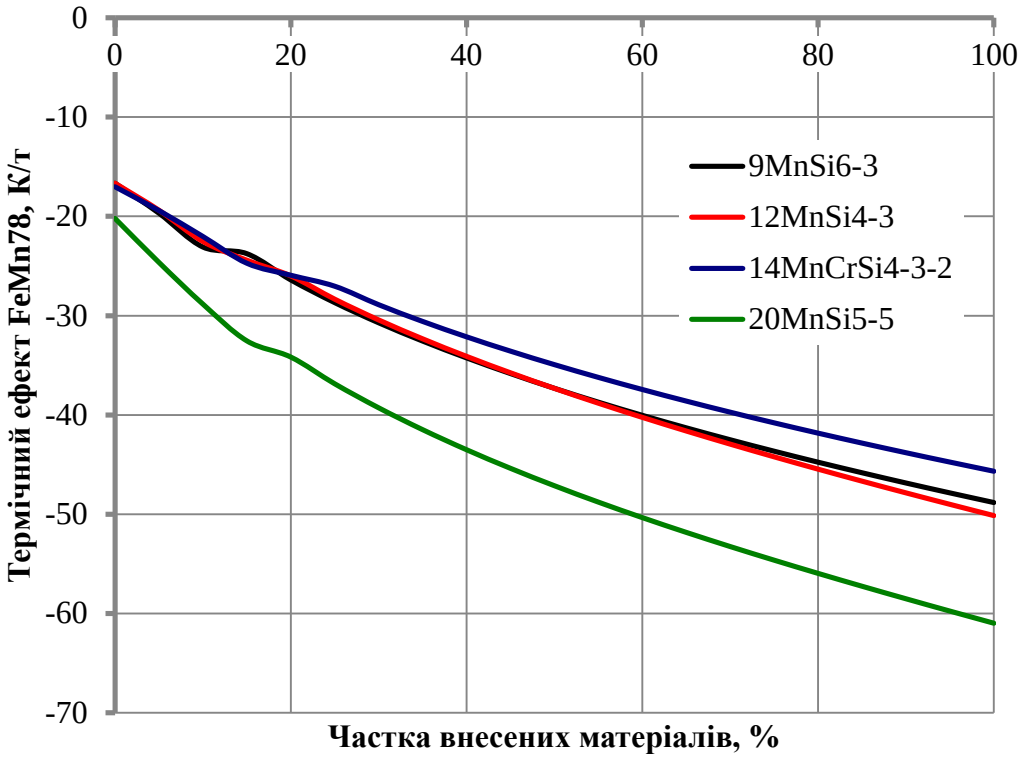


Рисунок 3.1 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект феромарганцю ФМн78

Дослідження термічного ефекту феромарганцю показало зниження величини ΔТ при збільшенні долі внесених феросплавів для сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, для сталі 20MnSi5-5 спостерігається спочатку зниження, а потім деяке підвищення. Найбільш помітний ефект зниження ΔТ виявився для сталі 9MnSi6-3, далі в порядку відносного зростання йдуть сталі 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2. Найбільше схильна зниженню термічного ефекту сталь 9MnSi6-3, яка має найбільше окислення в порівнянні з перерахованими сталями (рисунок 3.2). У випадку зі сталями 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 зниження термічного ефекту пояснюється зменшенням вмісту кисню в

металі і одночасним зменшенням вмісту FeO у шлаці, що приводить до зниження екзотермічного ефекту при використанні феромарганцю.

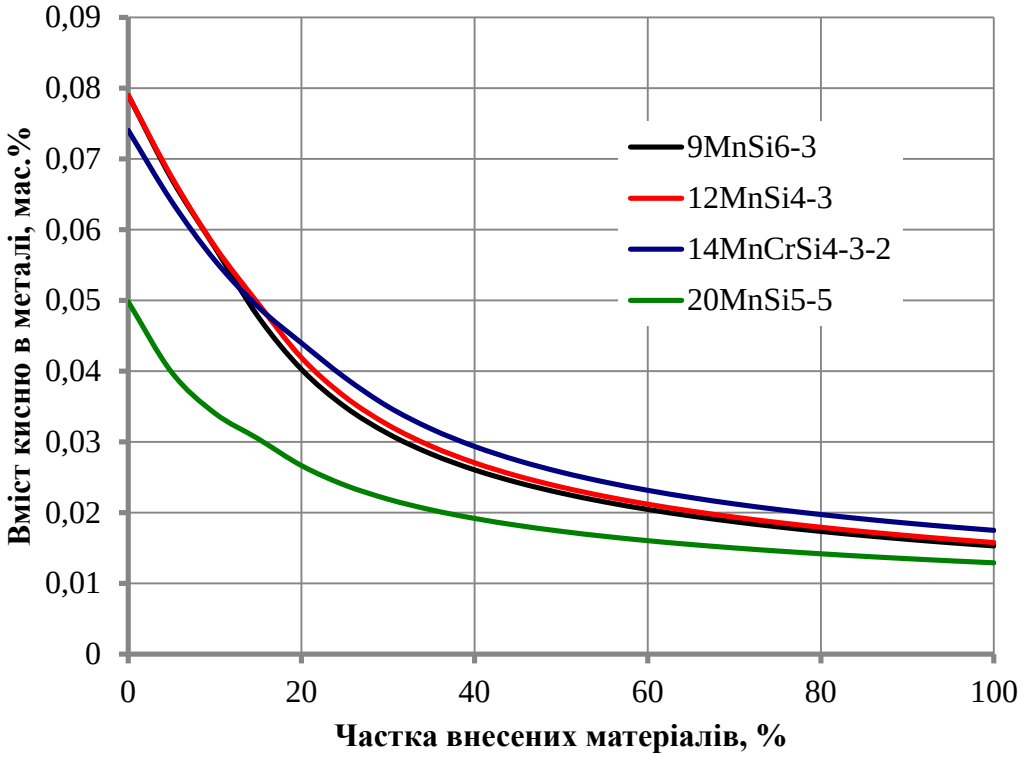


Рисунок 3.2 – Вплив частки внесених феросплавів на вміст кисню

За рисунком 3.2 спостерігається, що найменше розкислення має сталь 20MnSi5-5, тому термічний ефект цієї сталі зменшується повільніше, ніж у інших сталей.

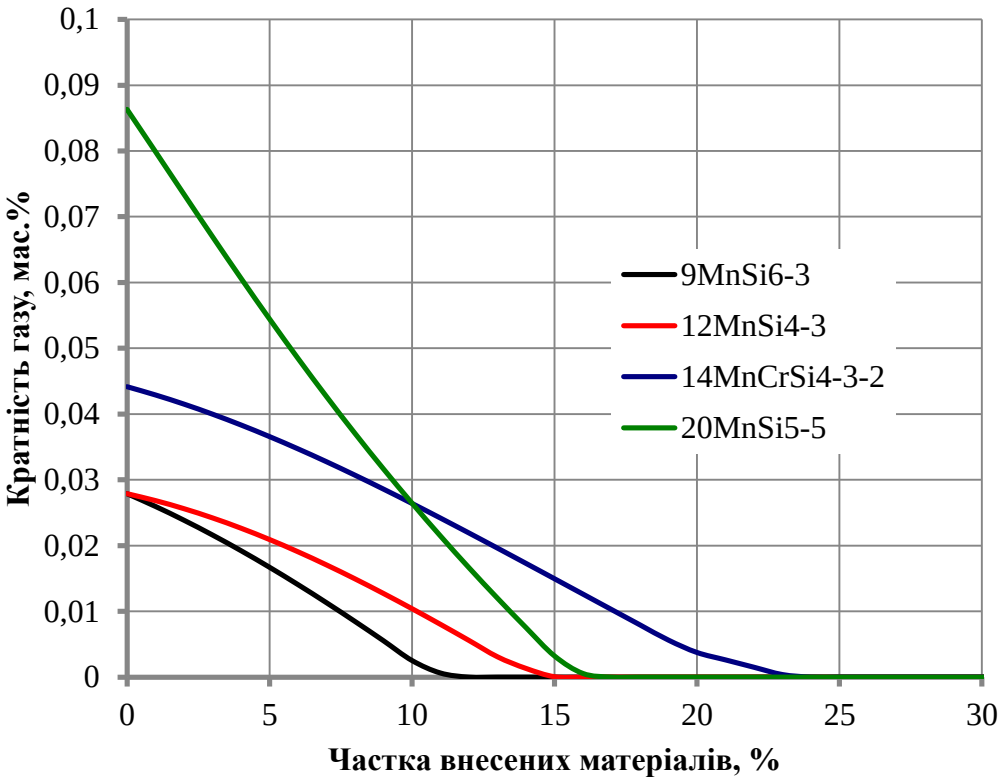


Рисунок 3.3 – Вплив частки внесених феросплавів на кратність газу

З рисунку 3.3 видно, що сталь 20MnSi5-5 має найвищу кратність газу при відносно малих частках внесених матеріалів. При внесенні від 10 до 25% матеріалів газова фаза припиняє виділення. Це впливає на термічний ефект матеріалів.

