МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

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

Кваліфікаційна робота

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

на тему_____ Використання диференціальних коефіцієнтів засвоєння для оптимізації розкислення-легування сталі _____
_____
_____

Виконав: студент ___4__курсу, групи *6.1361-м-з*

_Гайдаренко В.С._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

спеціалізація
_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
____*Металургія*_____
(шифр і назва)

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

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

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

Спеціальність *136 Металургія*
(шифр і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*

Ю.О. Бєлоконь

“ 20 ” 05 2025 року

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

Гайдаренко Володимир Сергійович
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Використання диференціальних коефіцієнтів засвоєння для оптимізації розкислення-легування сталі*

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “27” 12 2024 року № 2031-с.

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *15.05.2025*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Дослідити оптимізацію розкислення-легування сталі з використанням диференціальних коефіцієнтів засвоєння*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина, Металургійна частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки, Перелік 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
Загальна частина	*Харченко О.В., доцент*		
Технологічна частина	*Харченко О.В., доцент*		
Металургійна частина	*Харченко О.В., доцент*		
Охорона праці та техногенна безпека	*Харченко О.В., доцент*		
Нормоконтроль	*Воденнікова О.С., доцент*		

7. Дата видачі завдання *29.01.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*10.02.2025*	
2	*Реферат*	*20.02.2025*	
3	*Загальна частина*	*01.03.2025*	
4	*Технологічна частина*	*30.03.2025*	
4	*Металургійна частина*	*15.04.2025*	
5	*Охорона праці та техногенна безпека*	*30.04.2025*	

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

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

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *О.С. Воденнікова*
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 82 сторінки, 38 рисунків, 5 таблиць, 19 джерел.

МЕТОД ГІББСА, ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ, МАТЕРІАЛИ, ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ КОЕФІЦІЄНТИ ЗАСВОЄННЯ, СИСТЕМА «МЕТАЛ-ШЛАК-ГАЗ», ЛЕГУВАННЯ, СТАЛЬ

У загальній частині кваліфікаційної роботи розглянуто метод хімічних потенціалів Гіббса, визначення і методи розрахунку диференціальних коефіцієнтів засвоєння (ДКЗ), що використовуються для оптимізації розкислення-легування сталі.

У технологічній частині зроблено розгляд можливості використання навчально-дослідницького програмного комплексу «Excalibur в якості інструмента обчислювально-експериментального дослідження термодинамічної системи «метал-шлак-газ». Наведено об’єкт і методику дослідження.

У металургійному розділу проведені обчислювальні експерименти з метою визначення диференціальних коефіцієнтів засвоєння при розкисленні-легуванні сталей 10кп, 5пс, 15ГС, 25ГС, 10Г2С1 з урахуванням температури, тиску, маси шлаку та інших факторів. Розроблені паспорти розкислення-легування сталей. Побудовані відповідні графічні залежності.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розглянуто характеристики потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника киснево-конвертерного цеху.

ABSTRACT

Bachelor's qualification work contains 82 pages, 38 figures, 5 tables, 19 sources.

GIBBS METHOD, THERMODYNAMIC ANALYSIS, MATERIALS, DIFFERENTIAL ABSORPTION COEFFICIENTS, METAL-SLAG-GAS SYSTEM, ALLOYING, STEEL

The general part of the qualification work considers the method of Gibbs chemical potentials, definitions and methods for calculating differential absorption coefficients (DAC) used to optimize deoxidation-alloying of steel.

The technological part considers the possibility of using the educational and research software complex "Excalibur" as a tool for computational and experimental research of the thermodynamic system "metal-slag-gas". The object and methodology of the study are given.

In the metallurgical section, computational experiments were conducted to determine the differential absorption coefficients during deoxidation-alloying of steels 10kp, 5ps, 15GS, 25GS, 10G2S1, taking into account temperature, pressure, slag mass and other factors. Steel deoxidation-alloying passports were developed. Corresponding graphical dependencies were constructed.

In the section "Occupational health and safety", the characteristics of potentially dangerous and harmful factors affecting the worker of the oxygen converter shop are considered.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА 11

1.1 Метод Гіббса 11

1.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) та їх використання 19

1.2.1 Виведення диференціальних коефіцієнтів засвоєння у явному вигляді 20

1.2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння в системі «метал-шлак-газ» ... 24

1.2.3 Застосування ДКЗ для оптимізації шихтових матеріалів 26

1.3 Постановка задачі дослідження. Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу 29

1.3.1 Пряма задача 29

1.3.2 Зворотна задача 32

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА 37

2.1 Вибір об'єкту дослідження 37

2.2 Обчислювальний експеримент з використанням програми «Excalibur» 38

2.2.1 Методика дослідження 38

РОЗДІЛ 3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА 41

3.1 Одержані результати 41

3.1.1 Дослідження впливу температури сталі на ДКЗ 41

3.1.2 Дослідження впливу температури на масу шлаку 48

3.1.3 Дослідження впливу температури на масу газу 50

3.1.4 Дослідження впливу маси шлаку на ДКЗ 52

3.1.5 Дослідження впливу маси шлаку на кінцеву температуру 58

3.1.6 Дослідження впливу маси шлаку на масу газу 60

3.1.7 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на ДКЗ 62

3.1.8 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на кінцеву температуру 64
3.1.9 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на масу шлаку 66
3.1.10 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на масу газу 67
3.1.11 Дослідження зміни ДКЗ у процесі розкислення 68
3.2 Аналіз, обговорення і порівняння отриманих результатів 70
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 73
4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища киснево-конверторного цеху 73
4.2 Заходи пожежної безпеки 76
4.3 Заходи з електробезпеки 77
ВИСНОВКИ 79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 81

ВСТУП

Інтенсивні дослідження в області хімічної термодинаміки та фізичної хімії металургійних систем в середині XX ст. створили теоретичну базу для перетворення металургії з області, заснованої переважно на досвіді й інтуїції, у науку, що спирається на строгий математичний фундамент. В даний час на величезному числі конкретних прикладів показано, що практично весь комплекс фізико-хімічних процесів металургійної технології піддається розрахунку з точністю, достатньою для побудови високоефективних інформаційно-обчислювальних систем управління плавкою і проектування відповідної технології. У поєднанні з можливостями сучасних засобів обчислювальної техніки це робить реальним різке скорочення традиційного розриву між теорією і виробничою практикою, перетворення теорії в зручний і надійний інструмент техніки управління і вироблення нових технологічних рішень [1].

Коефіцієнти засвоєння здавна застосовуються в металургійному виробництві при визначенні кількості шихтових матеріалів, необхідних для одержання необхідного складу напівпродукту або готового металу. Використовувані величини засновані на середньостатистичних даних, характерних для даного періоду плавки, складу вихідного металу, одержуваної марки сталі і усталеного набору шихтових матеріалів. Будь-яке відхилення зазначених параметрів в ту або іншу сторону з великою ймовірністю призводить до виникнення позаштатних ситуацій і, як наслідок, до виробничого браку. Причина цього полягає в тому, що насправді коефіцієнти засвоєння не є константами, а залежать від температури, складу металевої, шлакової і газової фаз, а також від складу вживаних шихтових матеріалів. Більш того, засвоєння одних елементів може зменшуватися або збільшуватися при додаванні інших хімічних елементів. Тобто існують перехресні ефекти, вплив яких відомо лише на емпіричному рівні для окремих випадків [3].

Межа можливостей, що надаються знанням середньостатистичних коефіцієнтів засвоєння, була досягнута в інформаційно-технологічній системі

«Форвард» [2], у якій оптимальні кількості шихтових матеріалів розраховувалися без урахування складних фізико-хімічних процесів, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті (чи ковші). Зокрема, одним з істотних її недоліків була неможливість оптимізації кількостей неметалічних шихтових матеріалів, що не давало можливості проектувати технології десульфурації, дефосфорації, прямого легування і т. д. Система орієнтована на практичне застосування в металургійному виробництві, на оптимізацію процесу легування в печі або ковші. На відміну від інших відомих систем аналогічного призначення [4, 5], у системі «Форвард» отримання заданого складу сталі (сплаву) гарантується шляхом спільного обліку факторів невизначеності коефіцієнтів засвоєння, змісту елементів в шихтових матеріалах, точності зважування і маси початкового металу.

Відмінною рисою цієї системи є також використання в основі обчислювальної процедури подвійного симплекс-методу розв’язання задачі лінійного програмування, що надає їй виняткову швидкодію і можливість роботи у реальному масштабі часу.

У іншій системі «Оракул» [4] вказані обмеження були частково зняті, але залишилися серйозні проблеми з адекватністю і стійкістю отримуваних результатів.

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 і тому подібне);

- 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 сьогодні робота сталеплавильних цехів немислима без наявності в їх складі агрегатів позапічної обробки [6].

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Метод Гіббса

Метод Гіббса дозволяє описувати хімічні процеси у будь-яких системах без попереднього їх представлення у вигляді стехіометричних реакцій. Більше того, феноменологічна (класична, формальна, макроскопічна) термодинаміка Гіббса дає якраз ту мову, за допомогою якої можна найпростіше пояснити суть будь-якого завдання виключно в термінах безпосередньо вимірюваних величин, таких як температура, тиск, хімічний склад, об'єм, маса та ін., тобто величин, якими керується технолог у своїй роботі. По своїй математичній структурі 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 і теплом. Для цього в початкові рівняння механіки Гіббс вводить додаткову змінну, що характеризує здатність системи віддавати або поглинати тепло - ентропію. Таким чином, термодинаміка набуває абсолютно 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 виходять 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 представлень і понять.

Механіка виходить з положення, що стан (повна сукупність властивостей) системи взаємозв'язаних тіл за відсутності зовнішніх полів повністю визначений у 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 і її здатність обмінюватися роботою, - в простому випадку маса (m) і об'єм (V) - в один з моментів.

Математично цей постулат виражається рівнянням:

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

При переході до загальнішого випадку термодинамічних систем вводиться ентропія (S), як деякий параметр, що характеризує здатність системи віддавати або отримувати тепло:

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

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

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

Ентропія, об'єм і маса, що входять в ці вирази, представляють мінімально необхідний набір первинних понять, що не інтерпретуються на рівні феноменологічної (макроскопічної) теорії. Усі інші властивості, що розглядаються в термодинаміці, є їх похідними (як у звичайному, так і математичному значенні 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:

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

Диференціал внутрішньої енергії як функції декількох змінних має вид:

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

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

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

Так само визначається теплоємність $c_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$, модуль пружності $K_T = -V\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$ і інші поняття, що становлять мову термодинаміки. З урахуванням позначень (1.6) вираження (1.5) набирає вигляд:

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

Цей вираз представляє одну із загальних форм фундаментального рівняння, яке при відомому виді 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:

$$\frac{dU}{d\tau} = T\frac{dS}{d\tau} - P\frac{dV}{d\tau} + \sum_{i=1}^{k} \mu_i \frac{dm_i}{d\tau}; \quad (1.9)$$

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

де τ – час; x – просторова координата.

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

Щоб перейти до рішення практичних завдань, треба визначити конкретний вид функцій (1.4) для фаз, що беруть участь в процесі. Для цього необхідно використати знання про властивості часток, що утворюють речовину, хімічнмй зв'язок, про форми існування компонентів у металі і шлаку, дифузійній рухливості часток і так далі і тому подібне, що призводить до практично необмеженого

об'єму інформації, що представляє погано організовану безліч фактів, їх тлумачень, гіпотез, специфічних понять та ін.

Знову виникає проблема систематизуючої мови, оскільки поняття класичної термодинаміки (температура, тиск, ентропія та ін.) в 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 статистичною механікою.

Слід зазначити 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 усіх конденсованих фаз вважаються елементи періодичної системи;

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

3) число компонентів дорівнює числу 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 однаково описати електрохімічні, поверхневі явища, а також явища, що вивчаються в теорії напівпровідників. При цьому вираження 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 елементу i; μ – хімічний потенціал електронів в шлаку (рівень Фермі), 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 разі металів член $v_i\mu$ у вираженні (1.11) – електронний вклад - мало змінюється із складом, тому при розрахунках рівноваги з цілком достатньою точністю можна використати звичайне вираження:

$$\mu_{[i]} = \mu^0_{[i]} + RT \ln x_{[i]}\gamma_{[i]}. \qquad (1.13)$$

При цьому $\gamma_{[i]} = \psi_{[i]}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

де m_i – маса елементу *i,* що поступила з шихтою (задана); $m_{[i]}$, $m_{(i)}$ – маси елементу *i*, що перейшли в метал і шлак відповідно (вимагається визначити).

Всього є *k* (число компонентів) таких рівнянь, в яких містяться *2k* невідомих. Записуємо далі *k* умов рівноваги (1.14). Таким чином, отримуємо *2k* рівнянь і *2k* невідомих, крім того, необхідно задати температуру і тиск системи, 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 упродовж усієї плавки в рівноважному наближенні. Облік кінетичних зрушень реального процесу входить у функції системи адаптації до конкретних умов і враховує ту обставину, що відхилення від рівноваги носять систематичний характер (зміщення у бік початкового стану). На цій основі був створений програмний комплекс «Excalibur», який дозволяє імітувати плавку в наукових і учбових цілях.

Розрахунок оптимальних кількостей шлакотворних матеріалів, що забезпечують необхідний рівень дефосфорації, десульфурації, а також ефективне засвоєння легуючих і розкислювачів, є унікальною здатністю системи «Excalibur». На відміну від відомих систем розрахунку легуючих добавок, грунтованих на лінійних моделях рівномірного зміщення, система «Excalibur» використовує не середньостатистичні коефіцієнти засвоєння, які насправді залежать від індивідуальних умов кожної плавки, а обчислює їх шляхом спільного рішення задачі оптимізації шихти і термодинамічного розрахунку розподілу елементів в системі метал - шлак. Це істотно підвищує точність розрахунку і ефективність оптимального управління процесом. Завдання вирішується шляхом обчислення матриці диференціальних коефіцієнтів засвоєння $U_{ij} = \partial m_{[i]} / \partial m_j$, що визначаються з поточного розподілу елементів у ванні і що відбивають зміну маси елементу *i* в металі при додаванні елементу *j* в систему.

У спрощеному вигляді (без урахування газової фази) розподіл елементів між металом і шлаком визначається з наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{a_{(i)}}{a_{[i]}} = K_i \exp(-\dfrac{\mu \nu_i}{RT}) ; \\ \sum\limits_{i=1}^{k} x_{(i)} \nu_i = 0 . \end{cases} \tag{1.18}$$

Виражаючи усі величини через маси елементів, отримаємо, що в загальному вигляді задана система рівнянь:

$$F(m_1,...,m_k,m_{[1]},...,m_{[k]}) = 0, \tag{1.19}$$

котра вирішується відносно $m_{[1]},...,m_{[k]}$ при заданих $m_1,...,m_k$, звідки за правилом неявного диференціювання отримаємо в матричних позначеннях:

$$U_{ij} = \left(\frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} \right) = -\left(\frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}} \right)^{-1} \left(\frac{\partial F_i}{\partial m_j} \right). \tag{1.20}$$

Склад металу з використанням вказаних коефіцієнтів засвоєння в матричному виді обчислюється за допомогою системи з *2k* нерівностей:

$$F^H \le \frac{M + UB\Delta X}{I^T \left(M + UB\Delta X \right)} \le F^B, \tag{1.21}$$

де F^H, F^B – вектори нижнього і верхнього меж складу металу; M – вектор початкових мас елементів в металі; B – матриця складу матеріалів; I – одиничний вектор; $\Delta X = X - X^0$ – вектор зміни (приросту) мас матеріалів.

Приведення (1.21) до лінійного вигляду і перехід до нерівностей по складу металу дає систему, яку можна вирішити симплекс-методом.

До системи (1.21) можуть бути також додані будь-які інші можливі технологічні або організаційні обмеження, зокрема, вимоги до мінімальної і максимальної маси отримуваного металу, до загальної маси (чи об'єму) шихтових матеріалів, що вводяться, до маси або долі (відносно загальної маси шихти) окремих матеріалів (чи груп матеріалів, об'єднаних за певною ознакою), до складу, кількості і властивостей шлаку, а також обмеження наявності матеріалів на складі і так далі.

Рішення сформованої таким чином системи нерівностей дає новий набір шихтових матеріалів $X=X^0+\Delta X$, що має мінімальну вартість, після чого розрахунок повторюється при $X^0=X$. Ітерації припиняються, а розрахунок вважається закінченим при виконанні умови:

$$\left|\Delta X\right| = \left|X - X^0\right| \le \varepsilon, \qquad (1.22)$$

де ε – заздалегідь задана мала величина, що визначає необхідну точність результатів розрахунку.

В процесі рішення розрахункові маси рекомендованих шихтових матеріалів зазнають значні зміни – взаємне виключення або заміна одних матеріалів іншими, з чого можна зробити висновок, що система може самостійно знаходити рішення, що призводять до екстремуму цільової функції (мінімальні витрати).

У основі реалізованої обчислювальної процедури лежить подвійний лінійний симплекс-метод рішення задачі лінійного програмування в комбінації з оригінальним компактним алгоритмом «відкладених» обчислень, що надає їй виняткову швидкодію і практично повністю знімає обмеження по кількості елементів, що оптимізуються, і шихтових матеріалів.

Крім того, при практичній реалізації алгоритму істотне підвищення надійності розрахунку досягається шляхом детального обліку чинників невизначеності хімічних складів використовуваних шихтових матеріалів, маси і складу початкового металу, використовуваних констант розподілу елементів між металом і шлаком і так далі.

Можливі випадки, що представляють особливий інтерес для практики, коли рішення вказує на неможливість гарантованого попадання до необхідного складу в тій або іншій ситуації (відсутність необхідних феросплавів, помилка в зважуванні і тому подібне). У таких випадках система завчасно, на початку періоду плавки, видає відповідне повідомлення і, завдяки здатності аналізувати причини можливого відхилення, пропонує перелік оперативних рішень: понизити невизначеність заданих параметрів (уточнити склад того або іншого феросплаву, масу матеріалів, що задаються, і так далі); легувати в два прийоми з проміжною

пробою металу; перевести плавку в іншу марку відповідно до наявного портфеля замовлень або у будь-яку стандартну марку. По усіх можливих варіантах повідомляється нова шихтовка, сума витрат і очікуваний склад металу. У автоматичному режимі можливе самостійне ухвалення рішення системою в межах заздалегідь заданого переліку і приорітетів.

Уся інформація про фактично отриманий склад металу використовується в системі адаптації параметрів моделі, що враховують нерівноважність реального процесу залежно від повільних змін параметрів агрегату з урахуванням періоду плавки, марки стали та ін.

Система орієнтована на роботу в автоматичному режимі з видачею сигналу безпосередньо на виконавчі механізми, а також на роботу в режимі порадника сталевара з видачею рекомендацій і коментарів до фактичних дій персоналу. В той же час вона є досить гнучкою для використання при ретроспективних аналізах, короткостроковому і перспективному плануванні в технологічних розробках, оцінки ефективності нових технологічних рішень та ін. Система може бути використана при управлінні найрізноманітнішими процесами виробництва сталі, проте при розробці в першу чергу малося на увазі управління плавкою в ДСП і позапічний обробці [1].

1.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) та їх використання

Принципова роль постачальника повної інформації про систему «метал-шлак-газ» відводиться детермінованій термодинамічній моделі, здатній врахувати взаємний вплив елементів і адекватно представити рівноважний стан у вигляді системи рівнянь загального вигляду:

$$F_i(m_1, m_2, ..., m_k; \bar{m}_{[1]}, \bar{m}_{[2]}, ..., \bar{m}_{[k]}) = 0, \qquad (1.23)$$

де $m_1, m_2, ..., m_k$ – маси елементів системи; $\bar{m}_{[1]}, \bar{m}_{[2]}, ..., \bar{m}_{[k]}$ – шукані рівноважні маси елементів в металі.

Іншими словами, якщо задані маси елементів, то така модель «повинна» розподіляти їх між металом, шлаком і газом. З системи рівнянь (1.23) методом неявного диференціювання знаходяться величини $U_{ij} = \partial m_{[i]} / \partial m_j$:

$$U_{ij} = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}}\right]^{-1} \left[\frac{\partial F_i}{\partial m_j}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\bar{m}_{[j]}}, \qquad (1.24)$$

які складають квадратну матрицю і є шуканими диференціальними коефіцієнтами засвоєння (ДКЗ). Фізичний сенс величин ДКЗ досить простий: «на скільки зміниться маса елементу *i* в металі при додаванні одиниці маси елементу *j* в систему». Таким чином, з'являється можливість врахувати усі перехресні ефекти впливу одних елементів на вміст інших.

В той же час, формула загального вигляду (1.24) не дає уявлення про структуру ДКЗ і є досить проблематичною з точки зору об'єму і стійкості обчислень при великій кількості елементів, що враховуються. Представляється доцільним, використовуючи формалізм термодинамічної моделі, привести ДКЗ до компактного виду, зручного як для проведення обчислень, так і для аналізу їх структури.

1.2.1 Виведення диференціальних коефіцієнтів засвоєння у явному вигляді

В якості базової термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» (1.23) використовується детермінована фізико-хімічна модель [7], що найточніше описує процеси, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті. Істотною характерною особливістю цієї моделі є облік електронного вкладу в хімічний потенціал елементів в шлаку. Далі буде показано, що перевірка адекватності цієї моделі може бути проведена з використанням отриманих виразів для ДКЗ незалежно від прийнятих моделей металевих і шлакових розчинів.

