МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

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

Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) рівень _____
(другий (магістерський) рівень)

на тему_____ Застосування диференціальних коефіцієнтів засвоєння для легування та розкислення сталі_____
_____
_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1363-мчм*

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

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

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

Запоріжжя - 2024 року

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

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

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

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*

Ю.О. Бєлоконь

"_01_" ____05_____2024 року

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

Родигін Руслан Вадимович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта)*Застосування диференціальних коефіцієнтів засвоєння для легування та розкислення 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 "28" 02 2024 року № 359-с.

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)*01.12.2024*

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

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

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Літературний огляд	*Харченко О.В., доцент*		
Розрахунково-дослідницька частина	*Харченко О.В., доцент*		
Індивідуальне завдання	*Харченко О.В., доцент*		
Охорона праці та техногенна безпека	*Харченко О.В., доцент*		
Нормоконтроль	*Кириченко О.Г., доцент*		

7. Дата видачі завдання *07.05.2024*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*30.06.2024*	
2	*Реферат*	*30.06.2024*	
3	*Літературний огляд*	*30.06.2024*	
4	*Розрахунково-дослідницька частина*	*19.11.2024*	
5	*Індивідуальне завдання*	*26.11.2024*	
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*30.11.2024*	
7	*Висновки*	*30.11.2024*	

Студент _____ *Р.В. Родигін*
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *О.Г. Кириченко*
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 110 с., 6 табл., 44 рис., 23 джерел.

МЕТОД ГІББСА, ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ КОЕФІЦІЄНТИ ЗАСВОЕННЯ, СТАЛЬ, РОЗКИСЛЕННЯ, ЛЕГУВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, СИСТЕМА «МЕТАЛ-ШЛАК-ГАЗ».

Об’єкт дослідження – технологія розкислення-легування вуглецевих та низьколегованих сталей 15кп, 10пс, 16ГС, 18Г2С, 30ХГС.

Мета роботи – визначення диференціальних коефіцієнтів засвоєння (ДКЗ) при розкисленні-легуванні вуглецевих та низьколегованих сталей сталей; дослідити вплив температури, маси шлаку та інших факторів на ДКЗ.

Методи дослідження – термодинамічний аналіз системи «метал-шлак-газ» при ковшовій та позапічній обробці низьколегованих і вуглецевих сталей.

У роботі розглянуто метод хімічних потенціалів Гіббса, пряму і зворотну задачі термодинамічного аналізу, використання диференціальних коефіцієнтів засвоєння та методи їх розрахунку для оптимізації процесів розкислення-легування сталі.

Проведені обчислювальні експерименти з метою визначення диференціальних коефіцієнтів засвоєння при розкисленні-легуванні сталі за допомогою термодинамічного модуля комп’ютерної учбово-дослідницької програми «Excalibur». Побудовані відповідні графічні залежності.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» представлено аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на працівників киснево-конвертерного цеху, розробку інженерних рішень для захисту від ризиків виробничого середовища, а також заходи для покращення умов праці, забезпечення електробезпеки та пожежної безпеки.

ABSTRACT

Master's qualification work: 110 p., 6 tables, 44 figures, 23 sources.

GIBBS METHOD, DIFFERENTIAL ABSORPTION COEFFICIENTS, STEEL, DEOXIDATION, ALLOYING, RESEARCH, SYSTEM "METAL-SLAG-GAS".

Object of the research – technology of deoxidation-alloying of carbon and low-alloy steels 15kp, 10ps, 16GS, 18G2S, 30XGS.

The purpose of the work – to determine the differential absorption coefficients (DAC) during deoxidation-alloying of carbon and low-alloy steels; to investigate the influence of temperature, slag mass and other factors on DAC.

Research methods – thermodynamic analysis of the "metal-slag-gas" system during ladle and out-of-furnace processing of low-alloy and carbon steels.

The work considers the method of Gibbs chemical potentials, direct and inverse problems of thermodynamic analysis, the use of differential absorption coefficients and methods for their calculation for optimizing the processes of deoxidation-alloying of steel.

Computational experiments were conducted to determine the differential absorption coefficients during deoxidation-alloying of steel using the thermodynamic module of the computer educational and research program "Excalibur". The corresponding graphical dependencies were constructed.

The section "Occupational health and safety" presents an analysis of potentially dangerous and harmful factors affecting workers in the oxygen converter shop, the development of engineering solutions for protection against risks of the production environment, as well as measures to improve working conditions, ensure electrical safety and fire safety.

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД……... 10
2 МЕТОД ГІББСА ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ КОЕФІЦІЄНТИ ЗАСВОЄННЯ……... 12
2.1 Метод Гіббса …… 12
2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) і їх використання ..…. 22
2.2.1 Виведення диференціальних коефіцієнтів засвоєння в явному вигляді……...…… 23
2.2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння в системі «метал–шлак–газ»…….. 29
2.2.3 Застосування ДКЗ для оптимізації шихтових матеріалів …….. 31
2.3 Постановка задачі дослідження. Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу ……. 33
2.3.1 Пряма задача……... 34
2.3.1.1 Постановка задачі……... 34
2.3.1.2 Вибір моделі системи «метал–шлак–газ»…… 35
2.3.1.3 Коефіцієнти активності в металі……... 37
2.3.1.4 Коефіцієнти активності в шлаку……... 37
2.3.1.5 Коефіцієнти активності в газі…… 37
2.3.2 Зворотна задача…… 37
2.3.2.1 Постановка задачі……... 37
2.3.2.2 Фазові оператори…… 40
2.4 Висновки……... 43
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ……..... 44
3.1 Теоретичне обґрунтування методики обчислювального експерименту з використанням програми "Excalibur"……. 44
3.2 Вибір об'єкту дослідження ……..…… 45

3.3 Обчислювальний експеримент з використанням програми «Excalibur»…… 47
3.3.1 Методика обчислювального експерименту ……..…… 47
3.4 Результати досліджень……. 50
3.4.1 Дослідження впливу температури сталі на ДКЗ……. 50
3.4.1.1 Результат дослідження сталі 15кп……. 50
3.4.1.2 Результат дослідження сталі 10пс……. 51
3.4.1.3 Результат дослідження сталі 16ГС……..... 53
3.4.1.4 Результат дослідження сталі 18Г2С…….. 54
3.4.1.5 Результат дослідження сталі 30ХГС……. 54
3.4.2 Дослідження впливу відносної маси шлаку на ДКЗ елементів при розкисленні сталі…….. 55
3.4.2.1 Результат дослідження сталі 15кп……. 55
3.4.2.2 Результат дослідження сталі 10пс……. 56
3.4.2.3 Результат дослідження сталі 16ГС……..... 57
3.4.2.4 Результат дослідження сталі 18Г2С…….. 59
3.4.2.5 Результат дослідження сталі 30ХГС……. 60
3.4.3 Дослідження впливу ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі (m шл.= 0,01т)…….. 61
3.4.3.1 Результат дослідження сталі 15кп……. 61
3.4.3.2 Результат дослідження сталі 10пс……. 62
3.4.3.3 Результат дослідження сталі 16ГС……..... 64
3.4.3.4 Результат дослідження сталі 18Г2С…….. 65
3.4.3.5 Результат дослідження сталі 30ХГС……. 66
3.4.4 Дослідження впливу ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі (m шл.= 3,5- 4,5 т)……... 67
3.4.4.1 Результат дослідження сталі 15кп……. 67
3.4.4.2 Результат дослідження сталі 10пс……. 69
3.4.4.3 Результат дослідження сталі 16ГС……..... 70

3.4.4.4 Результат дослідження сталі 18Г2С…….. 72
3.4.4.5 Результат дослідження сталі 30ХГС……. 74
3.4.5 Дослідження зміни частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів у процесі розкислення сталі…….. 76
3.4.5.1 Результат дослідження сталі 15кп……. 76
3.4.5.2 Результат дослідження сталі 10пс……. 78
3.4.5.3 Результат дослідження сталі 16ГС……..... 79
3.4.5.4 Результат дослідження сталі 18Г2С…….. 81
3.4.5.5 Результат дослідження сталі 30ХГС……. 82
3.4.6 Дослідження впливу окисленості сталі на ДКЗ елементів при розкисленні сталі……. 83
3.4.6.1 Результат дослідження сталі 15кп……. 83
3.4.6.2 Результат дослідження сталі 10пс……. 85
3.5 Аналіз отриманих результатів……. 87
3.6 Техніко-економічне обґрунтування…… 89
3.7 Висновки…… 90
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……. 91
4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища конверторного цеху……. 91
4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища конверторного виробництва……... 95
4.3 Розрахунок аерації в конвертерному відділенні…… 98
4.4 Заходи пожежної безпеки…… 101
4.5 Заходи з електробезпеки…….. 103
ВИСНОВКИ……. 106
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ……... 108

ВСТУП

Інтенсивні дослідження в області 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 величезній кількості 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 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 [2].

Існує безкінечно багато способів ведення плавки, позапічної обробки, легування та розкислення сталі. Кожен із них повинен забезпечувати заданий склад напівпродукту або готової сталі, температурний і шлаковий режим, газонасиченість металу, а також враховувати допустимі параметри металургічного агрегату, дозаторів, фурм і т.д. У сучасному сталеплавильному виробництві широкого поширення набуло проведення розкислення і легування сталі при випуску металу з печі в ківш, з подальшою десульфурацією на установці доведення металу або установці «піч-ківш». При цьому для певних груп марок сталей часто ставиться умова мінімізації або повного виключення корекції хімічного складу при позапічній обробці. У зв'язку з цим постає задача точного розрахунку кількості розкислюючих і легуючих, необхідних для гарантованого отримання заданого складу металу при мінімальній вартості використаних матеріалів. Мінімізація вартості матеріалів передбачає вихід на нижні (або задані) межі вмісту елементів в готовому металі, що призводить до ще жорсткіших вимог до систем управління.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Коефіцієнти засвоєння здавна застосовуються в металургійному виробництві при визначенні кількості шихтових матеріалів, необхідних для одержання необхідного складу напівпродукту або готового металу. Зазвичай використовуються величини засновані на середньостатистичних даних, характерних для даного періоду плавки, складу вихідного металу, одержуваної марки сталі і незмінного 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 застосовуваних шихтових матеріалів. 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» [1], у якій оптимальні кількості шихтових матеріалів розраховувалися без урахування складних фізико-хімічних процесів, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті (або ковші). Зокрема, одним з істотних її недоліків була неможливість оптимізації кількостей неметалічних шихтових матеріалів, що не давало можливості проектувати технології десульфурації, дефосфорації, прямого легування тощо. 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], в системі «Форвард» одержання заданого складу сталі (сплаву) гарантується шляхом спільного обліку факторів

невизначеності коефіцієнтів засвоєння змісту елементів у шихтових матеріалах, точності зважування і маси вихідного металу.

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

У іншій системі «Оракул» [4] зазначені обмеження були частково зняті, але залишилися серйозні проблеми з адекватністю і стабільністю одержаних результатів.

На даний момент у світовій практиці методами позапічної металургії обробляють сотні мільйонів тонн сталі. Таке широке поширення позапічної обробки пояснюється 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, насамперед від сірки;

- 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 призвели до того, що сьогодні робота сталеплавильних цехів неможлива без наявності в їх складі агрегатів позапічної обробки [6].

2 МЕТОД ГІББСА І ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ КОЕФІЦІЄНТИ ЗАСВОЄННЯ

2.1 Метод Гіббса

Металургійні процеси нерозривно пов'язані з термодинамічним аналізом, який дозволяє зрозуміти природу перетворень речовин, обчислити теплові ефекти та передбачити напрямки перебігу реакцій. Одним з фундаментальних підходів у термодинаміці є метод Гіббса, названий на честь видатного американського фізико-хіміка Джозая Вілларда Гіббса.

Метод Гіббса дозволяє описувати хімічні процеси у будь-яких системах без необхідності попереднього представлення їх у вигляді стехіометричних рівнянь. Більше того, феноменологічна (або класична, формальна, макроскопічна) термодинаміка Гіббса дає якраз ту мову, яка дозволяє просто пояснити суть будь-якої задачі, використовуючи безпосередньо вимірювані величини: температуру, тиск, хімічний склад, об'єм, масу тощо. Ці параметри є ключовими для роботи технолога. Математична структура термодинаміки Гіббса - це класична механіка (статика суцільних середовищ), з тією відмінністю, що в механіці розглядаються системи, які обмінюються лише роботою і речовиною, тоді як термодинамічні системи обмінюються ще і теплом. Гіббс вводить у початкові рівняння механіки додаткову змінну — ентропію, що характеризує здатність системи віддавати або поглинати тепло. Введення ентропії в математичну модель дозволяє описати системи з урахуванням теплових втрат, що є принципово важливим для коректного аналізу металургійних процесів. Таким чином, термодинаміку Гіббса можна розглядати як узагальнення механіки на реальні системи, рух яких завжди супроводжується тепловими явищами.

При цьому з'ясовується, що багато емпіричних законів і правил хімії, наприклад закон діючих мас, природно випливають із базових постулатів термодинаміки як окремі випадки, представлені у вигляді точних

математичних співвідношень. Це спростовує поширене уявлення про те, що класична термодинаміка описує виключно стани рівноваги, а для розрахунку швидкостей і характеристик процесів потрібна окрема система 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:

$$f(V,m)=0 \tag{2.1}$$

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

$$f(S,V,m)=0 \tag{2.2}$$

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:

$$f(S,V,m_1,m_2,...,m_k)=0 \tag{2.3}$$

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:

$$U = U(S, V, m_1, ..., m_k). \tag{2.4}$$

Диференціал внутрішньої енергії як функції декількох змінних має вид:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,m_i} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,m_i} dV + \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\partial U}{\partial m_i}\right)_{S,V,m_{j\neq i}} dm_i . \tag{2.5}$$

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

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,m_i} = T, \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,m_i} = -p, \left(\frac{\partial U}{\partial m_i}\right)_{S,V,m_{j\neq i}} = \mu_i . \tag{2.6}$$

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 (2.6) вираження (2.5) набирає вигляд:

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^{k} \mu_i dm_i \tag{2.7}$$

Цей вираз представляє одну із загальних форм фундаментального рівняння, яке при відомому виді функції (2.4) дозволяє виконувати практичні розрахунки. Перетворенням рівняння (2.7) можна отримати іншу його форму:

$$SdT - VdP + \sum_{i=1}^{k} m_i d\mu_i = 0 \tag{2.8}$$

Вирази (2.7) і (2.8) можна представити у вигляді:

$$\frac{dU}{d\tau} = T\frac{dS}{d\tau} - P\frac{dV}{d\tau} + \sum_{i=1}^{k} \mu_i \frac{dm_i}{d\tau} \tag{2.9}$$

$$S\frac{dT}{dx} - V\frac{dP}{dx} + \sum_{i=1}^{k} m_i \frac{d\mu_i}{dx} = 0 \tag{2.10}$$

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 (2.4) для фаз, що беруть участь в процесі. Для цього необхідно використати знання про властивості часток, що утворюють речовину, хімічний 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 (2.4) 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 електро-нейтральною.

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:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln x_i + RT \ln \psi_i + \nu_i \mu \qquad (2.11)$$

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:

$$\mu = \mu^0 - \frac{1}{4} RT \ln P_{O_2} \tag{2.12}$$

У разі металів член $v_i\mu$ у вираженні (2.11) — електронний вклад - мало змінюється із складом, тому при розрахунках рівноваги з цілком достатньою точністю можна використати звичайне вираження:

$$\mu_{[i]} = \mu^0_{[i]} + RT \ln x_{[i]}\gamma_{[i]} \tag{2.13}$$

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:

$$\mu_{(i)} = \mu_{[i]} \tag{2.14}$$

Підставивши значення для хімічних потенціалів з (2.11) - (2.13) у вираження (2.14), отримуємо для коефіцієнта розподілу елементу *i* між металом і шлаком:

$$l_i = \frac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = K_i P_{O_2}^{v_i/4} = K_i' [O]^{v_i/2} \tag{2.15}$$

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

$$C_s = (\%S) P_{S_2}^{-1/2} P_{O_2}^{-1/2} \tag{2.16}$$

Різко спрощується опис рівноваги 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):

$$m_i = m_{[i]} + m_{(i)} \qquad (2.17)$$

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 (2.14). 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 пакет застосовних програм «Excalibur», що дозволяє імітувати плавку в наукових і учбових цілях.

Розрахунок оптимальних кількостей шлакоутворюючих 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, ґрунтованих 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 $U_{ij} = \partial m_{[j]} / \partial m_j$, визначуваних з поточного розподілу елементів у ванні і що відбивають зміну маси елементу *i* в металі при додаванні елементу *j* в систему.

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

$$\left.\begin{aligned} \frac{a_{(i)}}{a_{[i]}} &= K_i \exp\left(-\frac{\mu \nu_i}{RT}\right) \\ \sum_{i=1}^{k} x_{(i)} \nu_i &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (2.18)$$

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

$$F(m_1,...,m_k, m_{[1]},...,m_{[k]}) = 0, \qquad (2.19)$$

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

$$U_{ij} = \left(\frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j}\right) = -\left(\frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}}\right)^{-1}\left(\frac{\partial F_i}{\partial m_j}\right). \qquad (2.20)$$

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

$$F^{H} \le \frac{M + UB\Delta X}{I^{T}\left(M + UB\Delta X\right)} \le F^{B} \qquad (2.21)$$

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

До системи (2.21) 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:

$$\left|\Delta X\right| = \left|X - X^{0}\right| \le \varepsilon, \qquad (2.22)$$

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 пріоритетів.

Уся інформація про фактично отриманий склад металу використовується в системі адаптації параметрів моделі, що враховують неврівноваженість 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].

2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) і 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 :

$$F_i(m_1, m_2, ..., m_k; \overline{m}_{[1]}, \overline{m}_{[2]}, ..., \overline{m}_{[k]}) = 0 \qquad (2.23)$$

де $m_1, m_2, ..., m_k$ – маси елементів системи;

$\overline{m}_{[1]}, \overline{m}_{[2]}, ..., \overline{m}_{[k]}$ – 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 (2.23) методом неявного диференціювання знаходяться величини $U_{ij} = \partial m_{[i]} / \partial m_j$:

$$U_{ij} = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_j}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\overline{m}_{[j]}}, \qquad (2.24)$$

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 (2.24) 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.

2.2.1 Виведення диференціальних коефіцієнтів засвоєння в явному вигляді

В якості базової термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» (2.23) 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 ДКУ для системи «метал-шлак». Початкова система *k+1* нелінійних рівнянь, ґрунтована на рівності хімічних потенціалів елементів у металі і шлаку, в цьому випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\dfrac{\mu\nu_i}{RT}\right), i = 1..k \\ \sum\limits_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \qquad (2.25)$$

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 (2.25) :

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 - загальне число молей 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 $n_{[i]} = n_i - n_{(i)}$ набере наступного вигляду

$$\begin{cases} n_{(i)} = \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)}, i = 1..k \\ \sum\limits_{i=1}^{k} n_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

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 (2.25) :

$$\begin{cases} F_1 = \sum\limits_{i=1}^{k} \dfrac{n_i\nu_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)} = 0 \\ F_2 = \sum\limits_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)} - \dfrac{N}{1+\exp(Y)} = 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Переваги системи (2.27) 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 (2.27) дозволяють отримати ДКЗ в явному виді.

Рішенням системи (2.27) є величини μ і Y, за допомогою яких після підстановки (2.26) 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 виді:

$$n_{[i]} = n_i - n_{(i)} = \frac{n_i}{1+\exp\left(A_i - Y - \mu\nu_i\right)} \tag{2.28}$$

Знайдемо спочатку загальний вигляд матриці мольних ДКЗ. Для цього скористаємося правилом диференціювання складної функції (2.28) $n_{[i]} = f_i\left(n_i, m, Y\right)$:

$$V_{ij} = \frac{\partial n_{[i]}}{\partial n_j} = \frac{\partial f_i}{\partial n_i}\frac{\partial n_i}{\partial n_j} + \frac{\partial f_i}{\partial \mu}\frac{\partial \mu}{\partial n_j} + \frac{\partial f_i}{\partial Y}\frac{\partial Y}{\partial n_j} \tag{2.29}$$

Приватні похідні $\frac{\partial f_i}{\partial n_i}, \frac{\partial f_i}{\partial \mu}, \frac{\partial f_i}{\partial Y}$ знаходяться безпосередньо з (2.28) диференціюванням по відповідних змінних. Похідна дорівнює символу Кронекера δ_{ij}. У результаті, після підстановок з (2.26) і (2.28), отримаємо структурну формулу для молярних ДКЗ:

$$V_{ij} = \frac{n_{[i]}}{n_i}\left(\delta_{ij} + \nu_i n_{(i)}\frac{\partial \mu}{\partial n_j} + n_{(i)}\frac{\partial Y}{\partial n_j}\right) \tag{2.30}$$

Похідні, що залишилися, знайдемо шляхом неявного диференціювання системи рівнянь (2.27) :

$$\left[\frac{\partial \mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}\right] = -J_1^{-1}J_2 = -\left[\frac{\partial\left(F_1, F_2\right)}{\partial\left(\mu, Y\right)}\right]^{-1}\left[\frac{\partial\left(F_1, F_2\right)}{\partial n_j}\right] \tag{2.31}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial n_j} = -\frac{1}{D}\left[\frac{n_{(j)}\nu_j}{n_j}\left(\frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}}{n_h}\right) + \left(\frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N}\right)\sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu_h}{n_h}\right] \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial n_j} = -\frac{1}{D}\left[\frac{n_{(j)}\nu_j}{n_j}\sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu_h}{n_h} - \left(\frac{n_j}{n_j} - \frac{N_s}{N}\right)\sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu^2 h}{n_h}\right] \quad (2.33)$$

де D – якобіан системи (2.27):

$$D = -\left(\sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu_h}{n_h}\right)^2 - \left(\frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}}{n_h}\right)\sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu^2 h}{n_h} \quad (2.34)$$

Найважливішою особливістю отриманих формул для ДКЗ є та обставина, що вони не містять в явному виді 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 - матриця ДКЗ - не може бути довільною. Вона повинна задовольняти наступним очевидним умовам:

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

$$Vn_{[\,]} = n_{[\,]} \quad (2.35)$$

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

$$Vn_{(\ )} = 0 \tag{2.36}$$

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

$$V^T \nu = \nu \tag{2.37}$$

Отримані вище формули для ДКЗ повністю задовольняють усім трьом умовам.

Елементи матриці ДКЗ при переході від елементного складу до фазового складу системи перетворяться як тензор 2-го рангу. При цьому сама матриця V стає діагональною, а її елементи дорівнюють коефіцієнтам засвоєння відповідних фаз у металі (1 для металу і 0 для шлаку). Якщо термодинамічна система полягає із понад двох хімічних елементів, то окрім металевої і шлакової утворюються віртуальні λ-фази знакозмінного складу з нульовою масою.

