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_____ Дослідження кінетичних особливостей поведінки легуючих елементів та домішок в процесі позапічної обробки сталі _____
_____
_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1363-мчм*

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

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

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

Запоріжжя - 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)

Дущенко Данило Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Дослідження кінетичних особливостей поведінки легуючих елементів та домішок в процесі позапічної обробки 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 кінетичні особливості зміни хімічного складу металу і шлаку в процесі позапічної обробки низьколегованих і вуглецевих сталей*

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

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентаційний матеріал на 13 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 _____ *Д.С. Дущенко*
(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: 90 с., 15 табл., 48 рис., 19 джерел.

МЕТОД ГІББСА, ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ, КІНЕТИКА, ТРАЄКТОРІЇ, СИСТЕМА «МЕТАЛ-ШЛАК-ГАЗ», ЛЕГУВАННЯ, СТАЛЬ.

Об’єкт дослідження – кінетичні траєкторії системи «метал-шлак-газ» при позапічній обробці низьколегованих і вуглецевих сталей.

Мета роботи – дослідити кінетику розкислення при позапічній обробці сталі шляхом додавання в ківш оптимізованої кількості феросплавів.

Методи дослідження – термодинамічний і кінетичний аналіз системи «метал-шлак-газ» при позапічній обробці низьколегованих і вуглецевих сталей; рішення системи автономних диференціальних рівнянь.

У загальній частині кваліфікаційної роботи розглянуті теоретичні відомості, а саме метод хімічних потенціалів Гіббса, визначення і методи розрахунку кінетичних траєкторій вмісту хімічних елементів в металі та шлаку при розкисленні-легуванні сталі.

У розділі «Обчислювальний експеримент» зроблено розгляд можливості використання навчально-дослідницького програмного комплексу «Excalibur в якості інструмента обчислювально-експериментального дослідження кінетичних траєкторій у системи «метал-шлак-газ».

У розділі «Дослідження кінетики розкислення-легування в процесі позапічної обробки сталі» виконаний обчислювальний експеримент для моделювання кінетики розкислення сталей 09Г2С, 12ГС, 14ХГС, 30ГС, 3ПС, 08КП за допомогою термодинамічного модуля комп’ютерної учбово-дослідницької програми «Excalibur». Розглянуті особливості траєкторій руху концентрацій елементів до рівноваги в металі і шлаку у цих марках сталей.

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

ABSTRACT

Master's qualification work: 90 p., 15 tables, 48 figures, 19 sources.

GIBB'S METHOD, THERMODYNAMICAL ANALYSIS, KINETICS, TRAJECTORIES, METAL-SLAG-GAS SYSTEM, ALLOYING, STEEL.

Object of the study – kinetic trajectories of the metal-slag-gas system during the out-of-furnace processing of low-alloy and carbon steels.

Purpose of the work – to investigate the kinetics of deoxidation during the out-of-furnace processing of steel by adding an optimized amount of ferroalloys to the ladle.

Research methods – thermodynamic and kinetic analysis of the metal-slag-gas system during the out-of-furnace processing of low-alloy and carbon steels; solution of a system of autonomous differential equations.

General part of the qualification work considers theoretical information, namely the Gibbs chemical potential method, definition and methods for calculating kinetic trajectories of the content of chemical elements in metal and slag during deoxidation-alloying of steel.

In the section "Computational experiment", the possibility of using the educational and research software complex "Excalibur" as a tool for computational and experimental study of kinetic trajectories in the "metal-slag-gas" system is considered.

In the section "Study of deoxidation-alloying kinetics in the process of non-furnace steel processing", a computational experiment was performed to model the deoxidation kinetics of steels 09G2S, 12GS, 14XGS, 30GS, 3PS, 08KP using the thermodynamic module of the computer educational and research program "Excalibur". The features of the trajectories of element concentrations to equilibrium in metal and slag in these steel grades are considered.

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

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ 11

1.1 Кінетика укрупнення і спливання зі сталі неметалевих включень – продуктів розкислення 11

1.1.1 Аналіз сучасних теорій розкислення сталі 14

1.1.2 Інші підтвердження сучасної теорії розкислення сталі 16

1.2 Висновки 21

РОЗДІЛ 2 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ 22

2.1 Обчислюваний експеримент з використанням програми «Excalibur» 22

2.1.1 Теоретичні основи 22

2.1.2 Інтерфейс користувача «Excalibur» 33

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОЗКИСЛЕННЯ-ЛЕГУВАННЯ В ПРОЦЕСІ ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ 51

3.1 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 09Г2С 51

3.2 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 12ГС 54

3.3 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 14ХГС 58

3.4 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 30ГС 62

3.5 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 3ПС 65

3.6 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 08КП..... 68

3.7 Дослідження кінетики видалення кисню під час розкислення-легування при різних значеннях тиску на прикладі сталі 12ГС..... 72

3.7.1 Електромагнітне перемішування..... 74

3.8 Висновки..... 77

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА..... 79

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів конвертерного цеху..... 79

4.2 Заходи з поліпшення умов праці..... 84

4.3 Заходи з електробезпеки..... 85

4.4 Заходи пожежної безпеки..... 86

4.5 Заходи індивідуального захисту..... 87

ВИСНОВКИ..... 88

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... 89

ВСТУП

Сучасна техніка пред'являє все більш високі вимоги до якості сталі, масштаби, і ефективність сталеплавильного виробництва неможливо оцінити без урахування якості виплавленої сталі. Сучасні етапи розвитку металургійної промисловості характеризується перенесенням операцій безпосередньо з сталеплавильного агрегату в допоміжний агрегат або в спеціально обладнаний ківш, що забезпечує отримання металу високої якості, що є економічно і технічно привабливо для споживачів. Роль самих плавильних агрегатів в цьому зводиться до отримання рідкого напівпродукту певного складу і температури.

Проведення технологічних операцій поза плавильного агрегату називають вторинної металургією (або ковшового металургією, позаагрегатною обробкою, позапічною обробкою, ковшовим рафінуванням та ін.). Основну мету вторинної металургії можна сформулювати як здійснення ряду технологічних операцій швидше і ефективніше в порівнянні з рішенням аналогічних завдань в звичайних сталеплавильних агрегатах.

Підвищення вимог до якості сталі привели до створення нових сталеплавильних процесів, що відповідають сучасному рівню розвитку техніки. Одним з елементів таких технологій є позапічна обробка сталі.

Позапічна обробка сталі почала активно застосовуватися в 60-х роках минулого століття, головним чином для підвищення продуктивності дугових сталеплавильних печей і конвертерів, дозволяючи винести частину процесів рафінування з цих агрегатів в ківш. Позапічною обробкою стало можливим як істотно поліпшити якість сталі (механічні властивості, корозійну стійкість, електротехнічні показники та ін.), так і отримати сталь з принципово новими властивостями, наприклад, сталь зі наднизьких концентраціями таких елементів як вуглець, сірка, азот, водень, здатну працювати в екстремальних умовах. У сталеплавильних агрегатах таку сталь отримувати практично неможливо.

В даний час методами позапічної металургії обробляють сотні мільйонів тонн сталі масового призначення, установки для позапічної обробки є практично на всіх заводах якісної металургії. Обробці піддають метал, виплавлений в мартенівських печах, дугових електропечах і конвертерах. Таке швидке поширення в широких масштабах позапічної обробки пояснюється рядом причин:

1. Поширенням методу безперервного розливання сталі, який, в свою чергу, для високопродуктивної роботи установок вимагає точного (і стандартного від плавки до плавки) регулювання температури і хімічного складу металу, а також вимагає для розливання метал стандартно високої якості. В результаті практично вся сталь, розливається на установках безперервного розливання, піддається позапічної обробки.
2. Безперервно зростаючими масштабами виробництва сталей відповідного призначення, які важко отримати при звичайній технології плавки.
3. Зростаючими масштабами виробництва сталей і сплавів з особливо низьким вмістом вуглецю.

Певну роль у поширенні нових методів вторинної металургії грає і та обставина, що ці методи дозволяють докорінно змінювати структуру і тип споживаних феросплавів і розкислювачів в бік істотного зниження вимог до їх складу і відповідного їх здешевлення. Наприклад, використання методу аргоно-кисневої продувки дозволило переробляти високовуглецеві феросплави і відмовитися від використання дорогих низьковуглецевих феросплавів.

Мета роботи. Дослідити кінетику розкислення при позапічній обробці сталі шляхом додавання в ківш оптимізованої кількості феросплавів.

Об'єкт дослідження. Системи метал-шлак-газ при позапічній обробці різних марок сталей.

Предмет досліджень. Прослідкувати зміни хімічного складу металу і шлаку, щоб надалі прогнозувати кінцевий вміст кисню в металі.

Актуальність теми. Робота присвячена актуальному й важливому науково-технічному завданню – розробити базові теоретичні принципи кінетики видалення кисню при розкисленні-легуванні сталі на основі термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» і удосконалити технологічну схему позапічної обробки сталі.