Виведемо спочатку ДКЗ для системи «метал-шлак». Початкова система *k+1* нелінійних рівнянь, грунтована на рівності хімічних потенціалів елементів у металі і шлаку, в цьому випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\dfrac{\mu\nu_i}{RT}\right), i = 1..k\ ; \\ \sum\limits_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0\ , \end{cases} \tag{1.25}$$

де $x_{(i)}$ – мольні концентрації елементів у шлаку; $x_{[i]}$ – мольні концентрації елементів у металі; $K_{[i)}$ – константи рівноваги «метал-шлак»; γ_i – коефіцієнти активності елементів у металі; ψ_i – коефіцієнти активності елементів у шлаку; ν_i – валентності елементів у шлаку; μ – рівень Фермі електронів у шлаку, або окислювально-відновний потенціал системи; T – температура в системі; R – універсальна газова постійна.

Виконаємо наступні перетворення над системою рівнянь (1.25) :

1) перейдемо від мольних концентрацій до чисел молей елементів відповідно в металі $n_{[i]} = N_m x_{[i]}$ і шлаку $n_{(i)} = N_s x_{(i)}$,

де N_m і N_s – загальні числа молей відповідно в металі і шлаку.

В цьому випадку сума молей кожного елементу в металі і шлаку дорівнює числу молей цього елементу в системі $n_i = n_{[i]} + n_{(i)}$;

2) введемо позначення $A_i = \ln\left(K_{[i)}\gamma_i / \psi_i\right)$ і назвемо величини A_i логарифмами консолідованих (чи ефективних) констант рівноваги;

3) окислювально-відновний потенціал системи μ далі вимірюватимемо в одиницях RT. Таким чином, знаменник RT зникне.

4) введемо змінну $Y = ln(N_m / N_s)$, рівну натуральному логарифму зворотної величини мольної кратності шлаку.

Перетворена система рівнянь після підстановки $n_{[i]} = n_i - n_{(i)}$ набуде наступного вигляду:

$$\begin{cases} n_{(i)} = \dfrac{n_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)}, i = 1..k\ ; \\ \sum\limits_{i=1}^{k} n_{(i)}\nu_i = 0\ . \end{cases} \tag{1.26}$$

У отриманих рівняннях число молей елементу в шлаку $n_{(i)}$ виражається через число молей цього елементу в системі і змінні μ та Y. Наступний крок – виключити змінні $n_{(i)}$, скориставшись тим фактом, що суму молей в шлаку можна представити двома способами :

1) як суму величин $n_{(i)}$;

2) як долю загального числа молей в системі N, виражену через змінну Y.

Прирівнюючи отримані вирази для суми молей в шлаку, приходимо до компактної системи двох нелінійних рівнянь відносно невідомих μ і Y, яка повністю еквівалентна початковій системі (1.25) :

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)} = 0 \ ; \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)} - \dfrac{N}{1+\exp(Y)} = 0 \ . \end{cases} \tag{1.27}$$

Переваги системи (1.27) полягають в тому, що рішення її чисельними методами є стійким, а необхідна точність досягається приблизно в k разів швидше, ніж при рішенні початкової системи $k+1$ нелінійних рівнянь. Крім того, компактні матриці системи (1.27) дозволяють отримати ДКЗ в явному виді.

Рішенням системи (1.27) є величини μ і Y, за допомогою яких після підстановки (1.26) отримуємо рівноважний мольний склад шлаку $\bar{n}_{(1)}, \bar{n}_{(2)}, ..., \bar{n}_{(k)}$ і рівноважний мольний склад металу $\bar{n}_{[1]}, \bar{n}_{[2]}, ..., \bar{n}_{[k]}$. Важливо відмітити, що після рішення цієї системи кількості молей елементів у металі $n_{[i]}$ і шлаку $n_{(i)}$, а також їх суми N_m і N_s у усіх подальших виразах є рівноважними величинами. Для легкості для читання ми опускаємо рису над ними.

Використовуючи рівняння (1.26), представимо число молей елементу i в металі у вигляді:

$$n_{[i]} = n_i - n_{(i)} = \frac{n_i}{1+\exp\left(A_i - Y - \mu\nu_i\right)} . \tag{1.28}$$

Знайдемо спочатку загальний вигляд матриці мольних ДКЗ. Для цього скористаємося правилом диференціювання складної функції (1.28) $n_{[i]} = f_i(n_i, m, Y)$:

$$V_{ij} = \frac{\partial n_{[i]}}{\partial n_j} = \frac{\partial f_i}{\partial n_i}\frac{\partial n_i}{\partial n_j} + \frac{\partial f_i}{\partial \mu}\frac{\partial \mu}{\partial n_j} + \frac{\partial f_i}{\partial Y}\frac{\partial Y}{\partial n_j}. \qquad (1.29)$$

Приватні похідні $\frac{\partial f_i}{\partial n_i}, \frac{\partial f_i}{\partial \mu}, \frac{\partial f_i}{\partial Y}$ знаходяться безпосередньо з (1.28) диференціюванням по відповідних змінних. У результаті, після підстановок з (1.26) і (1.28), отримаємо структурну формулу для молярних ДКЗ:

$$V_{ij} = \frac{n_{[i]}}{n_i}\left(\delta_{ij} + \nu_i n_{(i)} \frac{\partial \mu}{\partial n_j} + n_{(i)} \frac{\partial Y}{\partial n_j} \right). \qquad (1.30)$$

Похідні, що залишилися, знайдемо шляхом неявного диференціювання системи рівнянь (1.27) :

$$\left[\frac{\partial \mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j} \right] = -\mathbf{J}_1^{-1}\mathbf{J}_2 = -\left[\frac{\partial (F_1, F_2)}{\partial (\mu, Y)} \right]^{-1} \left[\frac{\partial (F_1, F_2)}{\partial n_j} \right]; \qquad (1.31)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial n_j} = -\frac{1}{D}\left[\frac{n_{(j)}\nu_j}{n_j}\left(\frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]}}{n_h} \right) + \left(\frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N} \right) \sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]} \nu_h}{n_h} \right]; \qquad (1.32)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial n_j} = -\frac{1}{D}\left[\frac{n_{(j)}\nu_j}{n_j} \sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]} \nu_h}{n_h} - \left(\frac{n_j}{n_j} - \frac{N_s}{N} \right) \sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]} \nu^2 h}{n_h} \right], \qquad (1.33)$$

де D – якобіан системи (1.27):

$$D = -\left(\sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]} \nu_h}{n_h} \right)^2 - \left(\frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]}}{n_h} \right) \sum_{h=1}^{k} \frac{n_{(h)} n_{[h]} \nu^2 h}{n_h}. \qquad (1.34)$$

Найважливішою особливістю отриманих формул для ДКЗ є та обставина, що вони не містять в явному вигляді констант рівноваги і коефіцієнтів активності в металі і шлаку. Останні вже враховані в рівноважних величинах $n_{[1]}, n_{[2]}, \ldots, n_{[k]}; n_{(1)}, n_{(2)}, \ldots, n_{(k)}$. Це означає, що ДКЗ можуть бути оперативно вичислені безпосередньо з експериментальних даних про рівноважний склад металу і шлаку незалежно від прийнятих моделей розчинів у відповідних фазах, наприклад, за даними експрес-аналізу відібраних проб.

З іншого боку, ці ж формули дозволяють провести ефективну експериментальну перевірку адекватності початкової термодинамічної моделі шляхом порівняння фактичної $\Delta n_{[]}$ і розрахункової $V\Delta n$ зміни змісту елементів в металі в рівноважних системах «метал – шлак» з близькими елементними складами.

Слід зазначити, що V – молярна матриця ДКЗ – не може бути довільною. Вона повинна задовольняти наступним очевидним умовам:

1) рівноважний метал, що додається в систему, повинен повністю йти в метал:

$$Vn_{[\,]} = n_{[\,]}. \tag{1.35}$$

2) аналогічно, рівноважний шлак, що додається в систему, повинен повністю йти в шлак, тобто у метал він потрапляти не повинен:

$$Vn_{(\,)} = 0. \tag{1.36}$$

3) при додаванні в систему малої кількості довільного матеріалу частина його, що йде в шлак, має бути електронейтральною. Ця вимога наводиться до наступного вираження:

$$V^T \nu = \nu. \tag{1.37}$$

Отримані вище формули для ДКЗ повністю задовольняють усім трьом умовам.

1.2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння в системі «метал-шлак-газ»

Для системи «метал-шлак-газ» початкову систему рівнянь (1.25) доповнимо рівняннями, що виражають рівність хімічних потенціалів елементів у металі і газі:

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\dfrac{\mu\nu_i}{RT}\right), i = 1..k; \\ \dfrac{x_{\{i\}}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i\}}\gamma_i}{\psi_i}, i = 1..k; \\ \sum\limits_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0. \end{cases} \tag{1.38}$$

Підхід з використанням елементного складу газу $x_{\{i\}}$, відповідних констант рівноваги «метал-газ» $K_{[i\}}$ і коефіцієнтів активності елементів у газі λ_i дозволяє уніфікувати представлення хімічних потенціалів і активностей елементів у газі і дає можливість одночасно обчислювати парціальні тиски усіх молекулярних і атомарних складових газової фази.

Методика виведення ДКЗ для трифазної системи принципово не відрізняється від описаної вище процедури виведення ДКЗ для системи «метал-шлак». Тому нижче будуть приведені основні результати, необхідні для практичних розрахунків.

Використовуючи аналогічні перетворення, приведемо систему *2k+1* рівнянь (1.38) до системи трьох рівнянь:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Y\right)\left[1+\exp\left(-Z\right)\right]} = 0 \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i - Y - \mu\nu_i\right)\right]\exp\left(Z - B_i\right)} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Z\right)\left[1+\exp\left(-Y\right)\right]} = 0 \end{cases} \quad (1.39)$$

де $B_i = \ln\left(K_{[i\}}\gamma_i / \lambda_i\right)$ – натуральний логарифм консолідованої (ефективної) константи рівноваги «метал-газ»; $Z = \ln\left(N_m / N_g\right)$ – натуральний логарифм величини, зворотної мольної кратності газу.

Результатом рішення системи (1.39) є набір величин μ, Y, Z, по яких визначається рівноважний зміст елементів в усіх фазах.

Структурна формула для ДКЗ у системі «метал-шлак-газ» має вигляд:

$$V_{ij} = \frac{n_{[i]}}{n_i}\left(\delta_{ij} + \nu_i n_{(i)}\frac{\partial\mu}{\partial n_j} + n_{(i)}\frac{\partial Y}{\partial n_j} + n_{\{i\}}\frac{\partial Z}{\partial n_j}\right). \quad (1.40)$$

Приватні похідні $\frac{\partial\mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}, \frac{\partial Z}{\partial n_j}$ обчислюються неявним диференціюванням системи рівнянь (1.39):

$$\left[\frac{\partial\mu}{\partial n_j},\frac{\partial Y}{\partial n_j},\frac{\partial Z}{\partial n_j}\right]=-\mathbf{J}_1^{-1}\mathbf{J}_2=-\left[\frac{\partial\left(F_1,F_2F_3\right)}{\partial\left(\mu,Y,Z\right)}\right]^{-1}\left[\frac{\partial\left(F_1,F_2,F_3\right)}{\partial n_j}\right]. \qquad (1.41)$$

Для практичних цілей досить вичислити матриці Якобі $\mathbf{J}_1$ і $\mathbf{J}_2$, а далі використати чисельні методи матричної алгебри.

Порівнюючи рівняння (1.30), (1.40) і (1.27), (1.39) попарно, не можна не відмітити строге виконання принципу відповідності. Тобто за відсутності газової фази формули (1.40) і (1.39) для системи «метал-шлак-газ» переходять у формули (1.30) і (1.27), справедливі для двофазної рівноваги «метал-шлак».

У подальших розрахунках фігуруватиме матриця масових ДКЗ *U*, елементи якої обчислюються з молярної матриці *V* по формулі:

$$U_{ij}=V_{ij}\frac{M_i}{M_j}, \qquad (1.42)$$

де M_i, M_j – атомні маси елементів *i* і *j* відповідно.

1.2.3 Застосування ДКЗ для оптимізації шихтових матеріалів

Отримані ДКЗ безпосередньо використовуються для вирішення завдання оптимізації кількостей шихтових матеріалів з гарантованим попаданням до заданого складу напівпродукту або готового металу. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум сумарної вартості вибраних шихтових матеріалів.

Під шихтовими матеріалами мається на увазі широкий клас власне шихтових матеріалів, включаючи феросплави, шлакотворні матеріали, розкислювачі, лігатури, вуглецьвмісні матеріали, а також синтетичні шлаки і флюси, кисень, інертні гази і усі види енергоносіїв, у тому числі природний газ і електроенергію.

Для того, щоб напівпродукт або готовий метал задовольняв заданим обмеженням по хімскладу, необхідно, щоб виконувалася система *2k-2* нерівностей (*k* – кількість елементів). У матричному записі вона може бути компактно представлена таким чином:

$$\begin{cases} \dfrac{U^H\left(P^H + B^H X\right)}{I^T U^H\left(P^H + B^H X\right)} \geq F^H; \\ \dfrac{U^B\left(P^B + B^B X\right)}{I^T U^B\left(P^B + B^B X\right)} \leq F^B, \end{cases} \tag{1.43}$$

де U^H, U^B – матриці масових диференціальних коефіцієнтів засвоєння (нижня і верхня межі);

P^H, P^B – вектори фактичного початкового елементного складу відповідних систем до завдання шихтових матеріалів (нижня і верхня межі), т;

B^H, B^B – матриці елементного складу усіх доступних шихтових матеріалів (нижня і верхня межі), масові долі;

X – шуканий вектор оптимальних мас шихтових матеріалів, т;

F^H, F^B – вектори складу металу, що регламентується стандартом (готовий метал) або технологічною інструкцією (напівпродукт), (нижня і верхня межі), масові долі;

I^T – одиничний вектор.

Матриці U^H, U^B отримують з (1.40-1.42) шляхом термодинамічного розрахунку рівноваги в системах «метал-шлак-газ», що мають поточні склади $P^H + B^H X$ та $P^B + B^B X$, відповідно.

Вектори $B^H X$ і $B^B X$ мають сенс вступу в систему хімічних елементів з шихтовими матеріалами X.

Елементарними перетвореннями систему нерівностей (1.43) приведемо до виду $HX \text{ " } H_0$, придатного для її вирішення симплекс-методом:

$$\begin{cases} \left(F^H I^T - E\right) U^H B^H X \leq \left(E - F^H I^T\right) U^H P^H \\ \left(E - F^B I^T\right) U^B B^B \leq \left(F^B I^T - E\right) U^B P^B \end{cases} \tag{1.44}$$

У матрицях B^H і B^B береться відповідно нижній і верхній склад матеріалів по усіх елементах, виключаючи розчинник (як правило, залізо), масова доля якого обчислюється як доповнення до одиниці. Дві нерівності, що відповідають залізу, з системи (1.44) виключаються.

Отримані нерівності доповнимо системою нерівностей виду $RX'' R_0$, що враховують всілякі технологічні і організаційні обмеження, такі як:

- необхідна і допустима маса напівпродукту або готового металу;
- фактичні кількості наявних в цеху (на складі) шихтових матеріалів;
- обмеження на склад групи і долю окремих шихтових матеріалів, наявність обов'язкових шихтових матеріалів;
- граничне допустиме зниження (підвищення) температури металу при завданні шихтових матеріалів;
- граничні параметри використовуваних дозаторів (фурм, пальників, електрорегуляторів);
- граничні параметри металургійного агрегату, включаючи його мінімальну і максимальну продуктивність, завантаження, допустиму температуру робочого об'єму;
- тимчасові обмеження.

Повна система нерівностей відносно шуканого вектору шихтових матеріалів X матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} H \\ R \end{bmatrix} X \le \begin{bmatrix} H_0 \\ R_0 \end{bmatrix}. \qquad (1.45)$$

Отримана система нерівностей вирішується ітераційно подвійним симплекс-методом з використанням швидкого алгоритму відкладених обчислень. При цьому мінімізується функціонал загальної вартості шихтових матеріалів, рівний $Q^T X$, де Q – вектор цін. Ітерації припиняються, коли модуль вектору $\Delta X = X - X_0$ виявляється менше деякої малої величини.

Таким чином, викладені теоретичний підхід і розрахункова схема дозволяють ефективно вирішувати завдання оптимального управління і проектування виплавки сталі в практично необмеженому діапазоні вхідних і вихідних параметрів. Відповідні алгоритми для ДСП, установок «піч-ківш», легування на сливі реалізовані в комп'ютерній системі контролю і управління плавкою стали, працюючою в реальному масштабі часу [6].

1.3 Постановка задачі дослідження. Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу

Якщо металургійний агрегат представити у вигляді системи, на вході якої заданий вектор незалежних управляючих змінних *X* (як ті: шихтові матеріали, енергоносії, тиск і температура), а на виході – вектор залежних змінних *Y*, таких як метал, шлак і газ певного складу і маси, то пряме завдання термодинамічного моделювання такої системи можна визначити як функцію *Y*(*X*). Відповідно, зворотна задача визначається функцією *X*(*Y*). Істотна їх відмінність полягає в тому, що пряма задача має єдине рішення, а зворотна - нескінченну безліч рішень.

У програмі «Excalibur» реалізовані пряма і зворотна задачі на основі термодинамічної моделі колективізованих електронів [10] і диференціальних коефіцієнтів засвоєння (фазових операторів) [8]. Модель колективізованих електронів (МКЕ), грунтована на методі хімічних потенціалів Гіббса з урахуванням електронного вкладу, була запропонована і розвинена близько 30 років тому професором А. Г. Пономаренко для опису рівноважного стану в системі «метал-шлак» [10].

1.3.1 Пряма задача

1.3.1.1 П о с т а н о в к а з а д а ч і

У загальному вигляді пряме завдання формулюється у вигляді системи рівнянь відносно рівноважних мас елементів у металі, шлаку і газі :

$$F(m, \bar{m}_{[\,]}, \bar{m}_{(\,)}, \bar{m}_{\{\,\}}, p, T) = 0, \qquad (1.46)$$

де m – вектор мас елементів у системі; $\bar{m}_{[\,]}, \bar{m}_{(\,)}, \bar{m}_{[\,)}$ – шукані вектори рівноважних мас елементів у металі, шлаку і газі; p, T – тиск і температура в системі.

Постачальником мас елементів m в систему є рідкий метал і шлак, футерування печі або ковша, а також різні матеріали, що завантажуються в піч або ківш, у тому числі лом, чавун, феросплави, лігатури, вапно, кокс, кисневе дуття і т. д.

1.3.1.2 Вибір моделі системи «метал–шлак–газ»

В якості термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» (1.46) використовується детермінована фізико-хімічна модель колективізованих електронів МКЕ [10], що найточніше описує процеси, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті. Істотною характерною особливістю цієї моделі є облік електронного вкладу в хімічний потенціал елементів у шлаку.

Згідно МКЕ, рівновага в термодинамічній системі забезпечується рівністю хімічних потенціалів компонентів в усіх фазах. У системі «метал-шлак-газ» рівновага може бути описана системою *2k+1* рівнянь (*k* - число елементів):

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\mu_e\nu_i\right), i = 1..k \\ \dfrac{x_{\{i\}}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{\lceil i\}}\gamma_i}{\lambda_i}, i = 1..k \\ \sum_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \qquad (1.47)$$

де $x_{(i)}$ – мольні долі елементів у шлаку; $x_{[i]}$ – мольні долі елементів у металі; $x_{\{i\}}$ – мольні долі елементів у газі; $K_{[i)}$ – константи рівноваги «метал-шлак»; $K_{\lceil i\}}$ – константи рівноваги «метал-газ»; γ_i – коефіцієнти активності елементів у металі; ψ_i – коефіцієнти активності елементів у шлаку; λ_i – коефіцієнти активності елементів у газі; ν_i – валентності елементів у шлаку; μ_e – рівень Ферми електронів у шлаку, або окислювально-відновний потенціал системи, виражений в одиницях RT ; T – температура в системі; R – універсальна газова постійна.

Ця система *2k+1* нелінійних рівнянь допускає еквівалентне перетворення до системи трьох нелінійних рівнянь [8]:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Y\right)\left[1+\exp\left(-Z\right)\right]} = 0 \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i - Y - \mu\nu_i\right)\right]\exp\left(Z - B_i\right)} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Z\right)\left[1+\exp\left(-Y\right)\right]} = 0 \end{cases} \tag{1.48}$$

де $A_i = \ln\left(K_{[i)}\gamma_i / \psi_i\right)$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-шлак»; $B_i = \ln\left(K_{[i\}}\gamma_i / \lambda_i\right)$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-газ»; n_i – числа молей *i*-го елементу в системі; $Y = \ln\left(N_m / N_s\right)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності шлаку; $Z = \ln\left(N_m / N_g\right)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності газу.

Результатом рішення нелінійної системи (1.48) є набір величин μ_e, *Y*, *Z*, по яких визначається рівноважний зміст (числа молей) елементів у шлаку, газі і металі :

$$\begin{cases} n_{(i)} = \dfrac{n_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu_e\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]}; \\ n_{\{i\}} = \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i - Y - \mu_e\nu_i\right)\right]\exp\left(Z - B_i\right)}; \\ n_{[i]} = n_i - n_{(i)} - n_{\{n\}} \end{cases} \tag{1.49}$$

1.3.1.3 Коефіцієнти активності в металі. Коефіцієнти активності елементів у металі, що входять в рівняння (1.47–1.48), розраховуються відповідно до моделі розбавленого розчину. Як показано в роботі [11], цього цілком достатньо для адекватного опису рівноважного стану системи.