3.3.2 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікомарганцю

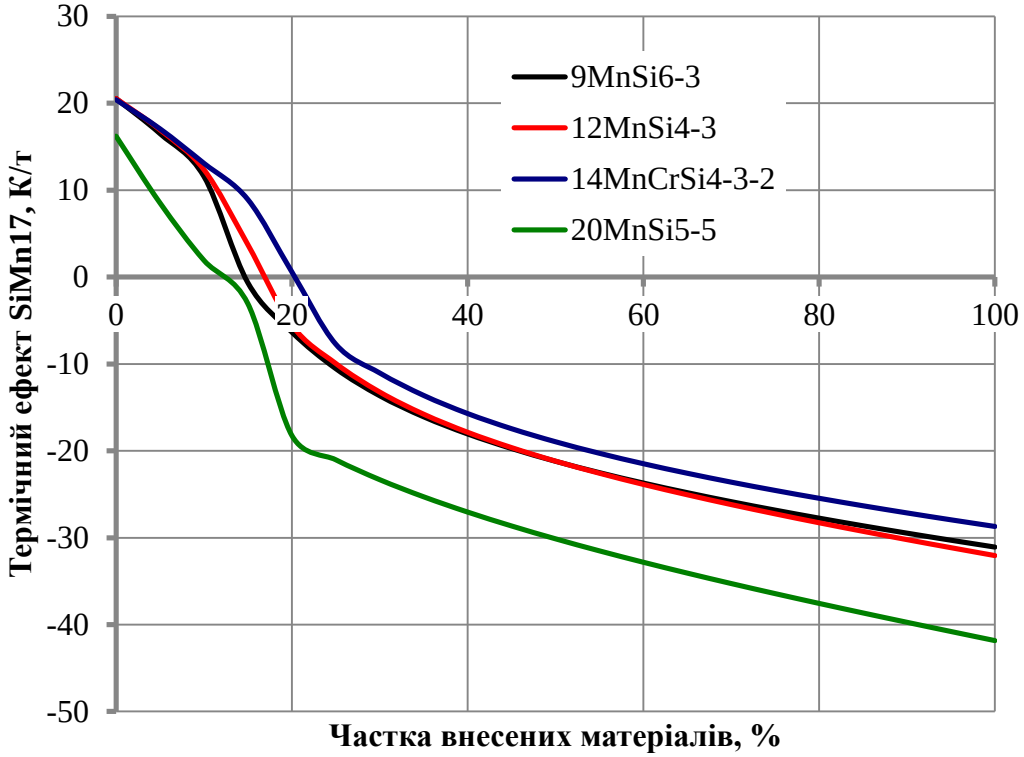


Рисунок 3.4 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікомарганцю МнС17

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект силікомарганцю показує поступове зниження цього показнику при збільшенні частки внесених феросплавів для всіх сталей.

Це обумовлено тим, що в міру внесення феросплавів вміст кисню в металах поступово знижується (рисунок 3.2). Таким чином, знижується кількість кремнію в складі цього феросплаву, який міг би взаємодіяти з киснем з екзотермічним ефектом.

3.3.3 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросиліцію

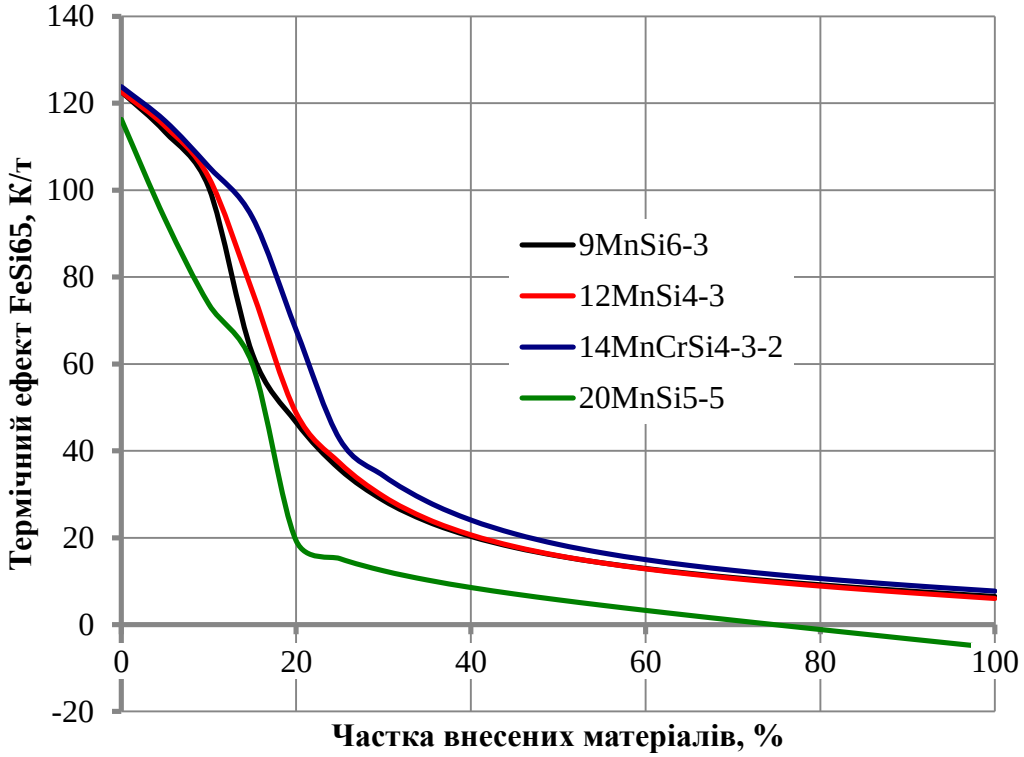


Рисунок 3.5 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект феросиліцію ФС65

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросиліцію показує зниження цього показнику при збільшенні частки внесених феросплавів.

Це обумовлено тим, що в міру внесення феросплавів вміст кисню в металі знижується, таким чином знижується відносна кількість кремнію в складі цих феросплавів, який міг би взаємодіяти з киснем з екзотермічним ефектом. При цьому рівень термічного ефекту феросиліцію в точці нульової кількості у всіх сталях залежить від вмісту кремнію і відрізняється незначно.

3.3.4 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ100Б

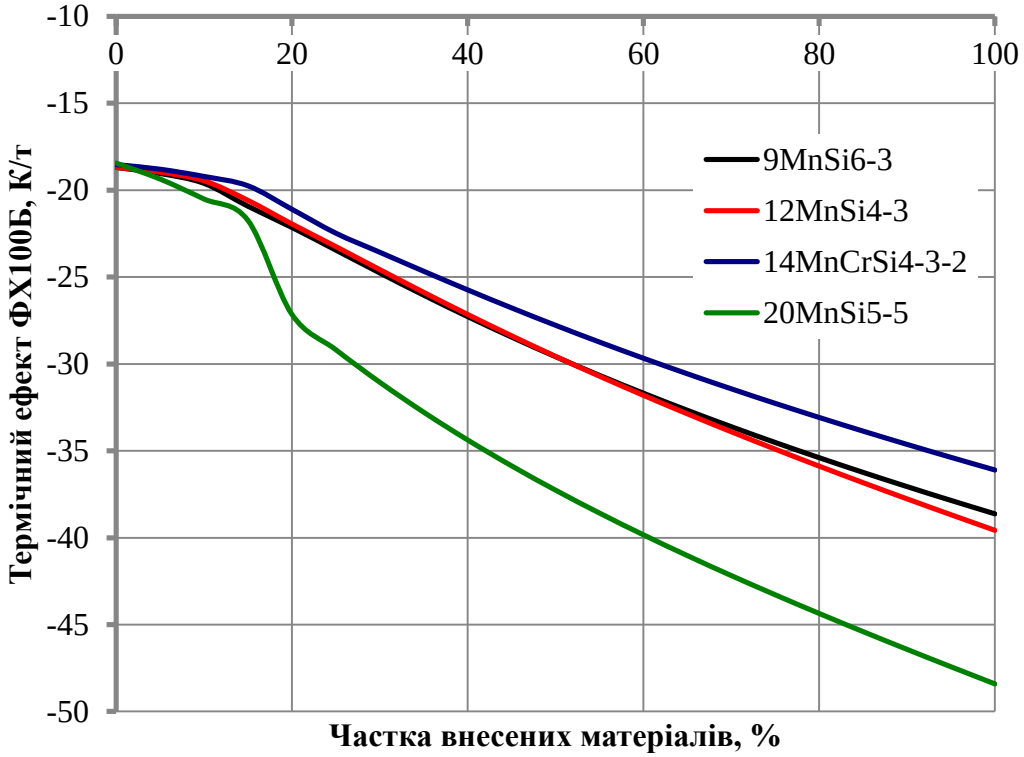


Рисунок 3.6 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ100Б

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ100Б показує зниження величини ΔТ при збільшенні долі внесених феросплавів для сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 20MnSi5-5.