Індивідуальні внески дослідників. Основні результати в магістерській роботі отримані самим автором. Виконав постановку завдання дослідження, вибрав методику експериментального дослідження, проаналізував і узагальнив результати дослідження, зробив загальні висновки.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, включених до кваліфікаційної магістерської роботи, були опубліковані в матеріалах І Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ «Інженерні інновації та розбудова національної економіки» (9–10 травня 2024 року, м. Запоріжжя); матеріалах Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ «Сучасні перспективи розвитку обліку, фінансів, економіки, управління, права та інженерії» (5-6 грудня 2024 року, м. Запоріжжя).

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Кінетика укрупнення і спливання зі сталі неметалевих включень – продуктів розкислення

Неметалеві включення, що виникають при розкисленні, утворюють з рідкої сталлю емульсії і суспензії. Неметалеві включення мають меншу питому вагу, ніж рідка сталь, тому вони можуть спливати з неї. При розкисленні сталі слід розрізняти два типи процесів:

1) хімічні процеси – взаємодія між розчиненим в сталі киснем і елементом-розкислювачем, що викликає утворення продуктів розкислення;

2) фізичні процеси, які відіграють певну роль при утворенні неметалічних включень і впливають на процеси видалення знаходяться в рідкій сталі продуктів розкислення.

Хімічний склад і властивості продуктів розкислення залежать від природи розкислювачей і їх змісту в сталі. При введенні елементів-розкислювачів, що володіють порівняно малим хімічну спорідненість до кисню (наприклад, марганцю), в сталі залишається відносно багато розчиненого кисню. Утворені включення - продукти розкислення - мають порівняно низьку температуру плавлення і находяться в розплавленої сталі в рідкому стані. При введенні в сталь розкислювачей, що володіють великим хімічним спорідненістю до кисню (наприклад, алюмінію), в ній утворюються продукти розкислення з більш високою температурою плавлення. Чим більше введено в сталь алюмінію, тим більш вміст у продуктах розкислення глинозему і тим вище їх температура плавлення. Такі включення можуть перебувати в розплавленої сталі в твердому стані [1].

При високому вмісті алюмінію в сталі кремній і марганець практично не є розкислювачами, так як вміст кисню в сталі визначається виключно алюмінієм. Однак слід мати на увазі, що вміст кисню в металі не визначається тільки концентрацією розчинених у ньому елементів-розкислювачів. Можна знизити до незначних значень концентрацію

розчиненого кисню і тим не менш отримати сталь з високим вмістом кисню, якщо вона не буде звільнена від зважених в ній продуктів розкислення. Ступінь очищення рідкої сталі від продуктів реакцій розкислення обумовлена багатьма факторами, головними з яких є властивості частинок продуктів розкислення і температура, при якій здійснюється розкислення [2].

При розкисленні сталі розмір неметалевих включень в момент зародження мізерно малий, але під впливом поверхневого натягу і взаємного тяжіння відбувається їх злиття і укрупнення.

Укрупнення включень відбувається двома шляхами: 1) злиттям в одне більш велике зі зникненням розділяючих їх поверхонь; цей процес носить назву коалесценции; 2) спіканням або злипанням один з одним, в цьому випадку поверхні, що розділяють включення, повністю не зникають; цей процес називається коагуляцією.

Коалесценція спостерігається при укрупненні суспензій рідких включень в металі, причому зливаються крапельки рідких включень можуть бути однакового або різного складу. Коагуляція відбувається при зустрічі двох або більше твердих включень, а також при зустрічі крапель взаємно нерозчинних рідин.

Слід зазначити, що укрупнення і спливання неметалевих включень в сильному ступені залежить від в'язкості розплавленої сталі. Результати вимірювання кінематичної в'язкості сталі деяких марок (рисунок 1.1) показують, що ця характеристика фізичного стану металу мало змінюється зі зміною його хімічного складу [3]. Поблизу температури ліквідусу в'язкість приблизно дорівнює одному сантістокс (сст), а при 1600°С становить 0,6 сст ($0{,}6 \cdot 10^{-6}$ $м^2$/сек). Хоча в абсолютних величинах значення в'язкості змінюється мало, відносна зміна її значно: майже в два рази. Перегрів сталі над температурою ліквідусу може характеризувати інтенсивність спливання з неї неметалічних включень. Чим вище температура металу в момент розкислення, тим повніше протікає процес очищення рідкої сталі від включень.

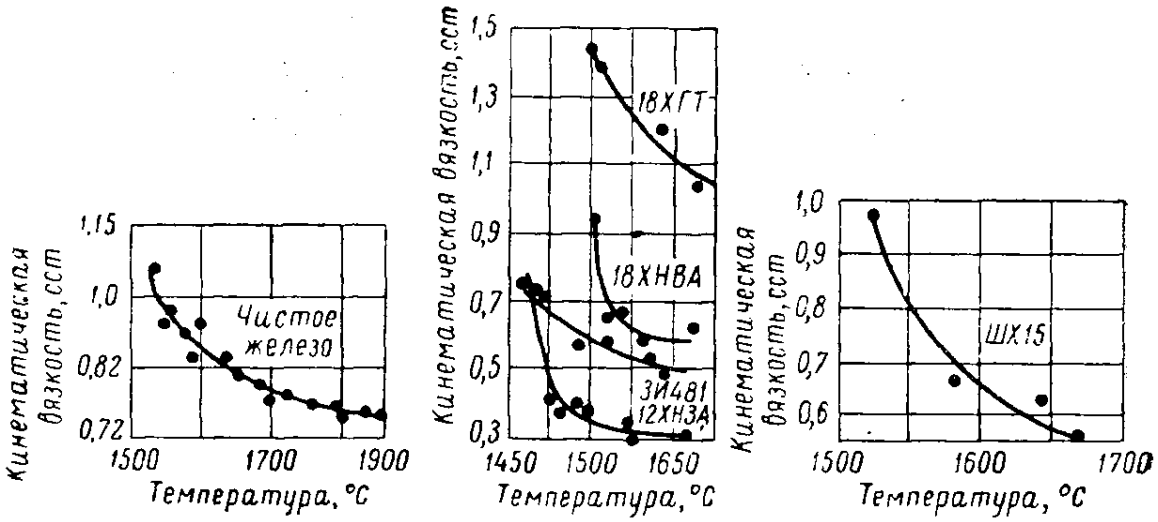


Рисунок 1.1 – Кінематична в'язкість чистого заліза і деяких сталей в рідкому стані

Якщо метал мало перегрітий над температурою ліквідусу, процеси змішування, коагуляції і спливання домішок затримуються і готова сталь виходить брудною.

До останнього часу існувала думка, що для кращого видалення зі сталі продуктів розкислення необхідно створювати умови для отримання їх в рідкому стані. Вважали, що від сталі добре відокремлюються продукти розкислення, схильні до коалесценції, тобто з більш низькою температурою плавлення. Передбачалося, що чим вище температура плавлення оксиду, тим менш сприятливі умови для укрупнення частинок і їх видалення з рідкої сталі. На підставі подібних уявлень про процеси укрупнення і спливання з рідкої сталі неметалевих включень була створена теорія розкислення, що передбачає введення в сталь мінімальної кількості алюмінію [4].

Відповідно до цієї теорії, швидкість видалення неметалевих включень з рідкої сталі зазвичай описується формулою Стокса:

$$v = \frac{2}{9} r^2 * g * \frac{d_1 - d_2}{\eta}, \qquad (1.1)$$

де g – прискорення земного тяжіння, рівне 9,81 м/сек²; r – радіус частинки (включення), (м); η – в'язкість сталі, вона тим менше, чим більше перегрів

сталі над її температурою ліквідусу, м²/сек; d_1, d_2 – значення щільності рідкої сталі і неметалевих включень, кг/м³.

Швидкість видалення неметалевих включень за рівнянням Стокса залежить від величини частинок, різниці щільності металу і неметалічних включень, а також від в'язкості металу. Фізико-хімічна взаємодія включень з рідкої сталлю рівнянням Стокса не враховується; отже, передбачається, що воно відсутнє для всіх типів включень, які спостерігаються в сталях.

Такі погляди на процеси укрупнення і видалення неметалевих включень з рідкої сталі тривалий час поділяли сталеплавильники, і тільки в 60-х роках XX-го століття їх піддали ревізії. Викликано це було тим, що стара теорія розкислення не могла забезпечити необхідного поліпшення якості сталей, зокрема, зменшення їх забрудненості неметалевими включеннями.

1.1.1 Аналіз сучасних теорій розкислення сталі

Аналіз сучасних даних про взаємодію оксидних систем з розплавленим металом, а також аналіз результатів великої кількості виробничих і лабораторних досліджень дозволили запропонувати теорію розкислення сталі, яка найбільш повно була розроблена. Основне положення теорії полягає в тому, що схильність неметалічних включень до укрупнення і видалення визначається не стільки їх температурою плавлення і питомою вагою, скільки іншими більш складними фізико-хімічними факторами і в першу чергу взаємодією включень з рідкої сталлю (змочуванням).

Стара теорія і практика розкислення сталі виходили з помилкових уявлень про умови стійкості дисперсних систем. Вважали, що суспензії (рідкі системи з твердими частинками) є досить стійкими, а емульсії (рідкі системи з рідкими дисперсними включеннями) нестійкі і швидко коагулюють.