1.3.1.4 Коефіцієнти активності в шлаку. Атомні коефіцієнти активності в шлаку, що входять в рівняння (1.47–1.48) розраховуються відповідно до моделі шлаку, прийнятої в МКЕ:

$$\frac{1}{\psi_i} = \sum_{j=1}^{k} x_{(j)} \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{\kappa_i} - \sqrt{\kappa_j}\right)^2}{RT} \right), \qquad (1.50)$$

де κ_i - атомний енергетичний параметр *i*-го елементу.

1.3.1.5 К о е ф і ц і є н т и а к т и в н о с т і в г а з і. Коефіцієнти активності елементів у газі розразовуються 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 у газі λ_i дозволяє уніфікувати представлення хімічних потенціалів і активностей елементів у газі і дає можливість одночасно обчислювати парціальні тиски усіх молекулярних і атомарних складових газової фази [10].

1.3.2 Зворотна задача

1.3.2.1 П о с т а н о в к а з а д а ч і

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, газонасиченість металу, а також враховувати допустимі параметри металургійного агрегату, дозаторів, фурм і так далі.

З усього різноманіття можливих способів досягнення поставленої мети, що відрізняються як кількісними, так і якісними характеристиками, бажано вибрати єдиний спосіб.

Якщо існує адекватна модель системи «метал-шлак-газ», то в принципі можливо, шляхом перебору величезної кількості варіантів прийти до деякого рішення, яке б відповідало заданим технологічним обмеженням і було найдешевшим з числа розглянутих. На жаль, перебрати усі можливі варіанти немислимо через обмеженість обчислювальних ресурсів і часу. Неповний же перебір не дає ніякої гарантії, що знайдене рішення зворотної задачі є оптимальним, який був би найменш дорогим.

Революційний крок в рішенні зворотних задач був зроблений в 1939 році Л. В. Канторовичем [13], який запропонував симплекс-метод лінійного програмування для широкого класу завдань, в яких вектор вихідних параметрів Y лінійно залежить від вектору незалежних змінних X:

$$Y = K + LX, \tag{1.51}$$

де K – вектор констант; L – лінійний оператор.

За допомогою стандартного алгоритму симплекс-методу знаходиться оптимальний вектор X с обліком всіляких обмежень, що накладаються на вектори X, Y і будь-які лінійні комбінації їх компонентів. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум (максимум) лінійного функціонала $C^T X$, кий можна ототожнити з вартістю варіанту X, якщо C має сенс вектору цін.

У низці робіт [2, 14, 15, 16] робилися спроби застосувати на практиці лінійне програмування для вирішення завдання гарантованого забезпечення хімічного складу готової сталі при мінімальній вартості розкислювачів і легуючих матеріалів. Завдання зводилося до складання системи нерівностей відносно шуканого вектору мас шихтових матеріалів (ШМ) X:

$$F^H \le P + (1/M_{ж})UBX \le F^B, \tag{1.52}$$

де $F^н$, $F^в$ – вектори заданого хімічного складу (верхня і нижня межі); P – вектор початкового складу напівпродукту; $M_{ж}$ – маса рідкої сталі; U – діагональна матриця коефіцієнтів засвоєння елементів в металі; B – матриця елементного складу шихтових матеріалів.

Далі ця система нерівностей вирішувалася симплекс-методом. При цьому коефіцієнти засвоєння (КЗ) елементів у металі задавалися, виходячи з середньостатистичних величин, характерних для цих умов плавки, початкового і заданого хімічного складу сталі, температури і окисленості 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 чинників. При цьому існують перехресні ефекти впливу добавок одних елементів на вміст інших.

Будь-яка термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ», що враховує хімічні взаємодії елементів, в загальному випадку являється нелінійною і тому непридатною для вирішення зворотної задачі засобами лінійного програмування. Нелінійне програмування, яке могло б прийти «на виручку», поки ще швидше мистецтво, чим чітко розроблена система алгоритмів.

Як правило, ці алгоритми складаються для конкретних завдань з використанням комбінацій методів можливих напрямів, штрафних функцій, множників Лагранжа з умовами Куна-Таккера. Усі вони працюють при не досить великій розмірності початкової задачі. Так зване «прокляття багатовимірності», описане Е. С. Вентцель в роботі [17], зводить нанівець зусилля розробника алгоритмів або нестійкістю роботи у багатовимірних (і частенько багатозв'язкових) областях зміни параметрів, або непомірно великими обчислювальними витратами, несумісними із застосуванням цього алгоритму в реальних виробничих умовах. Але якраз адекватні моделі реальних систем «метал-шлак-газ» з хімічною взаємодією повинні мати розмірність не менше 10 по числу елементів. А кількість видів шихтових матеріалів може вимірюватися десятками і сотнями.

1.3.2.2 Ф а з о в і о п е р а т о р и

Найбільш загальним методом, що дозволяє здолати вказані труднощі, є лінеаризація термодинамічної моделі в точці рівноважного стану. При цьому швидкий і надійний симплекс-метод лінійного програмування стає придатним для вирішення зворотної задачі. Іншими словами, необхідно знайти лінійні оператори *U, W, Q*, які виконували б роль самої термодинамічної моделі по рівноважному розподілу елементів між металом, шлаком і газом :

$$\begin{aligned} \bar{m}_{[\,]} &= Um; \\ \bar{m}_{(\,)} &= Wm; \\ \bar{m}_{\{\,\}} &= Qm, \end{aligned} \qquad (1.53)$$

де $m-$ вектор мас елементів у системі; $\overline{m}_{[\,]}, \overline{m}_{(\,)}, \overline{m}_{\{\,\}}-$ вектори рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі, відповідно.

Лінійні оператори обчислюються неявним диференціюванням системи рівнянь (1.46):

$$U = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F}{\partial m_{[\,]}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F}{\partial m}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\overline{m}_{[i]}}; \tag{1.54}$$

$$W = \frac{\partial m_{(i)}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F}{\partial m_{(\,)}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F}{\partial m}\right]\Bigg|_{m_{(i)}=\overline{m}_{(i)}}; \tag{1.55}$$

$$Q = \frac{\partial m_{\{i\}}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F}{\partial m_{\{\,\}}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F}{\partial m}\right]\Bigg|_{m_{\{i\}}=\overline{m}_{\{i\}}}. \tag{1.56}$$

Ці оператори мають квадратну матрицю і досить простий фізичний сенс: «на скільки зміниться маса елементу *i* у фазі при додаванні одиниці маси елементу *j* в систему». Ці лінійні оператори називаються фазовими операторами (ФО).

Внаслідок того, що $\overline{m}_{[\,]} + \overline{m}_{(\,)} + \overline{m}_{\{\,\}} = m$, з рівнянь (1.53) виходить, що сума матриць фазових операторів завжди дорівнює одиничній матриці:

$$U + W + Q = E \tag{1.57}$$

Ця обставина дозволяє на практиці обчислювати тільки два оператора, знаходячи третій з них простою арифметичною дією.

Вектор приходу елементів у систему *m* визначається як добуток матриці елементного складу шихтових матеріалів *B* на вектор шихтових матеріалів *X*:

$$m = BX \tag{1.58}$$

Таким чином, усі нерівності симплекс-методу можуть бути записані як лінійні (для мас) або дробово-лінійні (для масових доль елементів і їх співвідношень) функції фазових операторів і вектору *X*.

Після нескладних перетворень усі вони наводяться до виду $HX \leq H_0$, придатному для вирішення симплекс-методом відносно шуканого вектору X.

Оскільки з кожним новим вичисленим вектором X рівноважний стан системи змінюється, змінюватися будуть і фазові оператори. Ця обставина вимагає декількох (зовнішніх) ітерацій для знаходження стійкого рішення. Як правило, число таких зовнішніх ітерацій не перевищує 15-20 [18].

Фазові оператори у своїй сукупності дозволяють вирішувати поставлену зворотну задачу в повному об'ємі: тепер можливо контролювати усі процеси, що відбуваються в системі «метал-шлак-газ». Зрозуміло, насамперед необхідно забезпечити масу і заданий хімічний склад металу за допомогою оператора U. Далі, використовуючи оператор W, можна задати основність, масу і склад кінцевого шлаку. Можна також зажадати, щоб газонасиченість напівспокійного металу складала цілком певну величину на тонну рідкої сталі з допомогою оператора Q. При цьому буде отримано рішення у вигляді вектору мас шихтових матеріалів X, вартість яких в принципі ніколи не буде більше, ніж вартість якого-небудь іншого набору цих же матеріалів, що реалізовує поставлену задачу.

На відміну від колишніх спроб вирішити зворотну задачу металургійного виробництва підхід з використанням фазових операторів є універсальним: з його допомогою з рівним успіхом можна оптимізувати завалку, плавлення, окислення, рафінування, доведення, розкислення і легування металу. Не обмежений він також і типом сталеплавильного агрегату, в якому реалізується процес, оскільки фізико-хімічні закономірності поведінки системи «метал-шлак-газ» в електродугових печах, мартенівських печах, конвертерах, ковшах і установках «ківш-піч» мають одну і ту ж природу. Крім того, у рамках запропонованого підходу представляється можливим працювати із спокійною, напівспокійною і киплячою сталлю [6].

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір об'єкту дослідження

В якості об'єкту дослідження вибрана група вуглецевих і низьколегованих сталей: 10кп, 5пс, 15ГС, 10Г2С1, 25ГС.

10кп – вуглецева конструкційна якісна кипляча сталь. Її хімічний склад надано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 10кп, згідно ГОСТ 1050-88, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	N	As
0,07 – 0,14	≤ 0,07	0,25 – 0,50	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,15	≤ 0,30	≤ 0,008	≤ 0,08

Застосування: деталі, що працюють при температурі до 450 °С, до яких пред'являються вимоги високої пластичності, а також втулки, вушка, шайби, гвинти та інші деталі, до яких пред'являються вимоги високої поверхневої міцності і зносостійкості при невисокій міцності серцевини.

5пс – конструкційна вуглецева сталь звичайної якості. Її хімічний склад надано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сталі 5пс, згідно ГОСТ 380-94, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,28 – 0,37	0,15 – 0,30	0,50 – 0,80	≤ 0,30	≤ 0,050	≤ 0,040	≤ 0,30	≤ 0,010	≤ 0,30	≤ 0,080

Застосування: для виготовлення деталей клепаних конструкцій, болтів, гайок, ручок, тяг, втулок, ходових валиків, клинів, цапф, важелів, упорів, штирів, пальців, стрижнів, зірочок, трубчастих решіток, фланців і інших деталей, що працюють в інтервалі температур від 0 °С до +425 °С.

15ГС – конструкційна низьколегована сталь для зварних конструкцій. Її хімічний склад надано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад сталі 15ГС, згідно ТУ-3Р-55-2001 мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,12 – 0,18	0,70 – 1,00	0,90 – 1,30	≤ 0,3	≤ 0,025	≤ 0,035	≤ 0,30	≤ 0,30

Застосування: для виготовлення листового прокату, сортового прокату і трубних заготовок; деталей стаціонарних трубопроводів живильної води котлів СВП, що працюють при температурі до +280 °С.

10Г2С1 – конструкційна низьколегована сталь для зварних конструкцій. Її хімічний склад надано в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 –Хімічний склад сталі 10Г2С1, згідно ГОСТ 19281-89, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
≤ 0,12	0,80 – 1,10	1,30 – 1,65	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,30	≤ 0,012	≤ 0,30	≤ 0,08

Застосування: барабани котлів, посудини, що працюють під тиском, та інші деталі котлів, що працюють при температурах до 450 град.

25ГС – конструкційна низьколегована сталь для зварних конструкцій. Її хімічний склад надано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Хімічний склад сталі 25ГС, згідно ГОСТ 19281-89, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,22 – 0,26	0,60 – 0,90	1,00 – 1,30	≤ 0,30	≤ 0,035	≤ 0,040	≤ 0,30	≤ 0,30

Застосування: для виготовлення поковок різних деталей загального машинобудування; зварних конструкцій; деталей трубопровідної арматури.

2.2 Обчислювальний експеримент з використанням програми «Excalibur»

2.2.1 Методика дослідження

З метою формування масиву даних для подальшого їх використання при аналізі впливу різних параметрів плавки на ДКЗ 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;

- температура початкова, ºС;
- температура задана, ºС;
- температура кінцева, ºС;
- маса металу початкова, т;
- маса металу задана, т;
- маса металу кінцева, т;
- маса шлаку початкова, т;
- маса шлаку задана, т;
- маса шлаку кінцева, т;
- основність шлаку задана, т;
- основність шлаку кінцева, т;
- маса газу задана, т;
- маса газу кінцева, т;
- об'єм газу кінцевий, $м^3$;
- маса матеріалів фактична, т;
- вартість матеріалів фактична, у.од.

2) Матеріали. По кожному із матеріалів наводилися наступні дані:

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

3) Система «метал-шлак-газ». У кожній з трьох фаз наводяться наступні дані:

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

4) Термодинамічні функції по кожному елементу:

- коефіцієнт активності при нескінченному розбавленні в металі;
- коефіцієнт активності в металі;
- коефіцієнт активності в шлаку;
- коефіцієнт активності в газові фазі;
- активність в металі;
- активність в шлаку;
- активність в газовій фазі;
- стандартна парціальна ентальпія в металі;
- парціальна ентальпія змішення в металі;
- парціальна ентальпія змішення в шлаку;
- парціальна ентальпія змішення в газовій фазі.

5) Тиск газів:

- мінімальний тиск по кожному компоненту;
- максимальний тиск по кожному компоненту;
- сумарний тиск;
- об'єм при поточній температурі.

6) Властивості матеріалів. Для кожного з використовуваних матеріалів наводяться наступні дані:

- температура;
- агрегатний стан;
- приналежність до фази;
- термічний коефіцієнт;
- ентальпія, у тому числі стандартна і змішана;
- теплова енергія, необхідна для нагріву матеріалів до поточної температури системи.

7) ДКЗ по матеріалах і елементах.

РОЗДІЛ 3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА

3.1 Одержані результати

3.1.1 Дослідження впливу температури сталі на ДКЗ

3.1.1.1 Сталь 10кп

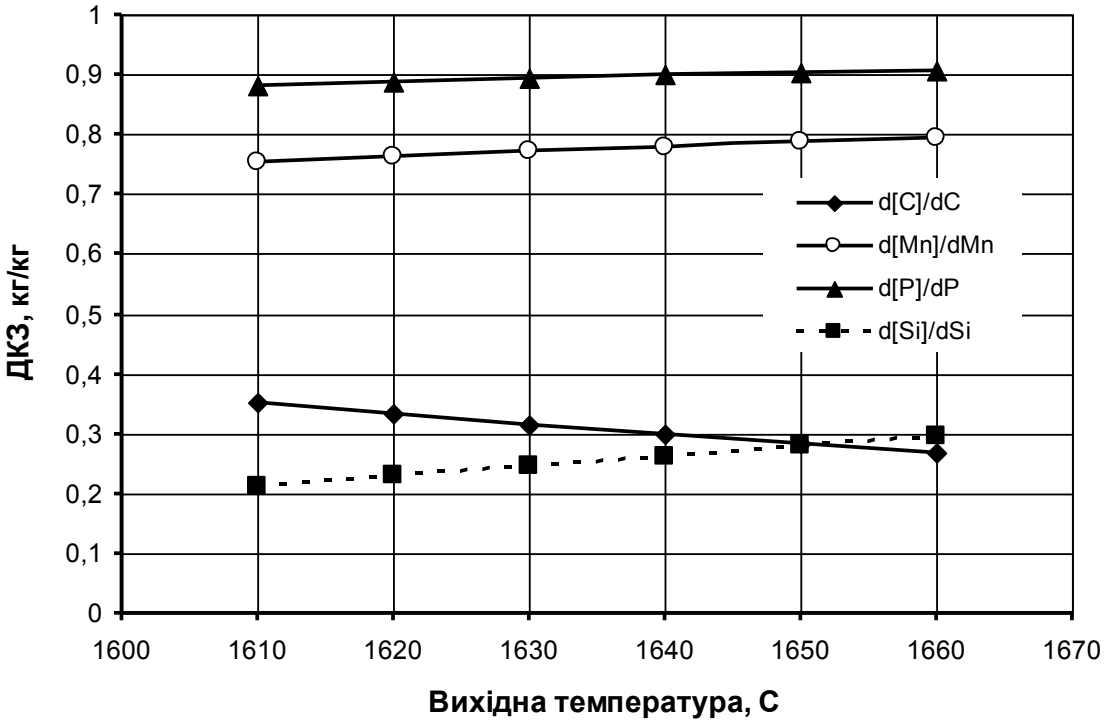

Рисунок 3.1 – Вплив початкової температури сталі 10кп на ДКЗ

Зі збільшенням початкової температури збільшується маса газу, що утворюється, а чим більше маса газу, тим менші ДКЗ по вуглецю, оскільки вуглець частково відноситься разом з CO, що утворився і котрий становить основну частину газу.

З іншого боку, з підвищенням початкової температури спостерігається збільшення ДКЗ фосфору і марганцю, що пов'язано зі зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів з позитивною валентністю.

Загальний рівень ДКЗ по марганцю в діапазоні 0,7...0,8 відповідає загальноприйнятим нормам технологічних інструкцій для киплячих сталей.

Загальний рівень ДКЗ для кремнію не перевищує 12%, так як для киплячої сталі коефіцієнт засвоєння завжди нижчий, ніж для розкисленої сталі. Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величину ДКЗ сірки, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.1.2 Сталь 5пс

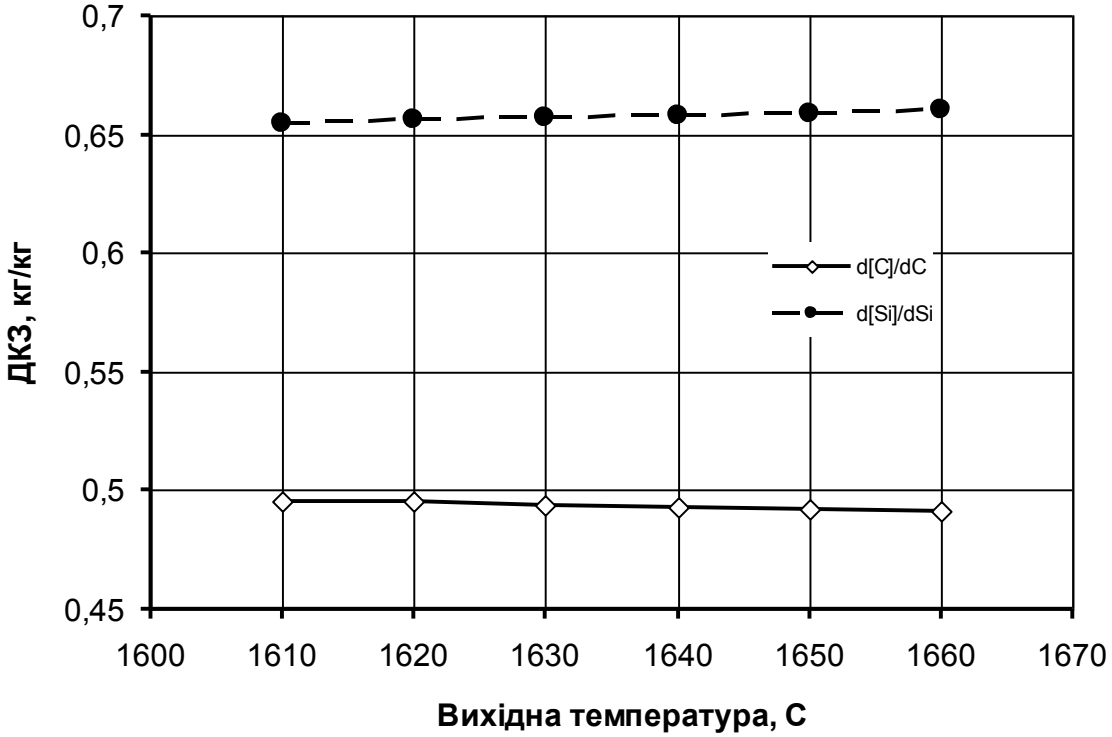

Рисунок 3.2 – Вплив початкової температури сталі 5пс на ДКЗ

Зі збільшенням початкової температури збільшується маса газу, що утворюється, а чим більше маси газу, тим менші ДКЗ по вуглецю, оскільки вуглець частково відноситься разом з CO, що утворився, і котрий становить основну частину газу.

З іншого боку, з підвищенням початкової температури спостерігається збільшення ДКЗ кремнію, що пов'язано зі зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів з позитивною валентністю.

Загальний рівень ДКЗ кремнію в діапазоні 0,45...0,5 відповідає загальноприйнятим нормам засвоєння кремнію в напівспокійних сталях.