2.2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння в системі «метал – шлак – газ»

Для системи «метал-шлак-газ» початкову систему рівнянь (2.25) доповнимо рівняннями, що виражають рівність хімічних потенціалів елементів у металі і газі:

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\dfrac{\mu\nu_i}{RT}\right), i = 1..k \\ \dfrac{x_{\{i\}}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i\}}\gamma_i}{\psi_i}, i = 1..k \\ \sum_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

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 (2.38) до системи трьох рівнянь:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i\nu_i}{1+\exp\left(-A_i+Y+\mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i-Z\right)\right]} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp\left(-A_i+Y+\mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i-Z\right)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Y\right)\left[1+\exp\left(-Z\right)\right]} = 0 \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i-Y-\mu\nu_i\right)\right]\exp\left(Z-B_i\right)} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Z\right)\left[1+\exp\left(-Y\right)\right]} = 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

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 (2.39) 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:

$$V_{ij} = \frac{n_{[i]}}{n_i}\left(\delta_{ij} + \nu_i n_{(i)}\frac{\partial \mu}{\partial n_j} + n_{(i)}\frac{\partial Y}{\partial n_j} + n_{\{i\}}\frac{\partial Z}{\partial n_j}\right) \tag{2.40}$$

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 (2.39):

$$\left[\frac{\partial \mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}, \frac{\partial Z}{\partial n_j}\right] = -J_1^{-1} J_2 = -\left[\frac{\partial (F_1, F_2 F_3)}{\partial (\mu, Y, Z)}\right]^{-1}\left[\frac{\partial (F_1, F_2, F_3)}{\partial n_j}\right] \tag{2.41}$$

Для практичних цілей досить вичислити J_1 і J_2, а далі використати чисельні методи матричної алгебри.

Порівнюючи рівняння (2.30), (2.40) і (2.27), (2.39) попарно, не можна не відмітити строге виконання принципу відповідності. Тобто за відсутності газової фази формули (2.40) і (2.39) для системи «метал-шлак-газ» переходять у формули (2.30) і (2.27), справедливі для двофазної рівноваги «метал-шлак».

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

$$U_{ij} = V_{ij}\frac{M_i}{M_j} \tag{2.42}$$

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

2.2.3 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, шлакоутворенні матеріали, розкислювачі, лігатури, вуглецевмісні 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 хімічному складу, необхідно, щоб виконувалася система *2k-2* нерівностей (k – кількість елементів). У матричному записі вона може бути компактна представлена таким чином:

$$\begin{cases} \dfrac{U^H\left(P^H + B^H X\right)}{I^T U^H\left(P^H + B^H X\right)} \geq F^H \\ \dfrac{U^B\left(P^B + B^B X\right)}{I^T U^B\left(P^B + B^B X\right)} \leq F^B \end{cases} \qquad (2.43)$$

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 (2.40-2.42) 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 (2.43) приведемо до виду $HX \,''\, H_0$, придатного для її вирішення симплекс-методом:

$$\begin{cases} \left(F^H I^T - E\right) U^H B^H X \le \left(E - F^H I^T\right) U^H P^H \\ \left(E - F^B I^T\right) U^B B^B \le \left(F^B I^T - E\right) U^B P^B \end{cases} \qquad (2.44)$$

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 (2.44) 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;
- часові обмеження.

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

$$\begin{bmatrix} H \\ R \end{bmatrix} X \le \begin{bmatrix} H_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \tag{2.45}$$

Отримана система нерівностей вирішується ітераційне 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 [8].

2.3 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 [9] і диференціальних коефіцієнтів засвоєння (фазових операторів) [8]. Модель колективізованих електронів (МКЕ), ґрунтована 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» [9].

2.3.1 Пряма задача

2.3.1.1 Постановка задачі.

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

$$F(m, \overline{m}_{[\ ]}, \overline{m}_{(\ )}, \overline{m}_{\{\ \}}, p, T) = 0, \qquad (2.46)$$

де m – вектор мас елементів у системі;

$\overline{m}_{[\ ]}, \overline{m}_{(\ )}, \overline{m}_{[\ )}$ – 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.

2.3.1.2. Вибір моделі системи «метал – шлак – газ».

В якості термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» (2.46) використовується детермінована фізико-хімічна модель колективізованих електронів МКЕ [9], 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):

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\mu_e\nu_i\right), i = 1..k \\ \dfrac{x_{\{i\}}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i\}}\gamma_i}{\lambda_i}, i = 1..k \\ \sum_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \qquad (2.47)$$

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»;

$K_{[i\}}$ – 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]:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Y\right)\left[1+\exp\left(-Z\right)\right]} = 0 \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i - Y - \mu\nu_i\right)\right]\exp\left(Z - B_i\right)} - \dfrac{N}{1+\exp\left(Z\right)\left[1+\exp\left(-Y\right)\right]} = 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

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 :

$$n_{(i)} = \frac{n_i}{1+\exp\left(-A_i + Y + \mu_e\nu_i\right)\left[1+\exp\left(B_i - Z\right)\right]};$$

$$n_{\{i\}} = \frac{n_i}{1+\left[1+\exp\left(A_i - Y - \mu_e\nu_i\right)\right]\exp\left(Z - B_i\right)}; \quad (2.49)$$

$$n_{[i]} = n_i - n_{(i)} - n_{\{n\}}$$

2.3.1.3 Коефіцієнти активності в металі

Коефіцієнти активності елементів у металі, що входять в рівняння (2.47-2.48), розраховуються відповідно до моделі розбавленого розчину. Як показано в роботі [10], цього цілком достатньо для адекватного опису рівноважного стану системи.

2.3.1.4 Коефіцієнти активності в шлаку

Атомні коефіцієнти активності в шлаку, що входять в рівняння (2.47-2.48) розраховуються відповідно до моделі шлаку, прийнятої в МКЕ:

$$\frac{1}{\psi_i} = \sum_{j=1}^{k} x_{(j)} \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{k_i} - \sqrt{k_j}\right)^2}{RT} \right) \qquad (2.50)$$

де k_i - атомний енергетичний параметр *i*-го елементу [3].

2.3.1.5 Коефіцієнти активності в газі

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 [11].

2.3.2 Зворотна задача

2.3.2.1 Постановка задачі

Існує нескінченно багато способів ведення плавки, позапічної обробки, легування і розкислення сталі. Кожен з них повинен забезпечувати заданий склад напівпродукту або готової сталі, температурний і шлаковий режим, 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 [10], який запропонував симплекс-метод лінійного програмування для широкого класу завдань, в яких вектор вихідних параметрів *Y* лінійно залежить від вектору незалежних змінних *X*:

$$Y = K + LX \qquad (2.51)$$

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 ряді робіт [2, 11, 12] 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*:

$$F^H \le P + (1/M_{ж})UBX \le F^B \qquad (2.52)$$

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 [13], 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.

2.3.2.2 Фазові оператори

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 :

$$\begin{aligned} \overline{m}_{[\,]} &= Um; \\ \overline{m}_{(\,)} &= Wm; \\ \overline{m}_{\{\,\}} &= Qm, \end{aligned} \tag{2.53}$$

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 (2.46):

$$U = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F}{\partial m_{[\,]}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F}{\partial m}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\overline{m}_{[i]}} \tag{2.54}$$

$$W = \frac{\partial m_{(i)}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F}{\partial m_{(\,)}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F}{\partial m}\right]\Bigg|_{m_{(i)}=\overline{m}_{(i)}} \tag{2.55}$$

$$Q = \frac{\partial m_{\{i\}}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F}{\partial m_{\{\,\}}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F}{\partial m}\right]\Bigg|_{m_{\{i\}}=\overline{m}_{\{i\}}} \tag{2.56}$$

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 (2.53) виходить, що сума матриць фазових операторів завжди дорівнює одиничній матриці:

$$U + W + Q = E \tag{2.57}$$

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:

$$m = BX \tag{2.58}$$

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.

Слід зазначити, в деяких випадках симплекс-метод у чистому вигляді не придатний для вирішення нелінійної зворотної задачі ітераційним способом. Річ у тому, що нескінченна мала зміна коефіцієнтів системи

нерівностей може привести (і частіше приводить) до стрибкоподібної зміни кількостей рекомендованих матеріалів. При цьому система починає здійснювати періодичні коливання, циклічно проходячи через два і більше станів. Для пригнічення таких коливань розроблені модифіковані алгоритми симплекс-методу з поступовим зменшенням ребр симплекс-многогранника [14].

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 [15].

2.4 Висновки

Теорія Гіббса дозволила перевести багато емпіричних знань у чітко визначені закономірності, що значно розширило можливості аналізу та моделювання складних фізико-хімічних процесів.

Диференціальні коефіцієнти засвоєння є ключовими показниками, які дозволяють більш точно розраховувати процеси засвоєння елементів у розплавленому металі. Використання ДКЗ сприяє оптимізації шихтових матеріалів і управлінню плавкою, що зменшує витрати і підвищує якість металу. Вони також допомагають враховувати перехресні ефекти між елементами, що важливо для створення сталі зі специфічними властивостями.

Задачі термодинамічного аналізу спрямовані на прогнозування рівноважного стану системи, дозволяючи визначати результати хімічних і фазових процесів за відомих початкових умов та орієнтовані на визначення необхідних початкових умов для досягнення заданого стану.

В цілому, використання диференціальних коефіцієнтів засвоєння і розв'язання прямих та зворотних задач термодинамічного аналізу сприяє впровадженню передових технологій у металургії, роблячи виробничі процеси більш передбачуваними і контрольованими.

3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Теоретичне обґрунтування методики обчислювального експерименту з використанням програми "Excalibur"

Програма "Excalibur" — це потужний інструмент, який пропонує широкий спектр засобів для моделювання, аналізу та візуалізації даних.

Програма "Excalibur" дозволяє реалізовувати математичні моделі, засновані на: диференційних рівняннях; статистичних методах; чисельних алгоритмах (метод кінцевих елементів, метод Монте-Карло тощо). Використання "Excalibur" забезпечує:

- Модульність. Користувачі можуть обирати окремі модулі для вирішення завдань: обчислення, моделювання, оптимізація.
- Зручний інтерфейс для налаштування параметрів експерименту.
- Висока точність результатів завдяки застосуванню сучасних чисельних методів.
- Інтеграція з іншими програмними засобами для подальшої обробки даних.

До переваг обчислювального експерименту можна віднести: швидкість отримання результатів у порівнянні з фізичними експериментами; економічність, адже немає потреби у дорогому обладнанні чи матеріалах; Можливість тестування екстремальних умов, які неможливо створити у лабораторії.

Методика обчислювального експерименту з використанням "Excalibur" дозволяє вирішувати складні наукові й технічні задачі, а застосування сучасних чисельних методів сприяє підвищенню точності й ефективності досліджень.

3.2 Вибір об'єкту дослідження

В якості об'єкту дослідження була обрана група сталей: 15кп, 10пс, 16ГС, 18Г2С, 30ХГС.

15кп – вуглецева конструкційна якісна кипляча сталь.

Хімічний склад сталі 15кп наведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 15кп, згідно ДСТУ 7809:2015, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,12 – 0,19	≤ 0,07	0,25 – 0,50	≤ 0,25	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,08

Застосування сталі 15кп: елементи трубних з’єднань, штуцера, вилки та інші деталі котлотурбобудування, які працюють в інтервалі температур від -40°С до +450°С, після цементації та ціанування, деталі від яких вимагається висока твердість поверхні та невисока міцність серцевини (кріпильні деталі, важелі, вісі та ін. деталі).

10пс – конструкційна вуглецева якісна напівспокійна сталь.

Хімічний склад сталі 10пс наведений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Хімічний склад сталі 10пс, згідно ДСТУ 7809:2015, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,07 – 0,14	0,05 – 0,17	0,35 – 0,65	≤ 0,25	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,15	≤ 0,25	≤ 0,08

Застосування сталі 10пс: деталі, що працюють при температурі до 450°С, до яких пред'являються вимоги високої пластичності, а також втулки, вушка, шайби, гвинти та інші деталі після ХТО, до яких пред'являються

вимоги високої поверхневої твердості та зносостійкості при невисокій міцності серцевини.

16ГС – конструкційна низьколегована сталь для зварних конструкцій. Хімічний склад сталі 16ГС наведений в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 –Хімічний склад сталі 16ГС, згідно ДСТУ 8541:2015, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,12 – 0,18	0,4 – 0,7	0,9 – 1,2	≤ 0,30	≤ 0,04	≤ 0,035	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,08

Застосування сталі 16ГС: деталі й частини парових котлів та посудин, що працюють під тиском. Корпуси апаратів, днища, фланці та ін. деталі, що працюють при температурах від -40°С до +475°С під тиском. Стаціонарні трубопроводи живильної води котлів СВП, що працюють при температурі 280°С і тиску 38 МПа.

18Г2С – конструкційна низьколегована сталь для зварних конструкцій. Хімічний склад сталі 18Г2С наведений в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сталі 18Г2С, згідно ДСТУ 3760:2006, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,14 – 0,23	0,6 – 0,9	1,2 – 1,6	≤ 0,30	≤ 0,045	≤ 0,04	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,08

Застосування сталі 18Г2С: арматура для армування звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій, серги, ланки, пальці, траверси, деталі зчеплень вагонеток та ін. деталі, що працюють від -40°С до +450°С, арматура класу А-II (А300).

30ХГС – конструкційна легована сталь, хромокремніймарганцева.

Хімічний склад сталі 30ХГС наведений в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад сталі 30ХГС, згідно ДСТУ 7806:2015, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,28 – 0,35	0,9 – 1,2	0,8 – 1,1	≤ 0,30	≤ 0,035	≤ 0,035	0,8 – 1,1	≤ 0,30

Застосування сталі 30ХГС: різні термічно оброблені деталі: вали, осі, зубчасті колеса, гальмівні стрічки моторів, фланці, корпуси обшивки, лопатки компресорних машин, важелі, штовхачі, відповідальні зварні конструкції, що працюють при знакозмінних навантаженнях, кріпильні деталі.

3.3 Обчислювальний експеримент з використанням програми «Excalibur»

3.3.1 Методика обчислювального експерименту

Паспорти розкислення-легування є ключовим елементом для систематизації даних процесів розкислення та легування під час плавки сталі. Вони забезпечують створення масиву даних, необхідного для подальшого аналізу впливу різних параметрів на ДКЗ. Для кожної марки сталі, а також визначених температурних і тискових умов, ці паспорти включають таку 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;
- основність шлаку кінцева, т;
- маса газу задана, 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 змішування в металі;
- парціальна ентальпія змішування в шлаку;
- парціальна ентальпія змішування 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.

3.4 Результати досліджень

3.4.1 Дослідження впливу температури сталі на ДКЗ

3.4.1.1 Результат дослідження сталі 15кп

На рисунку 3.1 видно при збільшенні 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 кремнію та алюмінію, що пов'язано зі зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів з позитивною валентністю.

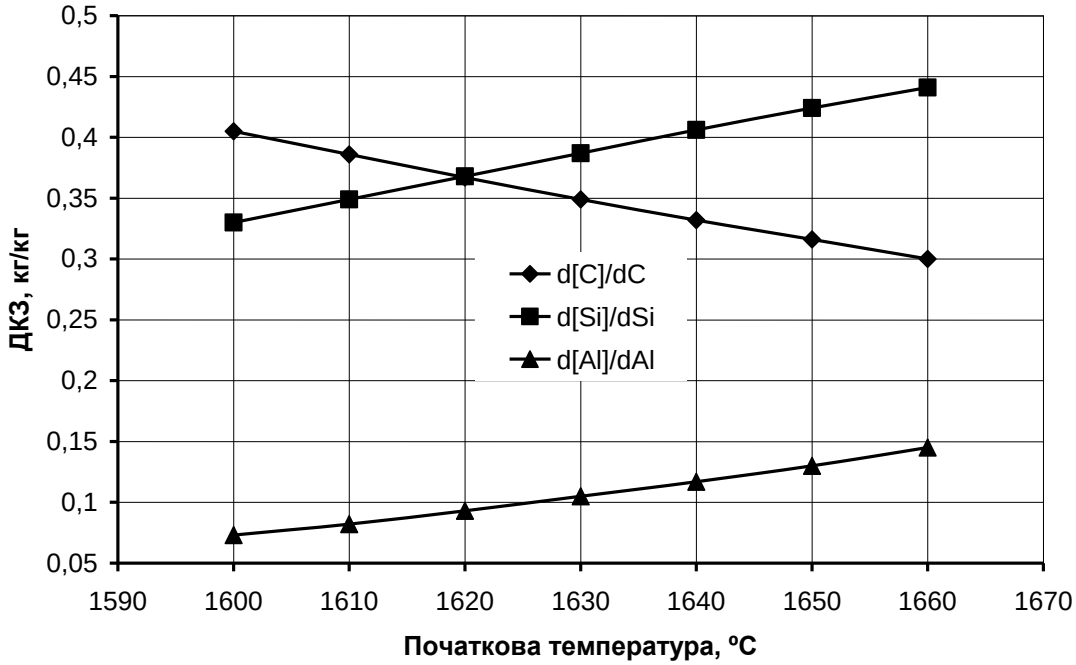


Рисунок 3.1 – Вплив початкової температури на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 15кп

З наведеного графіку (рис. 3.2) видно, що з підвищенням початкової температури збільшується ДКЗ по марганцю, що пояснюється зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів з позитивною валентністю.

Загальний рівень ДКЗ по марганцю в діапазоні 0,8...0,9 відповідає загальноприйнятим нормам технологічних інструкцій для киплячих сталей.

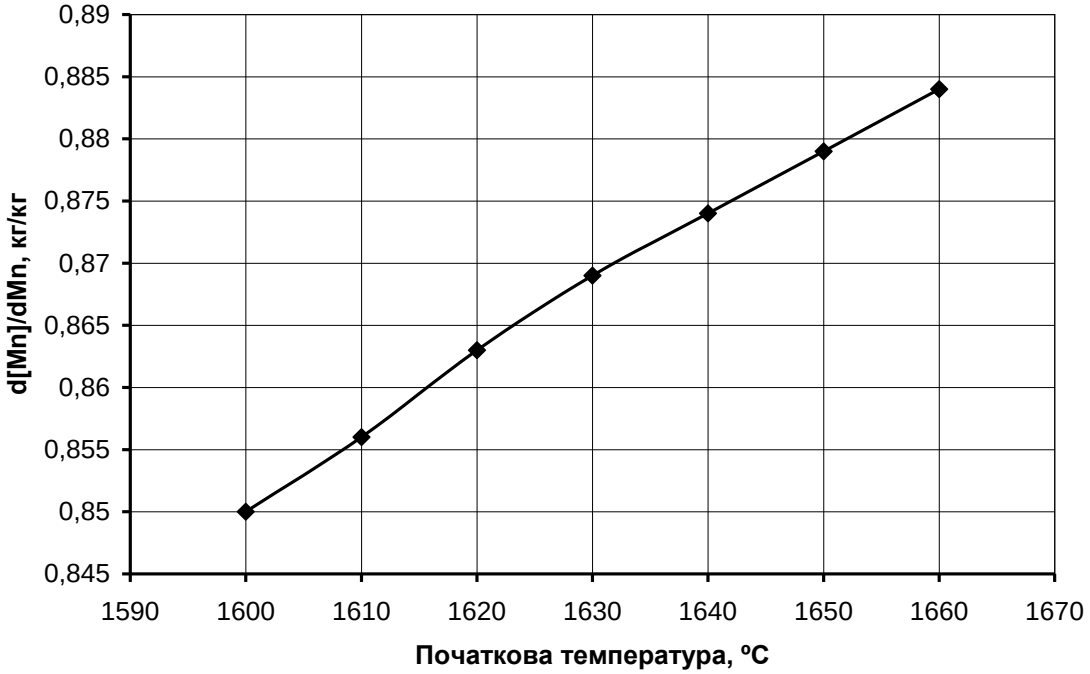


Рисунок 3.2 – Вплив початкової температури на ДКЗ марганцю при розкисленні сталі 15кп

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

3.4.1.2 Результат дослідження сталі 10пс

На рисунку 3.3 видно при збільшенні 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 підвищенням температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ кремнію і алюмінію підвищуються. Проте загальний рівень ДКЗ алюмінію залишається на досить низькому рівні для напівспокійної сталі.

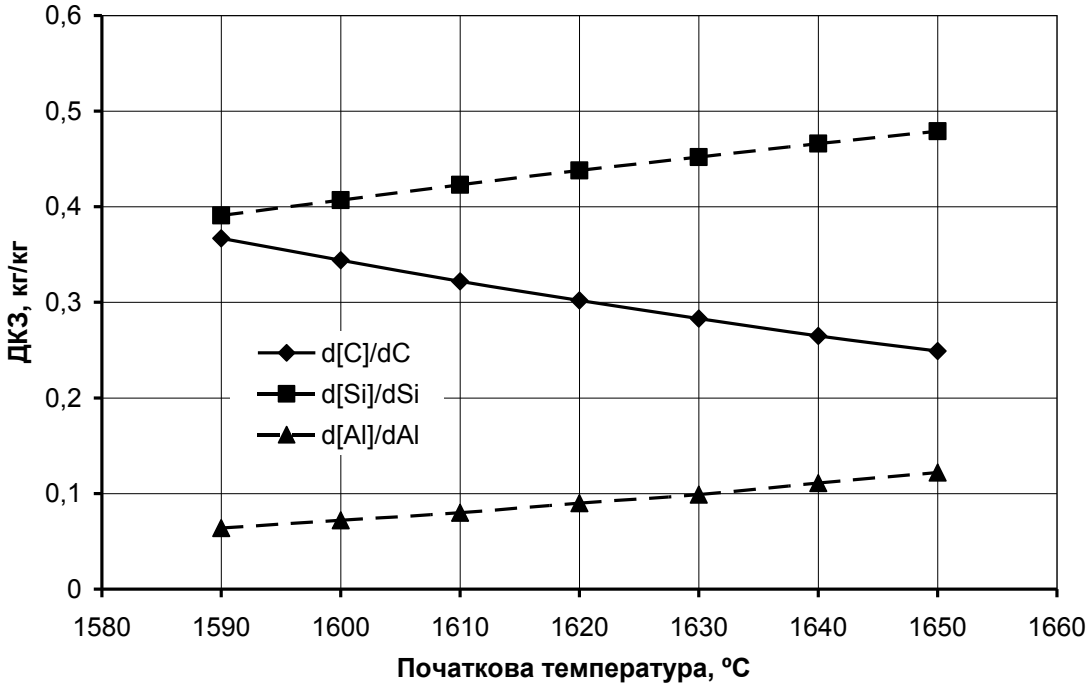


Рисунок 3.3 – Вплив початкової температури на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 10пс

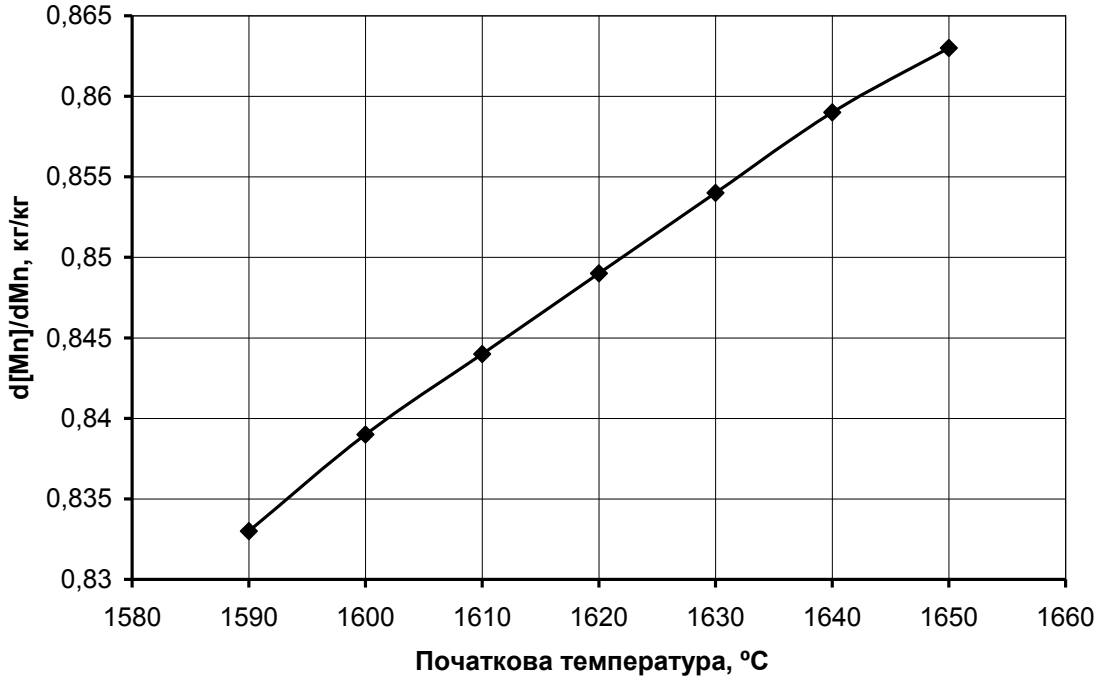


Рисунок 3.4 – Вплив початкової температури на ДКЗ марганцю при розкисленні сталі 10пс

З графіку (рис.3.4) видно, що з підвищенням початкової температури збільшується ДКЗ по марганцю, що пояснюється зміщенням рівноваги у бік відновлення елементів з позитивною валентністю.