За даними колоїдної хімії, нестійкими є дисперсні системи, що володіють великою вільної межфазною енергією, незалежно від стану

дисперсних частинок. У свою чергу межфазна поверхнева енергія частинок визначається ступенем їх змочування рідиною.

Відповідно до сучасних уявлень, змочування відбувається внаслідок хімічного і фізичного взаємодії оксидів з металом. Чим меншою хімічної міцністю володіє окисел, тим нижче температура його плавлення, тим більше сила його зчеплення з металом і тим менше величина вільної межфазной енергії на поверхні його зіткнення з рідкою сталлю. Такі хімічно неміцні включення утворюються при відсутності в сталі алюмінію або при дуже низькому вмісті його; їх прийнято називати феррофільнимі. За аналогією з ліофільними золями сталь з такими включеннями утворює стійкі колоїдні системи, в яких включення видаляються дуже повільно. Тому при відсутності в сталі алюмінію або при низькому вмісті його утворюються неметалеві включення - продукти розкислення - погано укрупнюються і спливають зі сталі. Оскільки поруч із цим в такий сталі залишається відносно велика концентрація розчиненого кисню, то в ній після затвердіння утворюється велика кількість великих включень. Останнє пояснюється тим, що фізико-хімічні процеси утворення неметалевих включень при кристалізації сталі протікають в основному на раніше утворених включень. Тому великі концентрації розчиненого в металі кисню сприяють утворенню великих включень.

При збільшенні в стали концентрації алюмінію склад неметалевих включень змінюється: в них зменшується вміст оксидів заліза (FeO) і марганцю (MnO) і збільшується кількість глинозему Al_2O_3. Як відомо, глинозем є дуже міцним хімічною сполукою. В результаті цього температура плавлення утворених продуктів розкислення значно підвищується. Згідно ж із сучасними уявленнями, зі збільшенням міцності оксидів зменшується їх хімічна взаємодія зі сталлю, а отже, збільшується межфазна поверхнева енергія. Внаслідок цього тугоплавкі продукти розкислення сталі алюмінієм погано змочуються сталлю і легко відокремлюються від неї. Такі включення слід називати феррофобними. За аналогією з дисперсними частинками

ліофобних систем вони швидко коагулюють в агрегати і спливають, відчуваючи при цьому найменший опір з боку сталі. В результаті сталь, розкисленна збільшеною кількістю алюмінію, надходить на розливання з мінімальною кількістю включень невеликих розмірів. Концентрація розчиненого в рідкій сталі кисню також невелика. Тому в такій сталі умови для утворення великих неметалевих включень при кристалізації відсутні.

Переважна більшість неметалевих включень, що утворюються в момент присадки розкислювачів, спливає зі сталі. Легше укрупнюються і швидше спливають феррофобне включення, одержувані в результаті розкислення стали великими кількостями енергійних розкислювачів. Незважаючи на невеликі розміри і тверду кристалічну будову таких включень, вони порівняно легко укрупнюються шляхом коагуляції, утворюючи більші кристали або грудочки неметалічних включень, спечених завдяки перекристалізації.

Про спливання тугоплавких продуктів розкислення зі сталі свідчить, зокрема, багаторазово спостерігається різними дослідниками явище, при якому збільшення кількості алюмінію, що вводиться в сталь для розкислення, не підвищує вмісту глинозему у включеннях. Так, наприклад, при збільшенні кількості введеного в шарикопідшипникову сталь алюмінію з 0,5 до 2 кг/т зміст глинозему у включеннях змінювався незначно і був приблизно в межах 70-80%; одночасно зміст оксидних включень у сталі зменшився з 0,0084 до 0,0041%. Звідси випливає, що включення глинозему добре видаляються з рідкої сталі. В іншому випадку збільшення кількості введеного в сталь алюмінію завжди викликало б значне підвищення вмісту глинозему у включеннях.

1.1.2 Інші підтвердження сучасної теорії розкислення сталі

Нова теорія розкислення сталі підтверджується іншими численними експериментальними і дослідницькими роботами.

Вивчали змочування рідкими металами поверхонь тугоплавких сполук. Змочування характеризувалося крайовим кутом в, який може бути визначений із загального рівняння капілярності Лапласа:

$$cos\ \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}, \quad (1.2)$$

де $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{1,3}$ и $\sigma_{2,3}$ – поверхневий натяг відповідно на кордонах: газ - тверда поверхня, газ - рідина і рідина - тверда поверхня в умовах їх взаємного насичення.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що причиною низького змочування окислів рідкими металами є висока межфазна енергія на межі рідина - тверда фаза, тобто мала енергія зв'язку метал - окисел. Чим більш стабільний оксид, тим менше змочується він металом. Відповідно зі зростанням змочування збільшується сила зв'язку металу і неметалевої фази. При цьому зменшується крайовий кут і, отже, зменшується поверхневий натяг розплаву на кордоні з оксидної фазою. При зменшенні крайового кута збільшується площа контакту розплаву і оксидної фази. Крім того, збільшується і сама робота відриву на одиницю площі. Робота відриву (адгезії) рідини від неметалевої фази визначається відповідно до рівняння Дюпре:

$$W_A = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}. \quad (1.3)$$

Звідси випливає, що чим менше межфазна енергія на межі рідина - неметалічна фаза, тим більше енергія зв'язку металу з оксидом, а отже, тим неблагоприятнее умови видалення таких включень з металу.

За даними експериментів, укрупнення включень в рідкому металі залежить не від їх рідиноплинності, а від вільної енергії процесу коалесценції (коагуляції). Зміна вільної енергії при коалесценції (коагуляції) неметалевих частинок можна виразити формулою

$$-\Delta F = \sigma_{2,3} * \Delta\omega_{2,3}, \quad (1.4)$$

де $\sigma_{2,3}$ – поверхневий натяг на межі метал - включення, н/м; $\Delta\omega$ – зміна поверхні розділу цих же фаз, $см^2$ ($м^2$).

Отже, зменшення поверхневого натягу $\sigma_{2,3}$ знижує вільну енергію процесу коалесценції кисневих включень в розплаві при їх зіткненні і емульсія стає більш стабільною. Результати вимірювань показують, що оксиди CaO, MgO, Al_2O_3 збільшують поверхневий натяг на межі включення – метал і тому зменшують прилипання включень до металу. У зв'язку з цим слід зазначити відомий сталеплавильникам факт про легку відділимість від рідкої сталі високоізвесткових і високоглиноземистих шлаків, які не можуть утворити стабільну емульсію в рідкій сталі. І навпаки, компоненти шлаку FeO, MnO, SiO_2 зменшують $\sigma_{2,3}$ і збільшують роботу прилипання (кислі шлаки). Чим більше робота прилипання шлаку до металу, тим більше розмір включень, здатних утворити стабільну емульсію в рідкій сталі. У стабільних дисперсних системах (суспензіях, емульсіях) вплив поверхневих сил вище, ніж сили тяжіння. Тому не можна не враховувати взаємодії металу (дисперсійного середовища) на контактної поверхні з неметалевими включеннями (диспергуючим середовищем).

Необхідно мати на увазі, що в реальних умовах укрупнення неметалічних включень протікає обмежений час і зміст їх в металі визначається в кінцевому підсумку кінетикою процесу. Швидкість коалесценции залежить від міжфазного натягу і заряду поверхні розділу, але, крім того, визначається ще рядом умов: концентрацією включень, в'язкістю металу, його перемішуванням і ін. При низькому міжфазному натягу емульсія може утворитися спонтанно. У разі дуже малих значень міжфазного натягу на кордоні частки з розплавом навіть концентровані емульсії стійкі без стабілізаторів.

Повідомляють, що кількість глинозему в сталях, розкисленних алюмінієм, становить в середньому 0,015-0,020%, тобто значно менше, ніж в дійсності утворюється глинозему, якщо весь кисень, розчинений в сталі, вступає у взаємодія з алюмінієм. Іншими словами, зміст глинозему в усіх сталях, незалежно від рівня вмісту в них кисню, за даними авторів, приблизно одне й те саме. Отже, воно практично не залежить від кількості

введеного в сталь алюмінію. Це вказує на дуже велику швидкість видалення глинозему з сталей, розкислених алюмінієм. Передбачається, що глинозем ошлаковується в алюмінат заліза, який в змозі утворити великі частки, що піднімаються з великою швидкістю на поверхню рідкого металу. Однак подібне припущення не підтверджується експериментальними даними. У той же час встановлений факт дуже швидкого видалення глинозему з рідкої сталі безсумнівний.

В роботі [4] досліджували процеси роздільного розкислення технічно чистого заліза кремнієм і алюмінієм. Швидкості видалення оксидних включень з металу оцінювали за часом наближення вмісту кисню в залізі до рівноважних значень. Встановлено, що кремнеземміcткі оксиди, що утворюються при добавках кремнію більше 0,1%, спливають з рідкого заліза повільніше, ніж продукти розкислення алюмінієм, що додається в кількості 0,1-0,6% від ваги металу. Основна частина кисню у вигляді глиноземистих включень видаляється з рідкого заліза протягом першої хвилини після добавки алюмінію. Видалення кремнєземмістких включень при добавках кремнію вище 0,1% протікає протягом всієї витримки металу в печі (близько 30 хв.), в зв'язку з чим вміст кисню в залізі не досягає рівноважних значень.