3.3.5 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ферохрому ФХ800Б

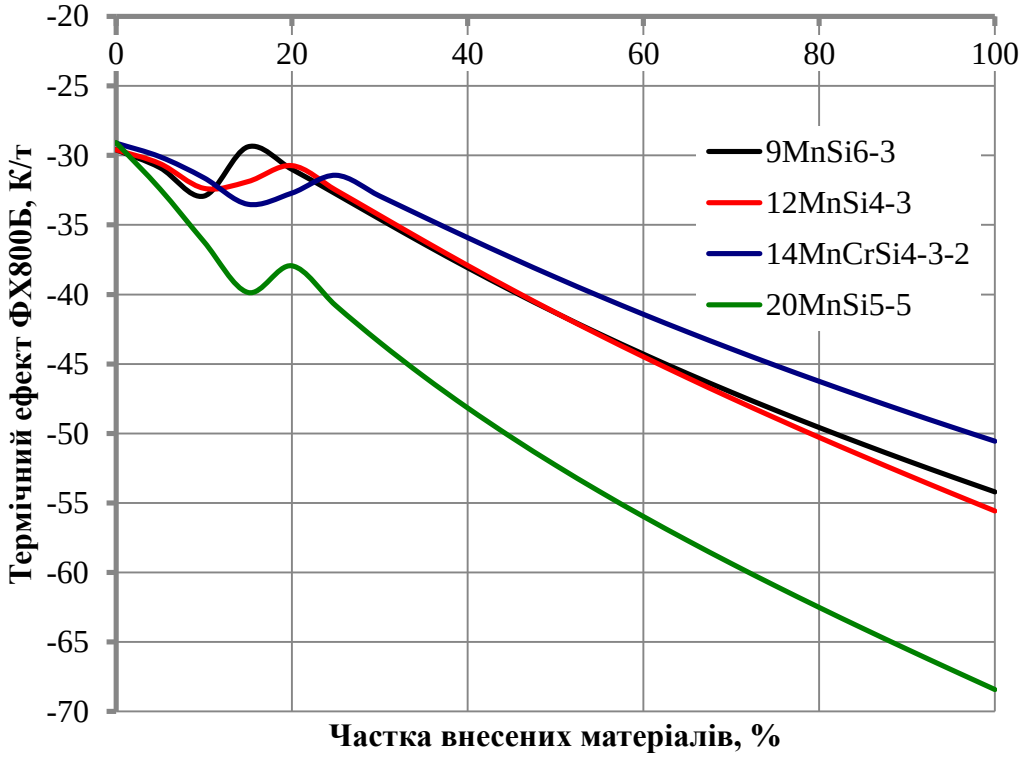


Рисунок 3.7 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ800Б

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект ФХ800Б показує зниження величини ΔТ при збільшенні долі внесених феросплавів для сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2. Для сталі 20MnSi5-5 спостерігається коливання термічного ефекту, це пов'язано з виділенням газової фази при внесенні феросплавів.

Різниця термічних ефектів ФХ100Б і ФХ800Б полягає в різниці складів цих матеріалів.

3.3.6 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікохрому ФСХ33

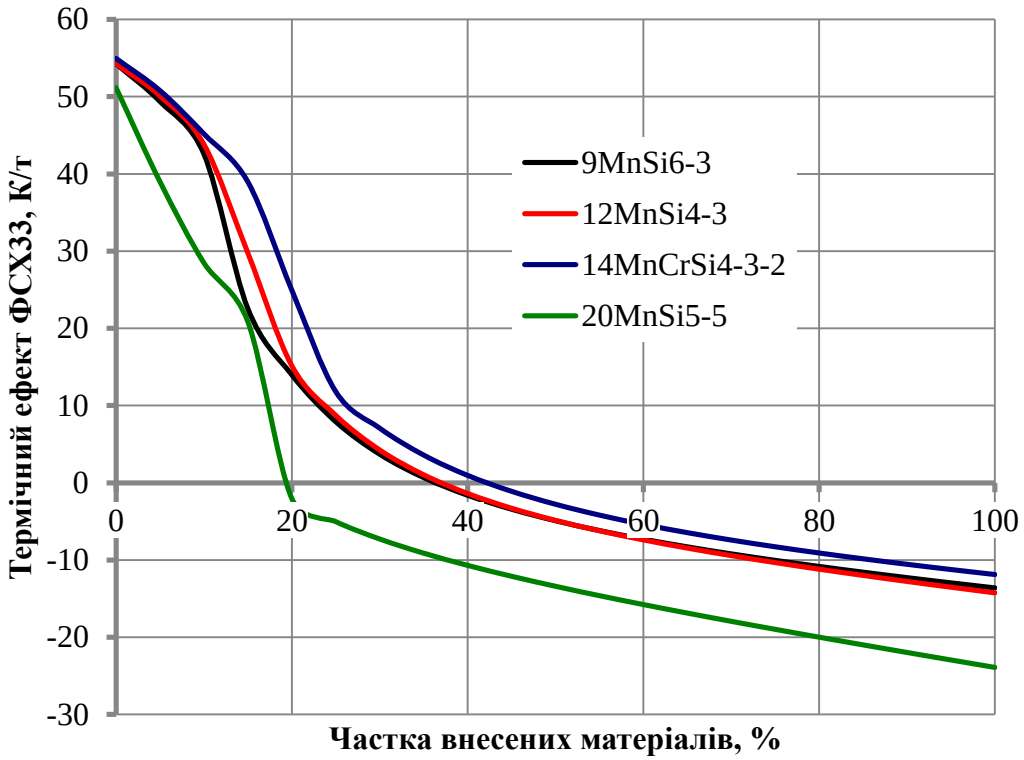


Рисунок 3.8 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект ФСХ33

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект феросилікохрому показує поступове зниження цього показнику при збільшенні частки внесених феросплавів для всіх сталей.

Це обумовлено тим, що в міру внесення феросплавів вміст кисню в металах поступово знижується (рисунок 3.2). Таким чином, знижується кількість кремнію в складі цього феросплаву, який міг би взаємодіяти з киснем з екзотермічним ефектом.

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

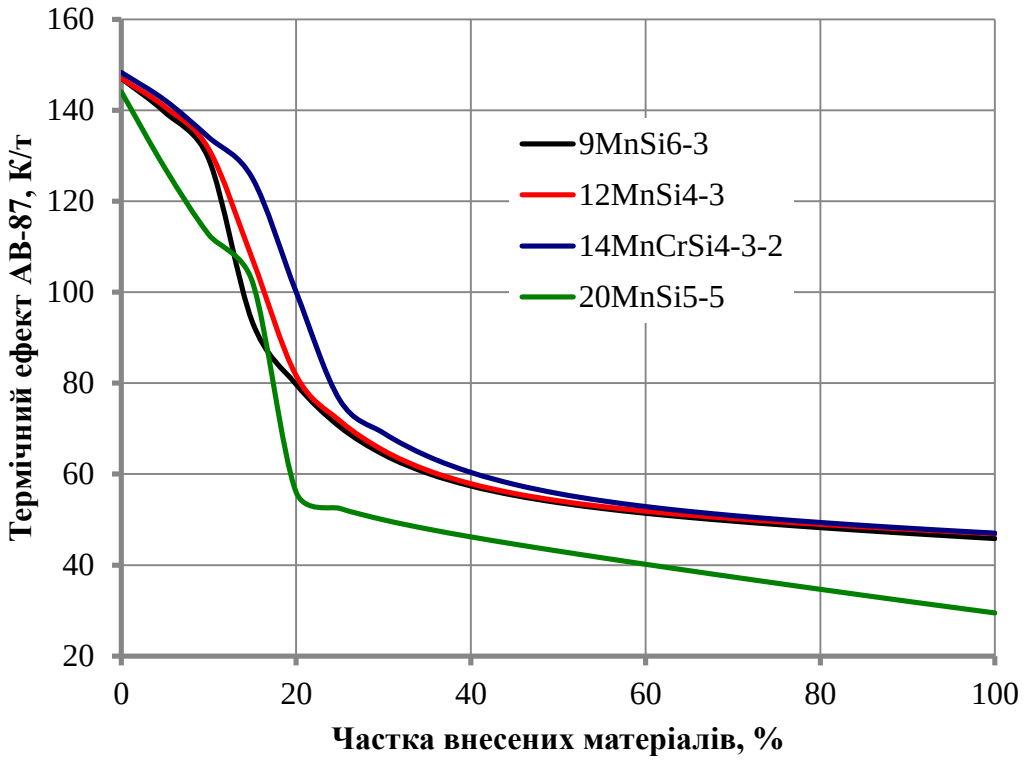


Рисунок 3.9 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект АВ-87

При дослідженні впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект алюмінію вторинного термічний ефект закономірно знижується для усіх сталей. Різке зниження термічного ефекту (від 20 до 40 відсотків) для сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 пояснюється припиненням виділення газової фази. При цьому термічний ефект алюмінію вторинного завжди має знак плюс, це пов’язано з тим, що високий вміст алюмінію дає позитивний термічний ефект.