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

3.4.1.3 Результат дослідження сталі 16ГС

На рисунку 3.5 видно, що при підвищенні температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються.

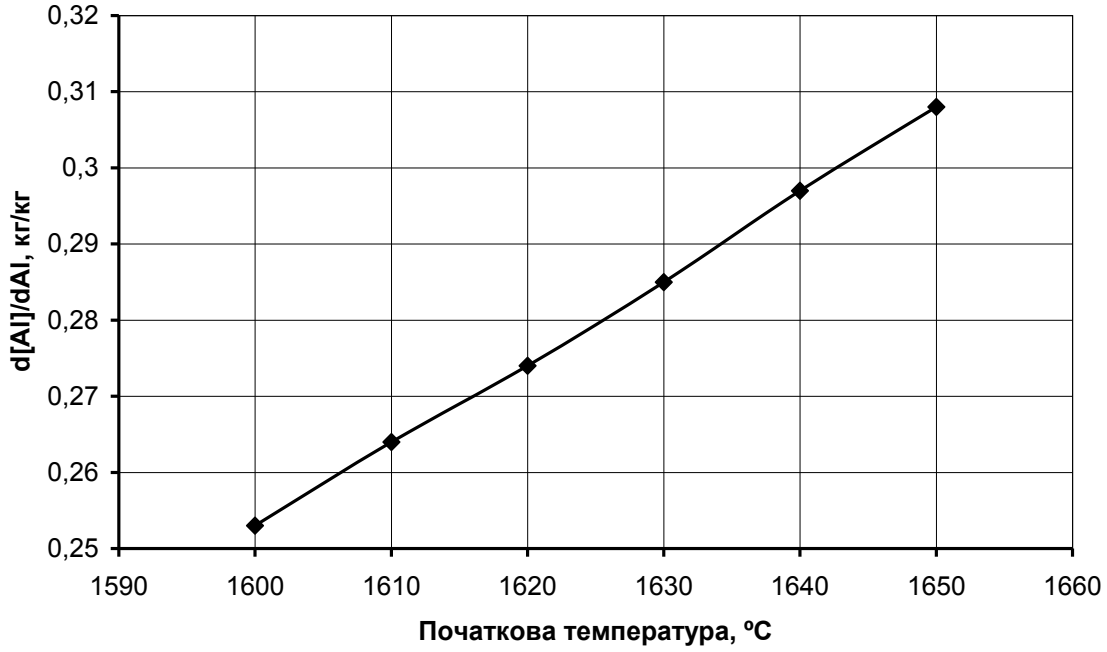


Рисунок 3.5 – Вплив початкової температури на ДКЗ алюмінію при розкисленні сталі 16ГС

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

3.4.1.4 Результат дослідження сталі 18Г2С

На рисунку 3.6 видно, що при підвищенні температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються.

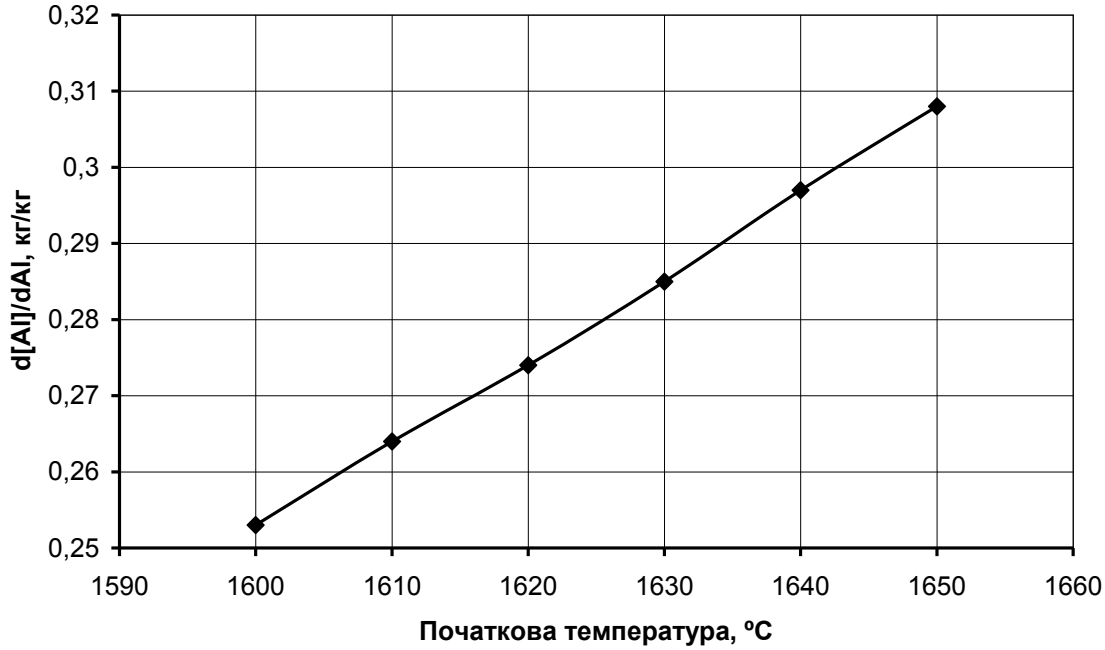


Рисунок 3.6 – Вплив початкової температури на ДКЗ алюмінію при розкисленні сталі 16ГС

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

3.4.1.5 Результат дослідження сталі 30ХГС

На рисунку 3.7 видно, що при підвищенні температури рівновага зміщується у бік відновлення елементів з позитивною валентністю, таким чином ДКЗ алюмінію підвищуються.

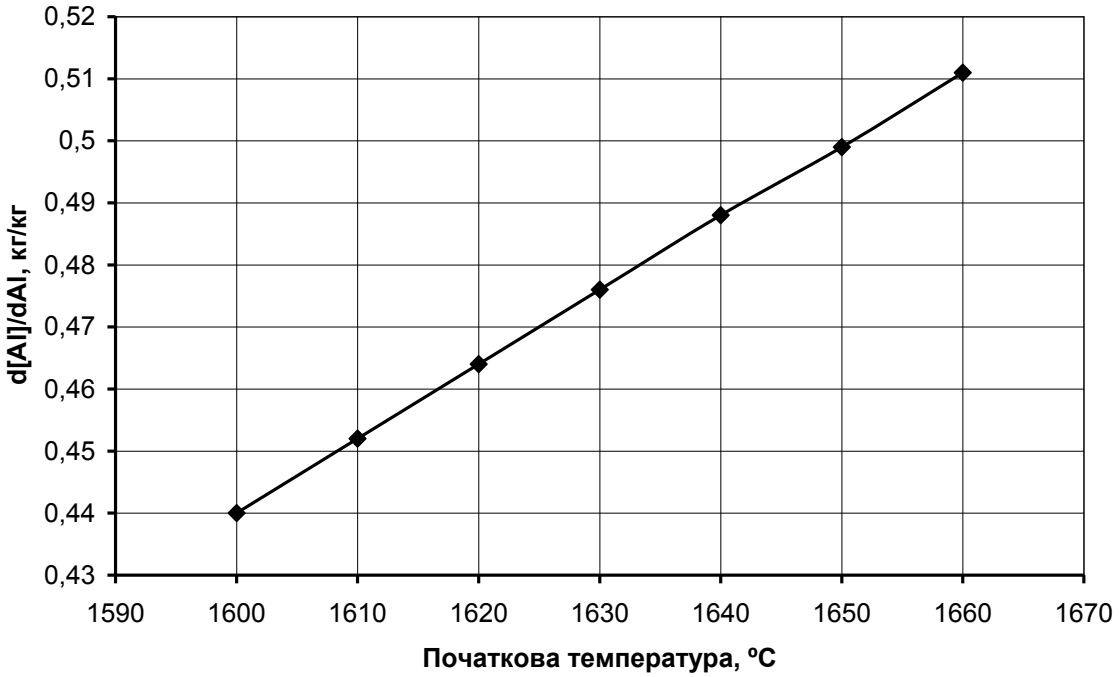


Рисунок 3.7 – Вплив початкової температури на ДКЗ алюмінію при розкисленні сталі 30ХГС

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

3.4.2 Дослідження впливу відносної маси шлаку на ДКЗ елементів при розкисленні сталі

3.4.2.1 Результат дослідження сталі 15кп

На рисунку 3.8 видно, що чим більше відношення маси шлаку до маси металу, тим більше кремнію, марганцю і алюмінію потрапляє в шлак, а вуглецю – в газову фазу.

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

Дослідження впливу відносної маси шлаку не виявило помітного впливу на величини ДКЗ фосфору і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

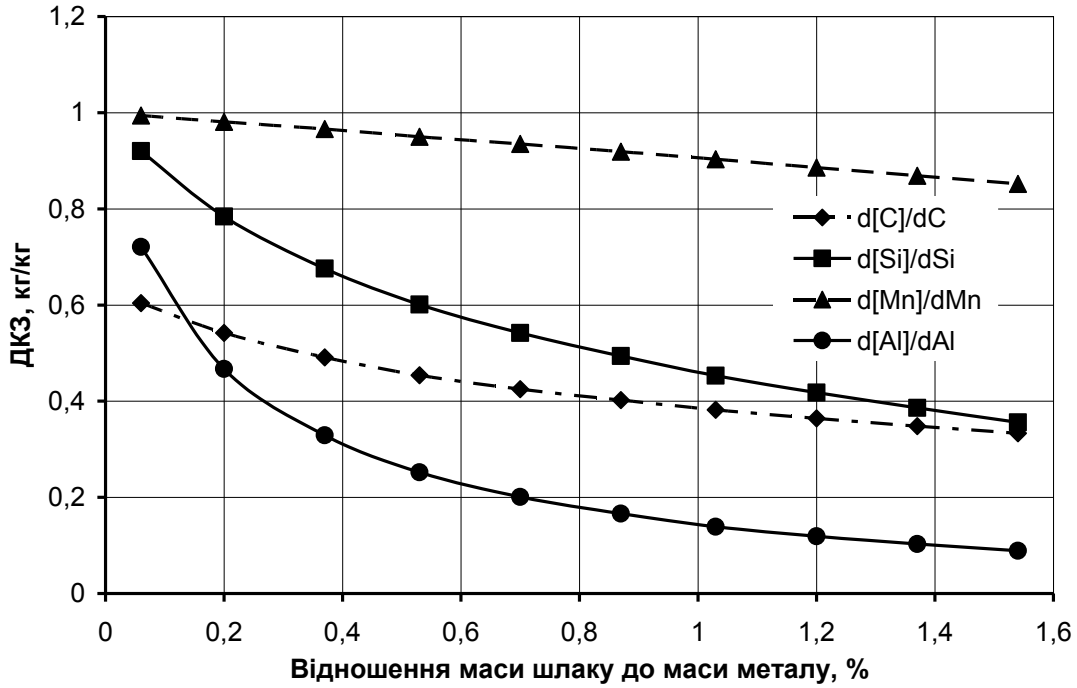


Рисунок 3.8 – Вплив відношення маси шлаку до маси металу в ковші на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 15кп (FeMn=0,729т; АВ-87=0,056т; коксик=0,43т; карбід Si=0,244т; е/е=0,247 МВтч)

3.4.2.2 Результат дослідження сталі 10пс

На рисунку 3.9 видно, що підвищення відношення маси шлаку до маси металу однозначно призводить до зниження диференціальних коефіцієнтів засвоєння по усіх елементах. При цьому вуглець переходить в газову фазу, а такі елементи як кремній, алюміній, марганець - в шлак.

Наведені 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 в ковші не виявило помітного впливу на величини ДКЗ фосфору і сірки, тому ці залежності графічно не відображалися.

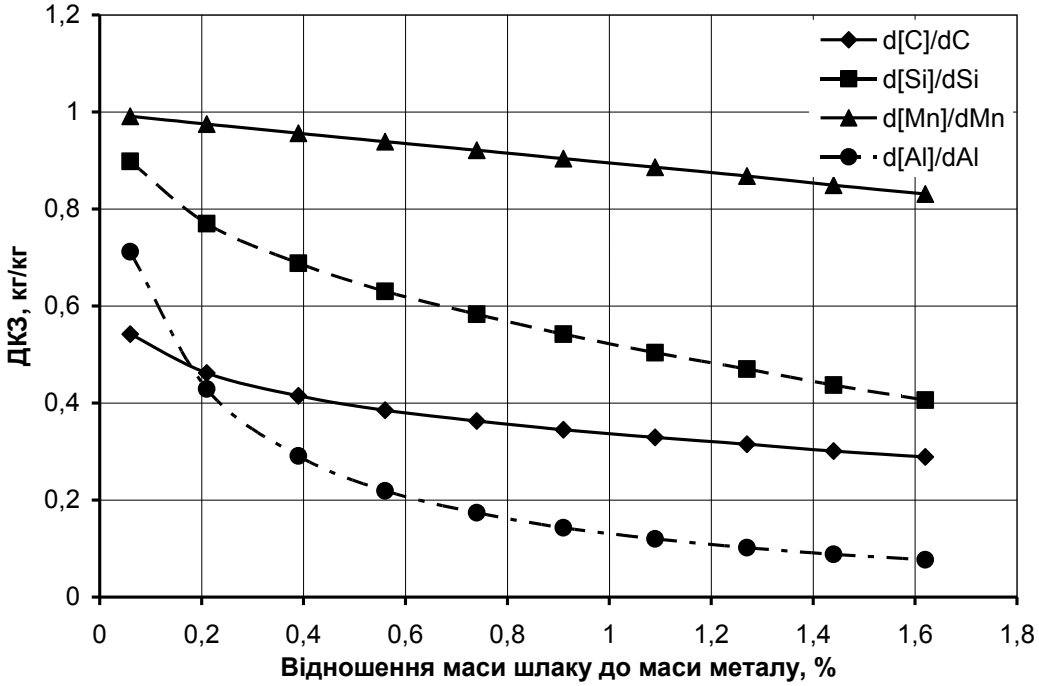


Рисунок 3.9 – Вплив відношення маси шлаку до маси металу в ковші на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 10пс (FeMn=1,2т; карбід Si=0,336т; е/е=0,099 МВтч)

3.4.2.3 Результат дослідження сталі 16ГС

На рисунку 3.10 видно, що чим більше відношення маси шлаку до маси металу, тим більше марганцю і сірки потрапляє в шлак. Як видно з приведеного графіку, в умовах відсутності шлаку десульфурація неможлива.

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

Чим більше відношення маси шлаку до маси металу, тим більше алюмінію потрапляє в шлак (рис.3.11).

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

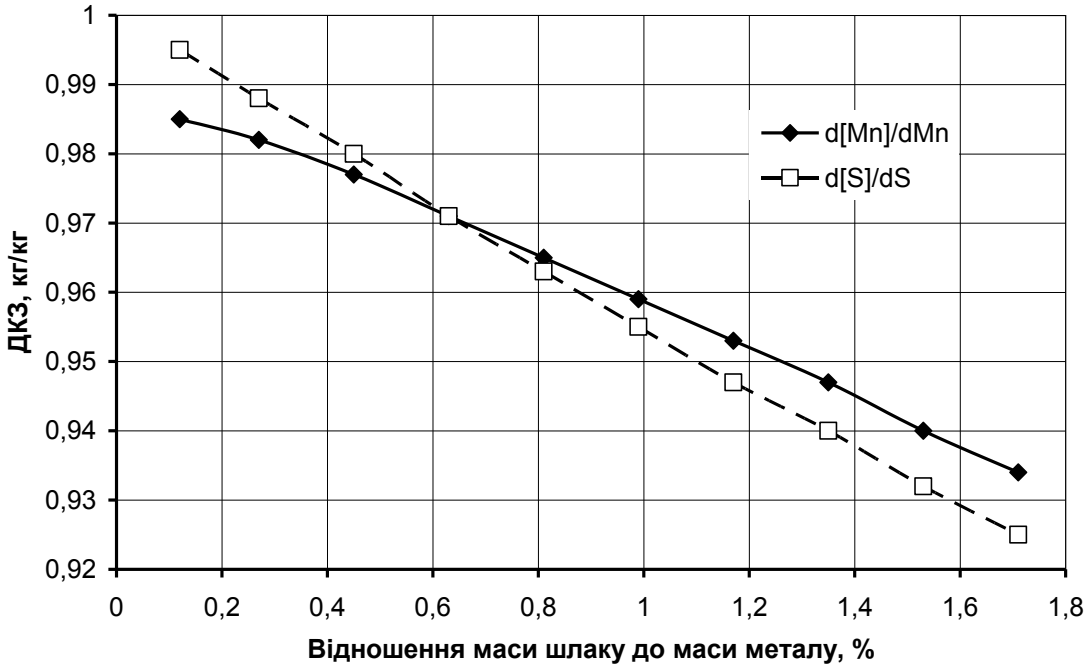


Рисунок 3.10 – Вплив відношення маси шлаку до маси металу в ковші на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 16ГС (FeMn=1,5 т; SiMn=2,154 т; FeSi65=1,109 т; карбід Si=0,398 т; е/е=0,534 МВтч)

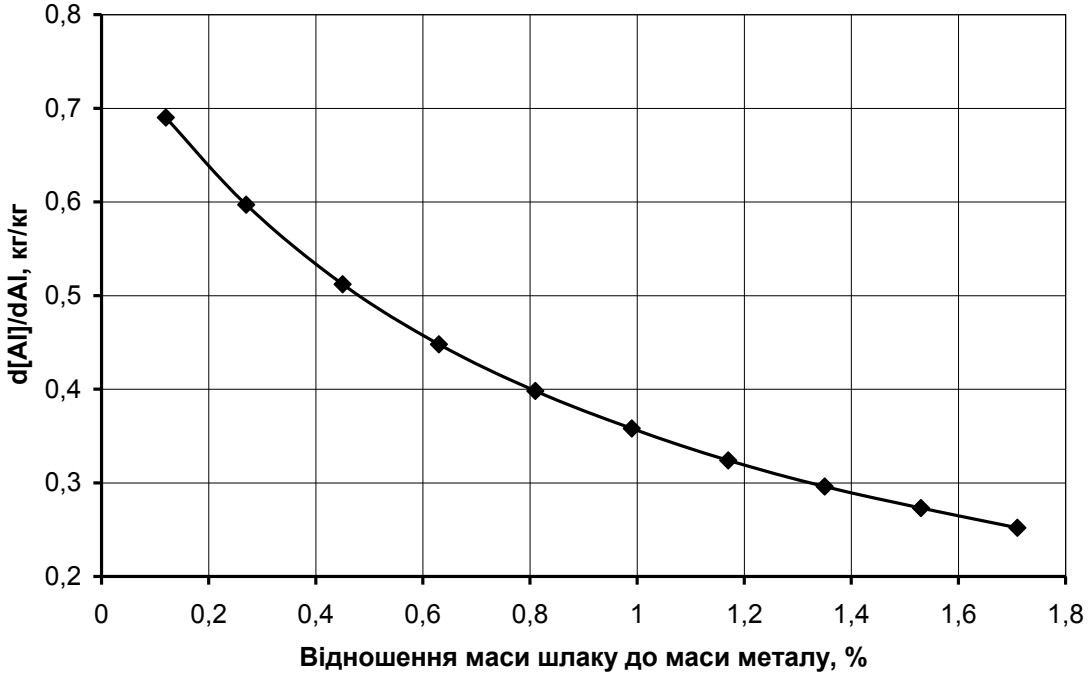


Рисунок 3.11 – Вплив відношення маси шлаку до маси металу в ковші на ДКЗ алюмінію при розкисленні сталі 16ГС (FeMn=1,5 т; SiMn=2,154 т; FeSi65=1,109 т; карбід Si=0,398 т; е/е=0,534 МВтч)

Дослідження впливу відношення маси шлаку до маси металу в ковші на величини ДКЗ вуглецю, кремнію і фосфору не виявило чіткої залежності, тому вони графічно не відображалися.

3.4.2.4 Результат дослідження сталі 18Г2С

На рисунку 3.12 видно, що чим більше відношення маси шлаку до маси металу, тим більше марганцю і сірки потрапляє в шлак. Як видно з приведеного графіку, в умовах відсутності шлаку десульфурація неможлива.