Дослідження процесу розкислення сталі комплексними сплавами показало, що підвищення в сплавах відношення алюмінію до кремнію позитивно впливає на зниження вмісту в сталі оксидних включень [4]. При постійному відношенні алюмінію до кремнію збільшення відносини марганцю до кремнію в сплавах практично не впливає на забрудненість стали включеннями (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Вміст і склад оксидних включень при розкисленні сталі комплексними сплавами різного складу

Відношення в сплавах Mn:S:A1	Вміст оксидних включень, %	Фазовий склад включень , %	
		шпінель и вільний глинозем	силікатна складова

1:1:0,3	0,0256	72,90	27,10
5:1:0,3	0,0275	77,02	22,98
1:1:1	0,0162	57,10	42,90
4:1:1	0,0191	44,30	56,70
5:1:1	0,0218	51,27	48,72
5:1:2	0,0161	60,80	39,20

Великий інтерес представляє розкислення стали кальцієм. Своєрідність кальцію як розкислювача полягає в тому, що він (поряд з магнієм, барієм і ін.) практично не розчинний ні в рідкої, ні у твердій стали. За деякими даними розчинність кальцію в рідкій сталі складає менше 10^{-5}% [15]. Крім того, кальцій має високу пружність пари при температурах рідкої сталі, тому при введення в метал він випаровується і взаємодіє з металом дуже короткий час, лише в момент свого виділення.

Дослідження показують, що при розкисленні сталі кальцієм вміст окису кальцію в неметалевих включеннях може підвищуватися до 4-12%. Відомо також, що при введенні в сталь кальцію включення набувають глобулярну форму, при цьому їх розміри збільшуються, а загальне число зменшується. Тому кальцій використовують в практиці виробництва сталі для регулювання типу і розподілу неметалевих включень в сталі. З цією метою кальцій зазвичай присідають в розкислену ванну; в металевому вигляді або у вигляді сплавів (з кремнієм або з кремнієм і марганцем). Слід зазначити, що підвищення вмісту окису кальцію в складі включень (зокрема, силікатних) зменшує їх адгезію до сталі, а значить сприяє їх видаленню.

Було проведено дослідження реакцій розкислення сталі сплавами, що містять кальцій. Встановлено, що кальцій при невеликих добавках сплаву до плавки, бідної киснем, пов'язує від 25 до 40% кисню. При великих добавках сплаву до плавки, багатою киснем, частка участі кальцію в розкислюванні зі збільшенням його добавки знижувалася з 50 до 6,5%, хоча ставлення кальцію до кисню в обох дослідах було приблизно однаковим. Очевидно, при великих добавках місцеві скупчення великої кількості кальцію не можуть бути повністю використані і значна частка його випаровується перш ніж він

вступить в реакцію з киснем, що міститься в плавці. У дослідах зі сплавами, що містять, крім кальцію і кремнію, ще титан або титан і алюміній, кальцій реагував з 25-40% кисню ванни також і при великих добавках сплаву.

Встановлено, що при застосуванні висококременистих сплавів кальцій більше бере участь в розкислюванні, ніж при використанні сплавів, багатих алюмінієм. При застосуванні силикокальция ступінь використання кальцію становить від 20 до 60%. На участь кальцію в розкислюванні впливають тривалість і хід випуску плавки, а також спосіб добавки розкислювача; вказується, що при вмісті кальцію в сплаві вище 20% не можна досягти більш повного його участі в розкисленні. Економія кремнію і алюмінію при застосуванні кальцію дуже невелика, що свідчить про незначне участю кальцію в розкислюванні. Автори дослідження припускають, що включення, що містять окис кальцію, відокремлюються гірше, ніж включення, що не містять окису кальцію; отже, вирішальним для остаточного результату процесу розкислення є тільки дія алюмінію.

1.2 Висновки

1. В процесі розкислення и легування сталі утворюються неметалеві включення. Головна мета розкислення це зниження кисню, але процес розкислення супроводжується утворенням неметалевих включень. Хімічний склад і фізичні властивості неметалевих включень визначається вибором розкислювачів і послідовності їх введення в метал.
2. Розкислювачі з точки зору утворювання неметалевих включень можна класифікувати наступним чином:
1) за спорідненості до кисню;
2) по температурі плавлення утворених неметалевих включень;
3) питома межфазна енергія на кордоні неметалеві включення – метал;
4) за граничною розчинністю елемента розкислювача в сталі.
3. Метал, що випускається в ківш сильно переокіслено. Крім того, йде досить сильне вторинне окислювання струменя (захист струменя відсутня).

РОЗДІЛ 2 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

2.1 Обчислюваний експеримент з використанням програми «Excalibur»

2.1.1 Теоретичні основи

У загальному вигляді пряме завдання термодинамічного аналізу формулюється у вигляді системи рівнянь щодо рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \overline{\mathbf{m}}_{[]}, \overline{\mathbf{m}}_{()}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}, p, T) = \mathbf{0}, \tag{2.1}$$

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

Постачальником мас елементів $\mathbf{m}$ в систему є рідкі метал і шлак, футеровка печі або ковшу, а також різні матеріали, що завантажуються в піч або ківш, в тому числі лом, чавун, феросплави, лігатури, вапно, кокс, кисневе дуття тощо.

В якості моделі системи «метал-шлак-газ» (2.1) використовується детермінована фізико-хімічна модель колективізованих електронів МКЕ [19], найбільш точно описує процеси, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті. Суттєвою характерною особливістю даної моделі є облік електронного вкладу в хімічний потенціал елементів в шлаку.

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

$$\begin{cases} \dfrac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i)}\gamma_i}{\psi_i}\exp\left(-\mu_e\nu_i\right),\ i=1..k \\ \dfrac{x_{\{i\}}}{x_{[i]}} = \dfrac{K_{[i\}}\gamma_i}{\lambda_i},\ i=1..k \\ \sum\limits_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

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

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

$$\begin{cases} F_1 = \sum\limits_{i=1}^{k} \dfrac{n_i\nu_i}{1+\exp(-A_i+Y+\mu_e\nu_i)\left[1+\exp(B_i-Z)\right]} = 0 \\ F_2 = \sum\limits_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i+Y+\mu_e\nu_i)\left[1+\exp(B_i-Z)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp(Y)\left[1+\exp(-Z)\right]} = 0 \\ F_3 = \sum\limits_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp(A_i-Y-\mu_e\nu_i)\right]\exp(Z-B_i)} - \dfrac{N}{1+\exp(Z)\left[1+\exp(-Y)\right]} = 0 \end{cases} \tag{2.3}$$

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

Результатом рішення нелінійних систем (2.2.3) є набор величин μ_e, Y, Z, по яким визначаються рівноважні змісту (числа молей) елементів в шлаку, газі та металі:

$$n_{(i)} = \frac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)[1+\exp(B_i - Z)]};$$
$$n_{\{i\}} = \frac{n_i}{1+[1+\exp(A_i - Y - \mu_e \nu_i)]\exp(Z - B_i)};$$
$$n_{[i]} = n_i - n_{(i)} - n_{\{i\}} \qquad (2.4)$$

Коефіцієнти активності елементів в металі, що входять в рівняння (2.2-2.3), розраховуються відповідно до моделі розведеного розчину. Як показано в роботі [18], цього цілком достатньо для адекватного опису рівноважного стану системи.

Атомні коефіцієнти активності в шлаку, що входять в рівняння (2.2-2.3) розраховуються відповідно до моделі шлаку, прийнятої в МКЕ:

$$\frac{1}{\psi_i} = \sum_{j=1}^{k} x_{(j)} \exp\left(- \frac{\left(\sqrt{\kappa_i} - \sqrt{\kappa_j}\right)^2}{RT} \right), \qquad (2.5)$$

де κ_i – атомний енергетичний параметр *i*-го елементу [11].

Коефіцієнти активності елементів в газі розраховуються на підставі законів Дальтона і Сівертса по рівновазі в підсистемі «метал-газ». Підхід з використанням елементного складу газу $x_{\{i\}}$, відповідних констант рівноваги «метал-газ» $K_{[i\}}$ и і коефіцієнтів активності елементів в газі λ_i дозволяє уніфікувати подання хімічних потенціалів і активностей елементів в газі і дає можливість одночасно обчислювати парціальні тиску всіх молекулярних і атомарних складових газової фази [12].

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

Якщо існує адекватна модель системи «метал-шлак-газ», то в принципі можливо, діючи за принципом «що, якщо?», Шляхом перегляду величезної кількості варіантів прийти до деякого рішення, яке б відповідало заданим технологічним обмеженням і було найдешевшим з числа розглянутих. На жаль, перебрати всі можливі варіанти немислимо через обмеженість обчислювальних ресурсів і часу. Неповний ж перебір не дає ніякої гарантії, що знайдене рішення оберненої задачі є оптимальним.