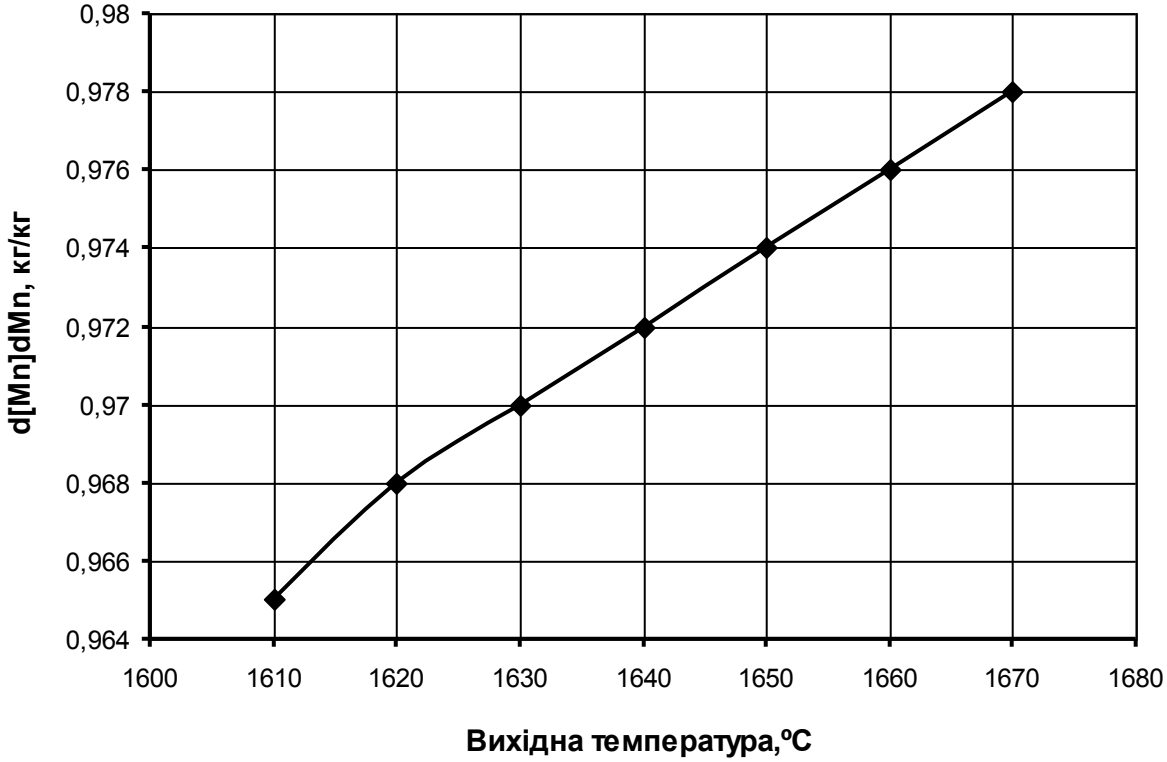

Рисунок 3.3 – Вплив початкової температури сталі 5пс на ДКЗ марганцю

Зі збільшенням початкової температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ марганцю підвищуються.

Загальний рівень ДКЗ марганцю в діапазоні 0,8...0,9 відповідає загальноприйнятим нормам засвоєння марганцю в напівспокійній сталі.

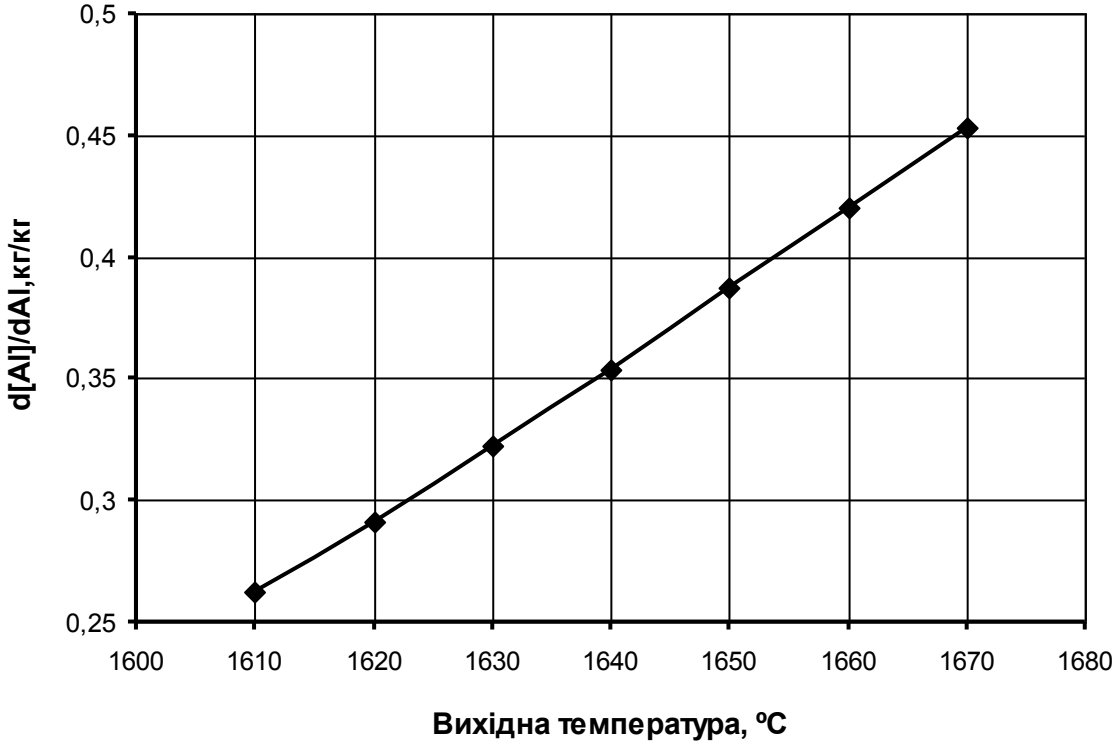

Рисунок 3.4 – Вплив початкової температури сталі 5пс на ДКЗ алюмінію

З підвищенням температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються. Проте загальний рівень ДКЗ алюмінію залишається на досить низькому рівні для напівспокійних сталей.

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величини ДКЗ фосфору і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.1.3. Сталь 15ГС

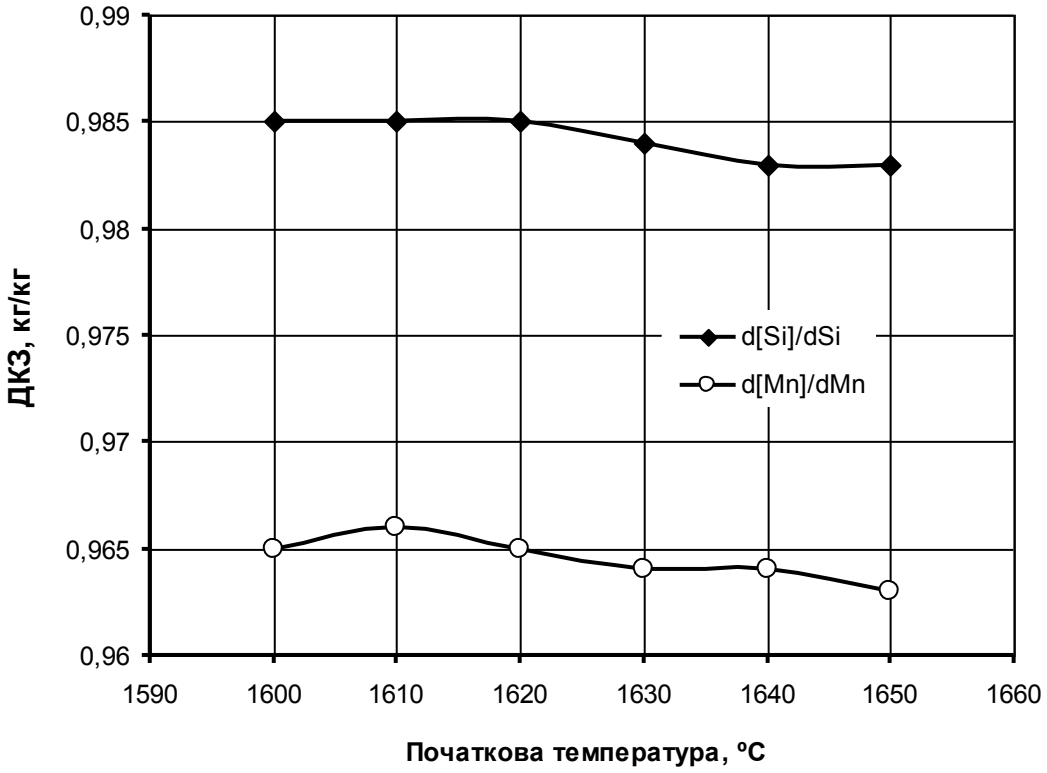

Рисунок 3.5 – Вплив початкової температури сталі 15ГС на ДКЗ кремнію і марганцю

З підвищенням початкової температури ДКЗ кремнію і марганцю трохи зменшуються у зв'язку з деяким збільшенням розчинності кисню в системі. При цьому кремній і марганець засвоюються з високою мірою, оскільки сталь 15ГС має підвищений вміст кремнію і марганцю і, таким чином, добре розкислена.

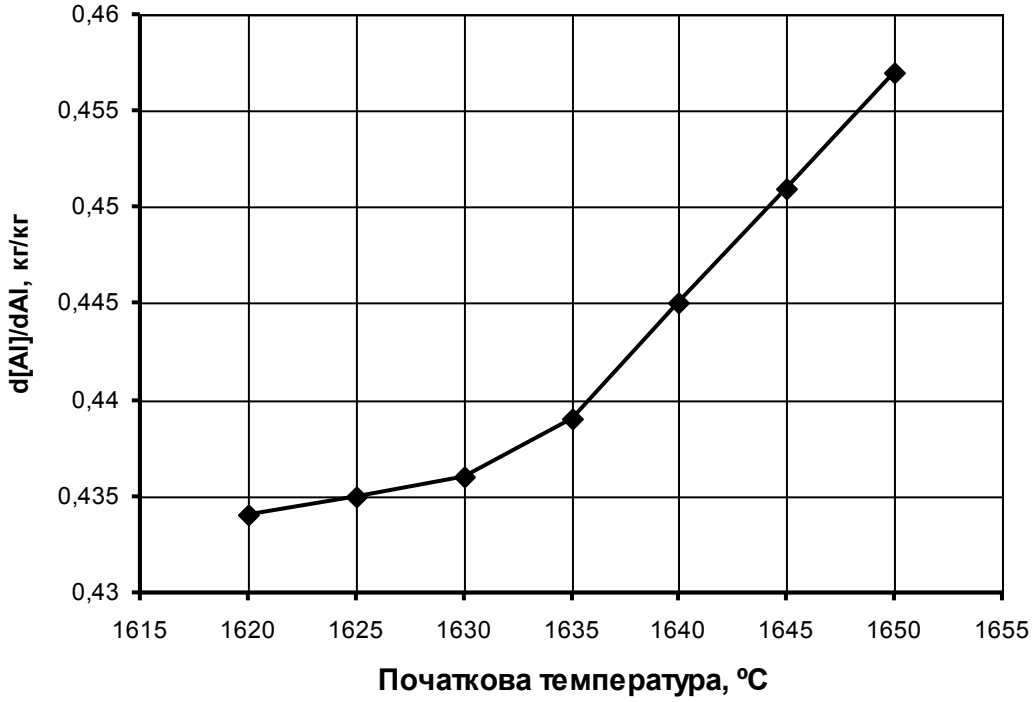

Рис. 3.6 – Вплив початкової температури сталі 15ГС на ДКЗ алюмінію

З підвищенням температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються.

Цей процес переважає в даному випадку над протилежним процесом підвищення розчинності кисню в системі при підвищенні початкової температури від 1620 до 1650 ºС.

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величини ДКЗ вуглецю, фосфору і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.1.4 Сталь 10Г2С1

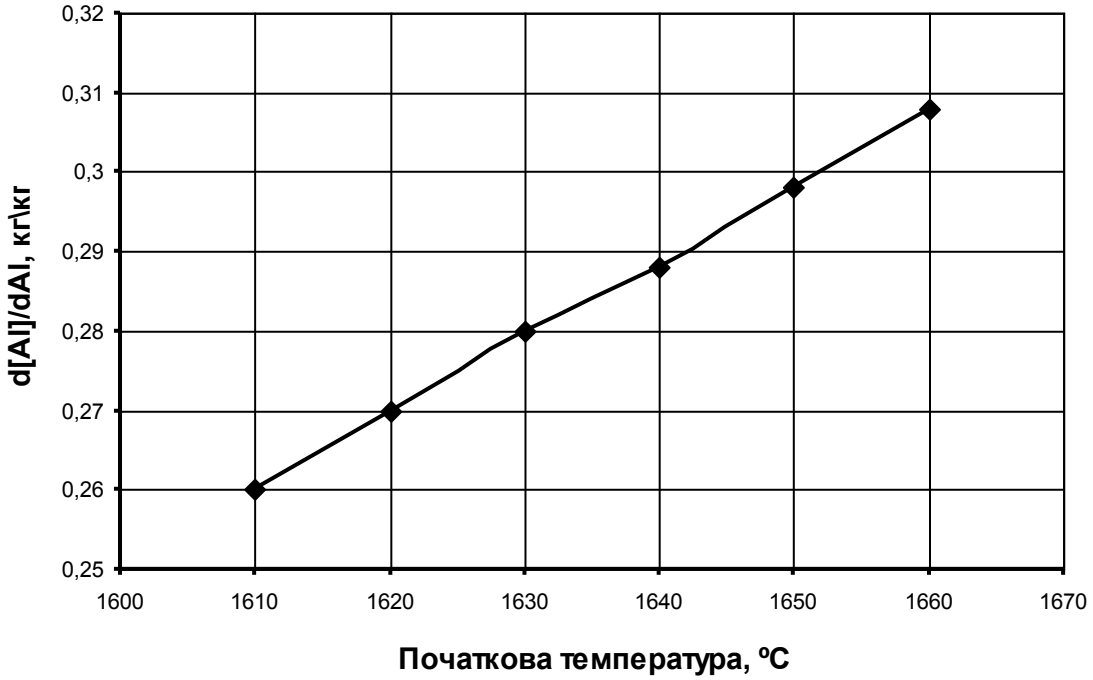

Рисунок 3.7 – Вплив початкової температури сталі 10Г2С1 на ДКЗ алюмінію

З підвищенням температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються.

Цей процес переважає в даному випадку над протилежним процесом підвищення розчинності кисню в системі при підвищенні початкової температури від 1610 до 1660 ºС.

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величини ДКЗ вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.1.5. Сталь 25ГС

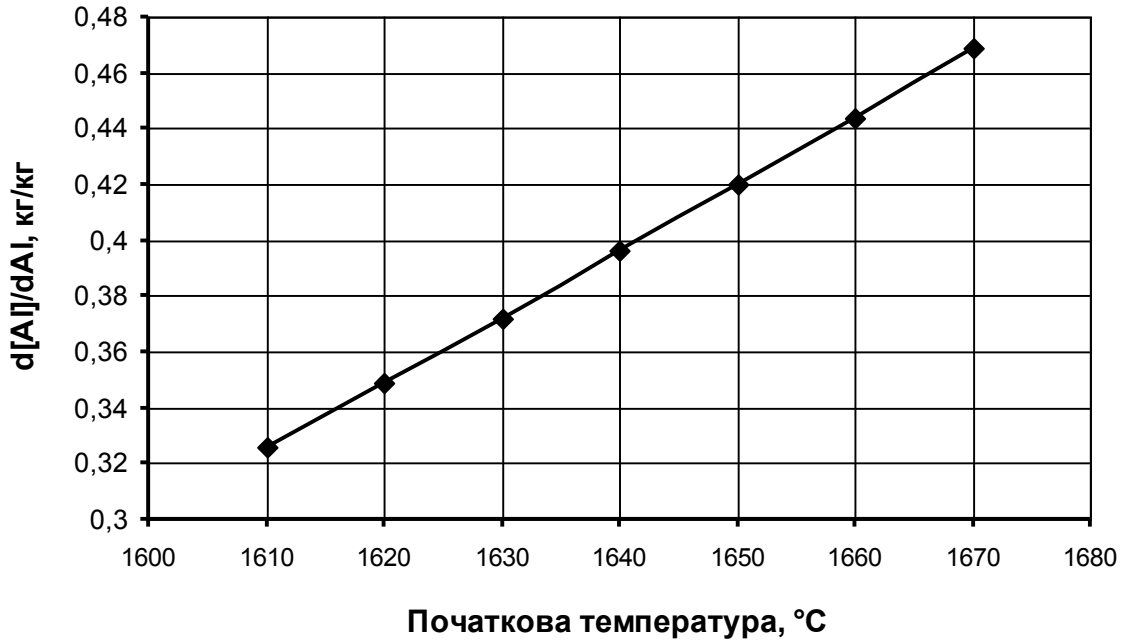

Рисунок 3.8 – Вплив початкової температури сталі 25ГС на ДКЗ алюмінію

З підвищенням температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються.

Цей процес переважає в даному випадку над протилежним процесом підвищення розчинності кисню в системі при підвищенні початкової температури від 1610 до 1670 ºС.

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величини ДКЗ вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.2 Дослідження впливу температури на масу шлаку

3.1.2.1 Сталь 10кп

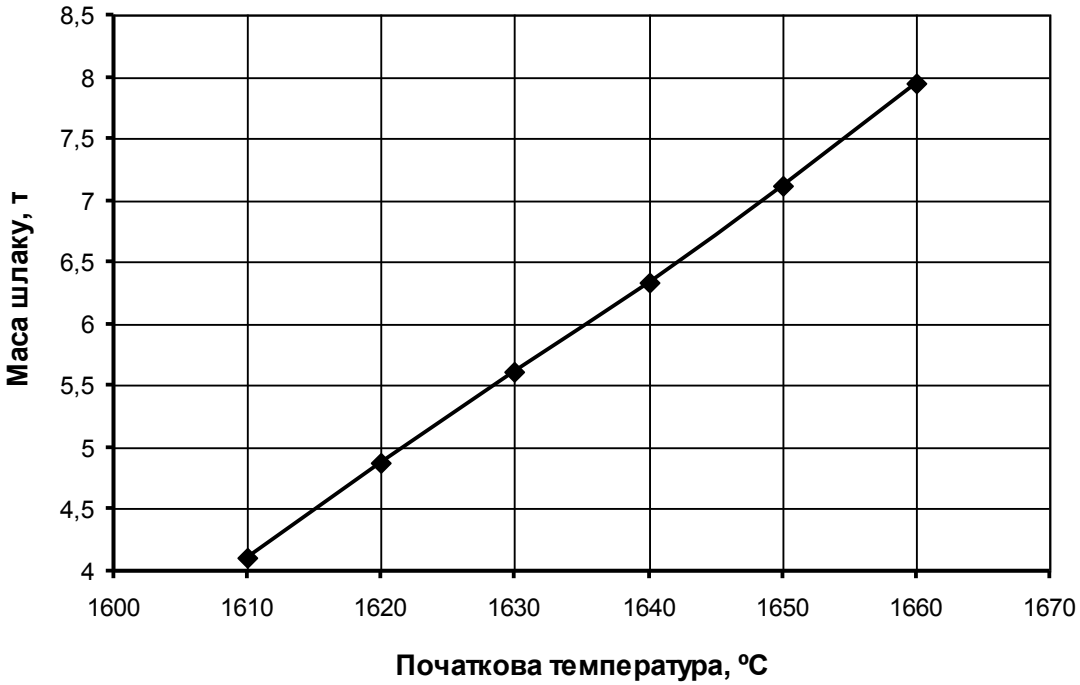

Рисунок 3.9 – Вплив початкової температури сталі 10кп на масу шлаку

Якщо висока окисленість сталі, то при підвищенні початкової температури кінцева маса шлаку збільшується, а ДКЗ при збільшенні маси шлаку зменшуються.

3.1.2.2 Сталь 5пс

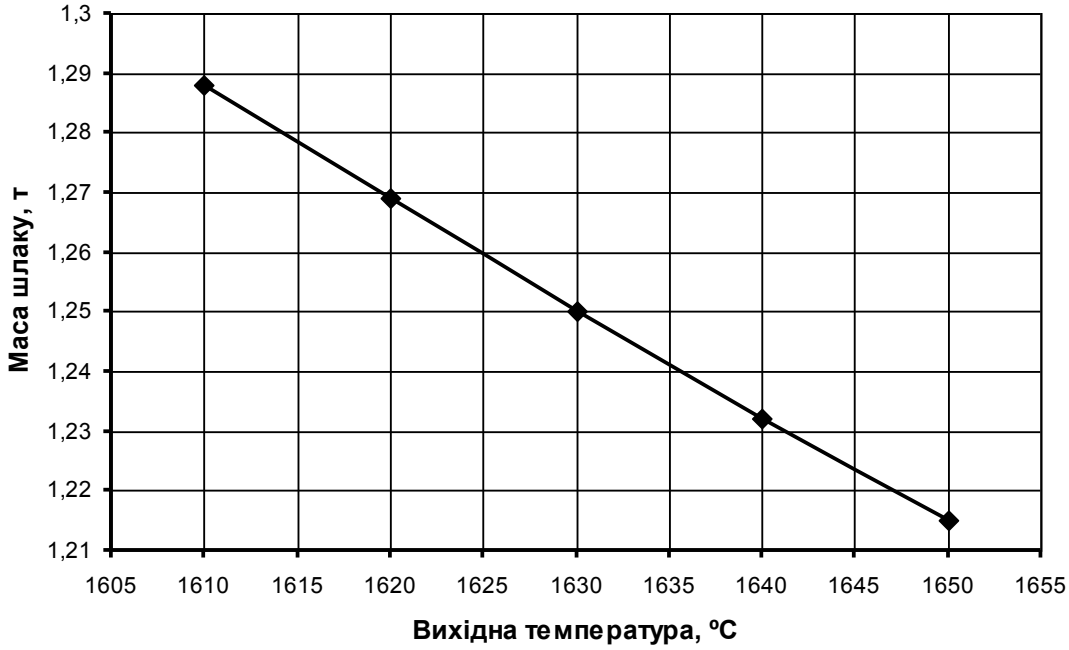

Рисунок 3.10 – Вплив початкової температури сталі 5пс на масу шлаку

При підвищенні початкової температури кінцева маса шлаку знижується, що пов'язано зі зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів і переходу їх з шлаку в метал. Це відповідає спостережуваному у виробничій практиці практично повному зникненню шлаку при температурі випуску сталі з печі.