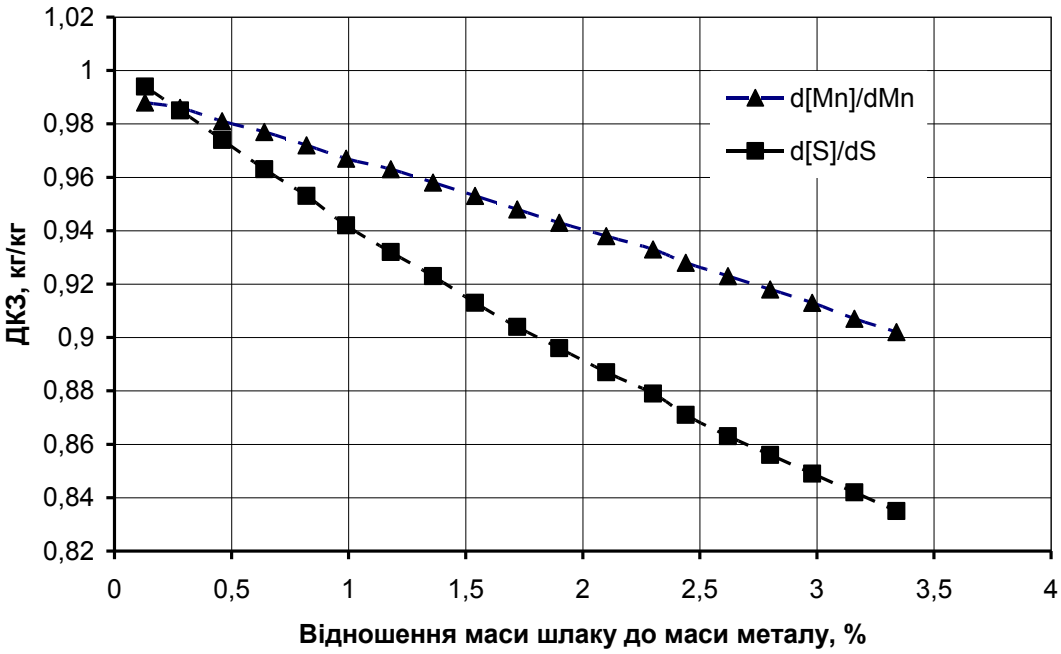


Рисунок 3.12 – Вплив відношення маси шлаку до маси металу в ковші на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 18Г2С (FeMn=3,898т; FeSi65=2,394т; карбід Si=0,407т; е/е=0,552 МВтч)

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

На рисунку 3.13 видно, що чим більше відношення маси шлаку до маси металу, тим більше алюмінію, потрапляє в шлак. При підвищенні відносної

маси шлаку зниження ДКЗ алюмінію уповільнюється, тому подальша зміна цього показника незначна.

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

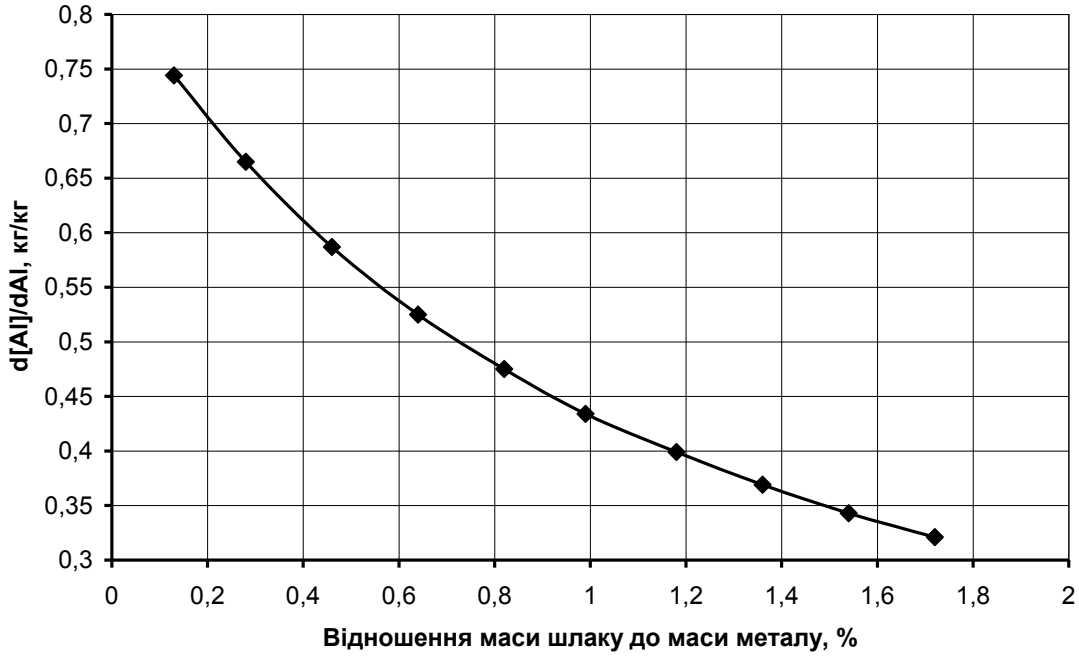


Рисунок 3.13 – Вплив відношення маси шлаку до маси металу в ковші на ДКЗ алюмінію при розкисленні сталі 18Г2С (FeMn=3,898т; FeSi65=2,394т; карбід Si=0,407т; е/е=0,552 МВтч)

Дослідження впливу відношення маси шлаку до маси металу на величини ДКЗ вуглецю, кремнію і фосфору не виявило чіткої залежності, тому вони графічно не відображалися.

3.4.2.5 Результат дослідження сталі 30ХГС

На рисунку 3.14 видно, що чим більше відношення маси шлаку до маси металу, тим більше алюмінію і сірки потрапляє в шлак.

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

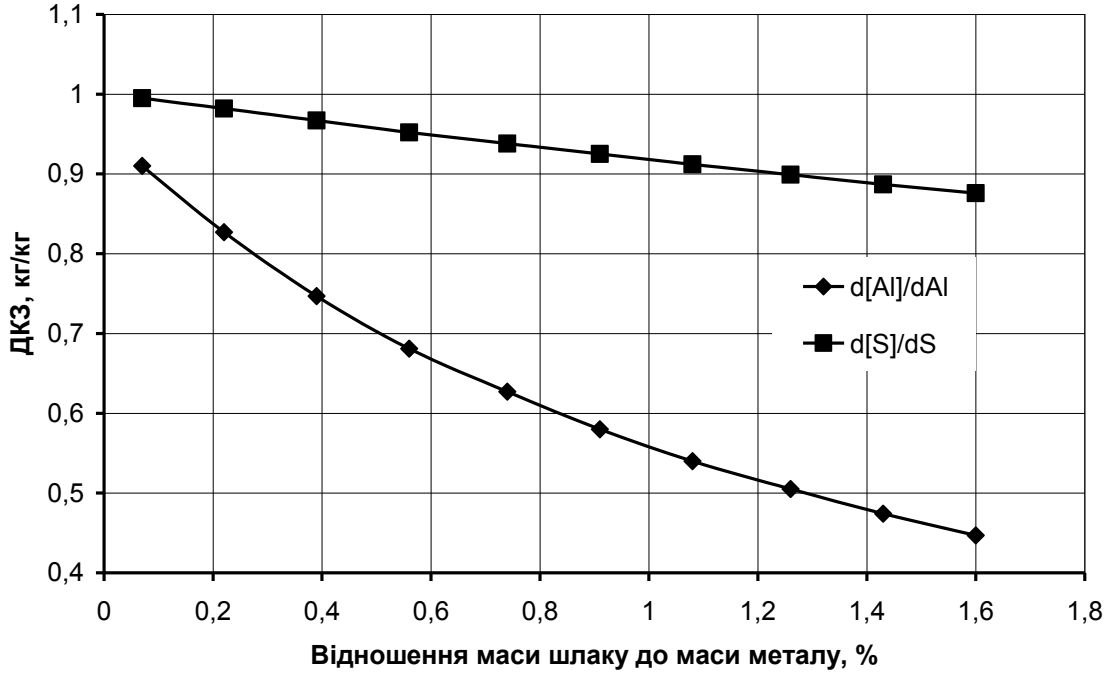


Рисунок 3.14 – Вплив відношення маси шлаку до маси металлу в ковші на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 30ХГС (FeMn=1,5т; SiMn=1,552т; FeSi65=3,836т; ФХ100Б=1,365т; ФХ800Б=1,733т; е/е=1,82 МВтч)

Дослідження впливу відношення маси шлаку до маси металу в ковші на величини ДКЗ вуглецю, марганцю, кремнію і фосфору не виявило чіткої залежності, тому вони графічно не відображалися.

3.4.3 Дослідження впливу ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі (m шл.= 0,01т)

3.4.3.1 Результат дослідження сталі 15 кп

При зниженні тиску з графіку (рис.3.15) видно, що ДКЗ вуглецю, алюмінію та кремнію збільшуються.

Невеликий максимум 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; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

При вакуумно-вуглецевому розкисленні в процесі зниження тиску частина кисню знижується, тому практично весь С залишається в металі.

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

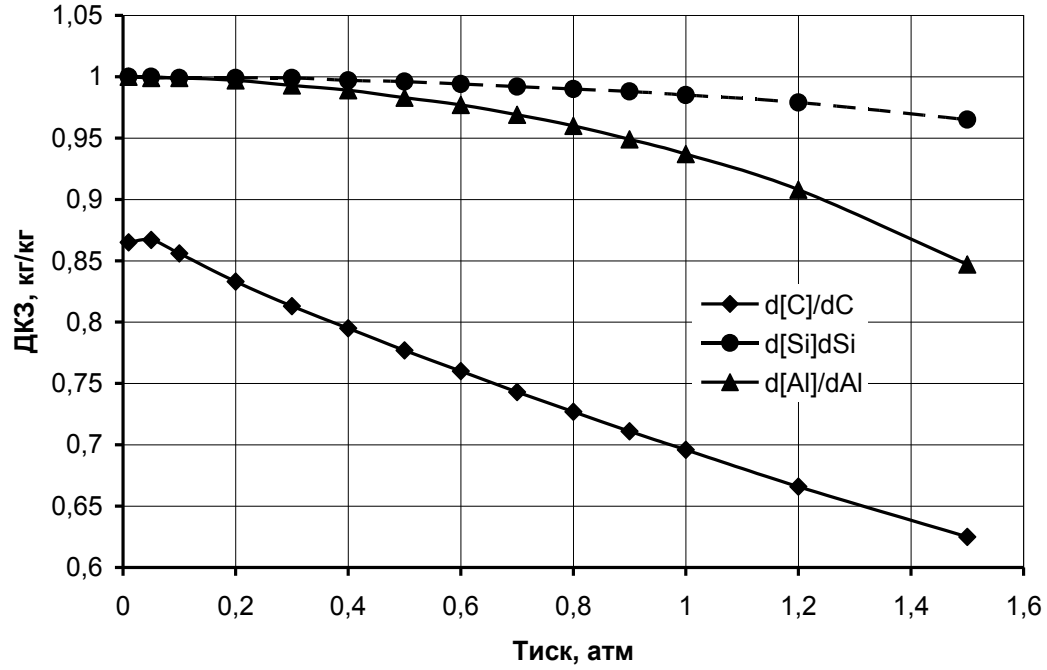


Рисунок 3.15 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 15кп (m шл.= 0,01т)

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 0,01 т, оскільки ефективність вакуумування різко знижується через наявність шлаку. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

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

3.4.3.2 Результат дослідження сталі 10пс

При зниженні тиску з графіку (рис. 3.16) видно, що ДКЗ вуглецю, алюмінію та кремнію збільшуються.

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; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

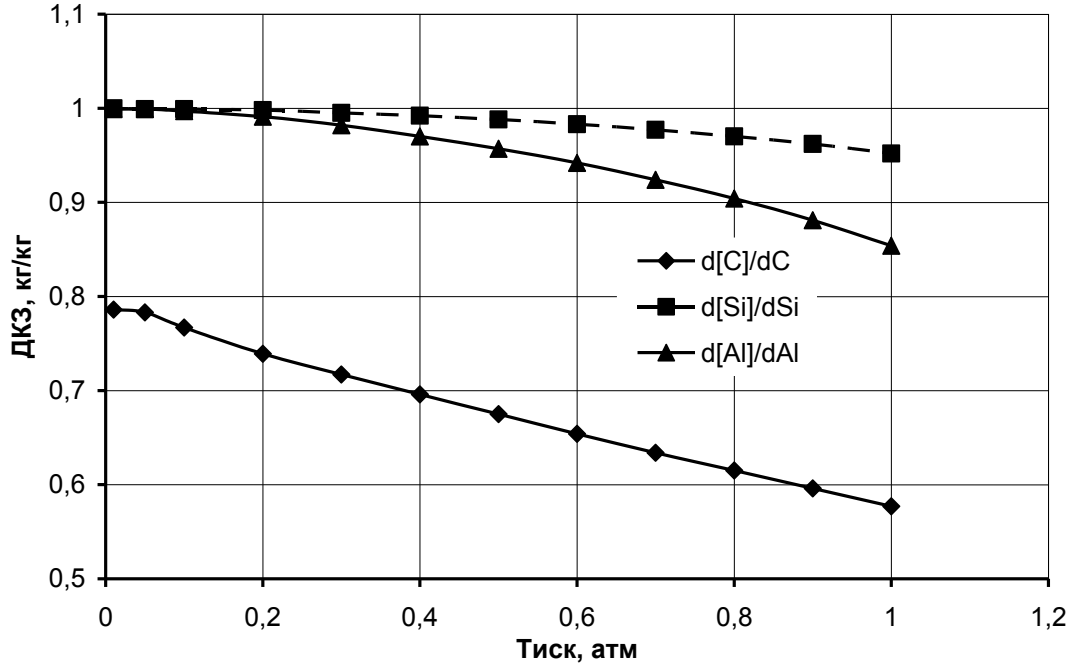


Рисунок 3.16 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 10пс (m шл.= 0,01т)

При вакуумно-вуглецевому розкисленні в процесі зниження тиску частина кисню знижується, тому практично весь C залишається в металі.

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

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 0,01 т, оскільки ефективність вакуумування різко знижується через наявність шлаку. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

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

3.4.3.3 Результат дослідження сталі 16ГС

Складна залежність ДКЗ вуглецю від тиску (рис. 3.17) при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

В інтервалі ефективного тиску від 1 до 1,5 атм відбувається стрибкоподібний перехід до інтенсивного газовиділення, головним чином CO.

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

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 0,01 т, оскільки ефективність вакуумування різко знижується через наявність шлаку. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

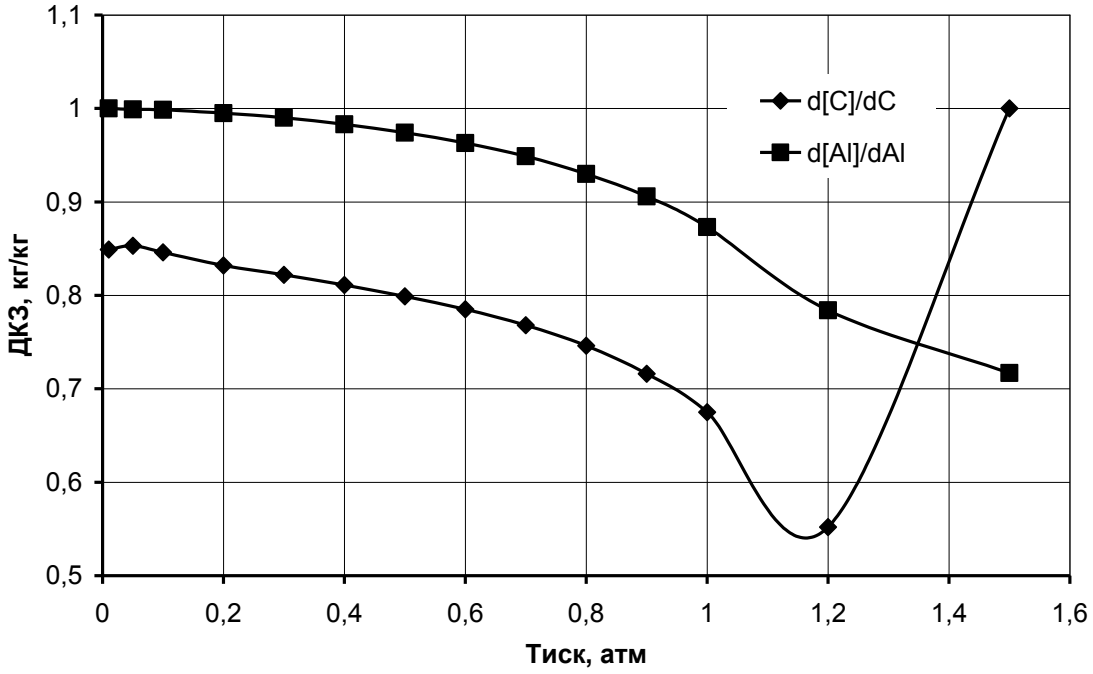


Рисунок 3.17 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 16ГС (m шл.= 0,01т)

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

3.4.3.4 Результат дослідження сталі 18Г2С

Складна залежність ДКЗ вуглецю від тиску (рис. 3.18) при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

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

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу ефективного тиску приймалася рівним 0,01 т, оскільки ефективність вакуумування різко знижується через наявність шлаку. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

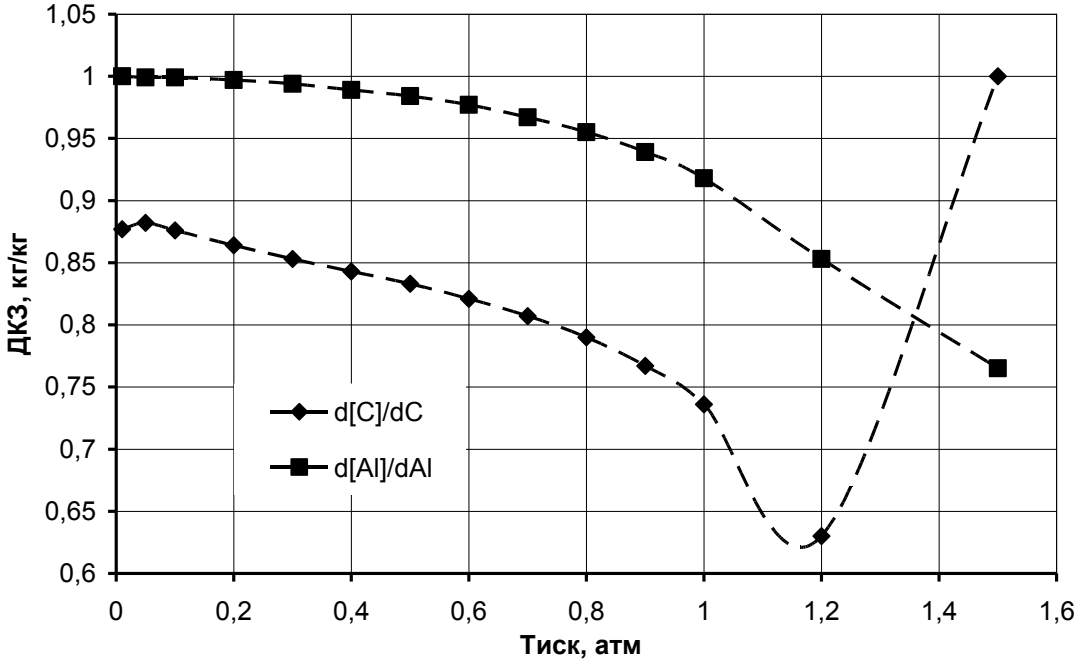


Рисунок 3.18 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 18Г2С (m шл.= 0,01т)

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

3.4.3.5 Результат дослідження сталі 30ХГС

Складна залежність ДКЗ вуглецю від тиску (рис. 3.19) при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

В інтервалі ефективного тиску від 1 до 1,5 атм відбувається стрибкоподібний перехід до інтенсивного газовиділення, головним чином CO.

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

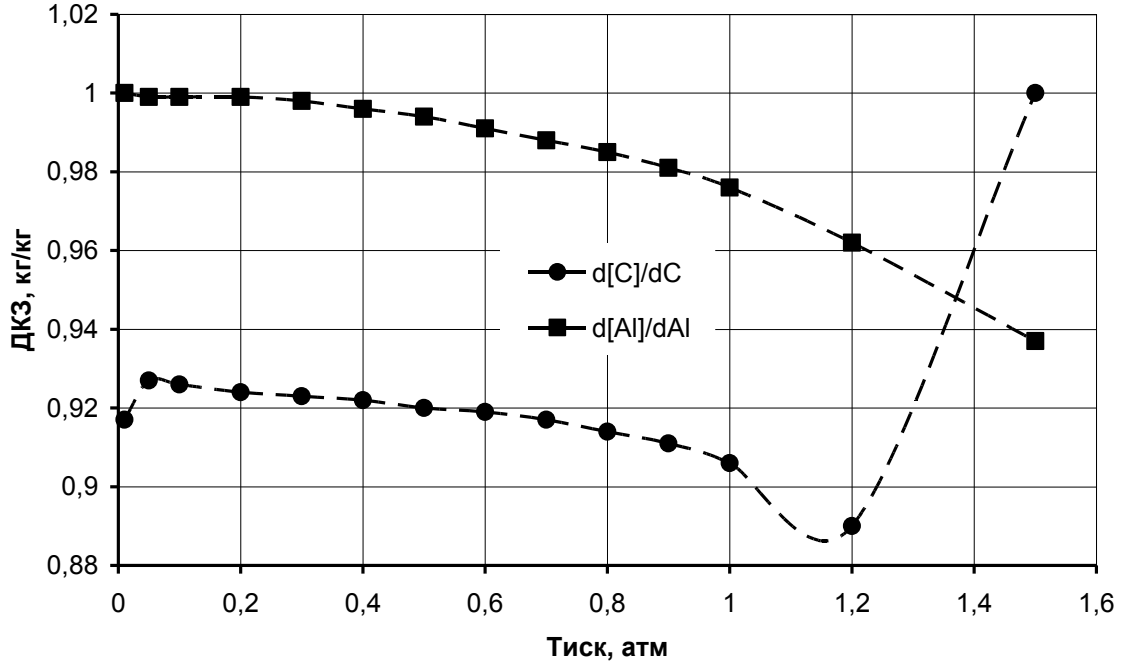


Рисунок 3.19 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 30ХГС (m шл.= 0,01т)

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 0,01 т, оскільки ефективність вакуумування різко знижується через наявність шлаку. Тому загальний рівень ДКЗ елементів виявляється досить високим.

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

3.4.4 Дослідження впливу ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі (m шл.= 3,5- 4,5 т)

3.4.4.1 Результат дослідження сталі 15кп

Залежність ДКЗ елементів від тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

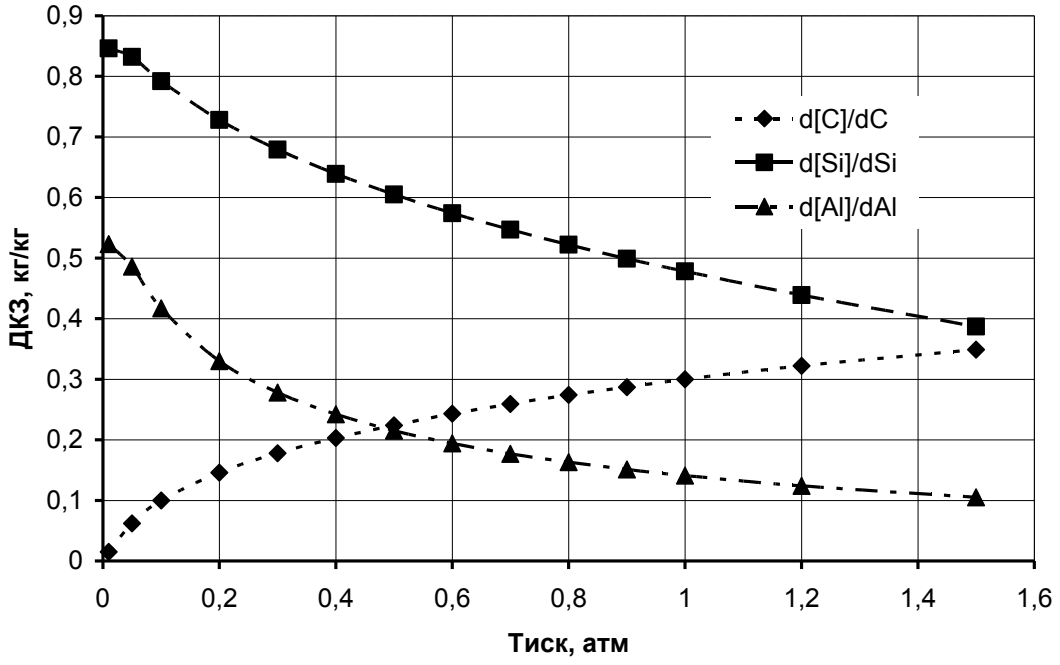


Рисунок 3.20 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 15кп (m шл.=3,5- 4,5т)

При зниженні тиску з графіку (рис.3.20) видно, що ДКЗ алюмінію та кремнію збільшуються, при цьому Al та Si в більшій мірі попадають в метал. Цей процес пояснюється зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. А невеликий вміст вуглецю пояснюється інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO.