3.3.8 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект коксику

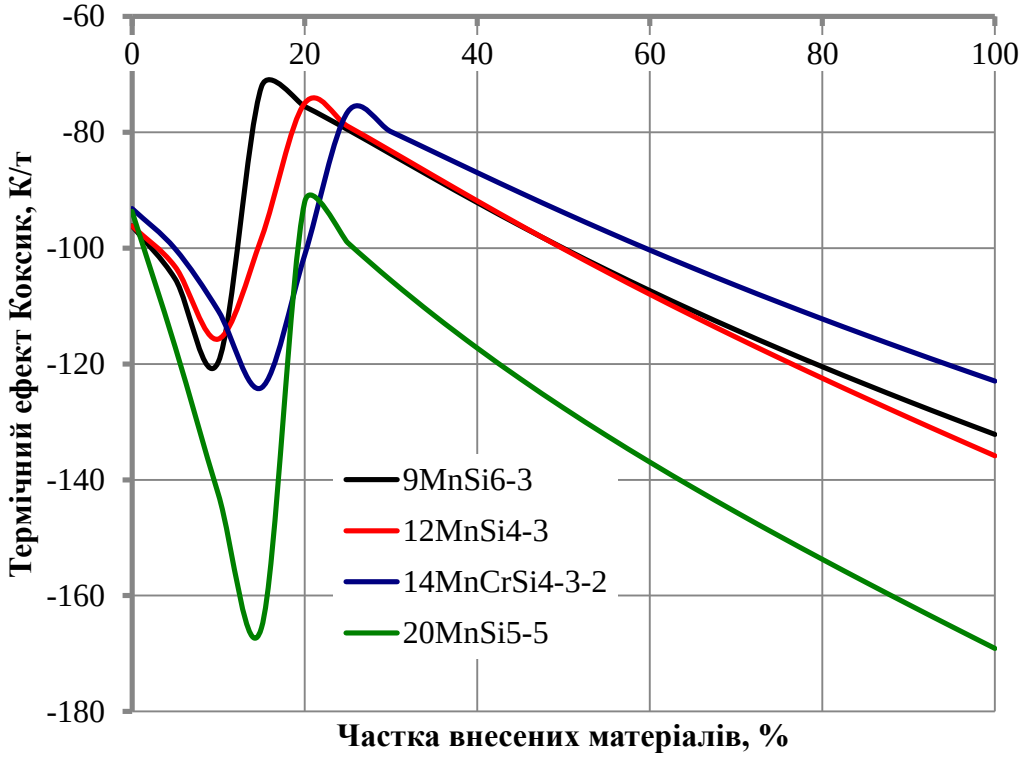


Рисунок 3.10 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект коксику

При збільшенні частки внесених феросплавів спостерігається інтенсивне окислення вуглецю, що міститься в металі та розкислювачах з утворенням значної кількості газової фази, яка складається в основному з CO. Це супроводжується ендотермічним ефектом. Крім того, у коксика завжди негативний термічний ефект, тому що з його додаванням збільшується утворення газової фази, а це звичайно має негативний тепловий ефект. Значне підвищення термічного ефекту сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3 та 14MnCrSi4-3-2 пов'язано з припиненням виділення газової фази для цих сталей. Спочатку припиняє виділятися газова фаза при плавці сталі 9MnSi6-3, потім при плавці сталі марки 12MnSi4-3, потім - 14MnCrSi4-3-2, підвищення термічного ефекту співпадає з цією послідовністю. Для сталі 20MnSi5-5 характерно деяке збільшення термічного ефекту при частці внесених феросплавів 60-80%, це пов'язано з припиненням розкислення сталі (рисунок 3.2).

3.3.9 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект карбіду кремнію

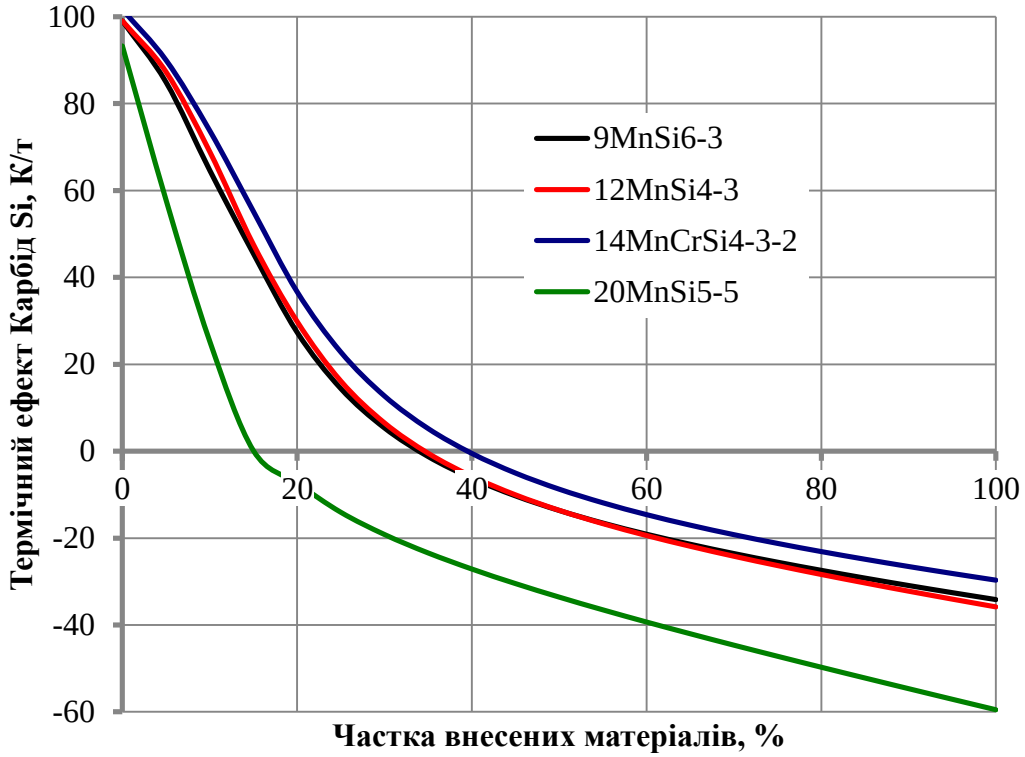


Рисунок 3.11 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект карбіду кремнію

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект карбіду кремнію показує поступове зниження цього показнику при збільшенні частки внесених феросплавів.

Це обумовлено тим, що в міру внесення феросплавів вміст кисню в металі поступово знижується. Таким чином, знижується кількість кремнію в складі цих феросплавів, який міг би взаємодіяти з киснем з екзотермічним ефектом. При цьому загальний початковий рівень термічного ефекту карбіду кремнію значно більше ΔТ феросилікохрому за рахунок більш високого вмісту кремнію. Також перехід вуглецю із твердої фази в металевий розчин дає негативний термічний ефект.