3.1.2.3 Сталь 15ГС

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величину маси шлаку, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.2.4 Сталь 10Г2С1

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величину маси шлаку, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.2.5 Сталь 25ГС

Дослідження впливу початкової температури не виявило помітного впливу на величину маси шлаку, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.3 Дослідження впливу температури на масу газу

3.1.3.1 Сталь 10кп

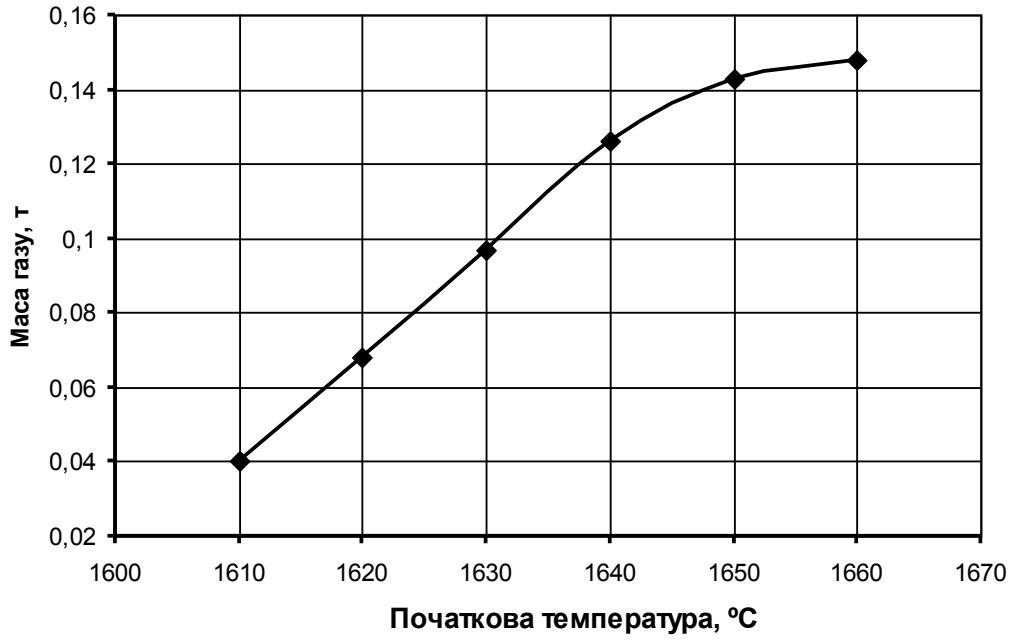

Рисунок 3.11 – Вплив початкової температури сталі 10кп на масу газу

При підвищенні початкової температури кінцева маса газу підвищується, оскільки при цьому рівновага зміщується у бік утворення монооксиду вуглецю.

3.1.3.2 Сталь 5пс

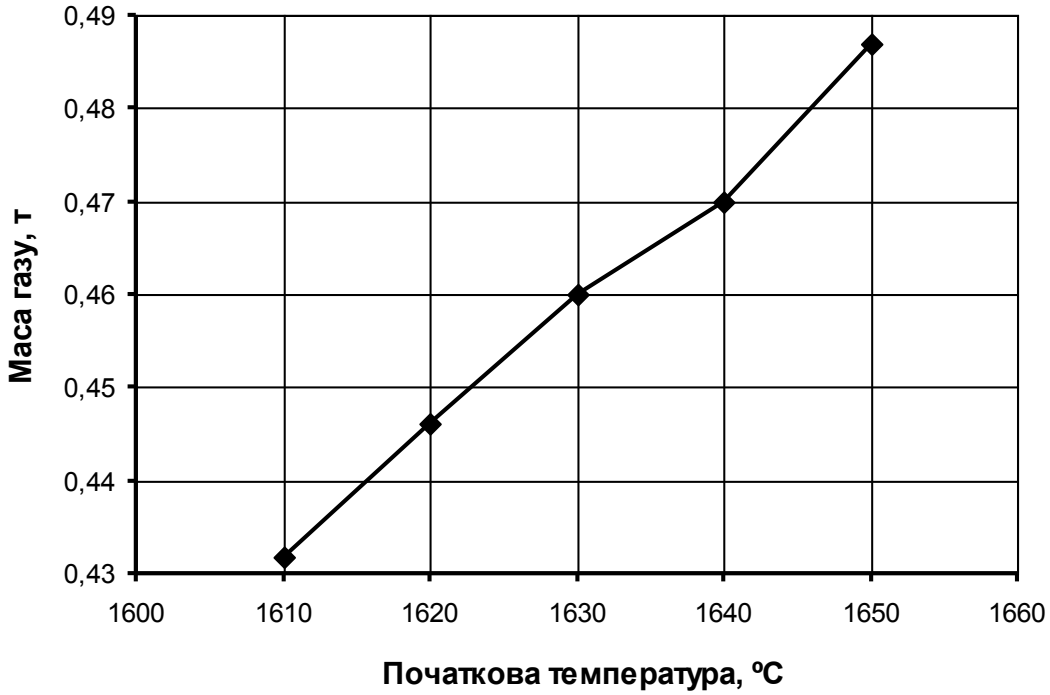

Рисунок 3.12 – Вплив початкової температури сталі 5пс на масу газу

При підвищенні початкової температури кінцева маса газу підвищується, оскільки при цьому рівновага зміщується у бік утворення монооксиду вуглецю.

3.1.3.3 Сталь 15ГС

При підвищенні початкової температури газовиділення не спостерігається, маса газу дорівнює 0, оскільки сталь повністю розкислена.

3.1.3.4 Сталь 10Г2С1

При підвищенні початкової температури газовиділення не спостерігається, маса газу дорівнює 0, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.3.5 Сталь 25ГС

При підвищенні початкової температури газовиділення не спостерігається, маса газу дорівнює 0, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.4 Дослідження впливу маси шлаку на ДКЗ

3.1.4.1 Сталь 10кп

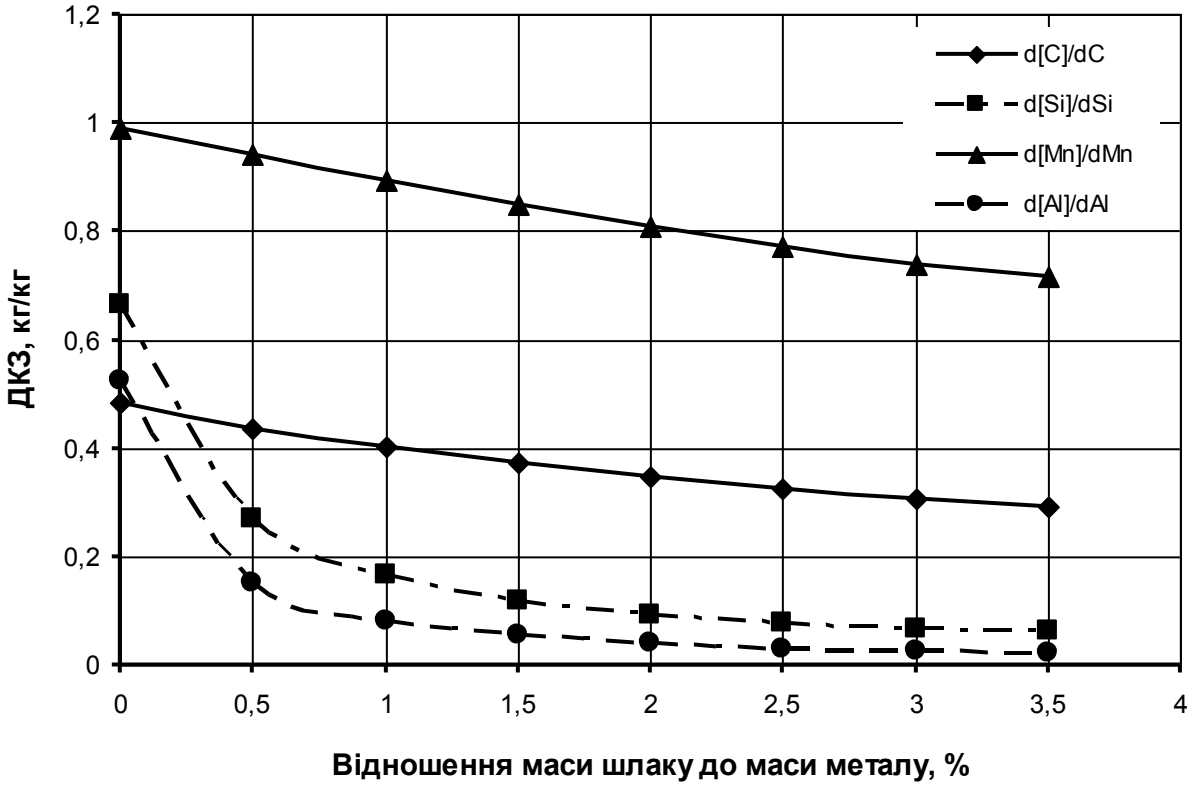

Рисунок 3.13 – Вплив кратності шлаку сталі 10кп на ДКЗ

Чим більше кратність шлаку (відношення маси шлаку до маси металу), тим більше кремнію, марганцю і алюмінію потрапляє в шлак, а вуглецю – в газову фазу.

Приведені залежності повністю відповідають виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

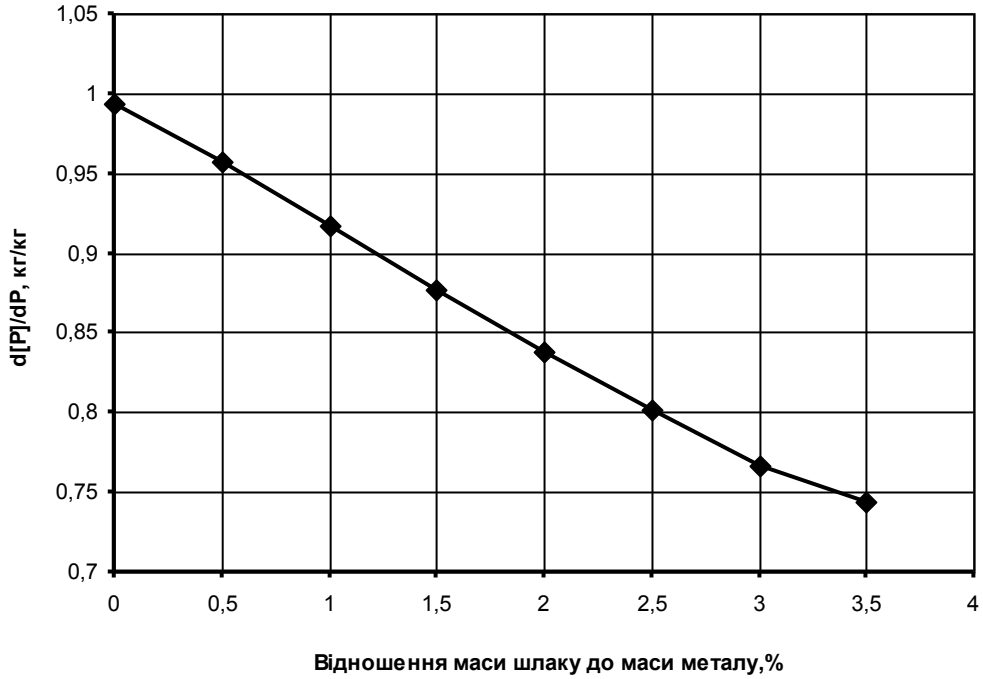

Рисунок 3.14 – Вплив кратності шлаку сталі 10кп на ДКЗ фосфору

Чим більше кратність шлаку, тим більше фосфору потрапляє в шлак.

Дослідження впливу кратності шлаку не виявило помітного впливу на величини ДКЗ сірки, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.4.2 Сталь 5пс

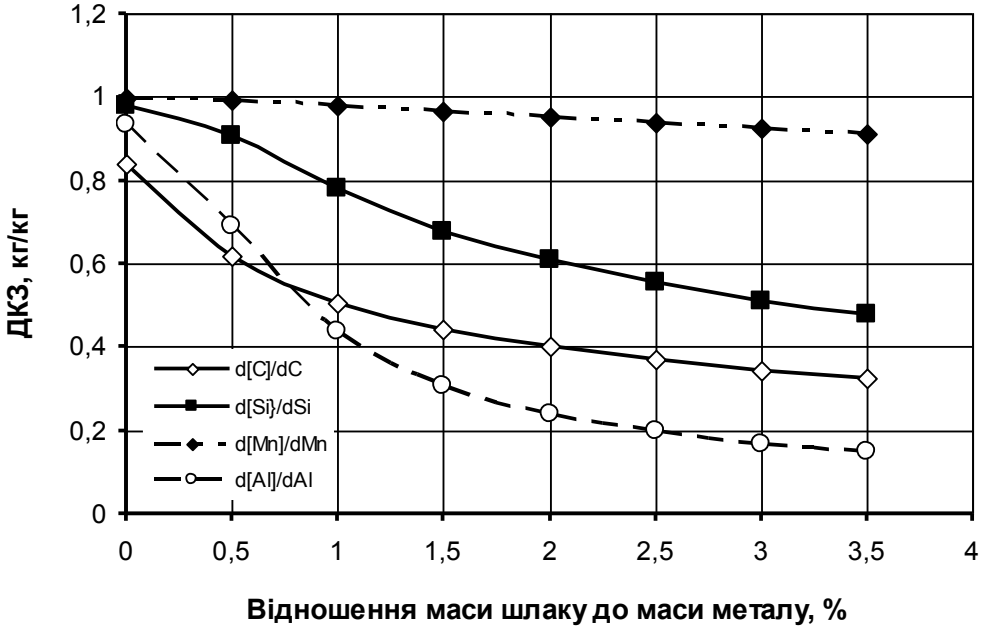

Рисунок 3.15 – Вплив кратності шлаку сталі 5пс на ДКЗ

Чим більше кратність шлаку, тим більше кремнію, марганцю і алюмінію потрапляє в шлак, а вуглецю - в газову фазу.

Приведені залежності повністю відповідають виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

Дослідження впливу відношення маси шлаку до маси металу не виявило помітного впливу на величини ДКЗ сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.4.3 Сталь 15ГС

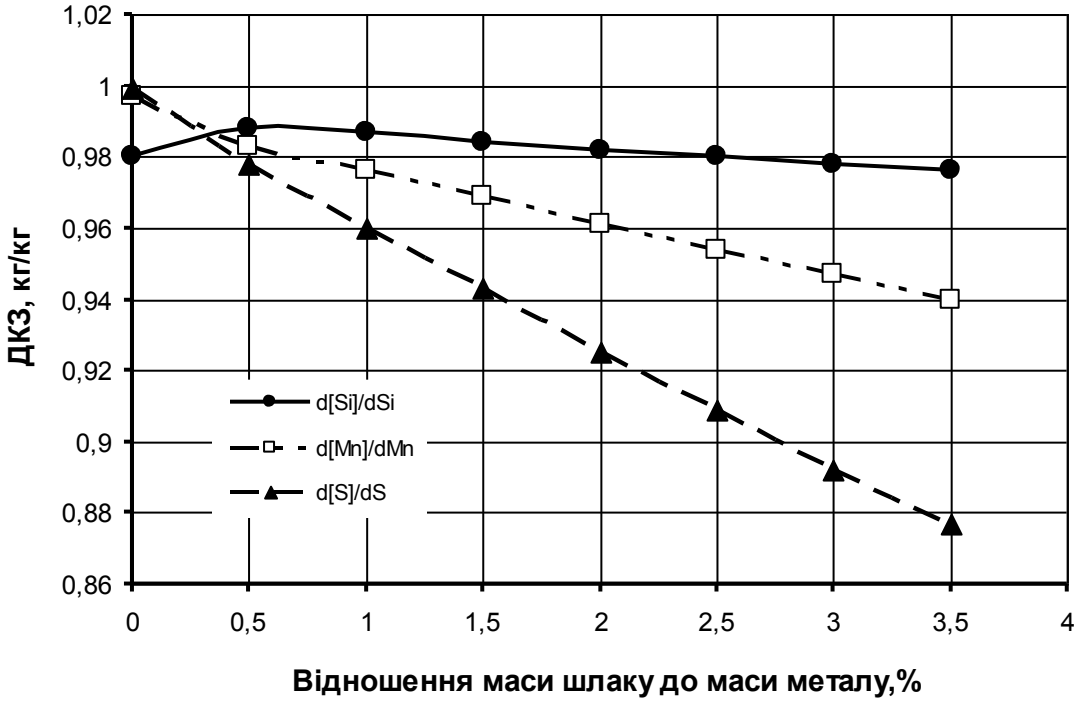

Рисунок 3.16 – Вплив кратності шлаку сталі 15ГС на ДКЗ

Чим більше кратність шлаку, тим більше кремнію, марганцю і сірки потрапляє в шлак. Як видно з приведеного графіку, в умовах відсутності шлаку десульфурація неможлива.

Приведені залежності повністю відповідають виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

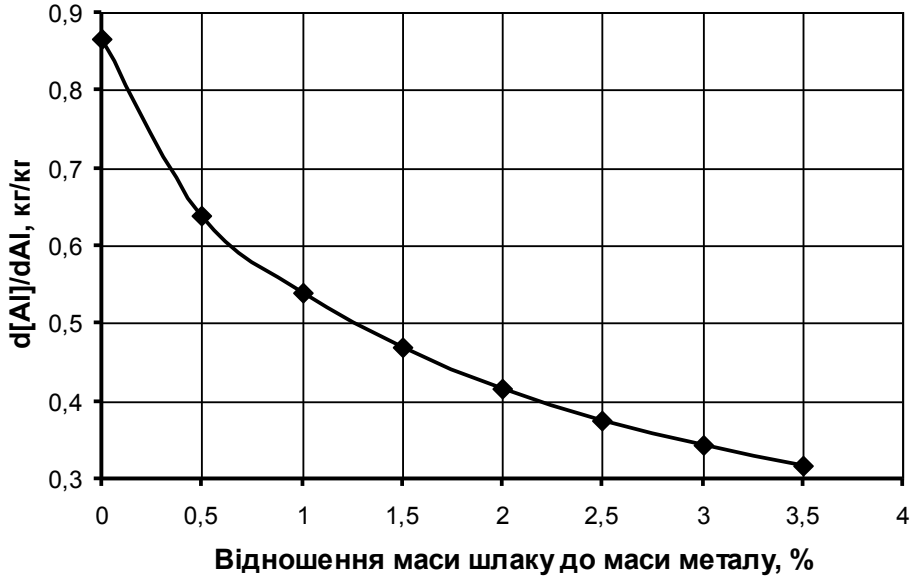

Рисунок 3.17 – Вплив кратності шлаку сталі 15ГС на ДКЗ алюмінію

Чим більше кратність шлаку, тим більше алюмінію потрапляє в шлак.

Приведена залежність повністю відповідає виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

Дослідження кратності шлаку не виявило помітного впливу на величини ДКЗ вуглецю і фосфору, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.4.4 Сталь 10Г2С1

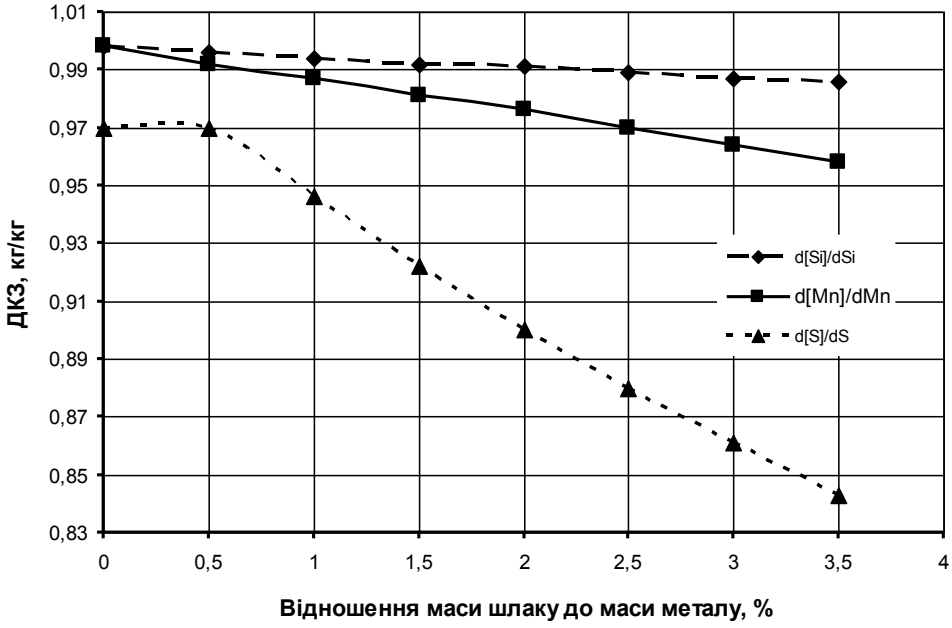

Рисунок 3.18 – Вплив кратності шлаку сталі 10Г2С1 на ДКЗ

Чим більше кратності шлаку, тим більше кремнію, марганцю і сірки потрапляє в шлак. Як видно з приведеного графіку, в умовах відсутності шлаку десульфурація неможлива.

Приведені залежності повністю відповідають виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».



Рисунок 3.19 – Вплив кратності шлаку сталі 10Г2С1 на ДКЗ алюмінію

Чим більше кратність шлаку, тим більше алюмінію, потрапляє в шлак.