З графіку (рис. 3.21) видно, що при зниженні тиску ДКЗ марганцю збільшується, внаслідок зниження окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. При низьких тисках Mn схильний до інтенсивного випаровування більше інших схильних до випаровування елементів, тому при ефективному тиску P = 0,01 атм спостерігається різке зниження ДКЗ по марганцю.

З іншого боку ДКЗ сірки зменшується, бо при зниженні окисленості сірка намагається перейти в шлак.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 3,5 - 4,5 т.

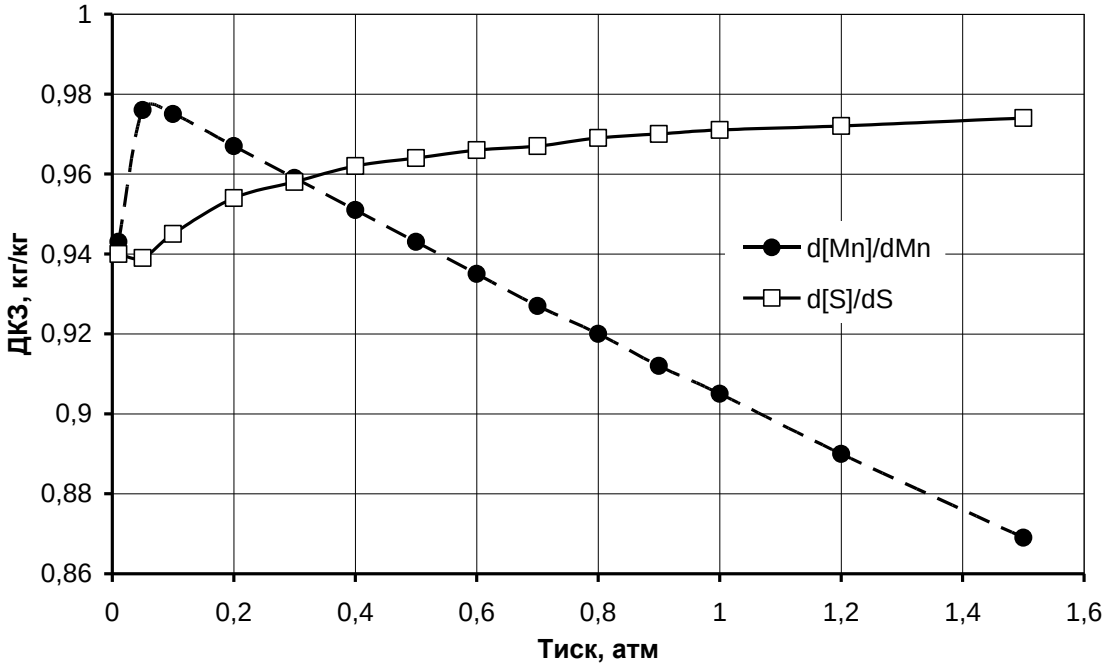


Рисунок 3.21 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 15кп (m шл.=3,5- 4,5т)

Дослідження впливу ефективного тиску не виявило помітного впливу на величини ДКЗ фосфору, тому ця залежність графічно не відображалась.

3.4.4.2 Результат дослідження сталі 10пс

Залежність ДКЗ елементів від тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

При зниженні тиску з графіку (рис. 3.22) видно, що ДКЗ алюмінію збільшується, при цьому Al в більшій мірі попадає в метал. Цей процес пояснюється зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. А невеликий вміст вуглецю пояснюється інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO.

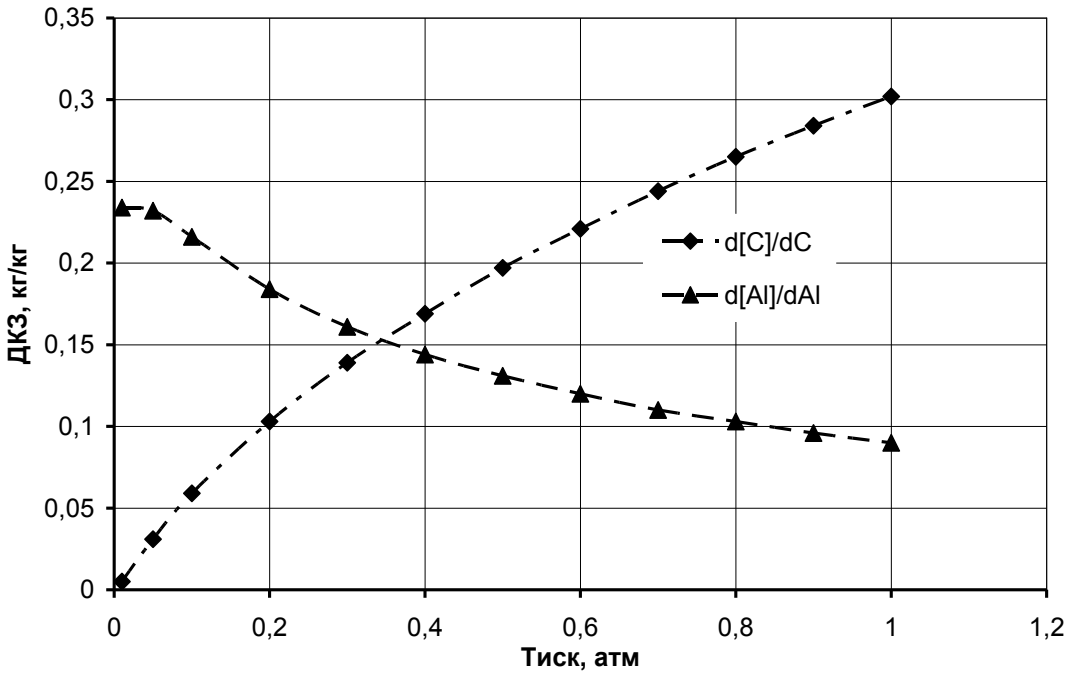


Рисунок 3.22 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 10пс (m шл.= 3,5- 4,5 т)

З графіку (рис. 3.23) видно, що при зниженні тиску ДКЗ марганцю і кремнію збільшується, внаслідок зниження окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. По мірі зниження ефективного тиску настільки зменшується вміст кисню, що подальше зниження тиску вже не приводить до істотної зміни цього показника, таким чином ДКЗ кремнію залежить тільки від кількості шлаку.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу ефективного тиску приймалася рівним 3,5 - 4,5 т.

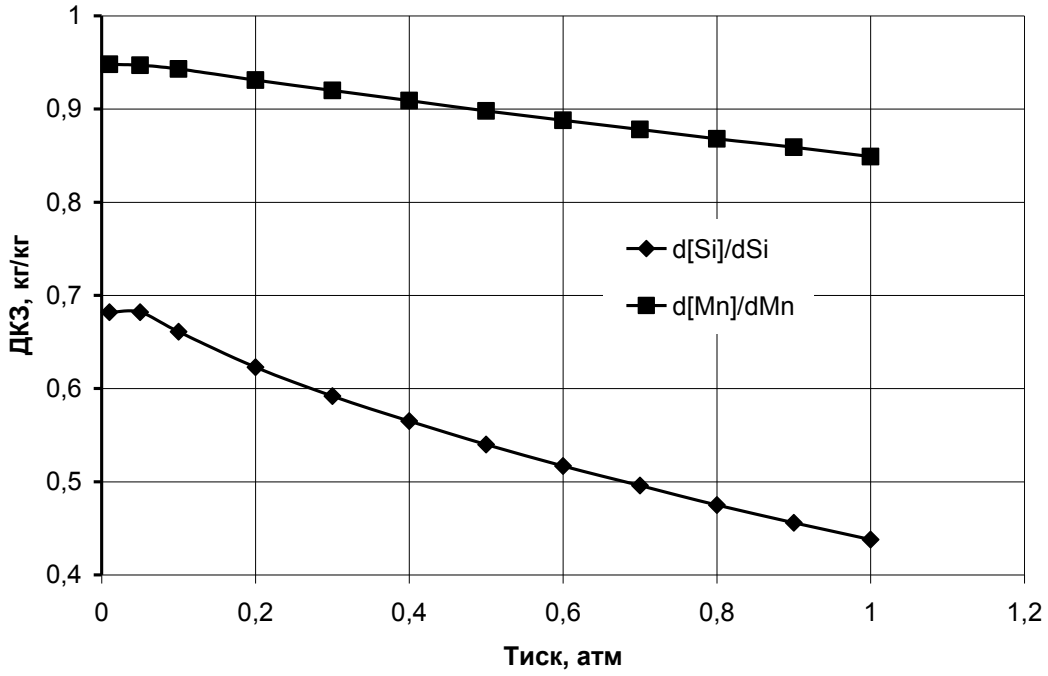


Рисунок 3.23 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 10пс (m шл.=3,5- 4,5т)

Дослідження впливу ефективного тиску не виявило помітного впливу на величини ДКЗ фосфору і сірки, тому ці залежністі графічно не відображались.

3.4.4.3 Результат дослідження сталі 16ГС

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; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

В інтервалі ефективного тиску від 0,7 до 0,8 атм відбувається стрибкоподібний перехід до інтенсивного газовиділення, головним чином CO.

При зниженні тиску з графіку (рис. 3.24) видно, що ДКЗ алюмінію збільшується, при цьому Al в більшій мірі переходить в метал. Цей процес пояснюється зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. А невеликий вміст вуглецю пояснюється інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO.

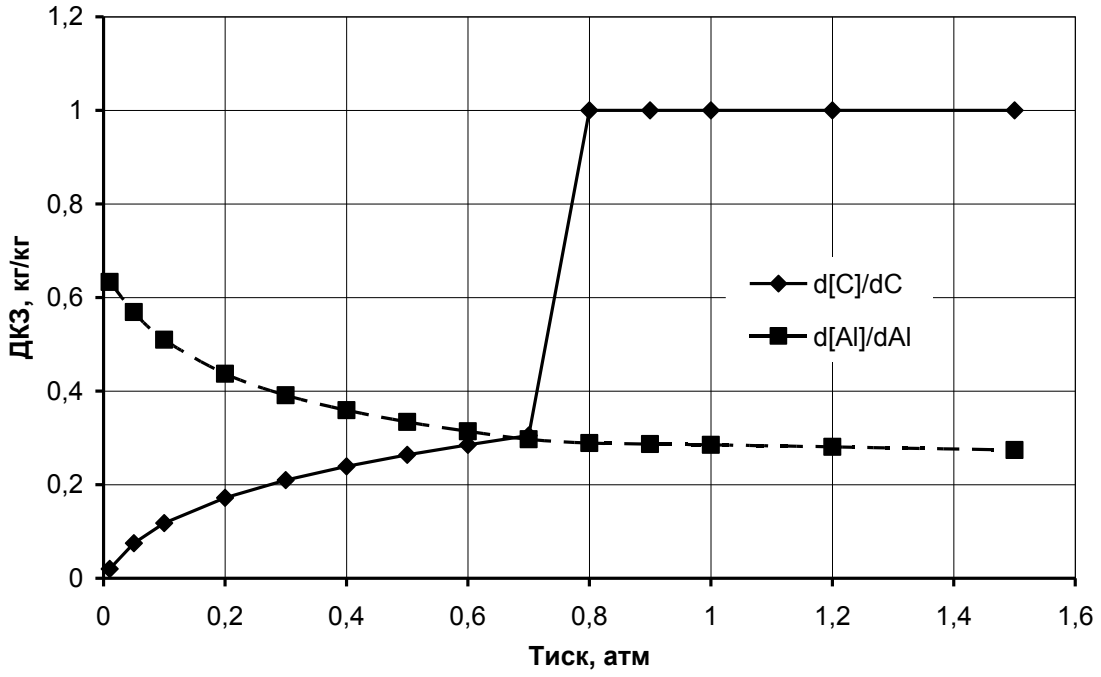


Рисунок 3.24 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 16ГС (m шл.=3,5- 4,5т)

З графіку (рис. 3.25) видно, що при зниженні тиску ДКЗ марганцю збільшується, внаслідок зниження окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. При низьких тисках Mn схильний до інтенсивного випаровування більше інших схильних до випаровування

елементів, тому при ефективному тиску Р = 0,01 атм спостерігається різке зниження ДКЗ по марганцю.

З іншого боку при зменшенні тиску кремній попадає в метал – це пов'язано з тим, що сталь при переході тиску Р = 0,85кПа, переходить із стану спокійної у стан киплячої сталі.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу ефективного тиску приймалася рівним 3,5 - 4,5 т.

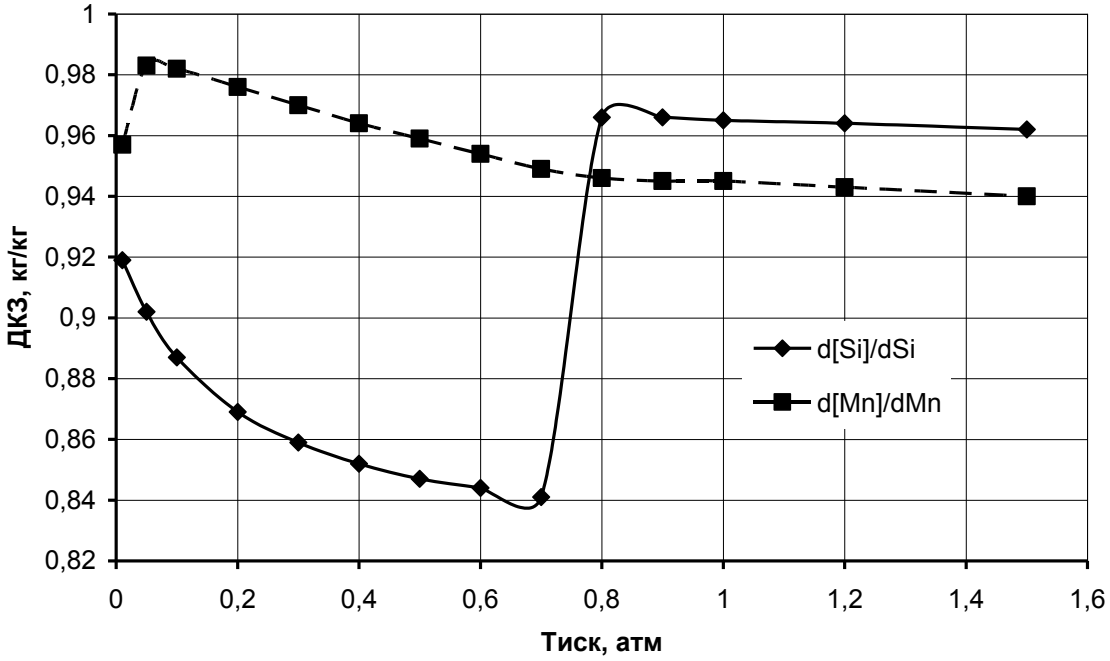


Рисунок 3.25 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 16ГС (m шл.=3,5- 4,5т)

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

3.4.4.4 Результат дослідження сталі 18Г2С

Складна залежність ДКЗ елементів від тиску при вакуумно-вуглецевому розкисленні пояснюється впливом двох взаємовиключних процесів: 1) інтенсивним утворенням СО при зниженні тиску нижче

критичного тиску утворення бульбашок CO; 2) зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення.

При зниженні тиску з графіку (рис. 3.26) видно, що ДКЗ алюмінію збільшується, при цьому Al в більшій мірі попадає в метал. Цей процес пояснюється зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. А невеликий вміст вуглецю пояснюється інтенсивним утворенням CO при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок CO.

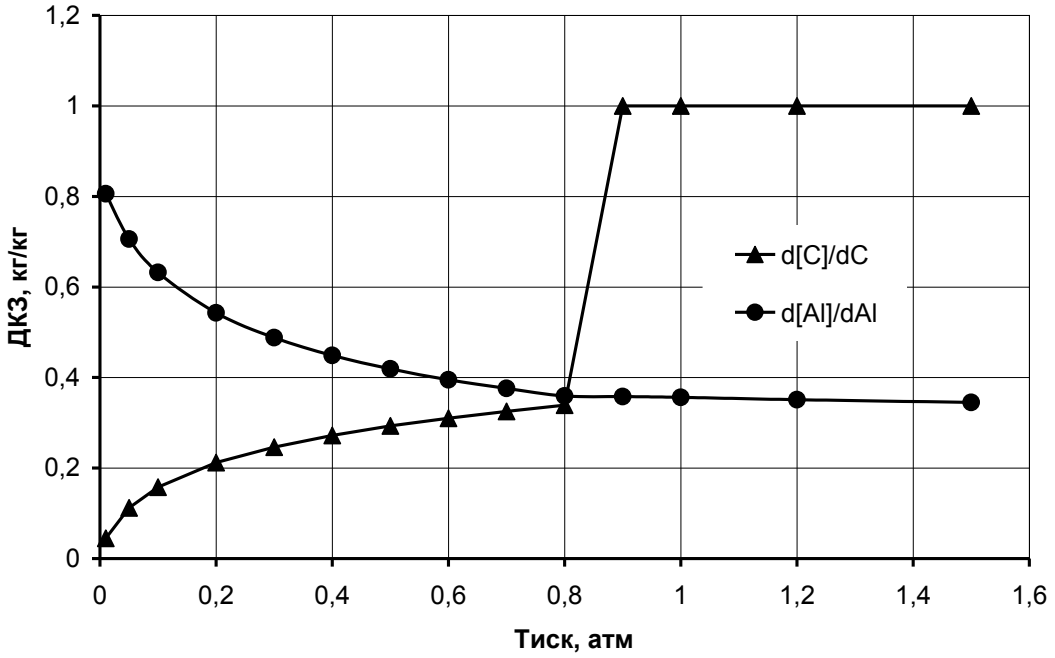


Рисунок 3.26 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 18Г2С (m шл.=3,5- 4,5т)

З графіку (рис. 3.27) видно, що при зниженні тиску ДКЗ марганцю збільшується, внаслідок зниження окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення, а ДКЗ сірки зменшується, бо при зниженні окисленості сірка намагається перейти в шлак. При низьких тисках Mn схильний до інтенсивного випаровування більше інших схильних до випаровування елементів, тому при ефективному тиску P = 0,01 атм спостерігається різке зниження ДКЗ по марганцю.

З іншого боку при зменшенні тиску кремній попадає в метал – це пов’язано з тим, що сталь при переході тиску Р = 0,87кПа, переходить із стану спокійної у стан киплячої сталі.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 3,5 - 4,5 т.

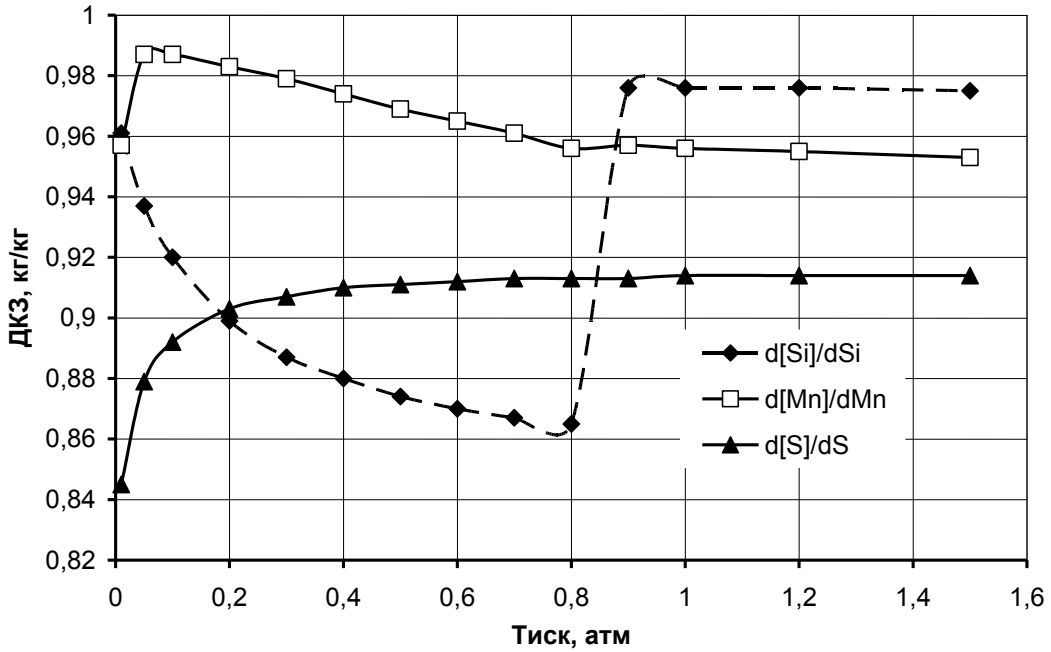


Рисунок 3.27 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 18Г2С (m шл.=3,5- 4,5т)

Дослідження впливу ефективного тиску не виявило помітного впливу на величину ДКЗ фосфору, тому ця залежність графічно не відображалась.

3.4.4.5 Результат дослідження сталі 30ХГС

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

В інтервалі ефективного тиску від 1 до 1,2 атм відбувається стрибкоподібний перехід до інтенсивного газовиділення, головним чином СО.

При зниженні тиску з графіку (рис. 3.28) видно, що ДКЗ алюмінію збільшується, при цьому Al в більшій мірі переходить в метал. Цей процес пояснюється зниженням окисленості системи в результаті вакуумно-вуглецевого розкислення. А невеликий вміст вуглецю пояснюється інтенсивним утворенням СО при зниженні тиску нижче критичного тиску утворення бульбашок СО.