3.3.10 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект вапна

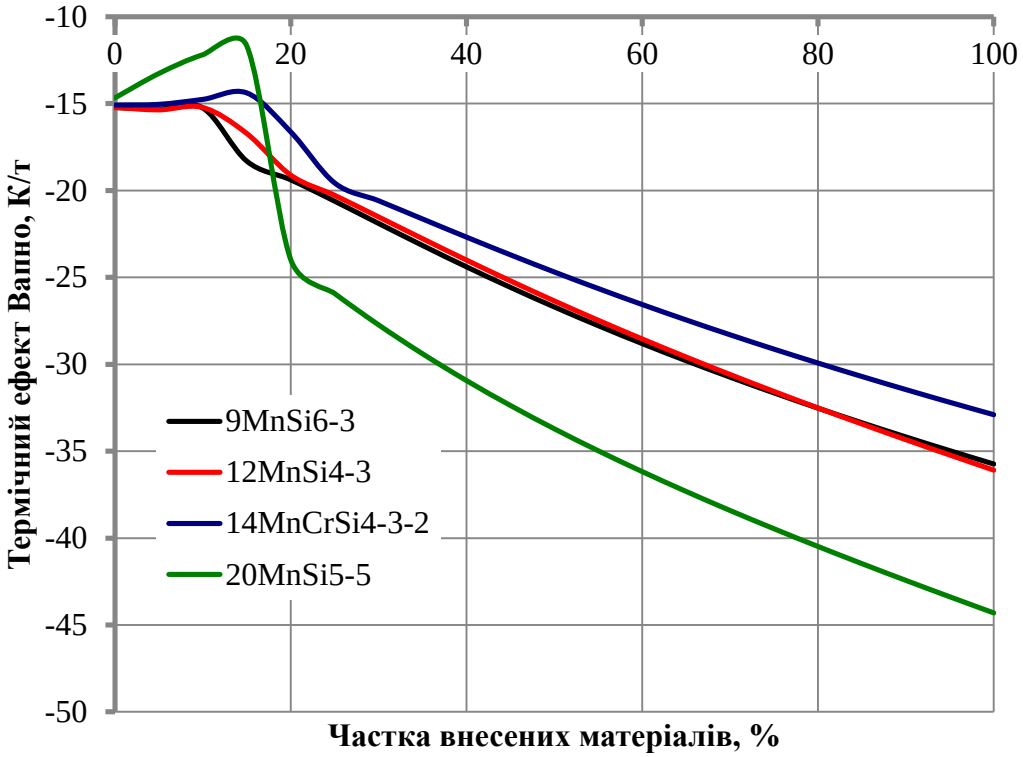


Рисунок 3.12 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект вапна

Дослідження термічного ефекту вапна при позапічній обробці сталей показало зниження величини ΔТ при збільшенні долі внесених феросплавів для сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2. З виділенням газової фази збільшується і термічний ефект. Коли кратність газу падає до 0 і газова фаза перестає виділятися термічний ефект починає падати. Спершу це відбувається у сталі 9MnSi6-3, потім 12MnSi4-3 і 14MnCrSi4-3-2 відповідно. Для сталі 20MnSi5-5 термічний ефект зростає разом зі зростанням частки внесених феросплавів, це пов’язано зі збільшенням кратності газу при додаванні феросплавів, що видно з рисунку 3.3.

3.3.11 Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії

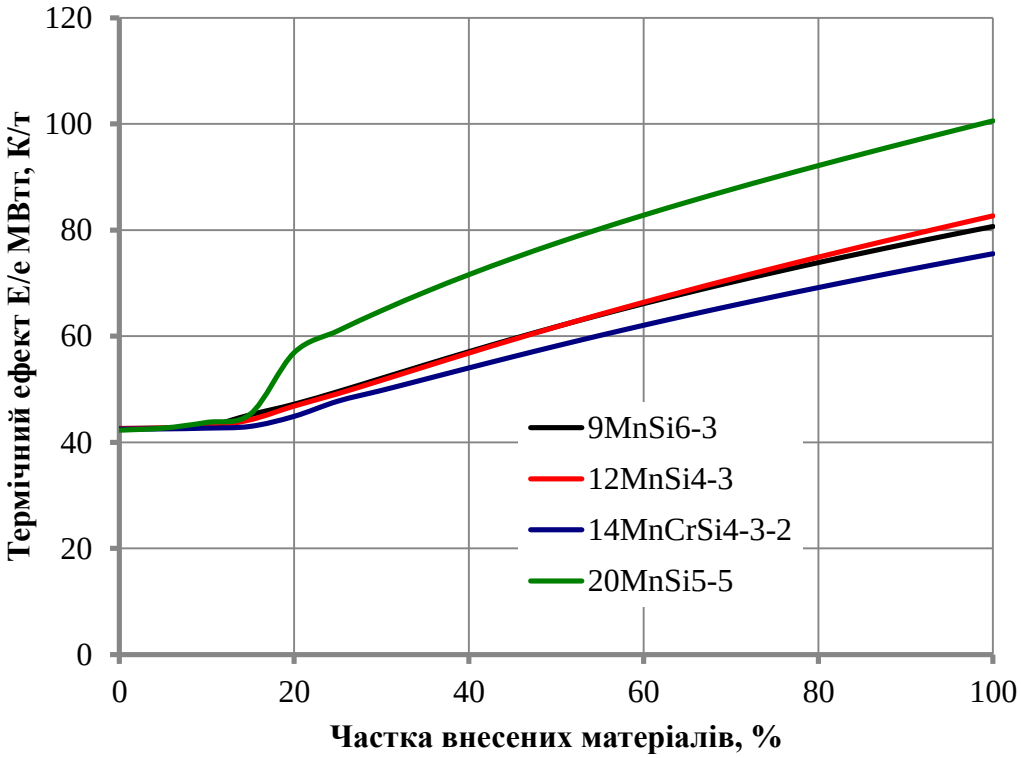


Рисунок 3.13 - Вплив частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії

Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії при позапічній обробці сталей показує, що питома теплоємність системи з внесенням феросплавів зменшується.

3.4 Висновки

Таким чином, розглянуті залежності теплоенергетичних параметрів позапічної обробки від долі внесених феросплавів дозволяє ефективно враховувати кількість феросплавів. Це дозволяє оптимально використовувати і економити дорогі феросплави.

Дослідження проведенні за допомогою обчислювального експерименту в програмі Excalibur дозволили виявити наступні особливості теплових ефектів матеріалів при розкисленні-легуванні сталі:

1. Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічні ефекти матеріалів плавки показало, що зниження термічного ефекту пояснюється зменшенням вмісту кисню в металі і одночасним зменшенням вмісту FeO у шлаці, що приводить до зниження екзотермічного ефекту.

2. При збільшенні частки внесених феросплавів спостерігається інтенсивне окислення вуглецю, що міститься в металі та розкислювачах з утворенням значної кількості газової фази, яка складається в основному з CO. Це супроводжується ендотермічним ефектом.

3. Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект електроенергії показало, що питома теплоємність системи з внесенням феросплавів зменшується.

4. На усіх діаграмах тепловий ефект будь-якого матеріалу до внесення легуючих матеріалів відповідає нерозкисленому металу і складається з теплового ефекту екзотермічних реакцій розкислення і теплового ефекту розчинення в неідеальному металевому розчині. При внесенні 100% матеріалів залишається тільки тепловий ефект неідеального розчинення.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії

Всі види негативних впливів, що формуються при проведенні відповідного дослідження, поділяють на основні групи: фізичні та хімічні. Фізичні фактори – рухомі машини і механізми; пересувні вироби, заготовки, матеріали; підвищені рівні шуму і вібрацій; підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони; підвищена температура поверхонь устаткування, матеріалів; електромагнітні випромінювання, недостатня освітленість, підвищений рівень статичної електрики, підвищене значення напруги в електричному ланцюзі та інші. Хімічні фактори – речовини та сполуки, різні за агрегатним станом і володіючі токсичною, дратівливою, канцерогенною та мутагенною дією на організм людини і впливають на його репродуктивну функцію.

Основними шкідливими чинниками в приміщенні лабораторії при проведенні досліду є загазованість та небезпека враження електричним струмом.

Лабораторія є приміщенням легкої категорії важкості праці (виконуються легкі фізичні роботи), тому повинні дотримуватися такі вимоги:

- 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 представляє оксид вуглецю – газ який не має кольору, запаху і дратівливих властивостей. Токсична дія оксиду вуглецю обумовлена тим, що він зв'язується з гемоглобіном крові міцніше, ніж кисень (при цьому утворюється каробоксигемоглобін), блокуючи процеси транспортування кисню і клітинного дихання в організмі. В результаті чого виникає кисневе голодування (гіпоксія, аноксія).

Згідно ГОСТ 12.1.005-88 ГДК для оксиду вуглецю складає 20 мг/м^3.

Дія токсичних речовин, у даному випадку окису вуглецю, може виявлятися в гострих і хронічних отруєннях. Симптоми отруєння, як правило, виявляються відразу.