Приведена залежність повністю відповідає виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

Дослідження впливу кратності шлаку на величини ДКЗ вуглецю і фосфору не виявило чіткої залежності, тому вони графічно не відображалися.

3.1.4.5 Сталь 25ГС

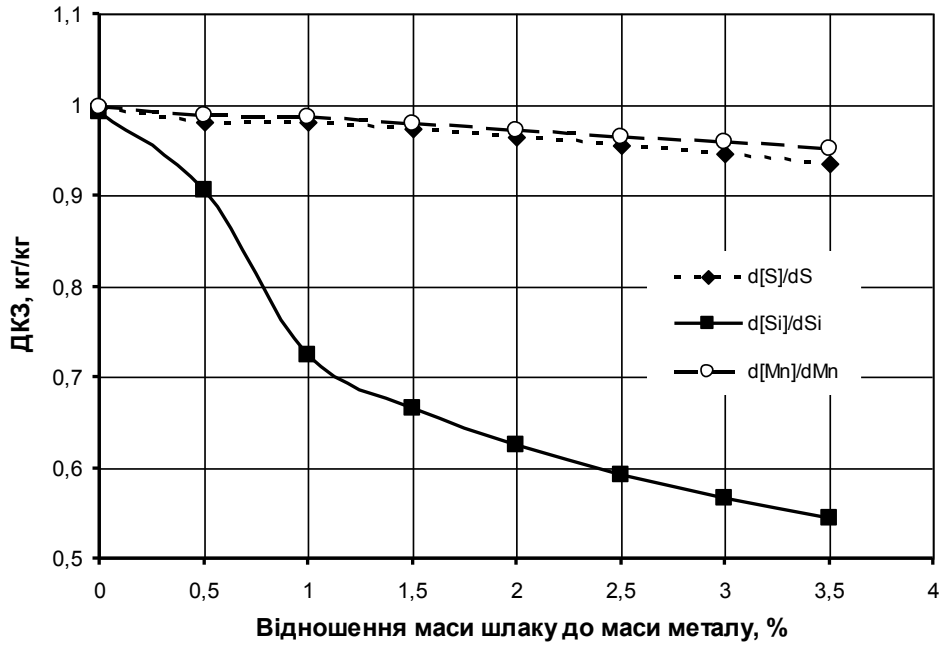

Рисунок 3.20 – Вплив кратності шлаку сталі 25ГС на ДКЗ

Чим більше кратність шлаку, тим більше кремнію, марганцю і сірки потрапляє в шлак. Як видно з приведеного графіку, в умовах відсутності шлаку десульфурація неможлива.

Приведені залежності повністю відповідають виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

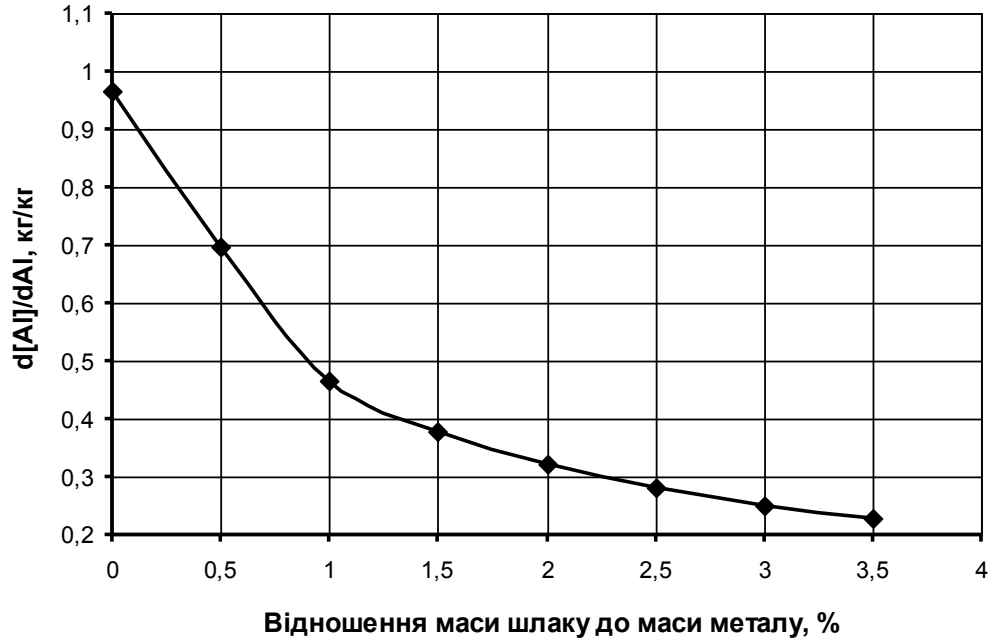

Рисунок 3.21 – Вплив кратності шлаку сталі 25ГС на ДКЗ алюмінію

Чим більше кратність шлаку, тим більше алюмінію, потрапляє в шлак.

Приведена залежність повністю відповідає виробничій практиці і теоретичним закономірностям, що лежать в основі термодинамічної моделі «метал-шлак-газ».

Дослідження впливу кратності шлаку на величини ДКЗ вуглецю і фосфору не виявило чіткої залежності, тому вони графічно не відображалися.

3.1.5 Дослідження впливу маси шлаку на кінцеву температуру

3.1.5.1 Сталь 10кп

Дослідження впливу відношення маси шлаку до маси металу не виявило помітного впливу на величину кінцевої температури після розкислювання, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.5.2 Сталь 5пс

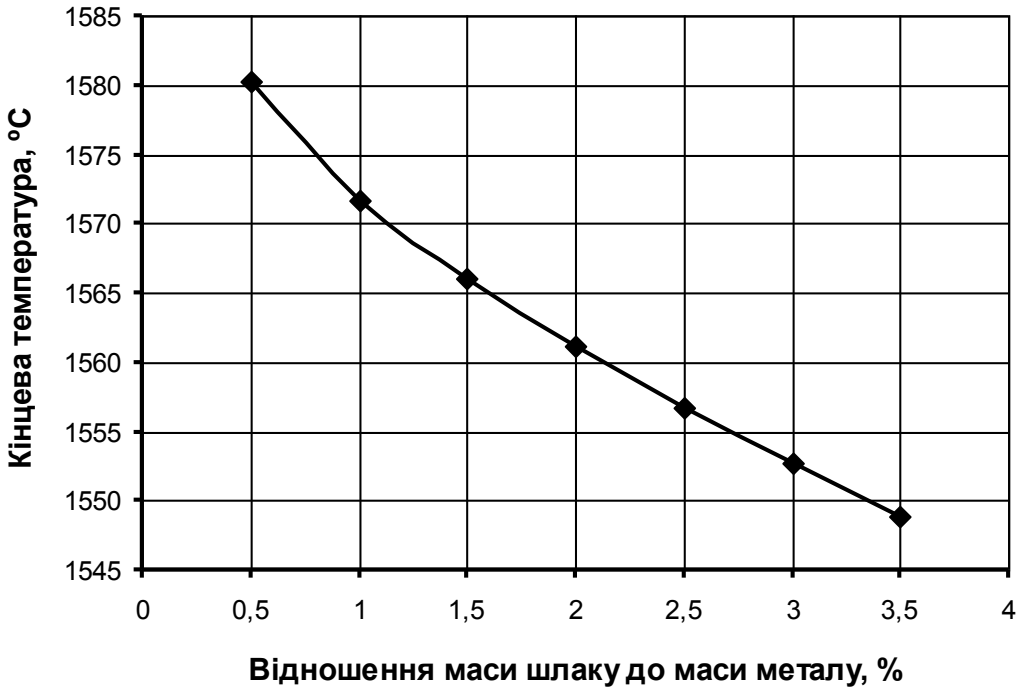

Рисунок 3.22 – Вплив кратності шлаку сталі 5пс на кінцеву температуру після розкислення

Оскільки при підвищенні маси шлаку кінцева температура після розкислення зменшується, то це може призводити до зміщення рівноваги у бік окислення елементів з позитивною валентністю, зниження їх ДКЗ.

2.1.5.3 Сталь 15ГС

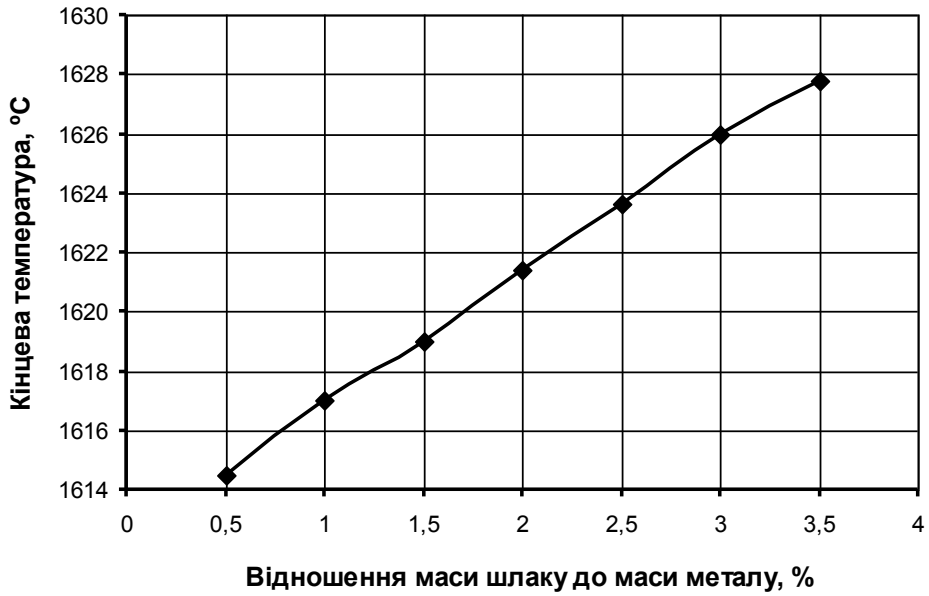

Рисунок 3.23 – Вплив кратності шлаку сталі 15ГС на кінцеву температуру після розкислення

При підвищенні маси шлаку кінцева температура після розкислення також підвищується. Це пов'язано з тим, що гарячий шлак частково компенсує зниження температури системи за рахунок нагріву і плавлення феросплавів і теплових втрат на нагрів футерування ковша. Крім того, підвищення маси шлаку призводить до збільшення теплового ефекту окислення домішок.

3.1.5.4 Сталь 10Г2С1

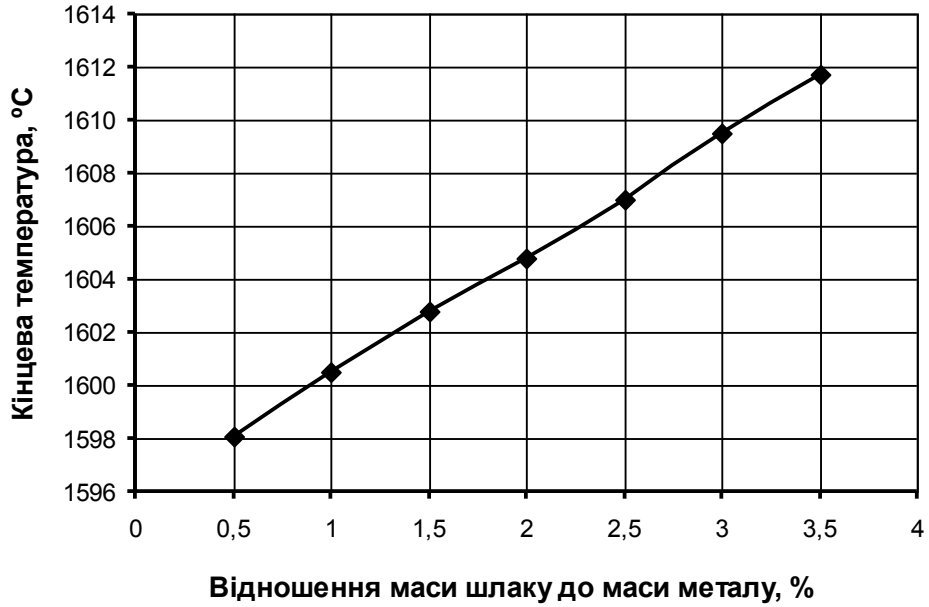

Рисунок 3.24 – Вплив кратності шлаку сталі 10Г2С1 на кінцеву температуру після розкислення

При підвищенні маси шлаку кінцева температура після розкислення також підвищується. Це пов'язано з тим, що гарячий шлак частково компенсує зниження температури системи за рахунок нагріву і плавлення феросплавів і теплових втрат на нагрів футерування ковша. Крім того, підвищення маси шлаку призводить до збільшення теплового ефекту окислення домішок.

3.1.5.5 Сталь 25ГС

Дослідження впливу відношення маси шлаку до маси металу не виявило помітного впливу на величину кінцевої температури після розкислювання, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.6 Дослідження впливу маси шлаку на масу газу

3.1.6.1 Сталь 10кп

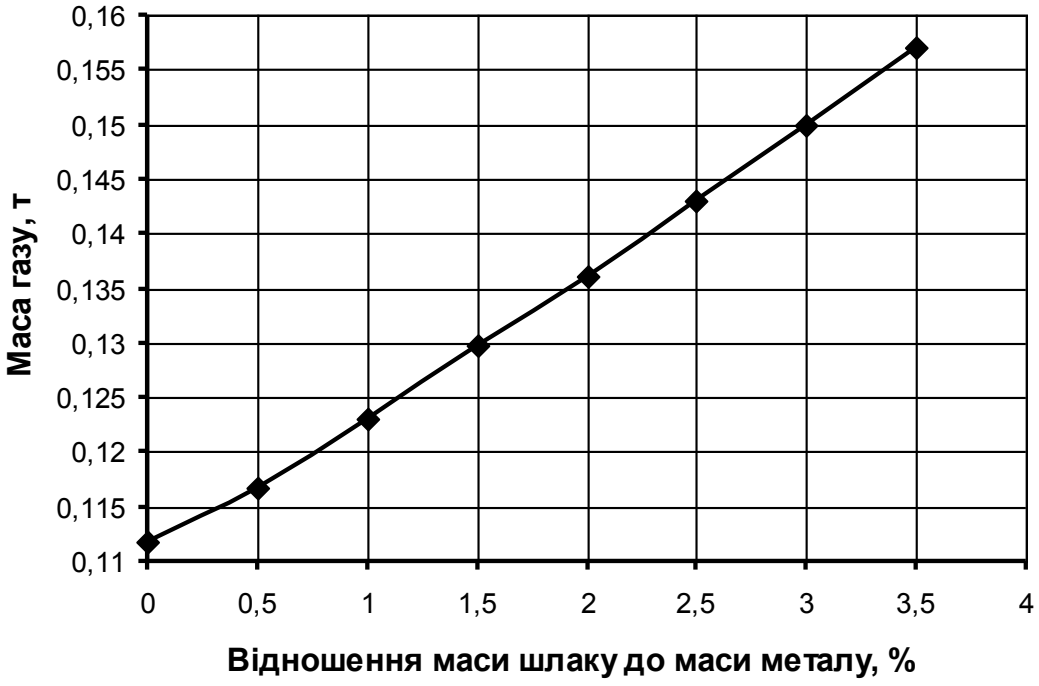

Рисунок 3.25 – Вплив початкової маси шлаку сталі 10кп на кінцеву масу газу

При підвищенні маси шлаку кінцева маса газу зростає у зв'язку зі збільшенням загального змісту (FeO) в системі «метал-шлак-газ» і взаємодією кисню (FeO) і інших оксидів з розчиненим в металі вуглецем з утворенням монооксиду вуглецю по реакції (FeO) + [C] = [Fe] + {CO}.

3.1.6.2 Сталь 5пс

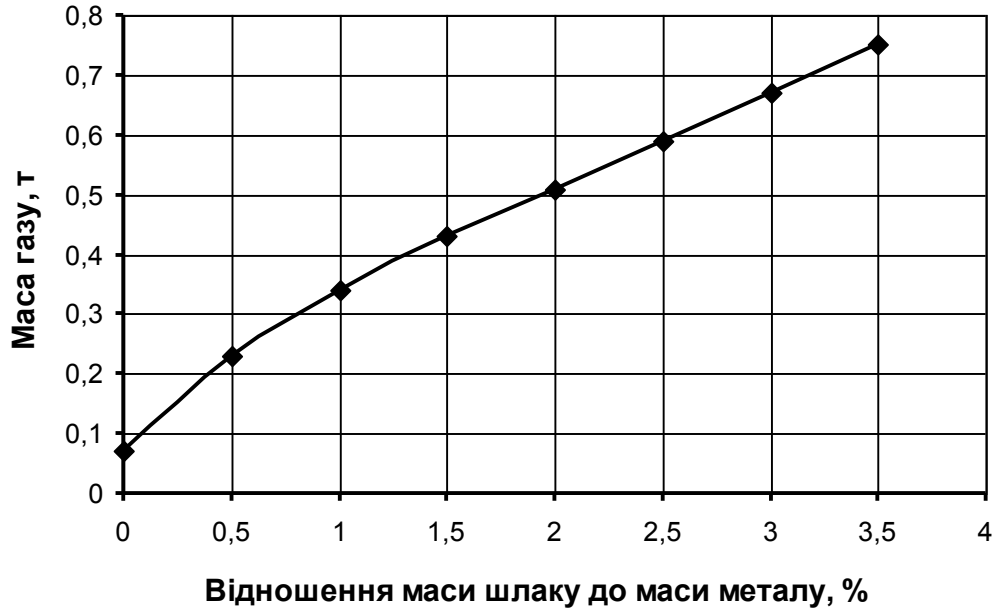

Рисунок 3.26 – Вплив початкової маси шлаку сталі 5пс на кінцеву масу газу

При підвищенні маси шлаку кінцева маса газу зростає у зв'язку зі збільшенням загального змісту (FeO) в системі «метал-шлак-газ» і взаємодією кисню (FeO) і інших оксидів з розчиненим в металі вуглецем з утворенням монооксиду вуглецю по реакції (FeO) + [C] = [Fe] + {CO}.

3.1.6.3 Сталь 15ГС

При підвищенні маси шлаку газовиділення не спостерігається, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.6.4 Сталь 10Г2С1

При підвищенні маси шлаку газовиділення не спостерігається, тому ця залежність графічно не відображалася.

3.1.6.5 Сталь 25ГС

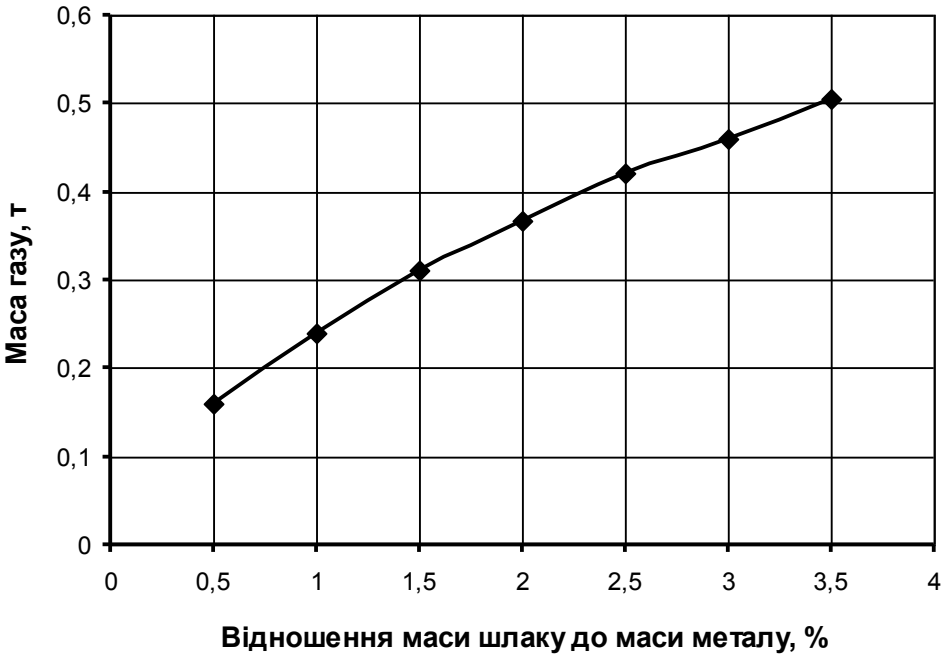

Рисунок 3.27 – Вплив початкової маси шлаку сталі 25ГС на кінцеву масу газу

При підвищенні маси шлаку кінцева маса газу зростає у зв'язку зі збільшенням загального змісту (FeO) в системі «метал-шлак-газ» і взаємодією кисню (FeO) і інших оксидів з розчиненим в металі вуглецем з утворенням монооксиду вуглецю по реакції (FeO) + [C] = [Fe] + {CO}.