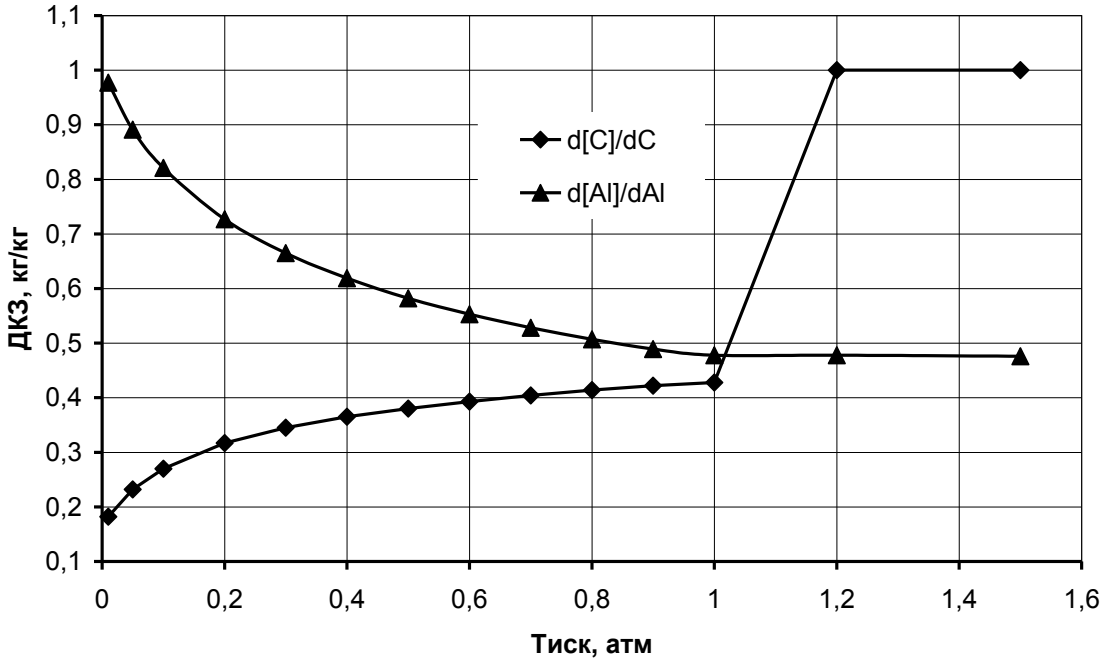


Рисунок 3.28 – Вплив ефективного тиску на ДКЗ елементів при вакуумуванні сталі 30ХГС (m шл.=3,5- 4,5т)

З графіку (рис. 3.29) видно, що при зниженні тиску ДКЗ сірки зменшується, бо при зниженні окисленості сірка намагається перейти в шлак.

Слід також відмітити, що кількість шлаку при дослідженні впливу тиску приймалася рівним 3,5 - 4,5 т.

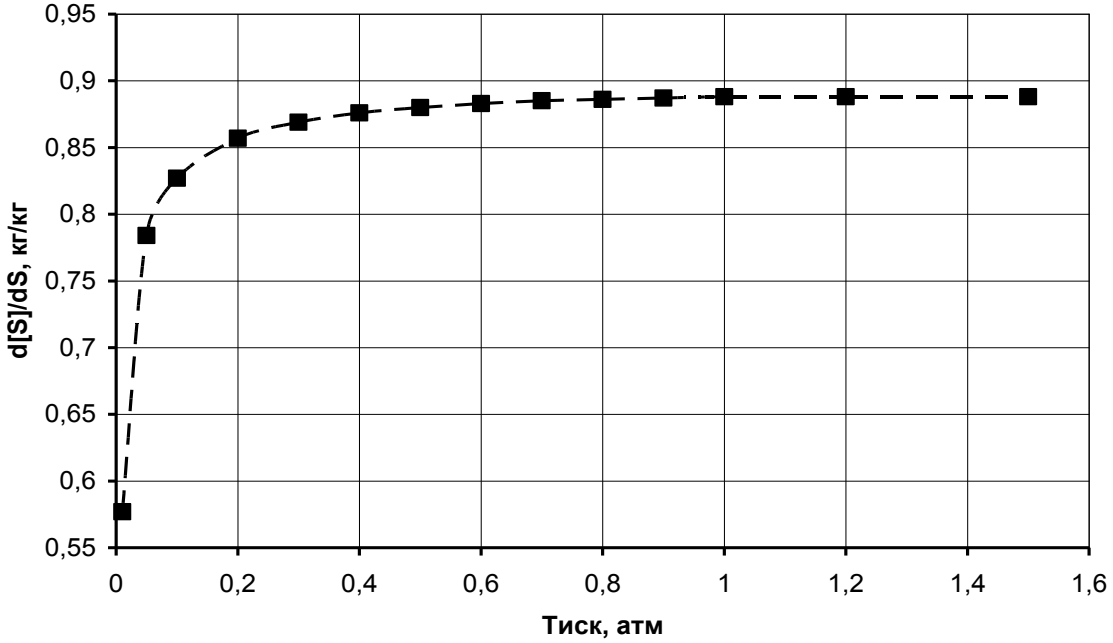


Рисунок 3.29– Вплив ефективного тиску на ДКЗ сірки при вакуумуванні сталі 30ХГС (m шл.=3,5- 4,5т)

Дослідження впливу ефективного тиску не виявило помітного впливу на величини ДКЗ марганцю, кремнію і фосфору, тому ці залежністі графічно не відображалась.

3.4.5 Дослідження зміни частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів у процесі розкислення сталі

3.4.5.1 Результат дослідження сталі 15кп

Перед внесенням феросплавів окисленість металу та частини пічного шлаку, який попадає в ківш, максимальна, тому ДКЗ перших малих порцій вносимих феросплавів мінімальна через інтенсивне окислення легуючих елементів, що добре видно з наведених графіків (рис. 3.30, рис. 3.31). По мірі збільшення частки внесених феросплавів окисленість системи знижується і відповідно ДКЗ легуючих елементів збільшується. Тому в практиці сталеплавильного виробництва перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

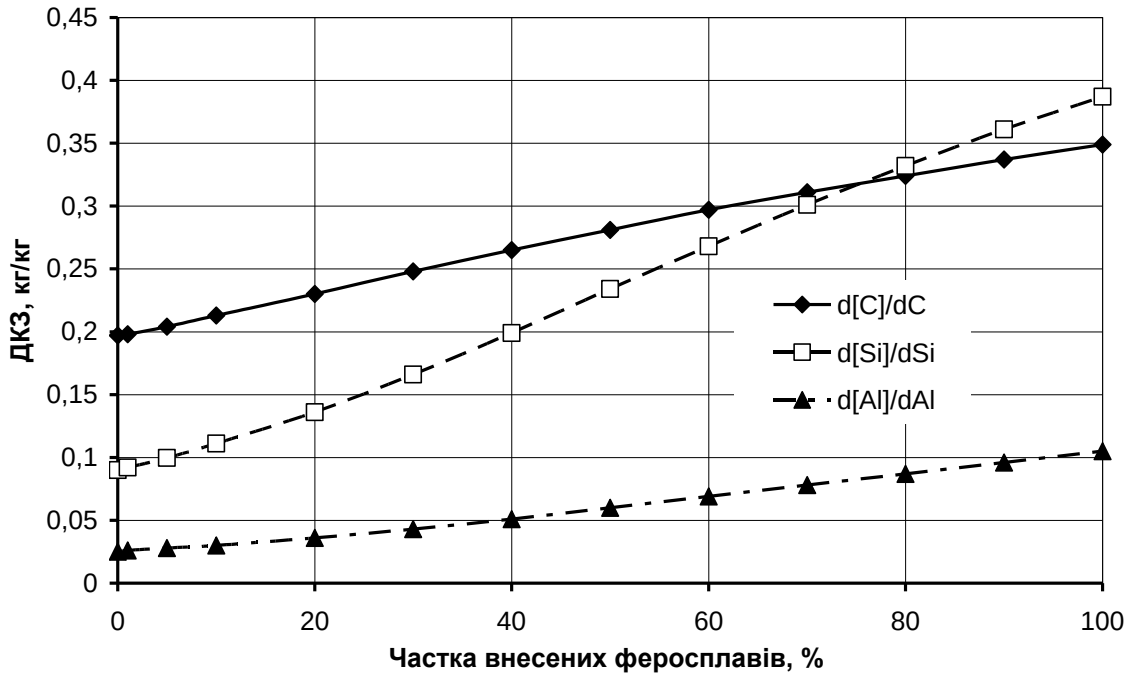


Рисунок 3.30 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 15кп при температурі 1630ºС

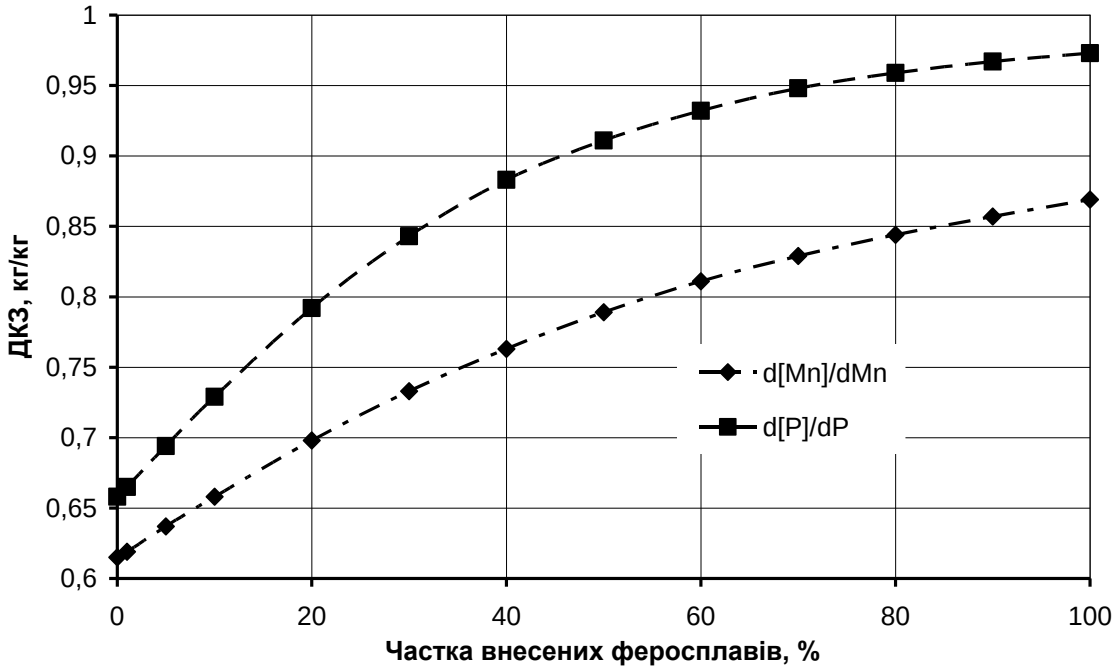


Рисунок 3.31 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 15кп при температурі 1630ºС

3.4.5.2 Результат дослідження сталі 10пс

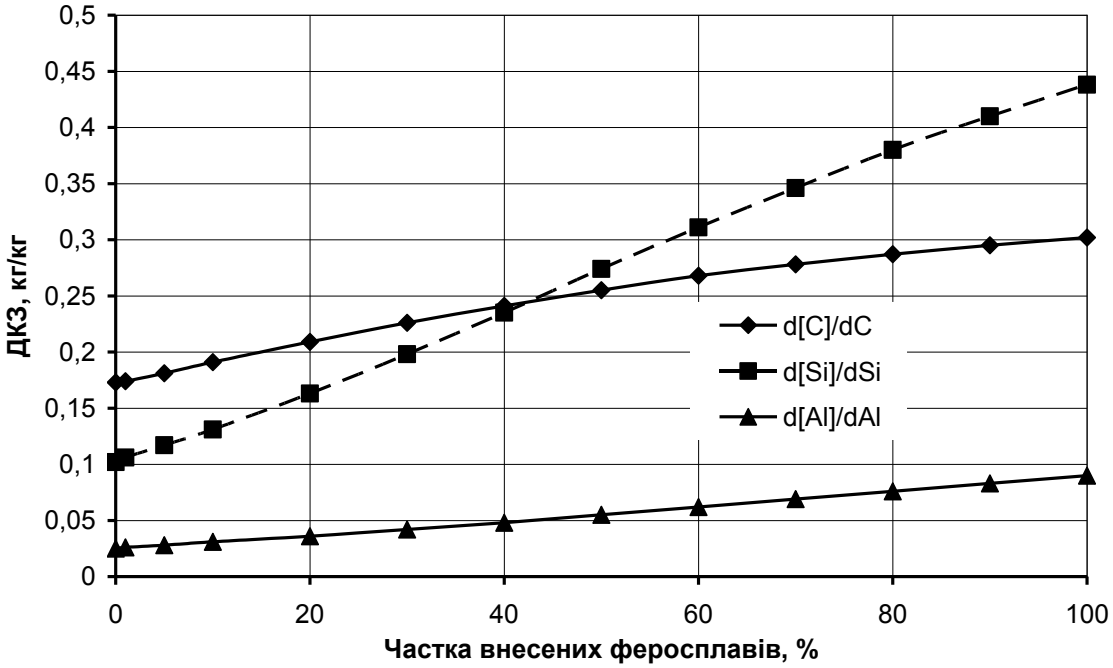


Рисунок 3.32 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 10пс при температурі 1620ºС

Перед внесенням феросплавів окисленість металу та частини пічного шлаку, який попадає в ківш, максимальна, тому ДКЗ перших малих порцій вносимих феросплавів мінімальна через інтенсивне окислення легуючих елементів, що добре видно з наведених графіків. По мірі збільшення частки внесених феросплавів окисленість системи знижується і відповідно ДКЗ легуючих елементів збільшується. Тому в практиці сталеплавильного виробництва перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

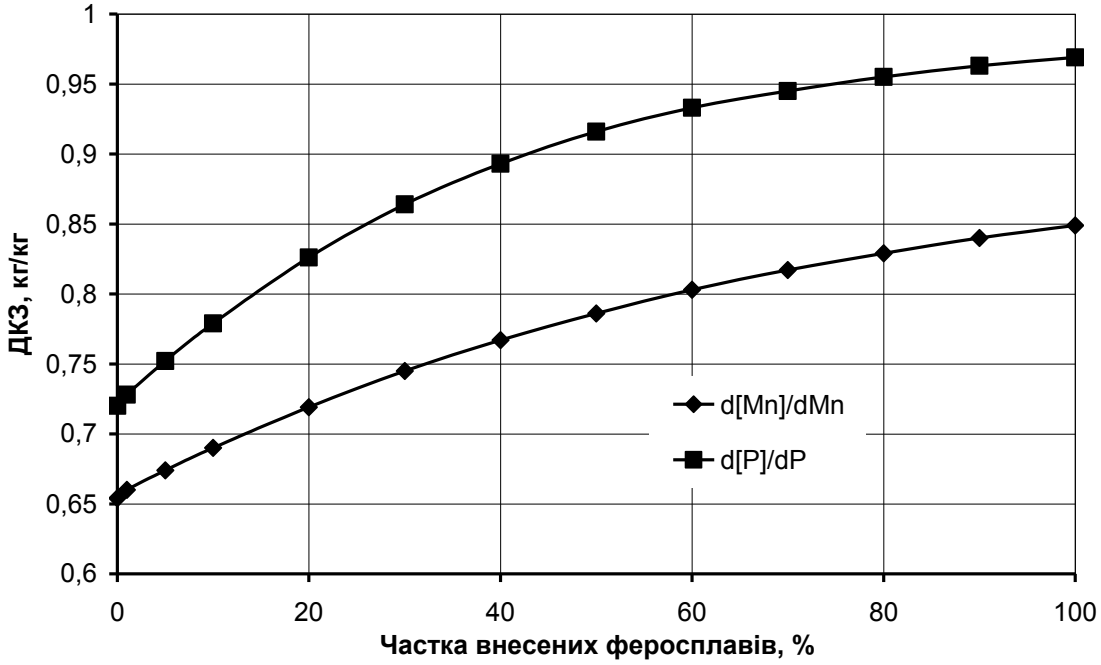


Рисунок 3.33– Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 10пс при температурі 1620ºС

3.4.5.3 Результат дослідження сталі 16ГС

Після внесення 30% феросплавів сталь вже стає спокійною і ДКЗ вуглецю залишається на одному рівні близько одиниці (рис. 3.34).

Перед внесенням феросплавів окисленість металу та частини пічного шлаку, який попадає в ківш, максимальна, тому ДКЗ перших малих порцій вносимих феросплавів мінімальна через інтенсивне окислення легуючих елементів, що добре видно з наведених графіків (рис.3.34, рис.3.35). По мірі збільшення частки внесених феросплавів окисленість системи знижується і відповідно ДКЗ легуючих елементів збільшується. Тому в практиці сталеплавильного виробництва перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

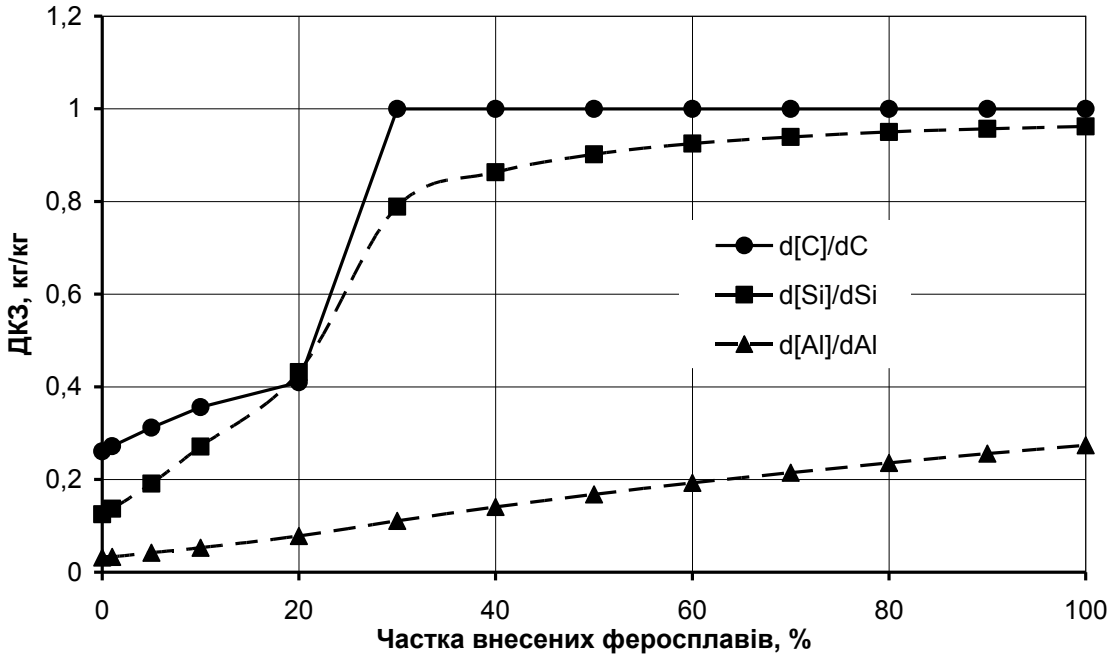


Рисунок 3.34 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 16ГС при температурі 1620ºС

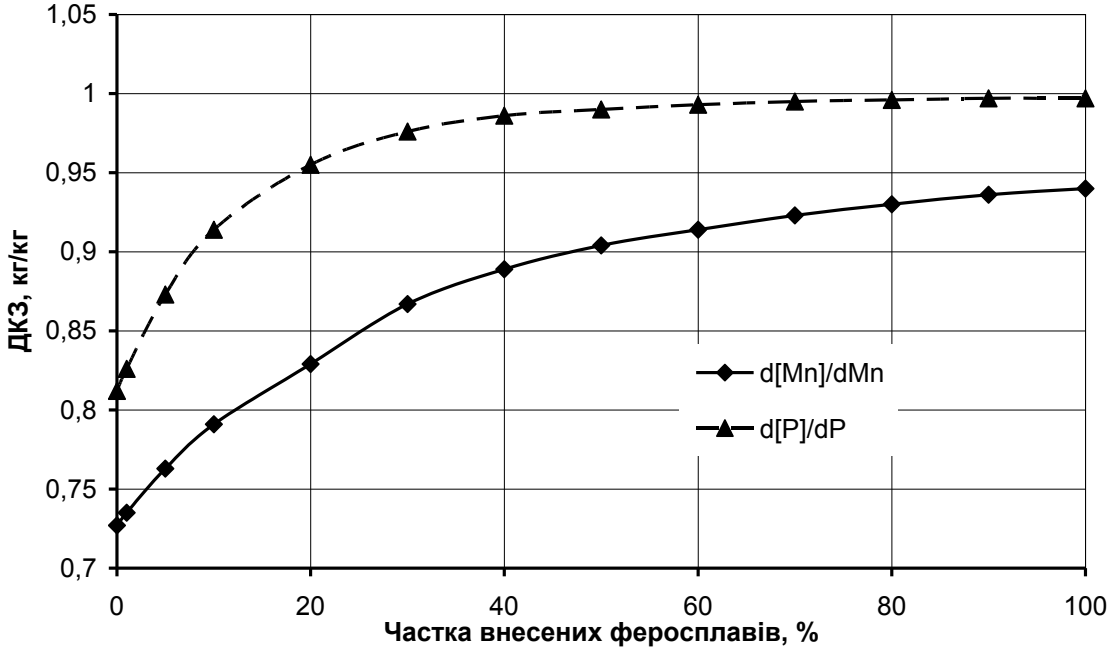


Рисунок 3.35 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 16ГС при температурі 1620ºС

3.4.5.4 Результат дослідження сталі 18Г2С

Після внесення 30% феросплавів сталь вже стає спокійною і ДКЗ вуглецю залишається на одному рівні близько одиниці.