Вираженість симптомів отруєння при вдиханні забрудненого повітря залежить від тривалості впливу (експозиції) і концентрації отрути. Чим вище концентрація отрути в навколишньому повітрі, тим скоріше проявляться і будуть тяжчі наслідки.

Так, для монооксиду вуглецю :

- при $C \cdot t < 350$ - дія непомітна;
- при $C \cdot t = 700$ - дія слабка;
- при $C \cdot t = 1000$ - головні болі і нудота;
- при $C \cdot t = 1700$ - важке отруєння

(тут С - концентрація окису вуглецю, мг/м ; t - тривалість дії, год).

Впливають і умови навколишнього середовища. При високій температурі повітря розширюються шкірні судини, підсилюється потовиділення, частішає подих, підвищується хвилинний об'єм серця; це прискорює проникнення отрут в організм. Висока температура впливає на швидкість випару і летючість речовини, що підсилює небезпеку забруднення повітря. Вологість повітря підвищує токсичність речовин. Тому небезпека отруєння зростає саме в жаркий час року.

Для забезпечення необхідного, по санітарних нормах якості, повітряного середовища необхідна постійна зміна повітря в приміщенні. Потрібно постійно видаляти "відпрацьоване" (забруднене) повітря і передбачати надходження

чистого зовнішнього повітря, тобто здійснювати повітрообмін. Видалення з приміщення забрудненого повітря здійснюється витяжною вентиляцією (витяжкою).

Теплове випромінювання.

Основним джерелом надходження теплоти у виробничому приміщенні є піч Тамана.

Тепловиділення і створювані ними надлишки тепла – найбільш шкідливі показники, що часто зустрічаються.

Як відомо, у перший період, що безпосередньо настає після розігріву печі, частина теплоти витрачається на розігрів її маси, інша частина теплоти надходить у приміщення і може являти собою надлишкову теплоту, що видаляється засобами вентиляції. При зупинці печі виділення теплоти у повітря приміщення буде продовжуватися, поступово загасаючи і припиняючи після охолодження устаткування до температури навколишнього середовища. Отже, тепловиділення від печі Тамана в приміщенні не постійно в часі.

Визначення тепловиділення печі є складною задачею, тому що тепловіддача її не постійна і міняється в залежності від режиму роботи, ступеня зношеності устаткування; крім того, конструктивне оформлення грубного устаткування по-різному.

Поразка електричним струмом

Основні причини нещасливих випадків від впливу електричного струму наступні:

- випадковий дотик чи наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходиться під напругою;
- поява напруги на металевих конструктивних частинах електроустаткування - у результаті ушкодження ізоляції й інших причин;
- поява напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, унаслідок помилкового включення установки;
- виникнення крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання проводу на землю.

На рівень електротравматизму впливають недоліки в конструкції і монтажі устаткування, недоліки в експлуатації, незадовільна організація робочих місць, недостатній інструктаж і т.д.

Проходячи через організм, електричний струм надає термічну, електролітичну, механічну і біологічну дії.

Термічна дія виражається в опіках окремих ділянок тіла, нагріванні кровоносних судин, нервів і інших тканин. Електролітична дія виражається в розкладанні крові й інших органічних рідин, що викликає значні порушення їхній фізико - хімічних складів. Механічна дія призводить до розриву тканин.

Біологічна дія є особливим специфічним процесом, властивим лише живій матерії. Вона виражається в роздратуванні і порушенні живих тканин організму (що супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів), а також у порушенні внутрішніх біоелектричних процесів, що протікають у нормально діючому організмі і найтіснішому образі зв'язаних з його життєвими функціями. У результаті можуть виникнути різні порушення в організмі, у тому числі порушення і навіть повне припинення діяльності органів подиху і кровообігу. Дратівна дія струму на тканині організму може бути прямою, коли струм проходить безпосередньо по цих тканинах, і рефлекторною, тобто через центральну нервову систему, коли шлях струму лежить поза цими тканинами.

Це різноманіття дій електричного струму нерідко приводить до різних електротравмам, що умовно можна звести до двох видів: місцевим електротравмам (електричні опіки, електричні знаки, металізація шкіри, механічні ушкодження) і загальним електротравмам (електричним ударам).

Результат електротравм залежить від ряду факторів - умов зовнішнього середовища і параметрів організму людини. До умов зовнішнього середовища відносяться, насамперед, характер включення тіла людини в електричний ланцюг, сила струму і напруга в ланцюги, тривалість його впливу. Велике значення мають температура і вологість навколишнього середовища, з

підвищенням якої вага результату зростає. На результат поразки електричним струмом впливають стомлення і хворобливий стан.

На результат поразки впливає і тривалість впливу струму. При цьому змінюється електричний опір тіла людини, що має на увазі вплив нагріву і пробивання рогового шару шкіри. При короткочасному впливі струму вага поразки залежить від фази роботи серця в момент проходження струму. Так, проходження струму через серце в стадії розслаблення (період між послідовними скороченнями і розширеннями передсердь і шлуночків серця, що триває близько 0,1 с) особливо небезпечно.

4.2 Інженерна розробка захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи з поліпшення умов праці

Видалення з приміщення забрудненого повітря здійснюється витяжною вентиляцією (витяжкою). При видаленні шкідливостей безпосередньо з місця їхнього виділення досягається найбільший ефект дії вентиляції, тому що при цьому не відбувається забруднення великих обсягів повітря і можна видалити малими обсягами повітря шкідливості, що виділяються. Такий спосіб вентилювання носить назву місцевої витяжної вентиляції.

Уловлювання шкідливостей у місці їхнього утворення виробляється за допомогою так званих місцевих відсмоктувачів.

Вони попереджають поширення шкідливостей по приміщенню, і, тим самим ефект дії вентиляції досягається при мінімальному повітрообміні і мінімальних капітальних витратах. Застосування місцевих відсмоктувачів дозволяє вирішувати основну задачу вентиляції - санітарно-гігієнічну.

Конструктивне оформлення місцевих відсмоктувачів визначається характером виділення шкідливостей і особливістю технологічного процесу. При розташуванні місцевого відсмоктувача поза джерелом виділення шкідливості, над ним чи збоку, він конструктивно виконується у виді витяжних зонтів.

Витяжний зонт являє собою металевий ковпак, розташовуваний над джерелом шкідливих виділень. Всмоктувальний перетин ковпака має форму, що геометрично подібна горизонтальній проекції дзеркала шкідливих виділень. Зонт повинен уловити всю кількість повітря, що підтікає до нього. Чим далі прийомний отвір від джерела виділення шкідливих речовин, тим більший обсяг повітря потрібно видаляти. Через зонт повинна віддалятися сумарна кількість повітря, що складається з початкової маси, що виділяється джерелом, і маси повітря, що приєдналося, по шляху від джерела до зонту. Якщо кількість повітря, що видаляється зонтом, буде меншою, то зонт буде переповнятися і частина забрудненого повітря буде надходити в приміщення. Тому необхідно, щоб швидкості всмоктування в просторі між поверхнею джерела виділень і приймальним отвором зонту були достатніми для захоплення газу під зонт (без вибивання в приміщення), швидкості по всій площині вхідного отвору зонту - рівномірні, а обсяг повітря, що відсмоктується - більше обсягу струменя, що підтікає. Для уловлювання зонтом забрудненого нагрітого повітря необхідно правильно визначити його обсяг на рівні зонту. Рішення цього питання ґрунтується на знанні закономірностей конвективних (теплових) струменів.

Зонт є досить ефективним при стійких конвективних потоках, що мають осьову швидкість на рівні всмоктувального отвору не менш 1 м/с.

Важливою умовою роботи зонту, що впливає на рівномірність швидкості всмоктування в прийомному перетині зонту, є кут розкриття зонту. Забезпечити рівномірну швидкість всмоктування можна тільки при куті розкриття до 60°.

Основна вимога, пропонована до зонтів, - уловлювати максимальну кількість шкідливостей при мінімальній витраті повітря; конструктивні їхні елементи не повинні заважати виконанню робочих операцій.

Для попередження або зменшення впливу на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів в лабораторії застосовують засоби захисту. В кожному випадку вибір таких засобів здійснюється у відповідності з вимогами безпеки для даного вигляду робіт.

Засоби колективного захисту робітників, які застосовуються в залежності від їх призначення підрозділяються на декілька класів:

- Засоби захисту від впливу механічних факторів – огороджувальні, запобіжні і гальмівні пристрої; пристрої автоматичного контролю, сигналізації і дистанційного керування; знаки безпеки.