Революційний крок у розв'язанні обернених задач був зроблений в 1939 році Л. В. Канторовичем, який запропонував симплекс-метод лінійного програмування для широкого класу задач, в яких вектор вихідних параметрів Y лінійно залежить від вектору незалежних змінних X:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{K} + \mathbf{LX}, \tag{2.6}$$

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

За допомогою стандартного алгоритму симплекс-методу знаходиться оптимальний вектор **X** з урахуванням усіляких обмежень, що накладаються на вектори **X**, **Y** і будь-які лінійні комбінації їх компонентів. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум (максимум) лінійного функціоналу $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{X}$, який можна ототожнити з вартістю варіанту **X**, якщо **C** має сенс вектору цін.

У ряді робіт робилися спроби застосувати на практиці лінійне програмування для вирішення задачі гарантованого забезпечення хімічного складу готової сталі при мінімальній вартості розкислювачів і легуючих матеріалів. Завдання зводилася до складання системи нерівностей щодо шуканого вектору мас шихтових матеріалів (ШМ) X:

$$\mathbf{F}^{\mathbf{н}} \le \mathbf{P} + (1/M_{ж})\mathbf{UBX} \le \mathbf{F}^{\mathbf{в}}, \tag{2.7}$$

де $\mathbf{F}^{\mathbf{н}}$, $\mathbf{F}^{\mathbf{в}}$ – вектори заданого хімічного складу (верхній і нижній межі); **P** – вектор вихідного складу напівпродукту; $M_{ж}$ – маса рідкої сталі; **U** – діагональна матриця коефіцієнтів засвоєнь елементів в металі; **B** - матриця елементного складу ШМ.

Далі ця система нерівностей вирішувалася симплекс-методом. При цьому коефіцієнти засвоєння (КУ) елементів в металі задавалися, виходячи із середньостатистичних величин, характерних для даних умов плавки, вихідного і заданого хімічного складу сталі, температури і окислення металу, кількості і складу пічного (ковшового) шлаку. Однак в реальних системах «метал-шлак-газ» реалізуються хімічні взаємодії між елементами, в силу яких КУ фактично не є постійними величинами, а істотно залежать від всіх перерахованих факторів. При цьому існують перехресні ефекти впливу добавок одних елементів на утримання інших.

Будь-яка термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ», що враховує хімічні взаємодії елементів, в загальному випадку є нелінійною і тому непридатною для розв'язання оберненої задачі засобами лінійного програмування. Нелінійне програмування, яке могло б прийти «на виручку», поки ще швидше мистецтво, ніж чітко розроблена система алгоритмів. Як правило, ці алгоритми складаються для конкретних завдань з використанням комбінацій методів можливих напрямків, штрафних функцій, множників Лагранжа з умовами Куна-Таккера. Всі вони працюють при не дуже великий розмірності вихідної задачі. Так зване «прокляття багатовимірності», описане Е. С. Вентцель, зводить нанівець зусилля розробника алгоритмів або нестійкістю роботи в багатовимірних (і часто багатозв'язних) областях зміни параметрів, або непомірно великими обчислювальними витратами, несумісними із застосуванням даного алгоритму в реальних виробничих умовах. Але як раз адекватні моделі реальних систем «метал-шлак-газ» з хімічною взаємодією повинні мати розмірність не менше 10 за кількістю елементів. А кількість видів шихтових матеріалів може вимірюватися десятками і сотнями.

Найбільш загальним методом, що дозволяє подолати зазначені труднощі, є лінеаризація термодинамічної моделі в точці рівноважного стану. При цьому швидкий і надійний симплекс-метод лінійного програмування стає придатним для розв'язання оберненої задачі. Іншими словами, необхідно

знайти лінійні оператори **U**, **W**, **Q**, які виконували б роль самої термодинамічної моделі по рівноважного розподілу елементів між металом, шлаком і газом:

$$\begin{aligned}\overline{\mathbf{m}}_{[]} &= \mathbf{U}\mathbf{m};\\ \overline{\mathbf{m}}_{()} &= \mathbf{W}\mathbf{m};\\ \overline{\mathbf{m}}_{\{\}} &= \mathbf{Q}\mathbf{m},\end{aligned} \tag{2.8}$$

де **m** – вектор мас елементів в системі; $\overline{\mathbf{m}}_{[]}, \overline{\mathbf{m}}_{0}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}$ – вектори рівноважних мас елементів в металі, шлаку и газі, відповідно.

Лінійні оператори обчислюються неявним диференцированням системи рівнянь (2.2.1):

$$\mathbf{U} = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{m}_{[]}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{m}}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\overline{m}_{[i]}}; \tag{2.9}$$

$$\mathbf{W} = \frac{\partial m_{(i)}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{m}_{0}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{m}}\right]\Bigg|_{m_{(i)}=\overline{m}_{(i)}}; \tag{2.10}$$

$$\mathbf{Q} = \frac{\partial m_{\{i\}}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{m}_{\{\}}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{m}}\right]\Bigg|_{m_{\{i\}}=\overline{m}_{\{i\}}}. \tag{2.11}$$

Ці оператори мають квадратну матрицю і досить простий фізичний зміст: «на скільки зміниться маса елемента і в фазі при додаванні одиниці маси елемента j в систему». Далі ці лінійні оператори називатимемо фазовими операторами (ФО).

В силу того, що $\overline{\mathbf{m}}_{[]} + \overline{\mathbf{m}}_{()} + \overline{\mathbf{m}}_{\{\}} = \mathbf{m}$, з рівнянь (2.2.8) випливає, що сума матриць фазових операторів завжди дорівнює одиничної матриці:

$$\mathbf{U} + \mathbf{W} + \mathbf{Q} = \mathbf{E}. \tag{2.12}$$

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

Вектор приходу елементів в систему **m** визначається як добуток матриці елементного складу ШМ **B** на вектор ШМ **X**:

$$\mathbf{m} = \mathbf{BX}. \tag{2.13}$$

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

Фазові оператори в своїй сукупності дозволяють вирішувати поставлену зворотну задачу в повному обсязі: тепер можливо контролювати всі процеси, що відбуваються в системі «метал-шлак-газ». Зрозуміло, в першу чергу 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 вимагати, щоб газонасиченість напівспокійного металу становила цілком певну величину на тонну рідкої сталі за 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 будь-якого іншого набору цих же матеріалів, що реалізує поставлену задачу.

В МКЕ елементи фазових операторів можуть бути обчислені за формулами:

$$U_{ij} = \frac{n_{[i]} M_i}{n_i M_j} \left(\delta_{ij} + \nu_i n_{(i)} \frac{\partial \mu_e}{\partial n_j} + n_{(i)} \frac{\partial Y}{\partial n_j} + n_{\{i\}} \frac{\partial Z}{\partial n_j} \right); \tag{2.14}$$

$$W_{ij} = \frac{n_{(i)} M_i}{n_i M_j} \left(\delta_{ij} + \nu_i (n_{(i)} - n_i) \frac{\partial \mu_e}{\partial n_j} + (n_{(i)} - n_i) \frac{\partial Y}{\partial n_j} + n_{\{i\}} \frac{\partial Z}{\partial n_j} \right); \tag{2.15}$$

$$Q_{ij} = \frac{n_{\{i\}} M_i}{n_i M_j} \left(\delta_{ij} + \nu_i n_{(i)} \frac{\partial \mu_e}{\partial n_j} + n_{(i)} \frac{\partial Y}{\partial n_j} + (n_{\{i\}} - n_i) \frac{\partial Z}{\partial n_j} \right), \tag{2.16}$$

де M_i – атомна маса i-го елемента; δ_{ij} – символ Кронекера.

Приватні похідні $\frac{\partial \mu_e}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}, \frac{\partial Z}{\partial n_j}$ обчислюються неявним диференціюванням системи рівнянь (2.2.3):

$$\left[\frac{\partial \mu_e}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}, \frac{\partial Z}{\partial n_j}\right] = -\mathbf{J}_1^{-1}\mathbf{J}_2 = -\left[\frac{\partial(F_1, F_2, F_3)}{\partial(\mu_e, Y, Z)}\right]^{-1}\left[\frac{\partial(F_1, F_2, F_3)}{\partial n_j}\right], \quad (2.17)$$

де матриця Якоби $\mathbf{J_1}$ і функціональна матриця $\mathbf{J_2}$ обчислюються по формулам:

$\mathbf{J_1} =$

$$\begin{bmatrix} -\sum_{h=1}^{k}\left(\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu_h^2}{n_h} + \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}\nu_h^2}{n_h}\right) & -\sum_{h=1}^{k}\left(\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu_h}{n_h} + \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}\nu_h}{n_h}\right) & \sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{\{h\}}\nu_h}{n_h} \\ -\sum_{h=1}^{k}\left(\frac{n_{(h)}n_{[h]}\nu_h}{n_h} + \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}\nu_h}{n_h}\right) & \frac{N_sN_m}{N} + \frac{N_sN_g}{N} - \sum_{h=1}^{k}\left(\frac{n_{(h)}n_{[h]}}{n_h} + \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}}{n_h}\right) & \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}}{n_h} - \frac{N_sN_g}{N} \\ \sum_{h=1}^{k}\frac{n_{(h)}n_{\{h\}}\nu_h}{n_h} & \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}}{n_h} - \frac{N_sN_g}{N} & \frac{N_mN_g}{N} + \frac{N_sN_g}{N} - \sum_{h=1}^{k}\left(\frac{n_{[h]}n_{\{h\}}}{n_h} + \frac{n_{(h)}n_{\{h\}}}{n_h}\right) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{J_2} = \begin{bmatrix} \frac{n_{(j)}\nu_j}{n_j} \\ \frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N} \\ \frac{n_{\{j\}}}{n_j} - \frac{N_g}{N} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Відзначимо, що один з фазових операторів (**U**) в якості елементів своєї матриці має диференціальні коефіцієнти засвоєння в металі (ДКУ) [20].