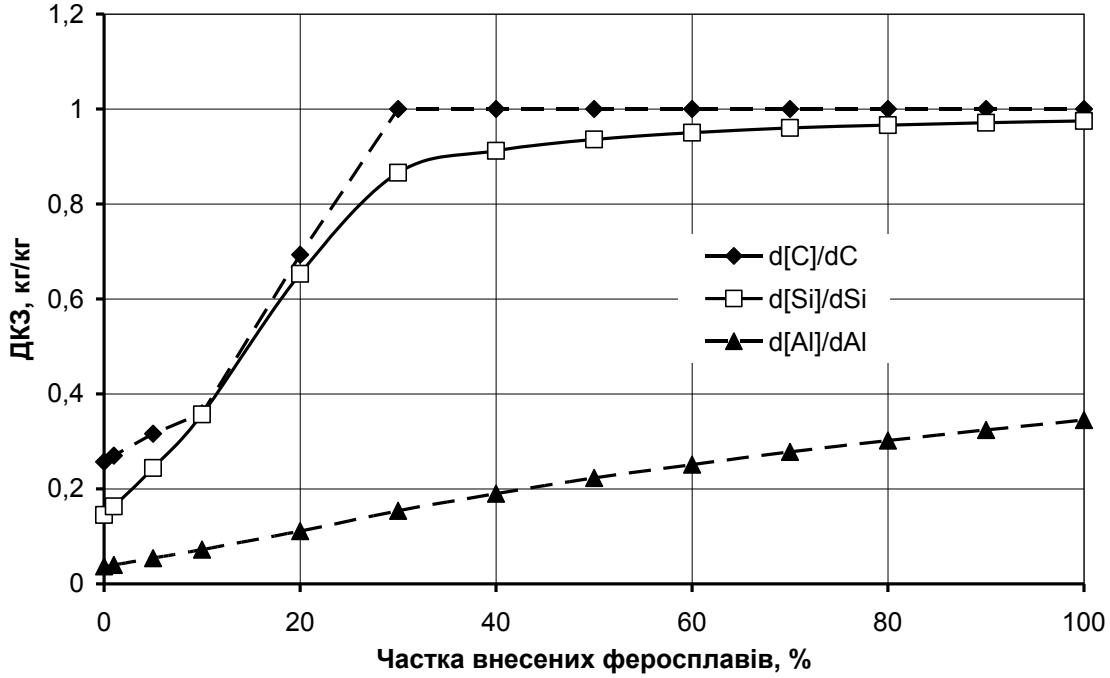


Рисунок 3.36 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 18Г2С при температурі 1630ºС

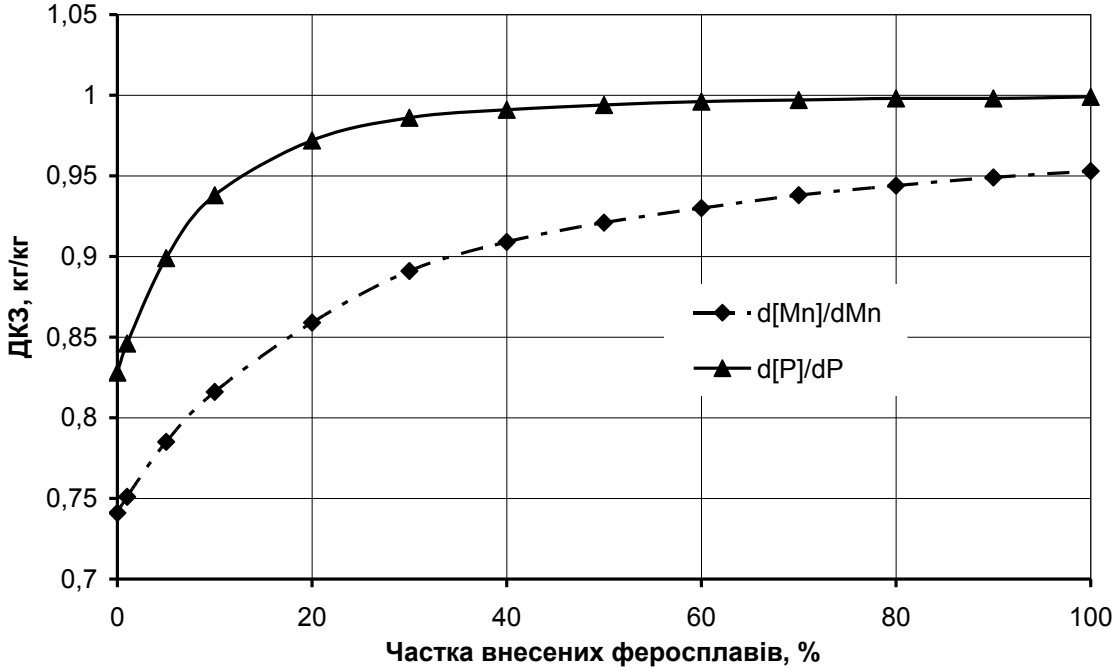


Рисунок 3.37 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 18Г2С при температурі 1630ºС

Перед внесенням феросплавів окисленість металу та частини пічного шлаку, який попадає в ківш, максимальна, тому ДКЗ перших малих порцій вносимих феросплавів мінімальна через інтенсивне окислення легуючих елементів, що добре видно з наведених графіків (рис. 3.36, рис 3.37). По мірі збільшення частки внесених феросплавів окисленість системи знижується і відповідно ДКЗ легуючих елементів збільшується. Тому в практиці сталеплавильного виробництва перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

3.4.5.5 Результат дослідження сталі 30ХГС

При збільшенні частки внесених феросплавів від 40 до 60 % різко підвищується ДКЗ вуглецю, що пов'язано із заспокоєнням сталі в результаті розкислення та припинення виділення газової фази.

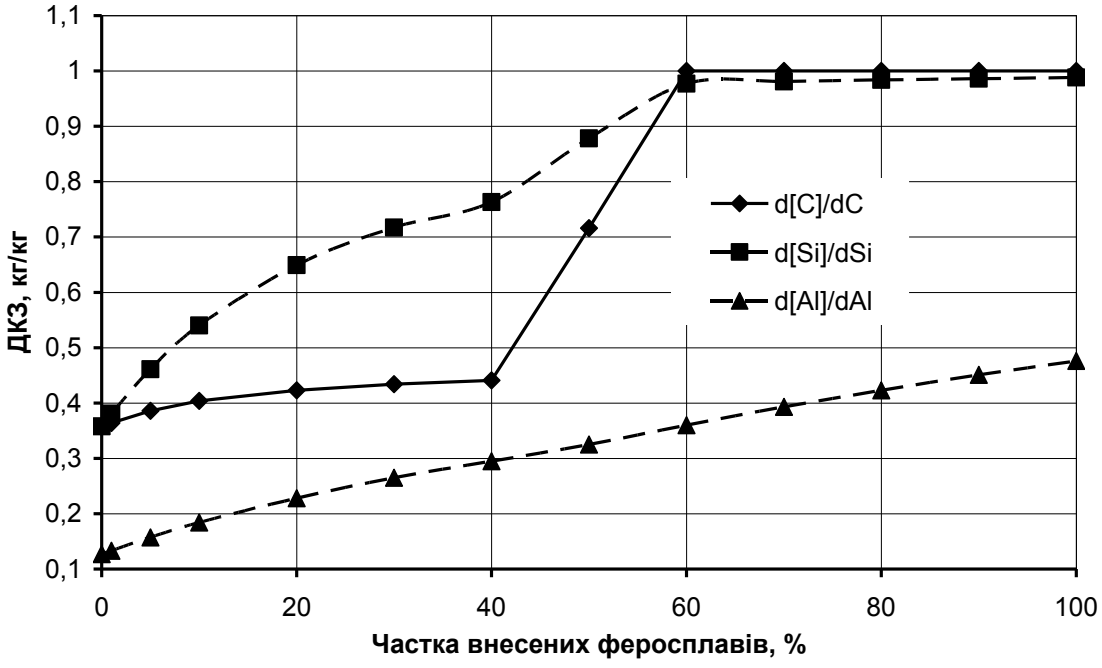


Рисунок 3.38 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 30ХГС при температурі 1630ºС

З графіку (рис. 3.39) видно, що при збільшенні частки внесених феросплавів знижується ДКЗ сірки, таким чином знижується перехід сірки до металу. Підвищення розкисленості системи знижує вміст сірки в металі та сприяє переходу її до шлаку.

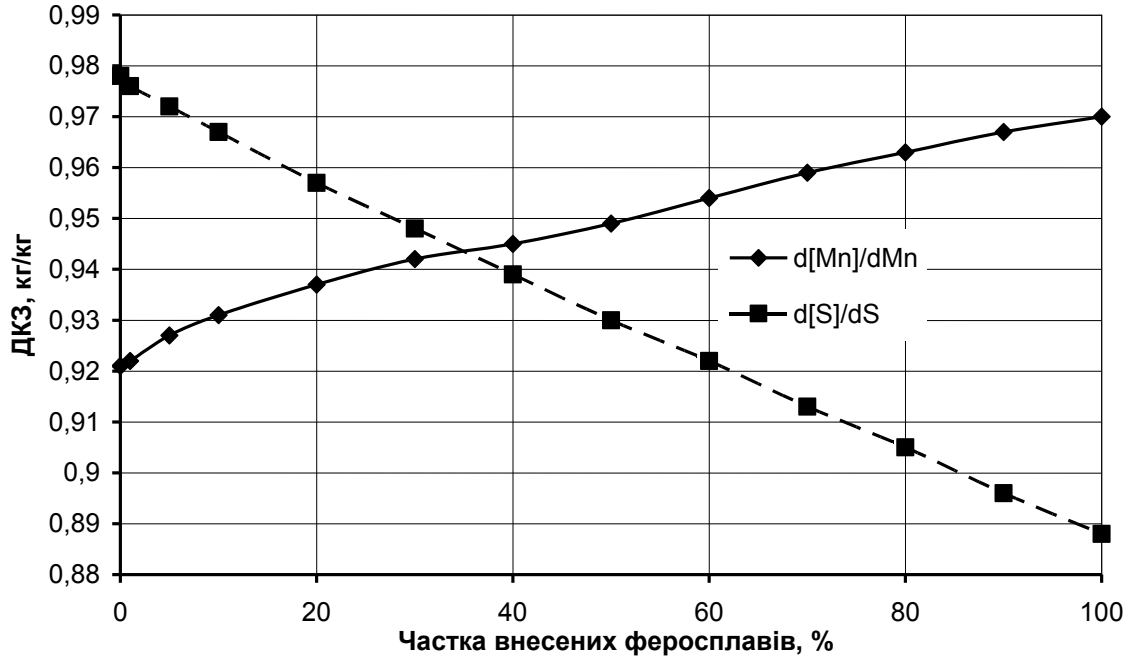


Рисунок 3.39 – Вплив частки внесених феросплавів на ДКЗ елементів при легуванні сталі 30ХГС при температурі 1630ºС

Перед внесенням феросплавів окисленість металу та частини пічного шлаку, який попадає в ківш, максимальна, тому ДКЗ перших малих порцій вносимих феросплавів мінімальна через інтенсивне окислення легуючих елементів, що добре видно з наведених графіків. По мірі збільшення частки внесених феросплавів окисленість системи знижується і відповідно ДКЗ легуючих елементів збільшується. Тому в практиці сталеплавильного виробництва перед тим, як додати дорогі феросплави, проводять попереднє розкислення більш дешевими феросплавами.

3.4.6 Дослідження впливу окисленості сталі на ДКЗ елементів при розкисленні сталі

3.4.6.1 Результат дослідження сталі 15пс

З наведених графіків (рис.3.40, рис. 3.41) видно, що при зменшенні вмісту кисню в сталі перед випуском, тобто при зменшенні окисленості сталі, збільшуються ДКЗ усіх елементів при розкисленні сталі 15кп. Це пояснюється тим, що кисень розчинений в металі взаємодіє з елементами – розкислювачами, які у виді оксидів переходять до шлаку. У виробничій практиці загальновідомим є той факт, що питома витрата феросплавів, які використовуються для розкислення, збільшується при підвищенні окисленості сталі. Тому при виплавці сталі прагнуть отримати вміст вуглецю, який відповідає нижній межі хімічного складу готової сталі. Таким чином, мінімізується негативний вплив підвищеної окисленості на ДКЗ та витрату феросплавів.

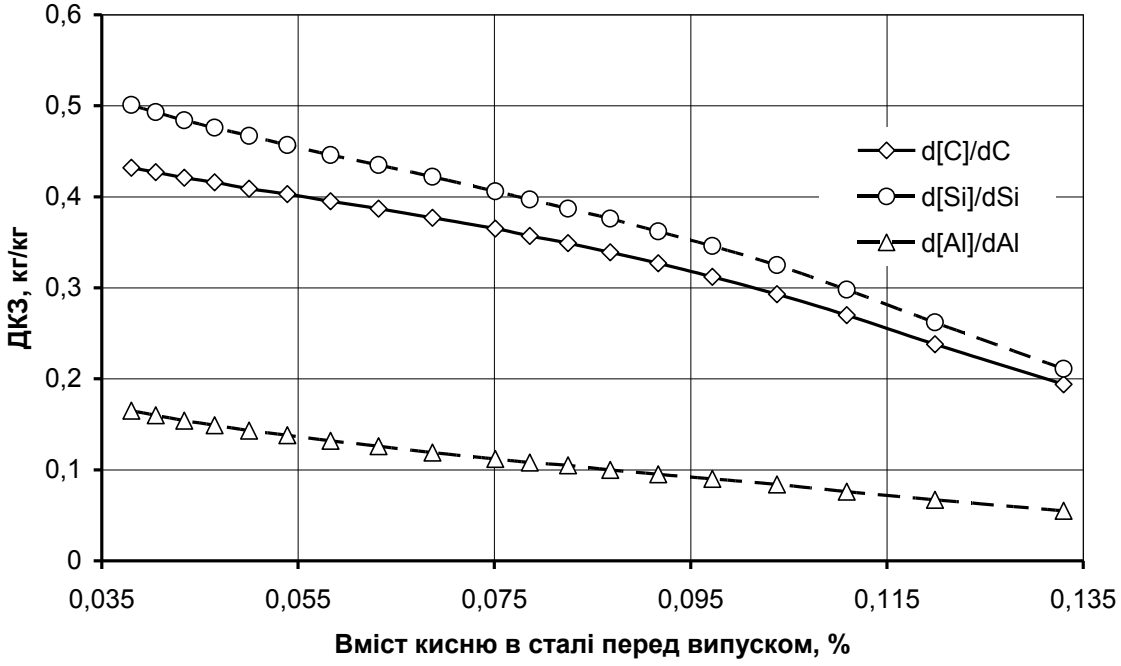


Рисунок 3.40 – Вплив окисленості сталі на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 15кп

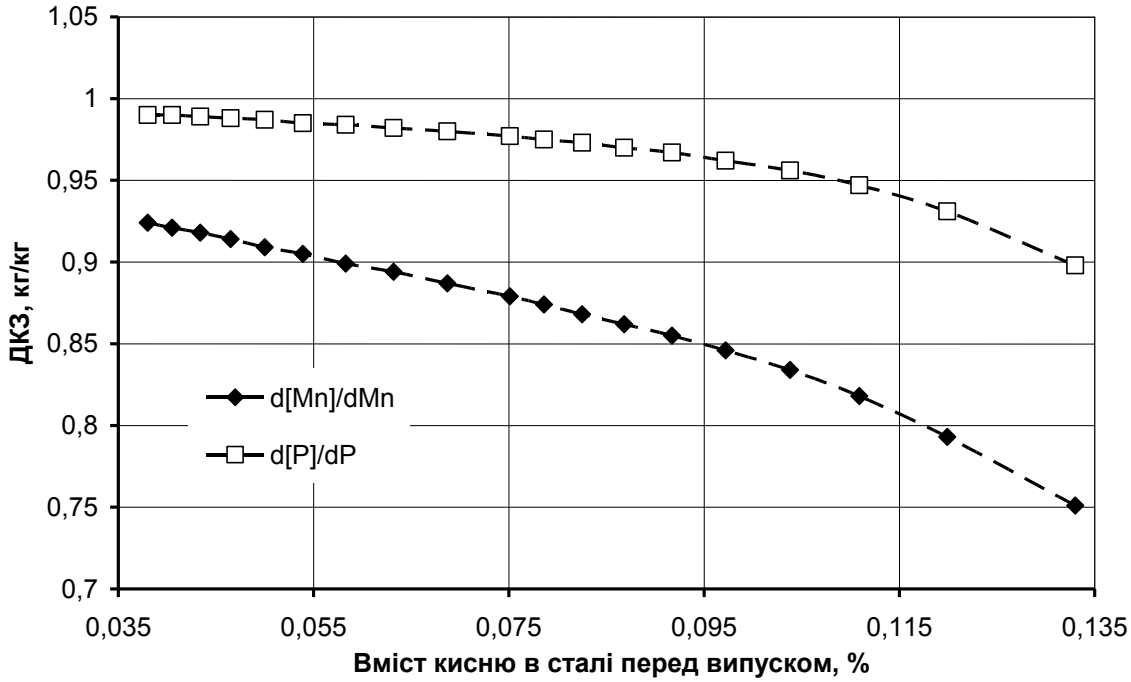


Рисунок 3.41 – Вплив окисленості сталі на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 15кп

3.4.6.2 Результат дослідження сталі 10пс

З наведених графіків (рис.3.42, рис. 3.43) видно, що при зменшенні вмісту кисню в сталі перед випуском, тобто при зменшенні окисленості сталі, збільшуються ДКЗ усіх елементів при розкисленні сталі 10пс. Це пояснюється тим, що кисень розчинений в металі взаємодіє з елементами – розкислювачами, які у виді оксидів переходять до шлаку. У виробничій практиці загальновідомим є той факт, що питома витрата феросплавів, які використовуються для розкислення, збільшується при підвищенні окисленості сталі. Тому при виплавці сталі прагнуть отримати вміст вуглецю, який відповідає нижній межі хімічного складу готової сталі. Таким чином, мінімізується негативний вплив підвищеної окисленості на ДКЗ та витрату феросплавів.

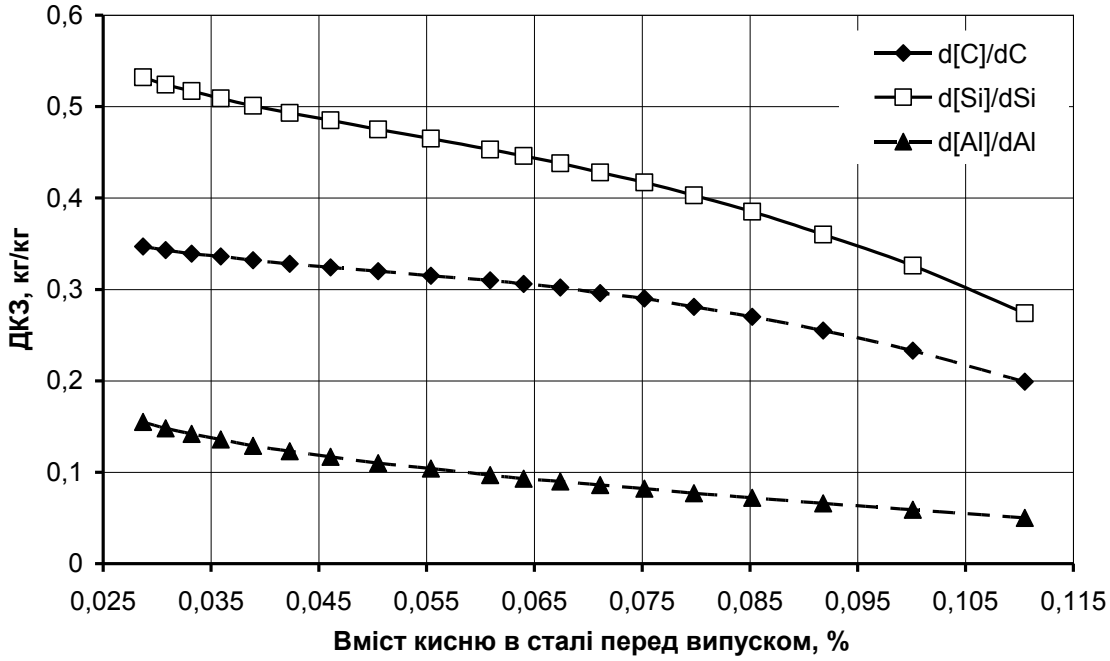


Рисунок 3.42 – Вплив окисленості сталі на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 10пс

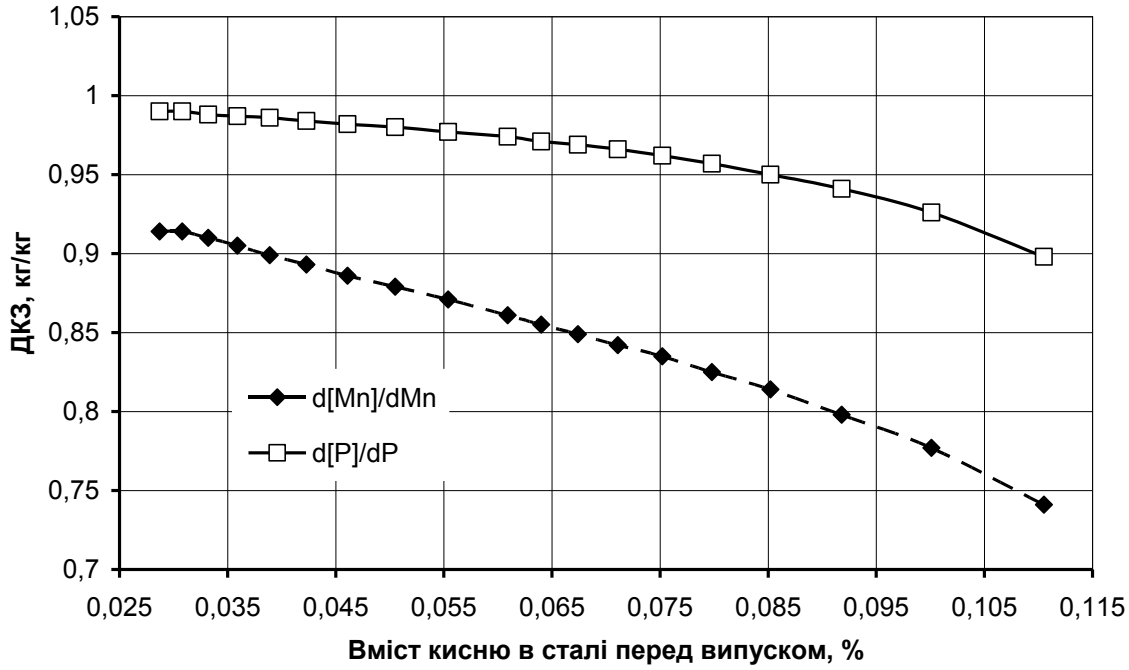


Рисунок 3.43 – Вплив окисленості сталі на ДКЗ елементів при розкисленні сталі 10пс

3.5 Аналіз отриманих результатів

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

- із підвищенням температури системи зростає маса утвореного газу, що призводить до зниження диференціальних коефіцієнтів засвоєння по вуглецю через зміщення рівноваги в бік утворення монооксиду вуглецю;
- підвищення температури сприяє збільшенню диференціальних коефіцієнтів засвоєння по фосфору, марганцю та кремнію в киплячих і напівспокійних сталях, оскільки рівновага зміщується в бік відновлення елементів із позитивною валентністю;
- при підвищенні температури рівновага зсувається в бік відновлення елементів із позитивною валентністю, що підвищує ДКЗ алюмінію у всіх марках сталі (рис. 3.44), однак для напівспокійної сталі загальний рівень алюмінію залишається доволі низьким;