3.1.7 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на ДКЗ

3.1.7.1 Сталь 5пс

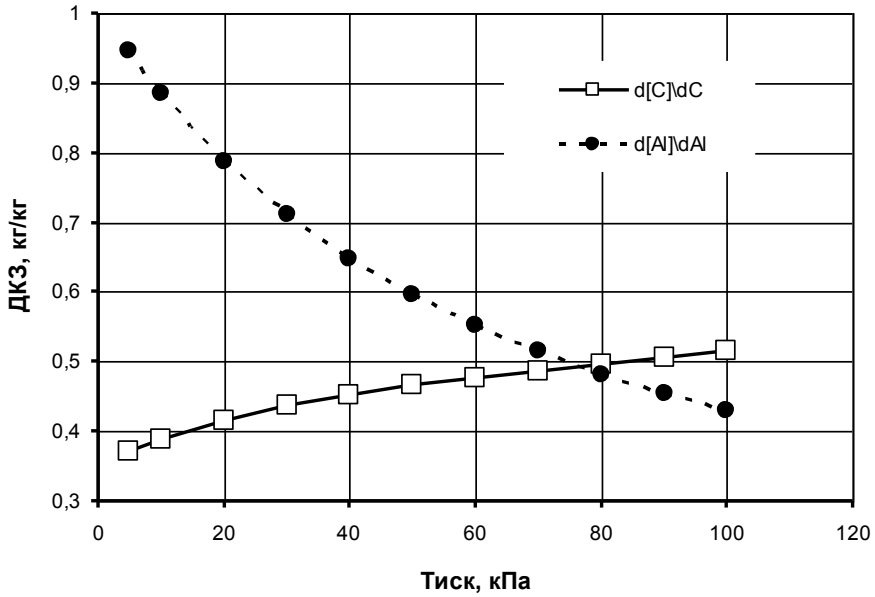

Рис. 3.28 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 5пс на ДКЗ

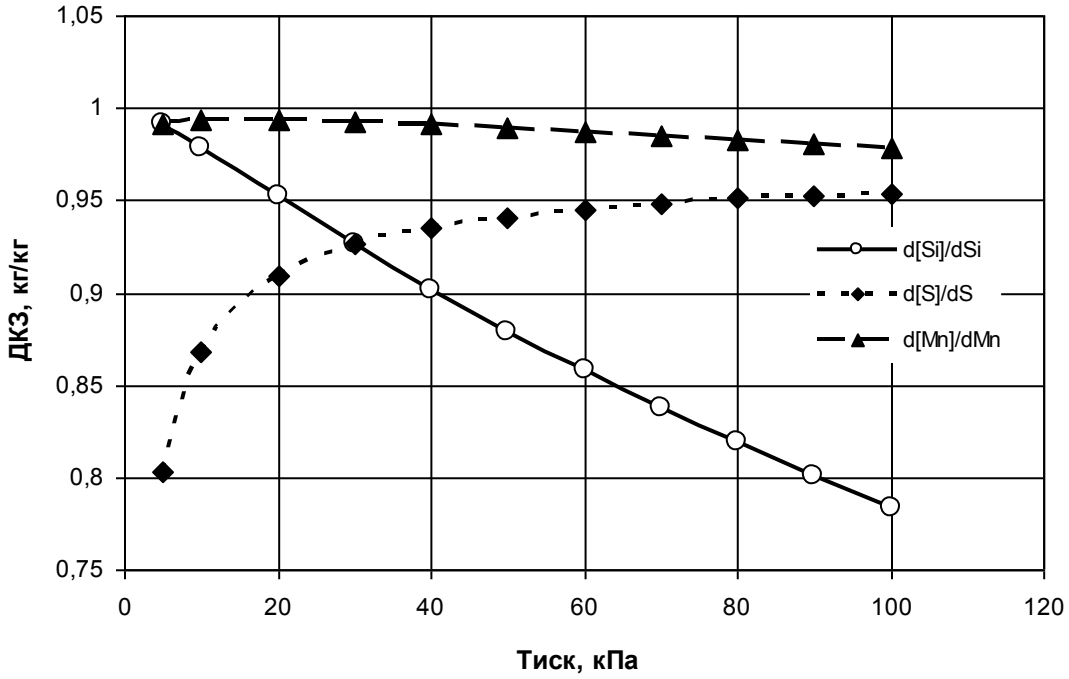

Рис. 3.29 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 5пс на ДКЗ

Складна залежність ДКЗ вуглецю від тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO (при тиску від 50 до 80 кПа); 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення при тисках від 1 до 50 кПа.

Залежність ДКЗ алюмінію від тиску пояснюється протіканням лише другого процесу, тобто зниженням окислености системи в усьому діапазоні тисків.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 0,01 т. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

Дослідження впливу тиску не виявило помітного впливу на величини ДКЗ марганцю, фосфору, кремнію і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

3.1.7.2 Сталь 25ГС

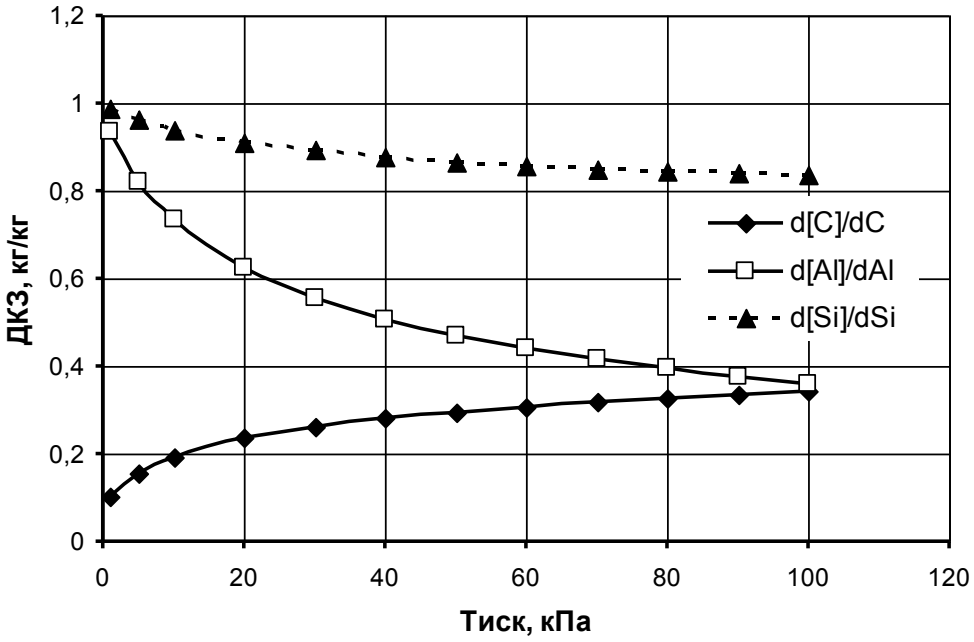

Рис. 3.30 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 25ГС на ДКЗ

Складна залежність ДКЗ вуглецю від тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO (при тиску від 50 до 80 кПа); 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення при тисках від 1 до 50 кПа.

Залежність ДКЗ алюмінію від тиску пояснюється протіканням лише другого процесу, тобто зниженням окислености системи в усьому діапазоні тисків.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 0,01 т. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

Дослідження впливу тиску не виявило помітного впливу на величини ДКЗ марганцю, фосфору, кремнію і сірки, тому ці залежності графічно не відображались.

3.1.8 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на кінцеву температуру

3.1.8.1 Сталь 5пс

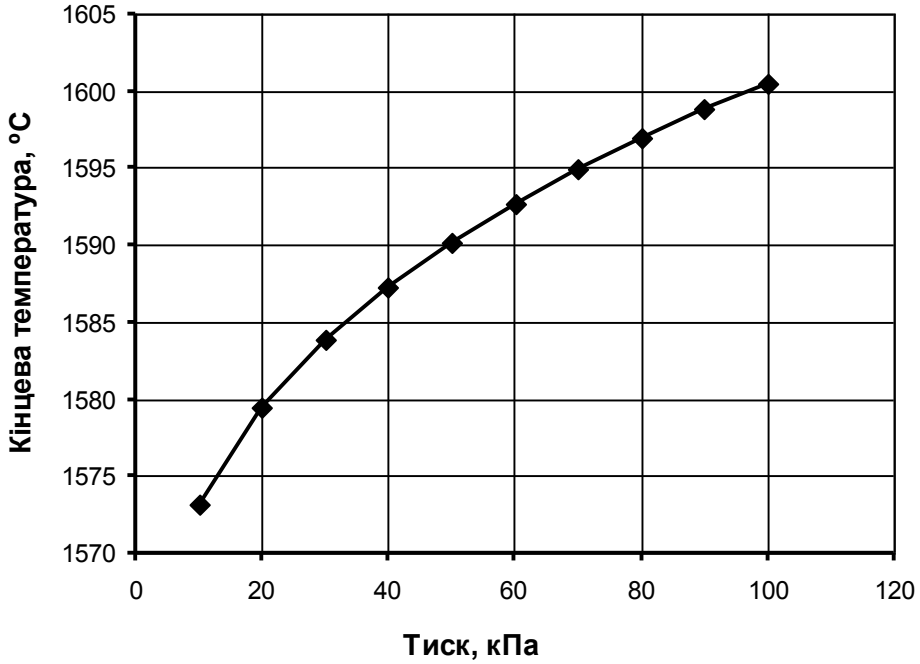

Рис. 3.31 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 5пс на кінцеву температуру після розкислення

При зниженні тиску температура системи закономірно знижується з огляду на те, що реакція вакуумно-вуглецевого розкислення [C] + [O] = {CO} є ендотермічною.

3.1.8.2 Сталь 25ГС

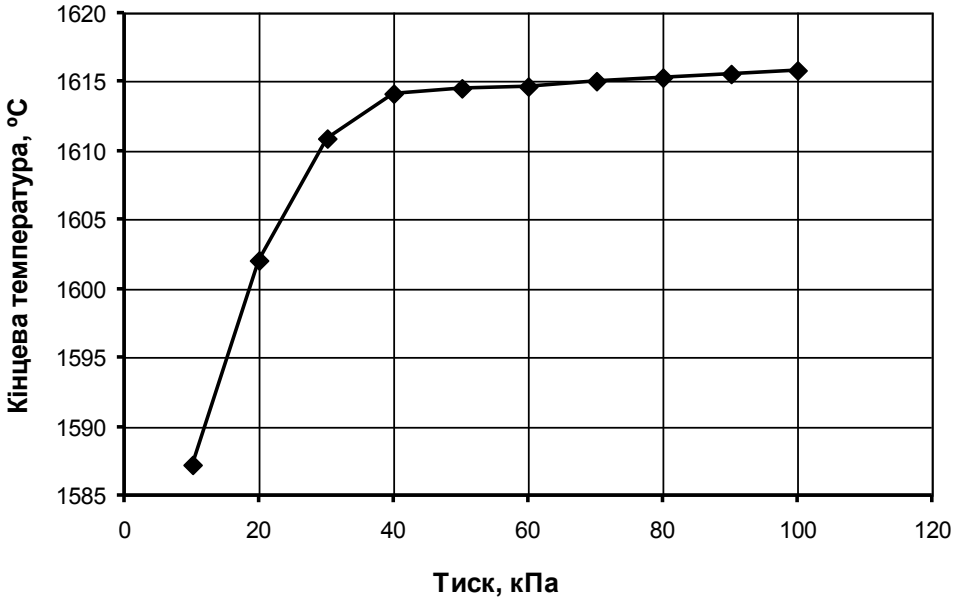

Рис. 3.32 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 25ГС на кінцеву температуру після розкислення

При зниженні тиску температура системи закономірно знижується з огляду на те, що реакція вакуумно-вуглецевого розкислення [C] + [O] = {CO} є ендотермічною.

3.1.9 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на масу шлаку

3.1.9.1 Сталь 5пс

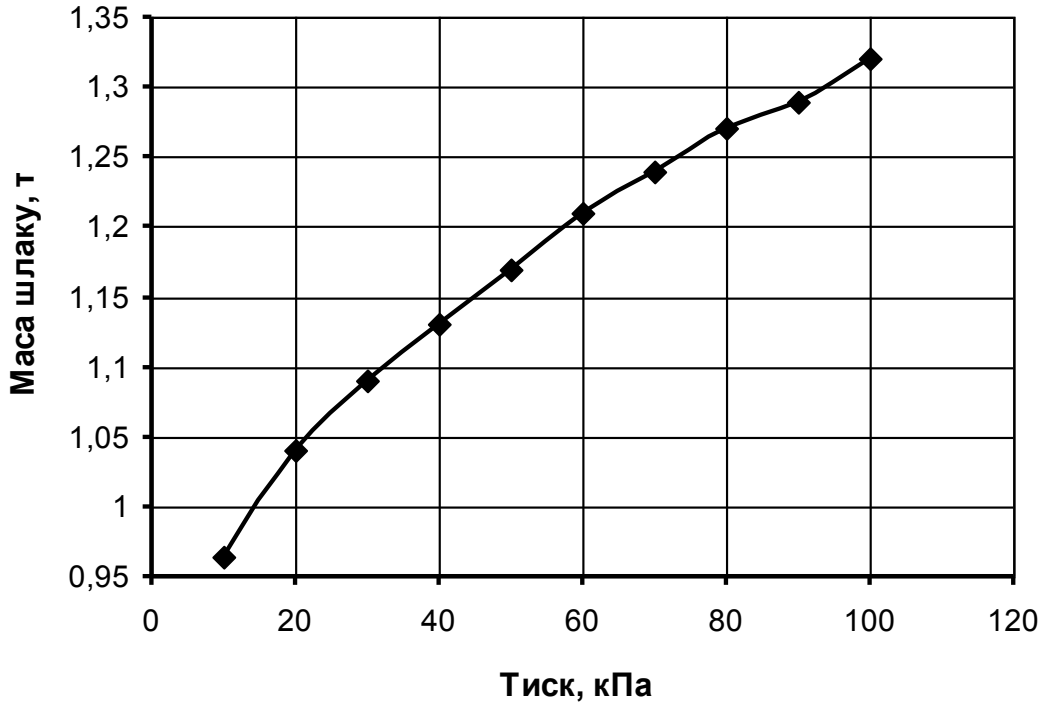

Рис. 3.33 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 5пс на масу шлаку

При вакуумно-вуглецевому розкислюванні сталі 5пс кисень видаляється з системи у вигляді {CO} і маса шлаку таким чином закономірно знижується через відновлення елементів і переходу їх у метал.

3.1.9.2 Сталь 25ГС

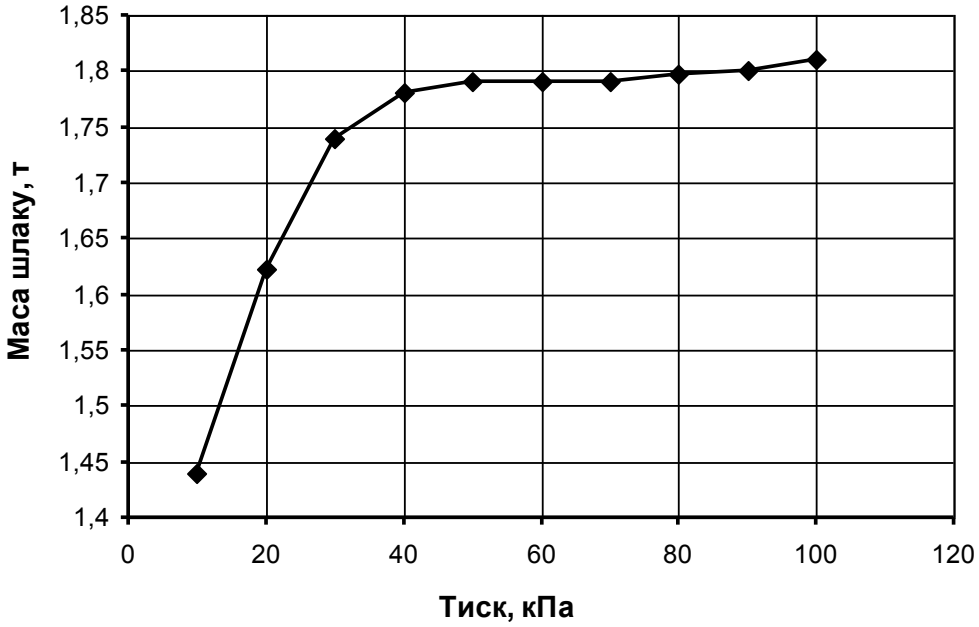

Рис. 3.34 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 25ГС на масу шлаку

При вакуумно-вуглецевому розкислюванні сталі 25ГС кисень видаляється з системи у вигляді {CO} і маса шлаку таким чином закономірно знижується через відновлення елементів і переходу їх в метал.

3.1.10 Дослідження впливу тиску при вакуумуванні на масу газу

3.1.10.1 Сталь 5пс

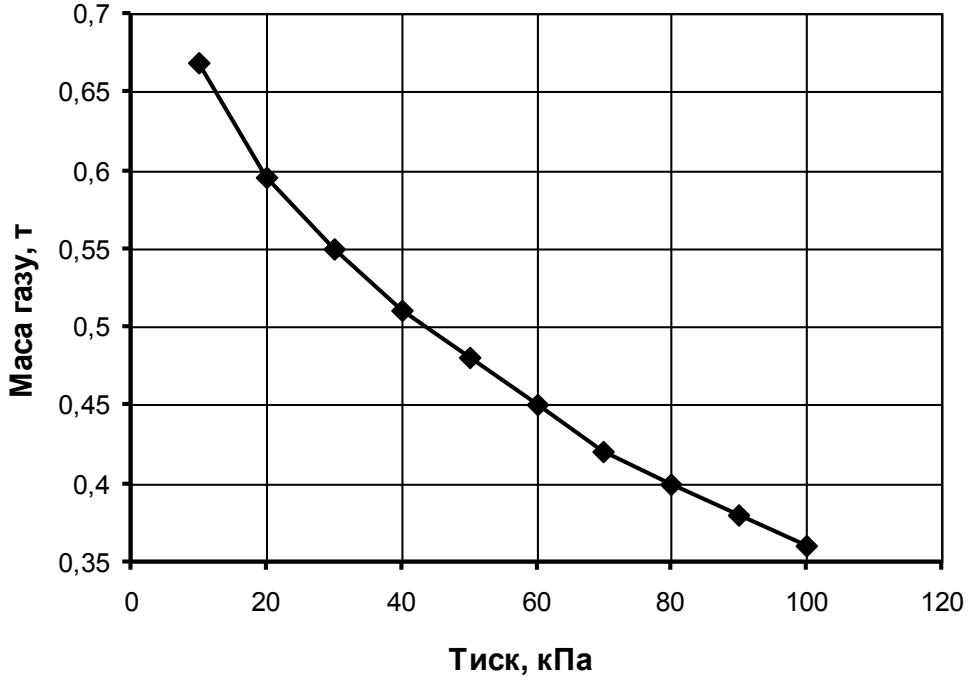

Рис. 3.35 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 5пс на масу газу

Процес вакуумно-вуглецевого розкислювання грунтований на значному виділенні СО в результаті реакції [С] + [О] = {СО}, тому маса газу при зниженні тиску закономірно росте.

3.1.10.2 Сталь 25ГС

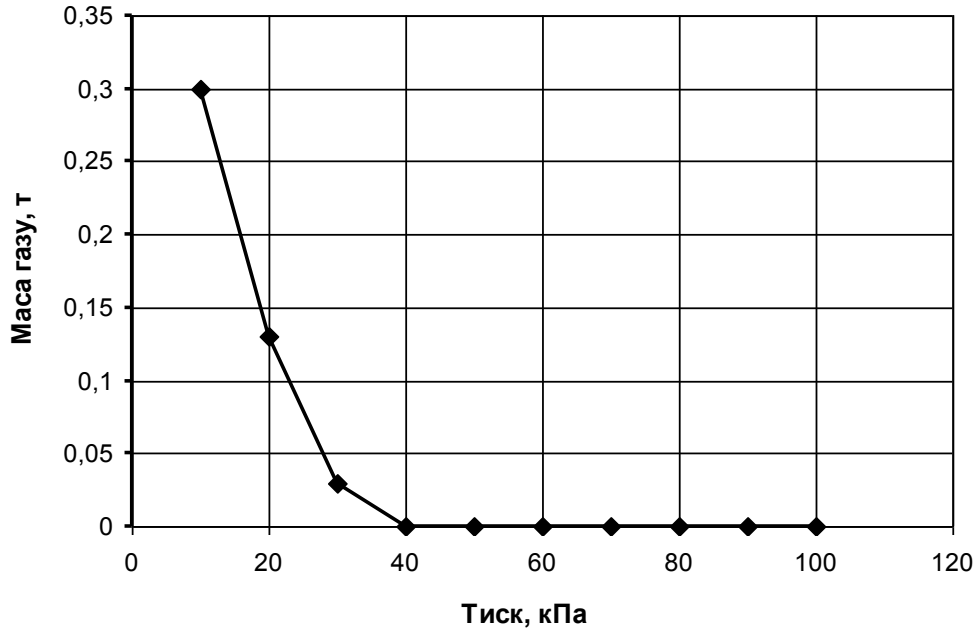

Рис. 3.36 – Вплив тиску при вакуумуванні сталі 25ГС на масу газу

Процес вакуумно-вуглецевого розкислювання грунтований на значному виділенні СО в результаті реакції [С] + [О] = {СО}, тому маса газу при зниженні тиску закономірно росте.