Оператори $\tilde{\mathbf{U}}, \tilde{\mathbf{W}}, \tilde{\mathbf{Q}}$ з елементами $\partial x_i / \partial m_j$, де x_i – масова доля елемента *i* в фазі, визначимо як фазові концентраційні оператори (ФКО). Використовуючи правило диференціювання складної функції залежності складу фази від мас елементів, висловимо елементи $\tilde{U}_{ij}, \tilde{W}_{ij}, \tilde{Q}_{ij}$ через елементи операторів **U**, **W**, **Q**:

$$\tilde{U}_{ij} = \frac{1}{M_m}\left(U_{ij} - x_{[i]}\sum_{h=1}^{k}U_{hj}\right); \quad (2.20)$$

$$\tilde{W}_{ij} = \frac{1}{M_s}\left(W_{ij} - x_{(i)}\sum_{h=1}^{k}W_{hj}\right); \quad (2.21)$$

$$\tilde{Q}_{ij} = \frac{1}{M_g}\left(Q_{ij} - x_{\{i\}} \sum_{h=1}^{k} Q_{hj} \right), \qquad (2.22)$$

де M_m , M_s , M_g – маси металу, шлаку и газу; $x_{[i]}$, $x_{(i)}$, $x_{\{i\}}$ – масові долі елементів в металі, шлаку і газі.

Фізичний сенс елементів ФКО: «на скільки зміниться масова частка елемента і в фазі при додаванні одиниці маси елемента j в систему».

Дія операторів $\tilde{\mathbf{U}}, \tilde{\mathbf{W}}, \tilde{\mathbf{Q}}$ на вектори рівноважних елементних складів фаз і будь-які їх лінійні комбінації має результатом нульовий вектор. Це відображає той факт, що додавання в систему або відбір з системи рівноважних металу, шлаку і газу в будь-якому співвідношенні не впливає на концентрації елементів в будь-який з фаз.

Додавання в систему малого кількості довільного матеріалу с вектором елементного складу **b** призведе до зміни масових часток елементів в металі на величину $\Delta\mathbf{x}_{[]} = \tilde{\mathbf{U}}\mathbf{b}$, в шлаку – на $\Delta\mathbf{x}_{()} = \tilde{\mathbf{W}}\mathbf{b}$ и в газі – на $\Delta\mathbf{x}_{\{\}} = \tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{b}$. Таким чином, ФКО дозволяють класифікувати будь-який матеріал по його впливу на концентрацію елементів у фазі в точці поточного стану системи. Наприклад, якщо $\Delta x_{[S]} < 0$, то матеріал є десульфуратором, якщо $\Delta x_{[O]} < 0$, то розкислювачем, та ін. Відповідні зміни мас кожної з фаз обчислюються як $\Delta M_m = \mathbf{I}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}\mathbf{b}$ для металу, $\Delta M_s = \mathbf{I}^{\mathrm{T}}\mathbf{W}\mathbf{b}$ для шлаку и $\Delta M_g = \mathbf{I}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{b}$ для газу (**I** – одиничний вектор).

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

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

Фазовий оператор **U** (ДКУ) безпосередньо використовується для вирішення задачі оптимізації кількості шихтових матеріалів з гарантованим попаданням в заданий склад напівпродукту або готового металу. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум сумарної вартості обраних шихтових матеріалів. Далі під шихтових матеріалів (ШМ) ми будемо мати на увазі широкий клас матеріалів, включаючи феросплави, шлакоутворюючі матеріали, розкислювачі, лігатури, вуглецьмісткі матеріали, а також синтетичні шлаки і флюси, кисень, інертні гази та всі види енергоносіїв, в тому числі природний газ і електроенергію .

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

$$\begin{cases} \dfrac{\mathbf{U}^{\mathbf{H}}(\mathbf{P}^{\mathbf{H}}+\mathbf{B}^{\mathbf{H}}\mathbf{X})}{\mathbf{I}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}^{\mathbf{H}}(\mathbf{P}^{\mathbf{H}}+\mathbf{B}^{\mathbf{H}}\mathbf{X})} \geq \mathbf{F}^{\mathbf{H}} \\ \dfrac{\mathbf{U}^{\mathbf{B}}(\mathbf{P}^{\mathbf{B}}+\mathbf{B}^{\mathbf{B}}\mathbf{X})}{\mathbf{I}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}^{\mathbf{B}}(\mathbf{P}^{\mathbf{B}}+\mathbf{B}^{\mathbf{B}}\mathbf{X})} \leq \mathbf{F}^{\mathbf{B}} \end{cases} \quad (2.23)$$

де $\mathbf{U}^{\mathbf{H}}$, $\mathbf{U}^{\mathbf{B}}$ – матриці фазових операторів засвоєння в металі (нижній і верхній межі); $\mathbf{P}^{\mathbf{H}}$, $\mathbf{P}^{\mathbf{B}}$ – вектори фактичного початкового елементного складу відповідних систем до завдання ШМ (нижній і верхній межі), т; $\mathbf{B}^{\mathbf{H}}$, $\mathbf{B}^{\mathbf{B}}$ – матриці елементного складу всіх доступних ШМ (нижній і верхній межі), масові частки; **X –** шуканий вектор оптимальних мас ШМ, т; $\mathbf{F}^{\mathbf{H}}$, $\mathbf{F}^{\mathbf{B}}$ – вектори

складу металу, що регламентується стандартом (готовий метал) або технологічною інструкцією (напівпродукт), (нижній і верхній межі), масові частки; $\mathbf{I^T}$ – одиничний вектор.

Матриці $\mathbf{U^H}$, $\mathbf{U^B}$ отримують з (2.2.1-2.2.5, 2.2.14, 2.2.17-2.2.19) шляхом термодинамічного розрахунку рівноваги в системах «метал-шлак-газ», маючих поточні склади $\mathbf{P^H + B^H X}$ и $\mathbf{P^B + B^B X}$ відповідно. Вектори $\mathbf{B^H X}$ и $\mathbf{B^B X}$ мають сенс надходження в систему хімічних елементів з шихтовими матеріалами **X.**

Елементарними перетвореннями систему нерівностей (2.2.23) наведемо до виду $\mathbf{[H]X \le [H]_0}$, придатному для її вирішення симплекс-методом:

$$\begin{cases} \mathbf{(F^H I^T - E)U^H B^H X \le (E - F^H I^T)U^H P^H} \\ \mathbf{(E - F^B I^T)U^B B^B X \le (F^B I^T - E)U^B P^B} \end{cases} \qquad (2.24)$$

У матрицях $\mathbf{B^H}$ и $\mathbf{B^B}$ береться відповідно нижній і верхній склад матеріалів за всіма елементами, виключаючи розчинник (як правило, залізо), масова частка якого обчислюється як доповнення до одиниці. Нерівності, відповідні залозу, в систему (2.24), як правило, не включаються.

Отримані нерівності (2.24) доповнимо системою аналогічних нерівностей за складом шлаку $\mathbf{(H)X \le (H)_0}$ і нерівностями виду $\mathbf{RX \le R_0}$, які враховують різноманітні технологічні і організаційні обмеження, такі як:

• необхідна і допустима маса напівпродукту або готового металу;

• фактичні кількості наявних в цеху (на складі) ШМ;

• обмеження на частку окремих ШМ, наявність обов'язкових ШМ;

• обмеження на масу і основність шлаку, масу утворився газу.

Повна система нерівностей щодо шуканого вектора шихтових матеріалів **X** матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{[H]} \\ \mathbf{(H)} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{X} \le \begin{bmatrix} \mathbf{[H]_0} \\ \mathbf{(H)_0} \\ \mathbf{R_0} \end{bmatrix} \qquad (2.25)$$

У програмі «Excalibur» система нерівностей (2.25) вирішується ітераційно двоїстим симплекс-методом. При цьому мінімізується функціонал загальної вартості ШМ, рівний $\mathbf{C^T X}$, де **C** - вектор цін.

Оскільки з кожним новим обчисленим вектором **X** рівноважний стан системи змінюється, змінюватися будуть і фазові оператори. Ця обставина вимагає декількох (зовнішніх) ітерацій для знаходження стійкого рішення. Ітерації припиняються, коли модуль вектора $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X_0}$ виявляється менше деякої малої величини. Як правило, число таких зовнішніх ітерацій не перевищує 15-20.