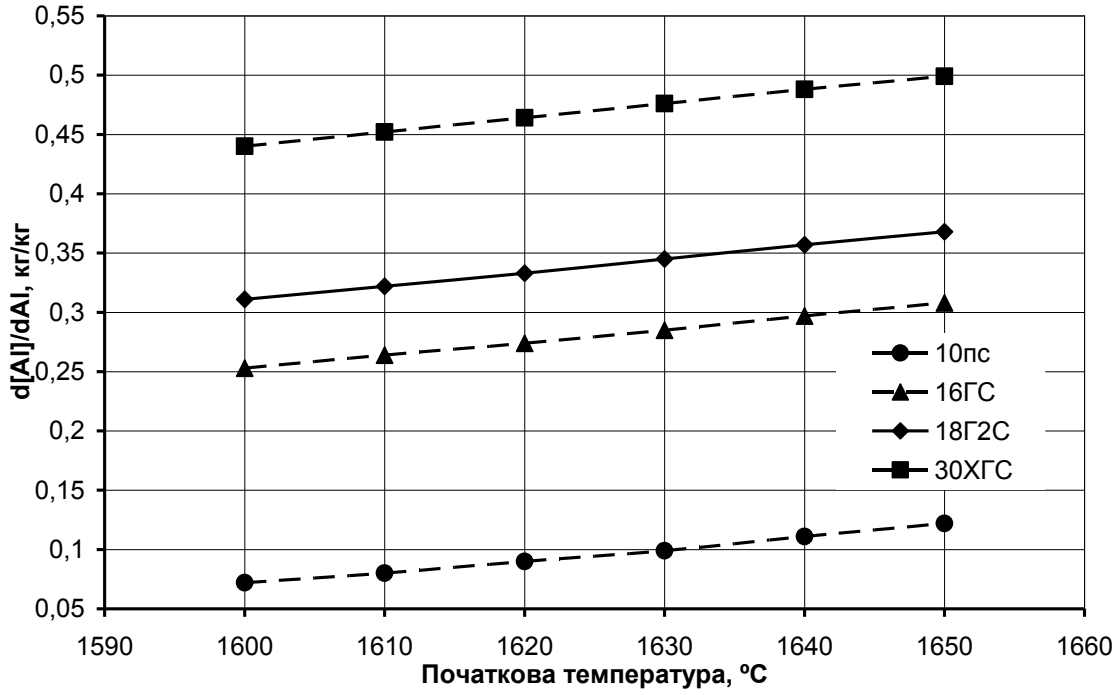


Рисунок 3.44 – Вплив початкової температури на ДКЗ алюмінію при розкисленні сталей 10пс, 16ГС, 18Г2С, 30ХГС

- зміна температури системи майже не впливає на диференціальні коефіцієнти засвоєння сірки;
- зростання початкової температури системи закономірно викликає підвищення її кінцевої температури. Невелике зниження кінцевої температури відносно початкової пояснюється втратами тепла на нагрів і плавлення феросплавів, а також на нагрів футерування ковша;
- підвищення температури системи зменшує масу шлаку. Це, у поєднанні зі зміщенням рівноваги в бік відновлення елементів і їх переходу зі шлаку в метал, сприяє підвищенню диференціальних коефіцієнтів засвоєння окремих елементів;
- збільшення співвідношення маси шлаку до маси металу в ковші знижує диференціальні коефіцієнти засвоєння для всіх елементів. У таких умовах вуглець переходить у газову фазу, а кремній, алюміній, марганець і сірка – у шлак;
- збільшення відношення маси шлаку до маси металу в ковші призводить до відносного збільшення маси газу у зв'язку зі збільшенням загального вмісту (FeO) в системі «метал-шлак-газ» і взаємодією кисню (FeO) і інших оксидів з розчиненим в металі вуглецем з утворенням монооксиду вуглецю по реакції $(FeO) + [C] = [Fe] + \{CO\}$;
- диференціальні коефіцієнти засвоєння вуглецю залежать від тиску у вакуумно-вуглецевому розкисленні, що зумовлено впливом двох взаємовиключних процесів:

1. активним утворенням CO при тиску нижче критичного для утворення бульбашок;
2. зниженням загальної окисленості системи внаслідок вакуумно-вуглецевого розкислення;

- зниження тиску під час вакуумно-вуглецевого розкислення зменшує температуру системи, оскільки ця реакція є ендотермічною;
- із підвищенням частки феросплавів у системі знижується окисленість, що збільшує диференціальні коефіцієнти засвоєння легуючих

елементів. Через це в сталеплавильній практиці перед внесенням дорогих феросплавів виконують попереднє розкислення більш дешевшими;

- зниження кисню в сталі перед випуском сприяє підвищенню диференціальних коефіцієнтів засвоєння елементів при розкисленні сталі, оскільки розчинений кисень реагує з розкислювачами, які переходять у шлак у формі оксидів.

У виробничій практиці відомо, що питома витрата феросплавів на розкислення зростає при підвищенні окисленості сталі. Тому при виплавці прагнуть досягти мінімального вмісту вуглецю в межах хімічного складу готової сталі, що дозволяє знизити негативний вплив підвищеної окисленості на на ДКЗ та витрати феросплавів.

3.6 Техніко–економічне обґрунтування

Розрахунок диференціальних коефіцієнтів засвоєння спрямований на оптимізацію використання і зниження витрат дорогих феросплавів.

Застосування виявлених закономірностей, таких як вплив початкової температури, відносної маси шлаку під час розкислення сталі, ефективного тиску при вакуумуванні, зміни частки внесених феросплавів при розкислені сталі і рівня окисленості сталі на ДКЗ елементів, дозволяє раціональніше використовувати легуючі матеріали, забезпечуючи отримання необхідного складу металу за основними легуючими елементами, наближеного до нижньої межі їх допустимого вмісту.

Техніко-економічні розрахунки, проведені для комбінату «Запоріжсталь», демонструють економію питомої витрати феросплавів у межах 0,2–0,5 кг/т.

3.7 Висновки

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.

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.

Отримані залежності є частиною термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» і відповідних алгоритмів, покладених в основу програми «Excalibur» і аналогічних програм, що працюють в якості верхнього рівня систем управління сталеплавильним виробництвом на комбінаті «Запоріжсталь». Оптимізація процесів розкислення сталі на основі вивчення температурного режиму, співвідношення шлаку і металу, рівня тиску та внесення феросплавів забезпечує як підвищення якості сталі, так і значну економію виробничих ресурсів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища 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 ківшів; пил, що утворюється при транспортуванні сипких матеріалів, продуванні конвертора, сливі чавуну з ківшу в конвертор, випуску сталі і шлаку з конвертора, ломці футерування конвертора і ківшів, 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/ ($м^2$·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 [20].

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 [20].

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.

Робота, що виконується в шумній обстановці, виявляється важчою, ніж при виконанні її в умовах відносної тиші. Шум впливає на зміну чутливості зору, перешкоджає зосередженню уваги, утрудняє виконання точних робіт і мовний обмін інформацією.

При щоденній дії це призводить до виникнення професійного захворювання – приглухуватості, основним симптомом якого є поступова втрата слуху на обидва вуха, що спочатку лежить в області високих частот, з

подальшим поширенням на нижчі частоти, що визначають здатність сприймати мову [22].

Окрім безпосередньої дії на орган слуху, шум впливає на різні відділи головного мозку, змінюючи нормальні процеси вищої нервової діяльності. Характерними є скарги на підвищену стомлюваність, загальну слабкість, дратівливість, апатію, послаблення пам'яті і тому подібне.

В результаті несприятливої дії шуму на працюючу людину відбувається зниження продуктивності праці, збільшується брак в роботі, створюються передумови до виникнення нещасних випадків.

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 [21].

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 [20].

4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища конверторного виробництва

Для поліпшення умов праці в цеху і захисту працюючих від теплової дії передбачені наступні заходи: теплоізоляція поверхонь, випромінюючих тепло, за допомогою водоохолоджуваних екранів, щитів, завіс і ін.; теплоізоляція і охолодження робочих місць (постів управління, кабін машиністів кранів і ін.); природна (аерація) і механічна вентиляція; повітряне охолодження замкнутих просторів конверторів, що знаходяться в ремонті; водорозпилення на робочих місцях і в припливних віконних отворах; спецодяг і індивідуальні захисні пристосування – щитки, екрани, окуляри, світлофільтри; раціональна організація режиму праці і відпочинку, регламентація місця і тривалості роботи в умовах опромінення; облаштування спеціальних місць, кабін і кімнат відпочинку.

Звукоізоляція є одним з найбільш ефективних і поширених методів зниження виробничого шуму.

За допомогою звукоізолюючих перешкод можна знизити рівень шуму на 30 – 40дБ. Ефективними звукоізолюючими матеріалами є метали, бетон, дерево та ін.

Засоби індивідуального захисту від шуму підрозділяються на протишумові навушники, що закривають вушну раковину, протишумові вкладиші, що перекривають зовнішній слуховий прохід, протишумові шоломи і каски, протишумові костюми.

Для зниження рівня вібрації всі агрегати, що їх створюють (робочі машини, залізничний транспорт, двигуни, вентилятори), встановлюють на самостійних фундаментах, віброізольованих від підлоги і інших конструкцій будівель, або на спеціально розрахованих амортизаторах із сталевих пружин або пружних матеріалів. Для ослаблення передачі вібрації і шуму по повітроводам і трубопроводам приєднання їх до вентиляторів і насосів виконується за допомогою гнучкої вставки з гумової тканини або гумового патрубка. Інтенсивність вібрацій деталей агрегатів зменшують шляхом облицювання їхніх поверхонь або заповнення спеціально передбачених повітряних порожнин в них демпфуючими матеріалами.

Установки для відведення, охолодження і очищення конвертерних газів обладнують контрольно-вимірювальними приладами, сигналізацією, блокуванням, системою автоматики і мають централізоване дистанційне керування, необхідне для безпечної експлуатації.

Усі елементи охолоджувача конвертерних газів і газоочищення, що охолоджуються технічною водою, забезпечуються показуючими і регулюючими витратомірами.

Також передбачені показуючи і реєструвальні прилади температури і розрідження газів по тракту (за ОКГ, за газоочищенням, перед і за димососом), температури води, що подається на газоочищення. На щитах КІП газовідводячого тракту встановлені сигналізатори падіння витрати води на елементи охолоджувача і газоочищення, сигналізатори досягнення граничних рівнів води у бункерах апаратів газоочищення і падіння розрідження перед димососом нижче заданого значення.

Для контролю за вмістом оксиду вуглецю в продуктах перед електричним газоочищенням при відведенні газів з повним допалюванням

встановлюється апаратура, що сигналізує на пост оператора конвертера про зміст оксиду вуглецю в газах 1% і більше, показує і реєструє його зміст в межах до 5% .

При відведенні газів без допалювання встановлюються показуючі і реєструвальні прилади, що вимірюють зміст CO, CO_2, O_2 і H_2 в продуктах неповного згорання перед газоочищенням; CO і O_2 за димососом. Вміст кисню в газі не повинен перевищувати 2% (об'ємних) і водню понад 3% (об'ємних).

Для захисту робітників від дії шкідливих хімічних речовин у конвертерному цеху передбачені наступні заходи: аспіраційні установки і витяжні зонти від джерел викидів шкідливих речовин.

На роботах із шкідливими умовами праці, а також в особливих температурних умовах або пов'язаних із забрудненням тіла робітників і службовців, відповідно до встановлених норм безкоштовно видаються засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). До таких засобів відносяться засоби захисту очей, органів дихання, органів слуху від шуму, захист від вібрації, захисні мазі і спеціальний одяг. Найбільш поширеним засобом захисту очей є запобіжні окуляри, які захищають око від шкідливого впливу і разом з тим якомога менше обмежують поле зору, не запітнівають, зберігають ясність бачення, допускають вентиляцію повітря, добре прилягають до обличчя і не роздратовують шкіру. Крім того, окуляри повинні бути міцні і легкі [21].

Фільтруючі протигази служать для захисту органів дихання від шкідливої пари і газів. Як поглиначі застосовують активоване вугілля, силікагель, хемосорбенти [21-22].

Найбільш зручними і ефективними противошумами є навушники різних марок. Кріпляться вони до голови за допомогою спеціальних кріплень, які облягають щільно голову.

Заходи по відвертанню травматизму і посадові інструкції розроблені в інструкції по охороні праці в ККЦ. Аналіз умов праці на ділянці представлений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Аналіз умов праці на ділянці котла

Конвертерне відділення	Шкідливий фактор		Заходи
Підвищена запиленість, мг/м^3:	Фактичний	Допустимий	
Виробничий пил;	12	6,0	
Загазованість мг/м^3:			
- виділення СО	24	20	Застосовувати систему
Виділення шкідливих речовин мг/м^3:			відводу і очищення конвертерних
- MnO_2	0,08	0,05	газів, аспірація пилу,
- Fe_2O_3	6,5	6,0	спецодяг, головний
- Оксид кальцію	1,5	1,0	убір, індивідуальні
Підвищена температура повітря в робочій зоні, ºС;	34	28	засоби захисту, установка теплових захисних екранів на
Шум, дБа;	86	80	ділянці конвертерного
Підвищений рівень вібрації, дБ;	110	101	відділення
Підвищений рівень інфрачервоного випромінювання, Вт/м^2	145	140	

4.3 Розрахунок аерації в конвертерному відділенні

У приміщенні виділяється надмірна теплота і шкідливі пил гази, пари у кількості 200кДж/ (м^3·ч).

Визначувана витрата повітря для видалення надмірної теплоти:

$$L_T = \frac{Q}{\rho_n \cdot C \cdot (t_y - t_n)}, \text{ м}^3/\text{год} \qquad (4.1)$$

де Q – надлишки теплоти, кДж/з;

t_y – температура повітря, що видаляється з приміщення, ºС;

t_n – температура припливного повітря, ºС;

C – теплоємність повітря, 1кДж/ (кг· ºС);

$\rho_в$ – щільність повітря при температурі припливного повітря, кг/м^3;

$$\rho_B = 0{,}465 \cdot P_a / (273 + t_n) \quad (4.2)$$

де P_a – атмосферний тиск, 760 мм. рт. стовпа.

$$\rho_n = 0{,}465 \cdot 760 / (273 + 20) = 1{,}21, \text{ кг/м}^3 \quad (4.3)$$

Надлишок теплоти в приміщенні (Q) визначається по формулі:

$$Q = g \cdot V_O, \text{ кДж/год} \quad (4.4)$$

де g – надлишок теплоти на 1м^3 вільного об'єму приміщення цеха, кДж/ (м^3·год), g = 200 кДж/ (м^3·год);

V_O – вільний об'єм приміщення цеху ($V_O = 0{,}8V$, де V – загальний об'єм приміщення, для якого розраховується повітрообмін, м^3).

$$Q = 200 \cdot 0{,}8 \cdot 300000 = 48000000 \text{ кДж/год} \quad (4.5)$$

Температура повітря, що видаляється з приміщення (t_y) визначається по формулі:

$$t_y = tp.з. + \Delta t \cdot (H - 2), \text{ ºС} \quad (4.6)$$

де *tp.з.* – нормована температура повітря в робочій зоні, *tp.з.*=28 ºС;

Δt – температурний градієнт по висоті приміщення цеху, *Δt*=1,5 ºС/м,

H – відстань від підлоги робочого майданчика до центру витяжних отворів, *H*=36 м.

Визначаємо по кресленню поперечного розрізу будівлі.

Температура в робочій зоні (*tp.з*) приймаємо рівною найбільш високою допустимою по температурі повітря в приміщеннях – 28 ºС.

Температура припливного повітря приймається на 5-8 ºС нижче температури повітря в робочій зоні.

$$t_n = tp.з. - 5 = 28 - 8 = 20\text{, ºC} \tag{4.6}$$

$$t_y = 28 + 1{,}5 \cdot (36 - 2) = 79\text{, ºC} \tag{4.7}$$

$$Z_m = 48000000 / 1{,}21 \cdot 1{,}0 \cdot (79 - 20) = 672363\ \text{м}^3/\text{год} \tag{4.8}$$

Витрата повітря для видалення з приміщення пилу і шкідливих газів робиться по кожній шкідливій речовині, що виділяється в приміщенні, по формулі:

$$Zi = Gi / (ПДКi - gi)\text{, м}^3/\text{год} \tag{4.9}$$

де *Gi* – годинні виділення в приміщення певної шкідливої речовини, мг/год;

ПДКі – гранично-допустима концентрація певної (*і*-го) речовини в повітрі робочої зони приміщення, мг/м^3; Визначається по ДСН 3.3.6-042-99 ПДК СО – 20 мг/м^3 , CO_2 – 2500 мг/м^3; залізовмісного пилу 6 мг/м^3;

gi – концентрація і-ї речовини в припливному повітрі, мг/м^3. Враховується тільки для пилу (0,1 мг/м^3) та CO_2 (500 мг/м^3).

Годинне виділення в приміщення шкідливих речовин, що визначають повітрообмін, визначається по формулі:

$$Gi = gi \cdot m, \text{мг/год} \tag{4.10}$$

де *gi* – виділення певної шкідливої речовини в приміщенні цеху при виробництві 1т основної продукції мг/т, CO – 9600 мг/м^3, CO_2 – 2 · 10^6 мг/м^3, залізовмісний пил – 5000 мг/м^3;

m – годинне виробництво основної продукції, т/год.

Залізовмісний пил:

$$Z_1 = 5000 \cdot 35/(6-0{,}1) = 29661 \text{ м}^3/\text{год}; \quad (4.11)$$

CO_2:

$$Z_2 = 2000000 \cdot 35/(2500-500) = 35000 \text{ мг/м}^3; \quad (4.12)$$

CO:

$$Z_3 = 9600 \cdot 35/20 = 16800 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.13)$$

$$L = 29661 + 35000 + 16800 = 81461 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.14)$$

Висновок: Розрахунок аерації передбачено для створення в приміщенні цеху потрібних по нормах параметрів повітряного середовища. За приведеною вище методикою я розрахувала основні параметри аерації і прийшла до висновку, що аерацію у ККЦ треба приймати максимальну.

4.4 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.

Пожежна небезпека визначається наявністю в агрегатах горючих газів, застосуванням кисню, наявністю кабельного господарства, масляних трансформаторів, застосуванням для мастила виливниць разом зі зневодненою смолою горючих рідин (петролатум, бітумний лак та ін.).

Для попередження пожеж, що виникають від коротких замикань, на лініях і відгалуження електричних мереж послідовно включають запобіжники. При проходженні надмірно великого струму плавкі запобіжники перегорають і тим самим розривають електричний ланцюг, запобігаючи небезпечному в пожежному відношенні нагріву дротів [20].

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 ^{o}C), 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 [20].

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.).

4.5 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 включення і відключення електричних установок застосовуються схеми безконтактного управління за допомогою електронних ламп, магнітних підсилювачів, напівпровідникових, магнітних і інших безконтактних елементів, які дозволяють робити знеструмлення тих або інших електричних машин і апаратів не шляхом розмикання контактів в ланцюгах, а шляхом зняття з них напруги.

Складним електричним устаткуванням оснащені електромостові крани. Електричне устаткування кранів розташоване на великій висоті, на металевих фермах або металевих підставах, що представляє особливу небезпеку при обслуговуванні.

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.

На кранах встановлені пристрої для автоматичного відключення тролейних дротів, розташованих на мосту, при виході машиніста з кабіни. Рубильник, через який подається живлення на тролі, має пристосування для замикання його на замок у відключеному положенні.

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. Так, усі металеві корпуси електроапаратури і електроустаткування крану надійно заземлені. При живленні його від тролів заземлення корпусів електроустаткування вважається достатнім, якщо вони приєднані до металевих конструкцій крану. Стики рейок надійно сполучені, щоб утворився безперервний електричний ланцюг.

Завдяки цим пристроям, виникаючі при пробоях електричної ізоляції, так звані, «напруга дотику або крокова напруга» обмежуються до безпечної для людини величини або автоматично відключається пошкоджене електроустаткування.

Передбачено облаштування штучних заземлювачів з прокладенням зовнішнього контуру заземлення із сталі смугової 40х5 оцинкованою по периметру цеху на рівні підошви фундаментів на відстані 1 м від них. У місцях приєднання внутрішньої магістралі заземлення до зовнішнього заземлювачу виконано болтове з'єднання для періодичної перевірки величини опору заземлювача.

Окрім захисного заземлення електроустановок, передбачений захист обслуговуючого персоналу від статичної електрики шляхом приєднання до контуру заземлення апаратів, місткостей, агрегатів, трубопроводів, вентиляційних коробів, теплоізоляційних кожухів [23].

ВИСНОВКИ

1. У ході роботи проведено обчислювальні експерименти для визначення диференціальних коефіцієнтів засвоєння під час розкислення-легування сталей 15кп, 10пс, 16ГС, 18Г2С, 30ХГС із застосуванням термодинамічного модуля програми «Excalibur». Створено паспорти розкислення-легування, які містять детальні дані щодо легування, розкислення та вакуумування сталей, а також побудовано графічні залежності.

2. Досліджено залежності диференціальних коефіцієнтів засвоєння від параметрів системи «метал-шлак-газ». Це дало змогу врахувати вплив температури, тиску, співвідношення маси шлаку до маси металу та міри розкисленості на засвоєння елементів у різних марках сталей.

3. Аналіз результатів обчислювальних експериментів виявив такі особливості поведінки системи «метал-шлак-газ»:

- З підвищенням температури зростає маса утвореного газу, що знижує коефіцієнти засвоєння вуглецю, але підвищує коефіцієнти засвоєння марганцю, кремнію й алюмінію, особливо в киплячих і напівспокійних сталях, через зміщення рівноваги у бік відновлення елементів із позитивною валентністю.
- Зростання відношення маси шлаку до маси металу знижує коефіцієнти засвоєння всіх елементів: вуглець переходить у газову фазу, а кремній, алюміній, марганець і сірка — у шлак.
- Залежність коефіцієнтів засвоєння вуглецю від тиску під час вакуумно-вуглецевого розкислення обумовлена балансом між утворенням CO за низького тиску та зниженням окисленості системи.
- Збільшення частки феросплавів знижує окисленість системи й підвищує коефіцієнти засвоєння легуючих елементів. У практиці це означає використання дешевших феросплавів для попереднього розкислення.

- Зниження окисленості сталі сприяє зростанню коефіцієнтів засвоєння всіх елементів завдяки зменшенню взаємодії між розчиненим киснем і елементами-розкислювачами.

4. Виявлені залежності дозволяють ефективно моделювати вплив основних параметрів на засвоєння елементів у процесі легування та розкислення.

5. Результати досліджень мають як теоретичну, так і практичну цінність.

6. Термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ» і алгоритми програми «Excalibur» можуть бути впроваджені на установках позапічної обробки сталі. Це сприятиме скороченню витрат феросплавів і забезпеченню гарантованого хімічного складу сталей та сплавів у рамках автоматизованого управління технологічним процесом.

7. Результати роботи спрямовані на підвищення техніко-економічних показників металургійного виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Харченко О. В., Пономаренко О. 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.

2. Пономаренко О. 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.

3. Колосов А. Ф., Литвин Л. М., Лук'янченко В. В. Освоєння системи "Електронний порадник сталевара" на металургійному заводі "Криворіжсталь". *Зб. наукових 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. наукових 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. Шаповалов В. О., Біктагіров Ф. К., Могилатенко В. Г. за ред. академіка І. В. Крівцуна. Позапічне оброблення сталі: способи, процеси, технології: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія», освітньої програми «Комп’ютеризовані процеси лиття». Київ : Хімджест, 2023. 360 с.

7. І.Р. Снігура, Д.М. Тогобицька Фізико-хімічне моделювання розподілу елементів в системі «метал-шлак» на основі параметрів міжатомної взаємодії. Литво. Металургія. 2019: *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Запоріжжя, 2019. С. 355 – 357.

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

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

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

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

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

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

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

15. Пономаренко О. 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.

16. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови.

17. ДСТУ 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови.

18. ДСТУ 3760:2006 Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови

19. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови.

20. Полєтаєв В. П. Охорона праці в галузі (для спеціальності «Металургія чорних металів»). Навчальний посібник. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. 363 с.

21. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці: навч. посіб. 2-ге вид. Київ : Центр учбової літератури, 2011. 280 с.

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

23. Типове положення про навчання з питань охорони праці ДНАОП 0.00-4.12-99.