3.1.11 Дослідження зміни ДКЗ у процесі розкислення

3.1.11.1 Сталь 10кп

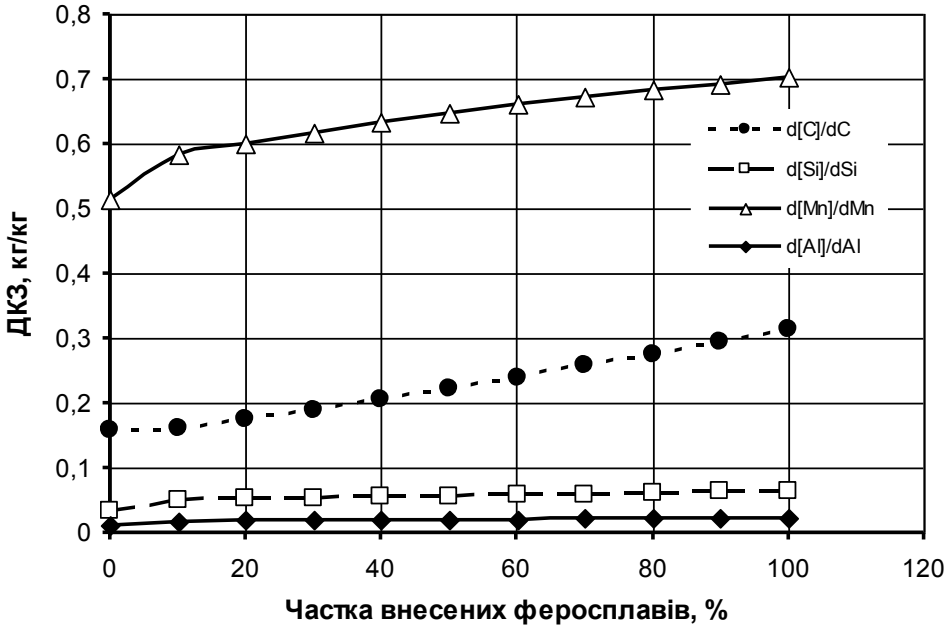

Рис. 3.37 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ при легування сталі 10кп при температурі 1630ºС

Добавки повністю засвоюються металом, але на ранніх стадіях, коли тільки вносять перші порції феросплавів й вони починають розчинятися, ДКЗ мають більш низькі значення, ніж коли вносяться останні порції феросплавів.

Перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

3.1.11.2 Сталь 25ГС

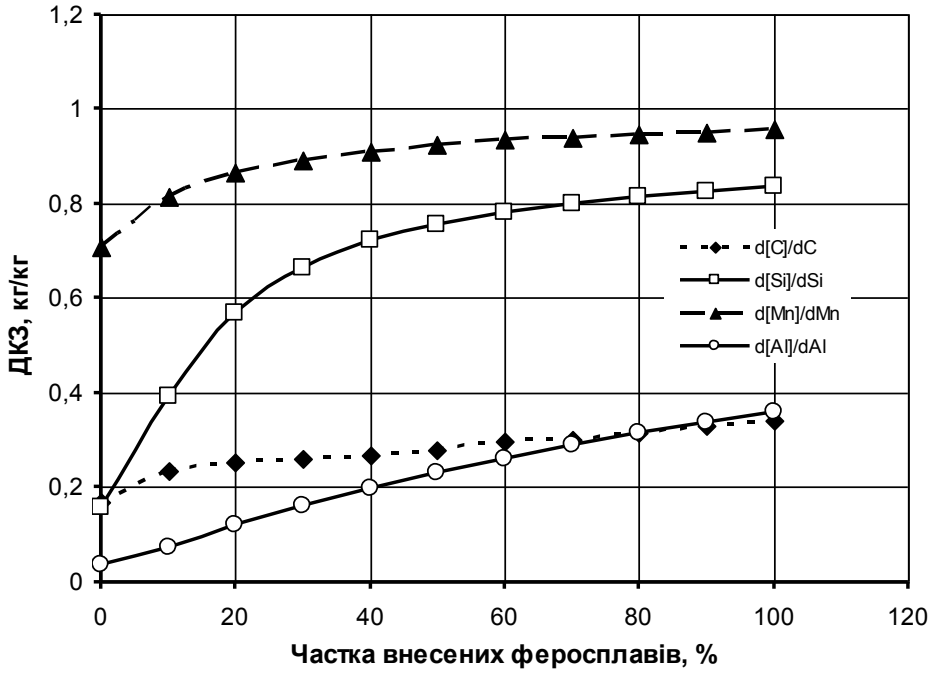

Рис. 3.38 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ при легування сталі 25ГС при температурі 1630ºС

Добавки повністю засвоюються металом, але на ранніх стадіях, коли тільки вносять перші порції феросплавів й вони починають розчинятися, ДКЗ мають більш низькі значення, ніж коли вносяться останні порції феросплавів.

Щодо марганцю, який має найменшу спорідненість з киснем. Внесені 10% феросплавів вже виявляються достатніми для того, щоб ДКЗ марганцю був досить високим.

Як і для інших сталей, перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

3.2 Аналіз, обговорення і порівняння отриманих результатів

Таким чином, розглянуті залежності диференціальних коефіцієнтів засвоєння від різних параметрів системи «метал-шлак-газ» дозволяють ефективно враховувати вплив температури, тиску, співвідношення маси шлаку до маси металу, міри розкисленості на фактичне засвоєння елементів для ряду сталей.

Отримані залежності є частиною термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» і відповідних алгоритмів, покладених в основу учбово-дослідницької програми «Excalibur» і аналогічних програм, що працюють в якості верхнього рівня систем управління сталеплавильним виробництвом.

Дослідження, проведені за допомогою обчислювального експерименту дозволили виявити наступні особливості поведінки системи «метал-шлак-газ»:

- з підвищенням температури системи збільшується маса газу, що утворюється, що приводить, зокрема, до зниження диференціальних коефіцієнтів засвоєння по вуглецю;
- з підвищенням температури системи спостерігається збільшення диференціальних коефіцієнтів засвоєння по фосфору, марганцю, кремнію і алюмінію в киплячих і напівспокійних сталях, що пов'язано зі зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів з позитивною валентністю;

- зміна температури системи практично не впливає на диференціальні коефіцієнти засвоєння по сірці;
- підвищення початкової температури системи закономірно призводить до підвищення її кінцевої температури. Деяке зменшення кінцевої температури відносно початкової пов'язане з втратами тепла на нагрів і плавлення феросплавів, а також на нагрів футерування ковша;
- підвищення температури системи призводить до зниження маси шлаку, що разом зі зміщенням рівноваги, є однією з причин підвищення диференціальних коефіцієнтів засвоєння ряду елементів;
- підвищення відношення маси шлаку до маси металу однозначно призводить до зниження диференціальних коефіцієнтів засвоєння по усіх елементах. При цьому вуглець йде в газову фазу, а такі елементи як кремній, алюміній, марганець і хром - в шлак;
- підвищення відношення маси шлаку до маси металу дещо збільшує кінцеву температуру системи, що пов'язано зі збільшенням теплового ефекту окислення домішок і тим, що гарячий шлак частково компенсує зниження температури системи за рахунок теплових втрат і нагріву, і плавлення феросплавів;
- збільшення відношення маси шлаку до маси металу закономірно призводить до відносного збільшення маси кінцевого шлаку. Деяке зменшення маси кінцевого шлаку відносно його початкової маси пояснюється частковим відновленням заліза марганцю, а в деяких випадках і кремнію при розкисленні і легуванні;
- збільшення відношення маси шлаку до маси металу призводить до відносного збільшення маси газу у зв'язку зі взаємодією кисню (FeO) і інших оксидів з розчиненим в металі вуглецем з утворенням монооксиду вуглецю по реакції (FeO) + [C] = [Fe] + {CO};
- встановлена складна залежність диференціальних коефіцієнтів засвоєння вуглецю від тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів : 1) інтенсивним утворювнням CO

при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням загальної окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення при тисках від 1 до 50 кПа;

- зниження тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні призводить до закономірного зниження температури системи, оскільки реакція вакуумно-вуглецевого розкислення є ендотермічною;
- зниження тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні призводить до відносного зниження маси шлаку, оскільки кисень видаляється з системи у вигляді CO і маса шлаку, таким чином, закономірно знижується із-за відновлення елементів і переходу їх в метал;
- зниження тиску закономірно призводить до відносного збільшення маси газу, що утворюється, в результаті зміщення рівноваги реакції [C] + [O] = {CO} управо.

Облік диференціальних коефіцієнтів засвоєння безпосередньо спрямований на ефективне використання і економію дорогих феросплавів.

Крім того, досліджені залежності диференціальних коефіцієнтів засвоєння від тиску і температури дозволяють спроектувати нові і удосконалити існуючі процеси позапічної обробки на установках піч-ківш, у тому числі із застосуванням модулів для вакуумно-вуглецевого розкислення металу.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища киснево-конверторного цеху

При проведенні киснево-конверторного процесу мають місце такі шкідливі виробничі фактори: тепловиділення від технологічного обладнання та розплавлених металу і шлаку; гази, що утворюються при продуванні конвертора , роботі газових пальників в котлах-утилізаторах і при сушці футерування відремонтованих конверторів і сталерозливних ковшів; пил, що утворюється при транспортуванні сипких матеріалів, продуванні конвертора, сливі чавуну з ковша в конвертор, випуску сталі і шлаку з конвертора, ломці футерування конвертора і ковшів, шум, який утворюється вентиляційними системами в обслуговуваних приміщеннях, вібрація, яка утворюється від роботи ваговитих конструкцій, електричний струм, іонізуючі випромінювання.

Теплові виділення. Джерелами теплових виділень є кожух і розжарена горловина конвертора, гази, що відходять, розплавлений чавун, рідка сталь і шлак. У розливному прольоті велика кількість тепла і нагрітих газів виділяє розплавлений метал, що подається у виливниці. Інтенсивність випромінювання на цих ділянках складає від 300 до 9000 ккал/ (м2·год). Особливо великому тепловому опроміненню піддаються конверторщики при узятті проби, вимірі температури, огляді і ремонті горловини конвертора.

Температура повітря при проведенні окремих операцій навіть на відстані 2-3 м від джерела тепловипромінювання дуже висока, особливо в літній час(досягає 45-50 °С) при зовнішній температурі повітря +23 °С.

Тепловий ефект дії опромінення залежить від довжини хвилі і інтенсивності потоку випромінювання, площі опромінюваної ділянки організму людини, тривалості опромінення і уривчастості його, кута падіння променів, одягу.

Променистa енергія, потрапляючи на людину, впливає, передусім, на незахищені частини тіла (обличчя, руки, шию), причому, якщо конвективне тепло

впливає, головним чином, на зовнішні шкірні покриви, то променисте тепло може проникати на деяку глибину в тканині.

Теплове відчуття виникає вже при інтенсивності опромінення 0,08 Вт/м^2 (при довжині хвилі 2,9 мкм) або 1,7 Вт/м^2 (при довжині хвилі 1,3 мкм); при останній довжині хвилі опромінення інтенсивністю 5,4 Вт/м^2 викликає приємне відчуття.

При тривалому перебуванні людини в зоні теплового променистого потоку, як і при систематичній дії високої температури, різко порушується тепловий баланс в організмі, порушується робота терморегулюючого апарату, посилюється діяльність серцево-судинної і дихальної систем, посилюється потовиділення, відбуваються втрати потрібних організму солей, що у свою чергу викликає судорожну хворобу, теплову гіпотермію або перегрівання.

Перегрівання викликає головний біль, шум у вухах, спотворення кольорового сприйняття, нудоту, блювоту, підвищення температури тіла.

Виробничий пил. Пил, що виділяється з конвертора, має щільність 4,3 г/см^3; його кількість і хімічний склад змінюються в широких межах і залежать від багатьох чинників: від складу чавуну і присадок, об'єму конвертора, висоти фурми над рівнем металу, від витрати і тиску кисню. Середня кількість пилу, що міститься в конверторних газах, складає 25-30 кг/т.

Дослідження міри дисперсності пилу показують, що біля 80% часток мають розміри до 5 мкм. Кількість пилу з частками більше 1 мкм складає усього 5-15%. Такий пил повітряними потоками відноситься від конвертора на великі відстані і довгий час не осідає.

Пил виділяється при перевантаженні шихтових матеріалів, кладці конверторів і сталерозливних ковшів, при ломці футерування і їх ремонті. У міксерних відділеннях пил і гази виділяються в період заповнення міксерів і зливу з них чавуну.

Пил проникає в організм оператора через дихальні шляхи. Вражаюча дія пилу визначається дисперсністю частинок пилу, їх формою і твердістю. Так, пилові частки розміром від 0,1 до 5 мкм, у відмінності від частинок інших

фракцій, не видаляються з організму, накопичуючись в легенях. Шкідливість виробничого пилу обумовлена його здатністю викликати, професійні захворювання легенів, в першу чергу пневмоконіози [19].

Шум. Джерелами шуму в цеху є працюючий конвертер, технологічне устаткування (мостові крани, насоси, автонавантажувачі і так далі), сопла фурми, з яких витікає кисень із швидкістю звуку.

З фізіологічної точки зору шум визначається як відчуття, яке сприймається органами слуху під час дії на них звукових хвиль в діапазоні частот від 16 до 20000 Гц, але найбільш важливий для слухового сприйняття інтервал від 45 до 10000 Гц.

Максимальний сприйманий вухом рівень звукового тиску 130 дБ. При подальшому зростанні звукового тиску виникає больове відчуття.

Різноманіття устаткування, використовуваного в конвертерному процесі, робота печей, агрегатів, систем вентиляції, обумовлює наявність виробничого шуму.

Нормативне значення гранично допустимого рівня шуму, що впливає на оператора поста управління, складає 80 дБА, а фактичне значення - 77 дБ, що не перевищує допустиме значення.

Загазованість. Гази – конденсаційні аерозолі з твердою дисперсною фазою, основним джерелом забруднення повітряного середовища робочої ділянки газовими виділеннями є конвертер. При порушенні газодинамічних параметрів процесу і пов'язане з цим вибивання полум'я, а також при випуску і позапічній обробці сталі, установці піч-ківш з робочого простору конвертера виділяються гази. Іноді виділення газу виникає внаслідок порушення цілісності газових комунікацій.

Повітря в конвертерному відділенні конвертерного цеху, згідно з картою умов праці, насичене оксидом вуглецю, діоксидом азоту, сірчистим і хромовим ангідридом. Фактичний зміст цих газів в повітрі перевищує гранично допустиму концентрацію у декілька разів.

Найбільш небезпечним газом є оксид вуглецю, що є продуктом неповного згорання палива і що утворюються в результаті фізико-хімічних реакцій в процесі плавки і на випуску з печі (окислення струменя металу при наповненні виливниць; введення спеціальних окисників, що інтенсифікують кипіння металу; в результаті відбувається кипіння металу у виливницях з інтенсивним виділенням оксиду вуглецю).

Не менш шкідливим є насичення повітря сірчистим ангідридом і діоксидом азоту, що утворюються в робочому просторі конвертера.

Гази аналогічно пилу проникають в організм оператора поста управління, що спостерігає за виробничим процесом, через органи дихання. Залежно від їх фізіологічної дії, вони можуть робити різний вплив на організм людини.

Сірчистий ангідрид чинить дратівливу дію. Вражає поверхню тканин дихального тракту і слизові оболонки.

Діоксид азоту викликає погіршуючу дію, розбавляючи вміст кисню нижче необхідного (об'ємна доля кисню в повітрі робочої зони має бути не менше 19 для нормального дихання тканин).

Окисел вуглецю є хімічно погіршуючим, знижує вміст кисню у вдихуваному повітрі, зв'язуючи його хімічно, з'єднується з гемоглобіном крові.

4.2 Заходи пожежної безпеки

Особливістю конвертерних цехів є небезпека пожежі від попадання на горючі матеріали рідкого шлаку при кантуванні шлакової чаші.

Характерною особливістю конвертерних печей є споживання великої кількості кисню, що поступає в цех по зовнішніх мережам. При цьому до киснево-розширювального пункту кисень йде зазвичай під надмірним тиском 3,5 мПа, а в цех поступає під надмірним тиском 1,6 мПа.

Ділянки газоочищення технологічних газів конвертерів являються вибухопожежонебезпечними.

Для запобігання розповсюдженню пожежі дотримуються протипожежних розривів між будівлями, установками; встановлюють пристрої автоматичного пожежогасіння; здійснюють систематичний нагляд за дотриманням заходів з пожежної безпеки, наявністю і справним станом протипожежного інвентаря і первинних засобів пожежогасіння.

У будівлі забезпечена можливість швидкої безпечної евакуації людей у разі виникнення пожежі. Допустима тривалість евакуації залежить від часу досягнення критичних для людини умов: критичної температури (60 ºС), зменшення концентрації кисню, втрати видимості внаслідок задимлення. Довжина шляхів евакуації (відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу) в електропічному корпусі (категорія В, II-IIа) не перевищує 100 м, що відповідає вимогам пожежної безпеки.

У конверторному цеху відповідно до норм знаходяться наступні первинні засоби пожежогасіння: вогнегасники (ОХП-10, ОУ-5 і ОУ-8, ОУ-25), пожежний інвентар (покривала з негорючого теплоізоляційного полотна, грубошерстної тканини або повсті, ящики з піском, совкові лопати); пожежний інструмент (багри, ломи, сокири та ін.).

4.3 Заходи з електробезпеки

У зв'язку з великим числом металоконструкцій, розташування електроустаткування на різній висоті, високій температурі навколишнього повітря, наявності металізованого пилу і газів до пристрою і експлуатації електроустановок і електромереж конвертерного цеху пред'являються підвищені вимоги. Тому завдання технічного персоналу – організувати безпечну експлуатацію електроустановок.

Передача і розподіл електричної енергії усередині відділень здійснюються по кабелях, дротах або шинах. Кабелі укладені в каналах, тунелях або в трубах, відкрито уздовж стін, по перехідних містках на рівні кроквяних ферм, уздовж підкранових шляхів. Сталеві труби з кабелями і дротами прокладені відкрито (по

стінах і колонах) і приховано (у перекриттях, стінах і фундаментах). Струмопідводи в доступних для зіткнення місцях захищені сітками.

Електроустаткування різноманітне. Сюди входять електродвигуни змінного струму, електрофільтри і інше устаткування напругою вище 1000 В, а також електродвигуни, апаратура управління, електроустаткування крану, внутрішньо цехові електромережі напругою до 1000 В.

Усі струмоведучі частини електричних машин і апаратури управління (а також струмопідводи до них) захищені, закриті кожухами щоб уникнути випадкового дотику. У зв'язку з виділенням значних кількостей пилу в робочий простір усі електродвигуни закритого типу – забезпечені кришкою, щільно прилеглою до корпусу.

Для захисту від механічних ушкоджень дроти на кранах прокладені в сталевих трубах. Пускорегулююча апаратура встановлена в місцях, відгороджених від робочого місця машиніста, або в шафах, що унеможливлюють випадковий дотик до струмоведучих частин.

Внутрішньоцехова електрична мережа виконується кабелем або ізольованими дротами. Для спусків від магістральних ліній електричної мережі використовуються ізольовані дроти, поміщені в металеві труби.

Кабель прокладений в каналах, влаштованих в підлозі і закритих згори знімними покриттями з вогнетривких матеріалів. Кабельні канали виконуються глибиною 40-60 см. Відстань між силовими кабелями, прокладених в кабельних каналах, має бути 35 мм, але не менше діаметру кабелю. При спільному прокладенні кабелів напругою до 1000 В з кабелями напругою вище 1000 В відстань між ними збільшено до 250 мм. Прокладення кабелів в каналах і тунелях, що містять газопроводи, заборонено.

Для захисту робітників від поразки електричним струмом усі не струмоведучі металеві частини електроустановок і іншого устаткування мають заземлюючі пристрої.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проведені обчислювальні експерименти з метою визначення диференціальних коефіцієнтів засвоєння для оптимізації розкислення-легування вуглецевих і низьколегованих сталей 10кп, 5пс, 15ГС, 25ГС, 10Г2С1 за допомогою термодинамічного модуля комп'ютерної учбово-дослідницької програми «Excalibur». Розроблені паспорти розкислення-легування з вичерпним набором даних, що стосуються процесів легування, розкислення та вакуумування сталей. Побудовані відповідні графічні залежності.

2. Розглянуті залежності диференціальних коефіцієнтів засвоєння від різних параметрів системи "метал-шлак-газ" дозволяють ефективно враховувати вплив температури, тиску, співвідношення маси шлаку до маси металу, ступеня розкисленості на фактичне засвоєння елементів для низки сталей.

3. Проведені дослідження дозволили виявити наступні особливості поведінки системи «метал-шлак-газ»:

- з підвищенням температури системи знижуються диференціальні коефіцієнти засвоєння по вуглецю, спостерігається збільшення диференціальних коефіцієнтів засвоєння по фосфору, марганцю, кремнію і алюмінію в киплячих і напівспокійних сталях. У спокійних сталях диференціальні коефіцієнти засвоєння по марганцю і кремнію практично не змінюються;
- підвищення початкової температури системи закономірно призводить до підвищення її кінцевої температури;
- підвищення температури системи призводить до зниження маси шлаку;
- підвищення відношення маси шлаку до маси металу однозначно призводить до зниження диференціальних коефіцієнтів засвоєння по усіх елементах;
- підвищення відношення маси шлаку до маси металу дещо збільшує кінцеву температуру системи;

- збільшення відношення маси шлаку до маси металу закономірно призводить до відносного збільшення маси кінцевого шлаку;
- збільшення відношення маси шлаку до маси металу призводить до відносного збільшення маси газу;
- зниження тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні призводить до закономірного зниження температури системи;
- зниження тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні призводить до відносного зниження маси шлаку;
- зниження тиску закономірно призводить до відносного збільшення маси газу.

4. Отримані в роботі результати досліджень диференціальних коефіцієнтів засвоєння мають як теоретичне, так і практичне значення.

5. Термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ» та відповідні алгоритми термодинамічного модуля програми «Excalibur» можуть бути рекомендовані для впровадження на установках позапічної обробки сталі з метою скорочення питомих витрат феросплавів та отримання гарантованого хімічного складу сталей і сплавів в якості інтелектуального ядра автоматизованої системи управління технологічним процесом

6. Результати роботи безпосередньо направлені на підвищення техніко-економічних показників металургійного виробництва.

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. 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.

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

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

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

9. 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.

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

11. 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.

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

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

14. 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.

15. 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.

16. 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.

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

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

19. Панасейко С.П. Гігієна праці і виробнича санітарія. Запоріжжя : ЗДІА. 2004. 220 с.