Огороджувальні пристрої - засоби захисту, що перешкоджають потраплянню людини в небезпечну зону. По конструкції огороджувальні пристрої бувають: стаціонарні (періодично монтуються для виконання допоміжних операцій), рухливі (пристрої, зблоковані з робочими органами механізму і машини, внаслідок чого закривають доступ в робочу зону при настанні небезпечного моменту) та переносні (використовують при ремонтних налагоджувальних роботах для захисту випадкових дотиків до струмоведучих частин, а також від механічних травм та опіків)

Запобіжні пристрої призначені для попередження виникнення небезпечних виробничих факторів при перенавантаженнях або перевищенні заданих параметрів шляхом нормалізації параметрів процесу або відключення обладнання.

Гальмівні пристрої є обов'язковою системою безпеки таких видів виробничого обладнання, як верстати, преси і т.д. Гальмівний пристрій вважається справним, якщо встановлено, що після відключення устаткування час вибігу небезпечних органів не перевищує зазначених у нормативній документації. По конструкції розрізняють гальма колодкові, дискові, конічні і клинові. Всі вони є складовою частиною машин і агрегатів і монтуються при їх виготовленні.

Пристрої автоматичного контролю і сигналізації включають в себе засоби отримання даних про роботу технологічного обладнання, а також про небезпечні та шкідливі фактори, які при цьому виникають. Для цього використовують датчики і прилади. За призначенням системи сигналізації діляться на три групи: оперативна (її мета видача інформації про хід технологічного процесу), попереджувальна (призначена для попередження

про виникнення небезпеки) та розпізнавальна (служить для виділення найбільш травмонебезпечних вузлів і механізмів, а також небезпечних зон).

- Засоби нормалізації повітряного середовища виробничих приміщень і робочих місць; засоби опалення, вентиляції, очистки, кондиціонування повітря, а також засоби локалізації шкідливих факторів і прилади контролю і сигналізації.

Вентиляція – організований повітрообмін – застосовується для створення нормальних метеорологічних умов, видалення шкідливих речовин. Вентиляція буває природною (аерація), механічною, місцевою.

Кондиціонування – це подача повітря з заданими параметрами (температура, вологість, швидкість руху).

Нормалізація метеорологічних умов в виробничих приміщеннях безпосередньо пов'язана з необхідністю підтримання визначеної температури повітря шляхом опалення. В тих приміщеннях, де температура повітря підтримується завдяки тепловим виділенням від технологічного обладнання і металу, передбачається резервне опалення, яке дозволяє підтримувати в холодний період року температуру не менше 5 ^{o}C.

- Засоби захисту від інфрачервоного випромінювання - відгороджуючі, герметизуючі і теплоізолюючі пристрої; засоби автоматичного контролю і управління.

Найбільш розповсюдженим і простим способом захисту від теплового опромінення є екранування. Екрани застосовують для екранування або джерел опромінення, або робочих місць від впливу променевої енергії.

- Засоби захисту від шуму – відгороджуючі, звукопоглинальні і звукоізоляційні пристрої, а також глушники шуму.

Звукопоглинання. Торкаючись з огородженою поверхнею, звукові хвилі втрачають частину своєї енергії, яка втрачається на приведення в коливання огородження; при цьому частина механічної енергії переходить в теплову в порах облицьованого матеріалу.

Звукоізоляція – це властивість огороджень знижувати рівень звуку, який через них проходить.

- Засоби захисту від ураження електричним струмом – прилади автоматичного контролю і сигналізації; ізолюючі пристрої і покриття; улаштування захисного заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів, захисного відключення.
- Засоби захисту від високих і низьких температур – відгороджуючі, термоізолюючі прилади; засоби радіаційного обігріву і охолодження.
- Засоби нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць – джерела світла, освітлювальні прилади, світлові пройми, світлозахисні пристрої і фільтри.

До засобів індивідуального захисту відносяться прилади для захисту органів дихання , зору, слуху, голови, рук, ніг та шкіри.

Спеціальний одяг служить для захисту робітника від несприятливих впливів виробничого середовища і небезпечних факторів виробництва, не порушуючи при цьому нормального функціонування організму. Для виготовлення спецодягу, який використовують для захисту від теплових впливів використовують льняні тканини.

Для захисту рук використовують рукавиці.

Для захисту очей від впливу енергії випромінювання використовують окуляри зі світлофільтрами.

Для захисту органів дихання використовують респіратори. Найбільш ефективним є респіратор «пелюсток». Опір диханню цих приладів повинен бути не великим (до 50 $Н/м^2$).

Для захисту органів слуху застосовують зовнішні і внутрішні противошуми (антифони). Як зовнішні противошуми рекомендують використовувать шумозахисні навушники, які покривають вушну раковину, як внутрішні противошуми – заглушки, вкладиші, які вставляють в зовнішній слуховий прохід.

4.3 Заходи з електробезпеки

Навіть при розвиненій системі захисних заходів не слід вважати, що вони створюють умови абсолютної безпеки. В усіх випадках настійно необхідно високоякісне виробництво електричних установок і періодичний контроль їх, підтримка якісного стану ізоляції, висока дисципліна персоналу і дотримання правил безпеки.

Пристрій і експлуатація електротехнічних установок повинні відповідати обов'язковим для всіх підприємств Правилам пристрою електротехнічних установок (ПУЭ) і правилам технічної експлуатації і безпеки обслуговування електроустановок промислових підприємств .

Для безпечної експлуатації електротехнічних установок важливе значення мають виробничі умови, що характеризуються особливостями навколишнього середовища, ступенем приступності електричного устаткування, напругою електричного струму.

Основними мірами захисту від поразки струмом є:

- Забезпечення недоступності, огородження та блокування струмоведучих частин. Ці засоби застосовують для захисту від випадкового потрапляння в небезпечну зону або дотику людини до струмоведучих частин електроустановок. Електричне блокування застосовується для автоматичного відключення електроустановки при відкриванні дверей , знятті огородження, інших подібних роботах , при яких відкривається доступ до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою , а також при наближенні людини до небезпечної зони .
- Застосування малих напруг (≤ 42 В). Мала напруга застосовується для ручного інструменту, переносного та місцевого освітлення в будь-яких приміщеннях і поза ними.
- Захисне заземлення корпусів обладнання. Досягається шляхом зниження до безпечних меж напруги дотику і кроку за рахунок малого опору заземлювача . Областю застосування захисного заземлення є мережі змінного і

постійного струму з ізольованою нейтраллю джерела напруги або трансформатора.

- Захисне відключення мережі за час не більше 0,2 с при виникненні небезпеки ураження струмом. Пристрій захисного відключення (ПЗВ) складається з чутливого елемента , що реагує на зміну контрольованої величини, та виконавчого органу , що відключає відповідний ділянку мережі. Призначення ПЗВ - захист від ураження електричним струмом шляхом відключення ЕУ при появі небезпеки замикання на корпус обладнання або безпосередньо при торканні струмоведучих частин людиною.
- Занулення корпусів електроустаткування в мережах з глухозаземленою нейтраллю. Занулення - це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним кабелем. Струмовим захистом є: плавкі запобіжники або автоматичне риле (вимикачі), встановлені перед споживачами енергії для захисту від струмів короткого замикання.
- Вирівнювання потенціалів корпусів електрообладнання застосовується як додатковий технічний спосіб захисту при наявності занулення або заземлення в приміщеннях з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних.
- Застосування захисних засобів. Захисними засобами називаються прилади , апарати , переносні і транспортовані пристосування і пристрої , а також окремі частини пристроїв , пристосувань і апаратів , що служать для захисту персоналу, який працює на електроустановках, від ураження електричним струмом. За призначенням ЗЗ поділяють на: ізолюючі, огороджувальні та допоміжні.

4.3.1 Розрахунок захисного заземлення

Необхідно розрахувати заземлювач для електроустановки, напругою до 1000 В з ізольованою нейтраллю. Установка складається з пічного трансформатора (380/4В), а також із блоку регулювання.

Визначаємо опір розтіканню струму електродів – вертикального $R_в$ и горизонтального $R_г$ за формулами:

$$R_в = \frac{\rho}{2\pi l_в}\left(\ln\frac{2l_в}{d_в} + \frac{1}{2}\cdot\frac{4t_в + l_в}{4t_в - l_в}\right) , \quad (4.1)$$

$$R_г = \frac{\rho}{2\pi l_г}\cdot\ln\frac{2l_г^2}{dt_г} , \quad (4.2)$$

де ρ – питомий опір грунту, Ом·м;

$l_в$ – довжина вертикального електроду, м;

$l_г$ – довжина горизонтального електроду, м;

$t_в$ – глубина заглиблення у грунт вертикального електроду, м;

$t_г$ – глубина заглиблення у грунт горизонтального електроду, м;

$d_в$ – діаметр вертикального електроду, м;

$d_г$ – еквивалентний діаметр горизонтального електроду, м:

$d_г$ = 0,5h = 0,5 · 40 = 20мм.