Рівняння теплового балансу засновано на рівність теплової енергії вихідних металу і шлаку, завантажених матеріалів, енергоносіїв та хімічних реакцій - з поправкою на теплові втрати - з одного боку, і теплової енергії кінцевих металу, шлаку і газу з іншого:

$$H_{m0}(T_0) + H_{s0}(T_0) + H_{mat} + Q_E + Q_r(T) - Q_L = H_m(T) + H_s(T) + H_g(T), \quad (2.26)$$

де $H_{m0}(T_0)$ – тепловміст вихідного металу при T_0; $H_{s0}(T_0)$ – тепловміст вихідного металу шлаку при T_0; H_{mat} – тепловміст завантажених матеріалів; Q_E – приход тепла від енергоносіїв; $Q_r(T)$ – тепловий ефект хімічних реакцій; Q_L – теплові втрати; $H_m(T)$ – тепловміст кінцевого металу при T; $H_s(T)$ – тепловміст кінцевого шлаку при T; $H_g(T)$ – тепловміст кінцевого газу при T.

Термін «тепловміст при T» в даному контексті означає позитивну різницю ентальпій $H(T) - H(0)$.

2.1.2 Інтерфейс користувача «Excalibur»

Типовий вигляд головної форми програми представлений на рис. 2.1.

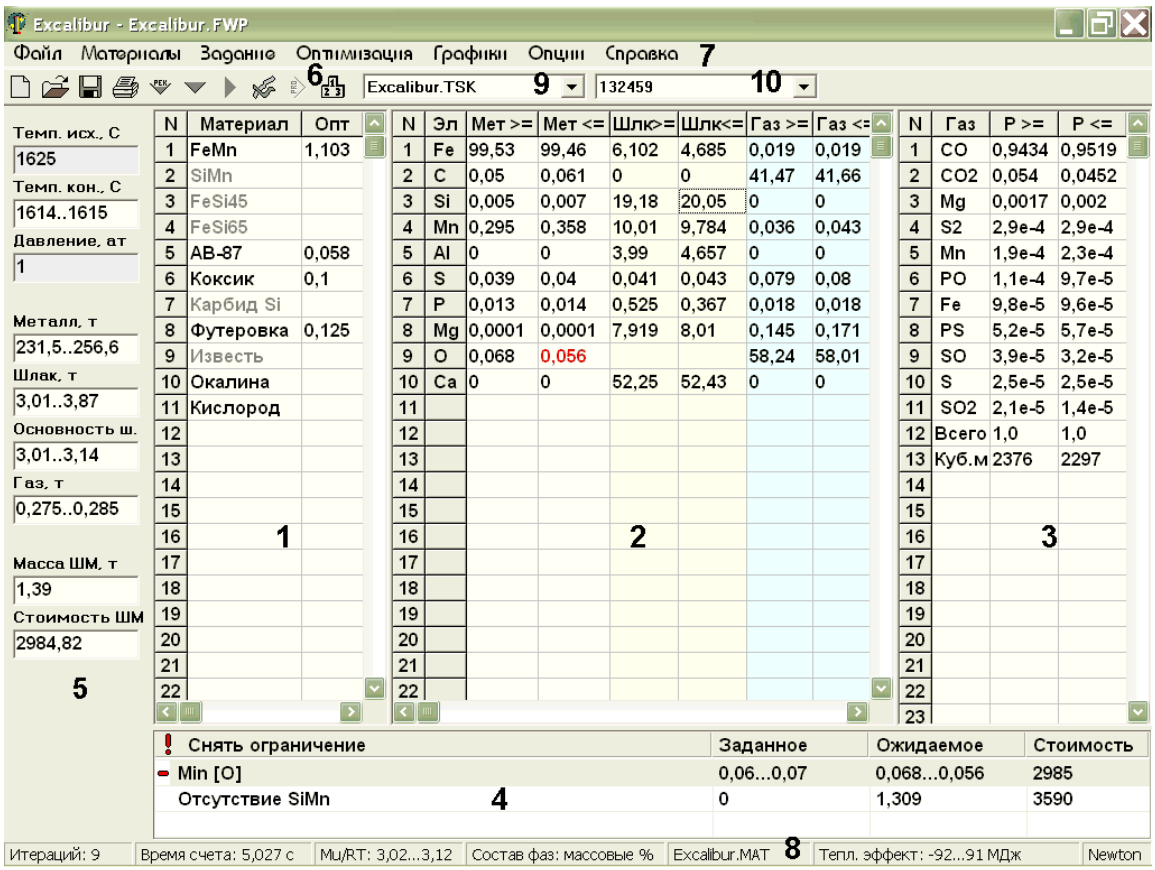


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд головної форми «Excalibur»

Елементи головної форми на рис. 2.1 позначені цифрами, які відповідають нумерації нижченаведених пунктів з поясненнями [5].

Таблиця матеріалів 1 (рис.2.1) містить список матеріалів, зчитуються з файлу матеріалів (MAT). Матеріали, заборонені до використання при оптимізації, виділені сірим кольором. З таблицею матеріалів асоційоване контекстне меню, Спливаюче при натисканні правої кнопки миші, що дозволяє забороняти і дозволяти матеріали окремо і в сукупності, а також очищати маси всіх матеріалів.

У колонці **Опт** спочатку відображаються маси рекомендованих матеріалів (в тоннах), що прочитуються з поточного завдання на плавку.

Після виконання команди **Оптимізувати** в колонці **Опт** відображається оптимальний набір матеріалів (в тоннах), що забезпечує виконання всіх заданих обмежень. У разі вибору будь-якого альтернативного рішення в цій колонці відображається набір матеріалів, що забезпечує часткове виконання заданих обмежень.

Поля колонки **Опт** є редагованими, що дозволяє задати довільний набір матеріалів і проплавити його командою **Проплавити** шляхом натискання функціональної клавіші F9 або кнопки на панелі управлення.

В колонку **Опт** можна вернуть (и проплавить) рекомендовані в поточне завдання матеріали командою **Проплавити рекомендовані** шляхом натискання функціональної клавіші F8 або кнопки на панелі управлення.

Таблиця елементів 2 (рис. 2.1) містить список активних елементів, що формується відповідно до хімічним складом використовуваних матеріалів, лічених з відповідного файлу матеріалів (MAT). Хімічні елементи, не представлені в одному матеріалі, в список не включаються.

Колонки **Мет >=** і **Мет <=** містять нижній і верхній межі хімічного складу металу після проплавлення або оптимізації матеріалів. Для деяких елементів (наприклад, O) можливе перевищення нижньої межі змісту над верхнім, що відображає взаємопов'язаність хімічного складу по окремих елементах.

Колонки **Шлк >=** і **Шлк <=** містять нижній і верхній межі хімічного складу шлаку після проплавлення або оптимізації матеріалів. За замовчуванням хімічний склад шлаку перераховується на масовий вміст оксидів для елементів з позитивною валентністю. При виборі мольних відсотків, кілограмів або кіломолей, або при включеній опції «Елементний склад шлаку» хімічний склад шлаку в оксиди не перераховується.

Колонки **Газ >=** і **Газ <=** містять нижній і верхній межі хімічного складу газу після проплавлення або оптимізації матеріалів.

Хімічні склади всіх фаз за замовчуванням відображаються у вигляді відсотків по масі.

Якщо в результаті проплавлення матеріалів хімічний склад металу або шлаку не повною мірою відповідає заданим обмеженням, відповідні значення в таблиці виділяються червоним кольором.

З таблицею елементів асоційоване спливаюче контекстне меню, Активується натисканням правої кнопки миші, що дозволяє уявити зміст фаз

у вигляді масових відсотків (за замовчуванням), мольних відсотків, кілограмів і кіломолей. Крім того, це меню дозволяє усереднювати нижній і верхній межі змісту елементів в фазах і подавати відповідні величини у вигляді десяткового логарифма.

Команда контекстного меню **Розширити** дозволяє побачити в таблиці елементів додаткову інформацію про поточний рівноважному стані хімічних елементів в фазах, яка використовується для налаштування моделей і в дослідницьких цілях:

Таблиця 2.2 – **Поточні термодинамічні параметри елементів в фазах**

Колонка	**Значення**
ln[K)	Логарифм константи рівноваги метал-шлак
A	Логарифм консолідованої константи рівноваги метал-шлак
ln[K}	Логарифм константи рівноваги метал-газ
B	Логарифм консолідованої константи рівноваги метал-газ
ln[g]	Логарифм коефіцієнта активності елемента в металі
ln(g)	Логарифм коефіцієнта активності елемента в шлаку
ln{g}	Логарифм коефіцієнта активності елемента в газі
ln[a]	Логарифм активності елемента в металі
ln(a)	Логарифм активності елемента в шлаку
ln{a}	Логарифм активності елемента в газі

Таблиця газів 3 (рис. 2.1) містить список активних газів, що формується відповідно до списку активних елементів і файлом газових термодинамічних даних (GAS). З файлу газових даних зчитуються тільки гази, які містять активні елементи.

В колонках **P >=** і **P <=** вказані нижній і верхній межі парціальних тисків газів в атмосферах.

На панелі опцій може бути встановлений поріг тиску відображення газів, що дозволяє не показувати в таблиці гази з незначним парціальним тиском. Крім того, є можливість вибрати, чи потрібно відображати склади і парціальні тиску віртуальних газів, тобто газів із загальною нульовою масою.