Відстань між вертикальними електродами приймаємо 5 м, а їх кількість 10 штук, тоді сумарна довжина вертикального електроду складе 50 м.

Прийнятий заземлювач контурний, число вертикальних електродів n = 10 шт, а відношення a/lв = 5/5 = 1, визначаємо коефіцієнти використання електродів заземлювача:

$$R_в = \frac{100}{2\pi 5}\left(\ln\frac{10}{0.012} + \frac{1}{2}\cdot\frac{4\cdot 3{,}3 + 5}{4\cdot 3{,}3 - 5}\right) = 24{,}9\ \text{Ом}$$

$$R_г = \frac{100}{2\pi 50}\cdot\ln\frac{50^2}{0{,}02\cdot 0{,}8} = 3{,}8\ \text{Ом}$$

вертикальних $\eta_в$ = 0,56, горизонтального $\eta_г$ = 0,34.

Тоді визначаємо опір розтіканню принятого групового заземлювача:

$$R = \frac{R_в \cdot R_г}{R_в \cdot \eta_г + R_г \cdot \eta_в \cdot n}, \quad (4.3)$$

$$R = \frac{24{,}9 \cdot 3{,}8}{24{,}9 \cdot 0{,}34 + 3{,}8 \cdot 10 \cdot 0{,}56} = 3{,}18 \text{ Ом}$$

Одже, проєктуємий заземлювач – контурний, складється з 10 вертикальних стержневих електродів довжиною 5 метрів і діаметром 12 мм та горизонтального електроду у вигляді стальної полоси довжиною 50 метрів розрізом 4×40мм, заглиблених у землю на 0,8 метри.

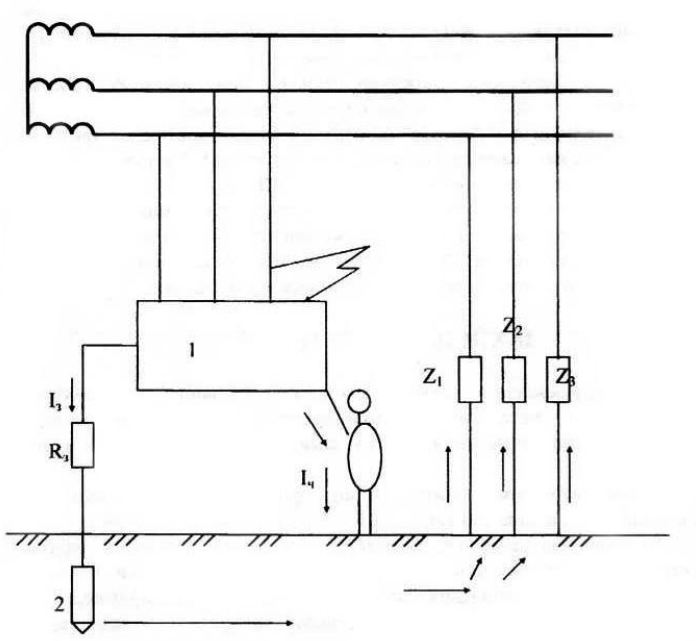


Рисунок 4.1 - Захисне заземлення: 1 – заземлене обладнання; 2 – заземлювач; $I_з$ – струм, що іде через заземлювач; $I_ч$ – струм, що іде через людину; $R_з$ – опір заземлення; Z_i – повний опір ізоляції фази

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Будівлю, в якій знаходиться лабораторія, по вибуховій і пожежній небезпеці можна віднести до приміщення категорії Д, оскільки в лабораторії є горючі (книги, документи, меблі) і важкоспалимі речі (різне лабораторне устаткування), які при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху. За

конструктивними характеристиками будівлю можна віднести до будівель з несучими та огороджувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону, де для перекриттів допускається використання дерев'яних конструкцій, захищених штукатуркою або важко горючими листовими, а також плитковими матеріалами. Отже, ступінь вогнестійкості будівлі можна визначити як третю (III).

Причинами виникнення пожежі в лабораторії можуть бути:

- несправності електропроводки, розеток і вимикачів, які можуть призвести до короткого замикання або пробою ізоляції;

- використання пошкоджених (несправних) електроприладів;

- використання в приміщенні електронагрівальних приладів з відкритими нагрівальними елементами;

- виникнення пожежі внаслідок попадання блискавки в будинок;

- загоряння будівлі внаслідок зовнішніх впливів;

- неакуратне поводження з вогнем та недотримання заходів пожежної безпеки.

Для гасіння пожеж в лабораторії використовується вуглекислотний вогнегасник ОУ-5 та ручний пожежний інструмент – гаки, ломи, сокири, відра, лопати, ножиці для різання металу. Інструмент розміщується на видному і доступному місці на стендах та щитах.

Для швидкого виявлення та повідомлення про місце виникнення пожежі в лабораторії є автоматична пожежна сигналізація АДС (автоматичний димовий сповіщувач) і автоматична система пожежогасіння. Для зв'язку використовують телефон, радіотелефон, радіо чи інші засоби першої зв'язку, що знаходяться у вищому навчальному закладі.

Особливу увагу необхідно приділяти евакуації людей з приміщень. Евакуація проводиться за заздалегідь спланованими шляхами. Схеми евакуації розташовані в доступних для погляду людини місцях.

ВИСНОВКИ

1. В роботі були розглянуті сучасні теоретичні відомості про теплові ефекти матеріалів та енергоносіїв при розкисленні-легуванні сталі.

2. Були розглянуті можливості і перспективи використання програми “Excalibur”, обгрунтований вибір цієї програми для дослідження.

3. Проведені дослідження теплових ефектів матеріалів при розкисленні-легуванні сталей 9MnSi6-3, 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 20MnSi5-5. Визначена залежність теплових ефектів матеріалів від долі внесених феросплавів для цих сталей:

- Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічні ефекти матеріалів плавки показало, що зниження термічного ефекту пояснюється зменшенням вмісту кисню в металі і одночасним зменшенням вмісту FeO у шлаці, що приводить до зниження екзотермічного ефекту.

- При збільшенні частки внесених феросплавів спостерігається інтенсивне окислення вуглецю, що міститься в металі та розкислювачах з утворенням значної кількості газової фази, яка складається в основному з CO. Це супроводжується ендотермічним ефектом.

- Дослідження впливу частки внесених феросплавів на термічний ефект системи показало, що питома теплоємність системи з внесенням феросплавів зменшується.

4. Встановлено, що проведені дослідження дозволяють спроектувати нові і удосконалити існуючі процеси при розкисленні-легуванні сталі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пономаренко А. Г., Окоуконі С. А., Храпко С. А. Управління сталеплавильними процесами на основі сучасних фізико-хімічних уявлень. Праці 4-го конгресу сталеплавців. Київ. 1997. С. 35–40.

2. Харченко О. В., Пономаренко А. Г., Храпко С. А. Розробка інформаційно–технологічної системи "Форвард" для управління металургійними процесами в реальному масштабі часу. Вісті ВНЗ. Чорна металургія. 1991. № 12. С. 89–91.

3. Колосов А. Ф., Литвин Л. М., Лук'янченко В. В. Освоєння системи "Електронний порадник сталевара" на металургійному заводі "Криворіжсталь". Зб. праць ДонНТУ. 2005. С. 46–48.

4. Фомін Н. А., Чухов І. І., Кошелєв А. Є. Автоматизована система розрахунку шихти при виробництві сталі в потужних електропечах. Зб. праць ДонНТУ. 2006. №3. С. 45–46.

5. ДСТУ EN 10027-1:2019 Сталь. Системи позначення. Частина 1. Назви сталі (EN 10027-1:2016, IDT).

6. 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.

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

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

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

10. 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.

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

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

13. 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.

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

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

16. Канторович Л. В. Математичні методи організації та планування виробництва. К. : Наукова думка. 2009. 124 с.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

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

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

22. 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.

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

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

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

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

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

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

29. 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.

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

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. ДСТУ 8541:2015. Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови.; прийнято від 18.12.2015 р., №197 та вступило в дію від 01.07.2016. К.: Мінрегіон України. 2014. 11 с.

35. ДСТУ ГОСТ 10884-94. Сталь арматурна термомеханічно зміцнена для залізобетонних конструкцій. Технічні умови. Затверджено та введено в дію Постановою Державного комітету за стандартами від 22.12.94, № 44. 1994. 36 с.