Сума парціальних тисків газів відображається в нижній частині таблиці. Якщо немає виділення газу, то ця сума менше або дорівнює зовнішньому тиску в системі. При виділенні газу сума парціальних тисків в точності дорівнює зовнішньому тиску.

У нижній частині таблиці відображається також обсяг газу, що виділився в $м^3$, приведений до нормальних умов.

При вирішенні оберненої задачі не завжди існує рішення, що повністю відповідає всім заданим обмеженням за хімічним складом металу і шлаку, мас фаз, основності шлаку, наявності матеріалів і т.д. В цьому випадку спрацьовує алгоритм пошуку альтернативних рішень шляхом послідовного зняття обмежень. Якщо в результаті зняття будь-якого обмеження знаходиться оптимальне рішення оберненої задачі, воно заноситься в список альтернативних рішень 4 (рис. 2.1), розташований в нижній частині головної форми.

В колонці **Зняти обмеження** відображається тип знімається обмеження і вказується відповідна величина. У колонці **Задане** відображаються межі, в яких допускається варіювання величини, що входить в це обмеження. У колонці **Очікуване** відображаються очікувані нижній і верхній межі величини після зняття обмеження. У колонці **Вартість** наводиться вартість набору матеріалів для даного альтернативного рішення.

Альтернативні рішення упорядковано відповідно до їх вартості в висхідному порядку.

Після закінчення пошуку альтернативних рішень автоматично відпрацьовується перше по списку рішення, яке має мінімальну вартість набору матеріалів.

Пошук альтернативних рішень може зайняти кілька хвилин. Хід пошуку показується хід-індикатором в нижній частині панелі параметрів.

Зі списку альтернативних рішень користувач може вибрати будь-який на свій розсуд шляхом наведення покажчика миші на відповідний рядок

списку і наступним натисканням лівої кнопки. Обраний альтернативне рішення зліва відзначається символом .

Набір матеріалів, що відповідає обраному альтернативного вирішення, відображається в таблиці матеріалів. Цей набір автоматично проплавляється, а склади утворюються фаз відображаються в таблицях елементів і газів.

Панель параметрів 5 розташована в лівій частині головної форми (рис. 2.1).

Нижче перераховані елементи панелі параметрів і їх функціональне значення.

Темп. исх., С. Вихідна температура системи. Якщо в поточному завданні на плавку не зазначена вихідна температура системи, вона за замовчуванням приймається рівною 1600С. У такому випадку дане поле стає редагується і дозволяє задати цю величину за бажанням користувача, не відкриваючи редактор завдання.

Темп. кон., С. Кінцева температура системи в стані рівноваги. Якщо в опціях заданий розрахунок температури (точний або спрощений), то в цьому полі відображається кінцева температури системи, що отримується в результаті рішення узагальненої прямої задачі. В іншому випадку відображається температура буде збігатися з вихідною температурою системи.

Тиск, ат. Зовнішній тиск в системі в атмосферах. Поле є редагується і дозволяє задати тиск на розсуд користувача. За замовчуванням тиск приймається рівним 1 ат.

Метал, т. Нижній і верхній межі маси металу в стані рівноваги, т.

Шлак, т. Нижній і верхній межі маси шлаку в стані рівноваги, т.

Основність ш. Нижній і верхній межі основності шлаку в стані рівноваги. Основність розраховується як частка $((CaO)+(MgO))/(SiO_2)$.

Газ, т. Нижній і верхній межі маси газу в стані рівноваги, т.

Маса ШМ, т. Маса набору завантажених шихтових матеріалів, т.

Вартість ШМ. Вартість набору завантажених шихтових матеріалів в одиницях цін, зазначених у файлі матеріалів.

Панель управління 6 (рис. 2.1) містить кнопки, за допомогою яких в програмі виробляються основні дії. Як правило, команди, що виконуються при натисканні кнопок панелі управління, доступні також з меню і за допомогою натискання певних сполучень «гарячих» клавіш. У табл. 2.3 наведені команди, доступні в панелі управління.

Таблиця 2.3 – **Кнопки панелі управління, відповідні пункти меню і поєднання клавіш**

Кнопка	Пункт меню	Сполучення клавіш	Функціональне призначення
	Файл → Новий проект	Ctrl-N	Почати новий проект.
	Файл → Відкрити проект	Ctrl-O	Відкрити файл проекту (FWP).
	Файл → Зберегти проект	Ctrl-S	Зберегти файл проекту (FWP).
	Файл → Друкувати проект	Ctrl-P	Надрукувати головну форму проекту.
	Матеріали → Проплавити рекомендовані	F8	Проплавити рекомендовані матеріали з поточного завдання.
	Матеріали → Проплавити	F9	Проплавити матеріали, задані в таблиці матеріалів.
	Оптимізація → Почати	F10	Оптимізувати і проплавити матеріали відповідно до обмежень, заданими в поточному завданні на плавку.
	Оптимізація → Зупинити		Зупинити процес оптимізації
	Графіки → Кінетика релаксації	Ctrl-K	Включити підпрограму кінетики руху до рівноважного стану.
	Графіки → Моделювання електроплавки	F4	Включити підпрограму моделювання електроплавки.
			Помістити головну форму поверх всіх вікон.

Головне меню 7 (рис. 2.1) містить комплекс команд, які виконуються за допомогою вибору користувачем пунктів меню. У табл. 2.4 наведені структура меню і функціональне призначення відповідних команд.

Таблиця 2.4 – **Структура и команди головного меню**

Верхній рівень	**Перший рівень**	**Другий рівень / поєднання клавіш**	**Функціональне призначення**
Файл	Новий проект	Ctrl-N	Почати новий проект.
	Відкрити проект	Ctrl-O	Відкрити файл проекту (FWP).
	Відкрити файл	Константи	Відкрити файл констант (CON).
		Матеріали	Відкрити файл матеріалів (MAT).
		Завдання	Відкрити файл заданий на плавку (TSK).
		Шаблон плавки	Відкрити файл шаблона електроплавки (HEA).
	Зберегти проект	Ctrl-S	Зберегти проект у вигляді файлу (FWP).
	Зберегти проект як		Зберегти проект у вигляді файлу (FWP) с ім’ям, відмінним від імені поточного проекту.
	Друкувати проект	Ctrl-P	Надрукувати головну форму проекту
	Вихід		Завершити роботу програми
Матеріали	Відкрити файл матеріалів		Відкрити файл матеріалів (MAT).
	Проплавити рекомендовані	F8	Проплавити рекомендовані матеріали з поточного завдання.
	Проплавити	F9	Проплавить матеріали, задані в таблице матеріалів.
	Ефективність		Відкрити форму ефективності використовуваних матеріалів.
Завдання	Редактор завдання	F5	Відкрити редактор завдання на плавку

	Відкрити файл завдань		Відкрити файл завдань на плавку (TSK).
	Виключити завдання з проекту		Виключити поточний файл завдань з проекту.
Оптимізація	почати	F10	Оптимізувати і проплавити матеріали відповідно до обмежень, заданими в поточному завданні на плавку.
	зупинити		Зупинити процес оптимізації матеріалів.
Графіки	Крива електро-нейтральності	F7	Вивести графік (Заряд шлаку) vs (Рівень Фермі електронів).
	кінетика релаксації	Ctrl-K	Включити підпрограму кінетики руху до рівноважного стану.
	моделювання електроплавки	F4	Включити підпрограму моделювання електроплавки.
Опції			Відкрити діалогове вікно опцій
Довідка	виклик довідки	F1	
	Реєстрація		Реєстрація програми.
	Про програму		Відкрити панель з короткими відомостями про програму.

Статус-рядок 8 розташована у нижнього краю головної форми (рис. 2.1). Вона має кілька розділів з текстовою інформацією про режими роботи програми. У табл. 2.5 наведено список розділів статус-рядка і їх зміст.

Таблиця 2.5 – **Розділи статус-строки та їх зміст**

Розділ	Зміст
Ітерацій	Кількість зовнішніх ітерацій, витрачених на пошук оптимального набору матеріалів.
Час відліку	Час відліку (с) при проплавлення або оптимізації матеріалів.
Mu/RT	Нижній і верхній межі рівноважного значення рівня Ферма електронів в одиницях RT.
Состав фаз	Одиниці виміру складів фаз: масові%, молярний%, кілограми або кіломолі.

*.MAT	Поточний файл матеріалів.
Тепл. ефект	Тепловий ефект хімічних реакцій в МДж - нижній і верхній межі. При спрощеному розрахунку і при відсутності розрахунку температури тепловий ефект обчислюється при початковій температурі системи.
Newton / Chain	Метод вирішення системи рівнянь прямої задачі - Ньютона або ланцюжкової (прості ітерації).

Список, що випадає 9 (рис. 2.1) служить для швидкого вибору файлу завдань (TSK) на плавку в рамках поточного проекту. В результаті такого вибору відкривається завдання, запам’ятоване в результаті збереження проекту при роботі з даним файлом завдань. Рекомендовані матеріали відкритого завдання автоматично проплавляються.

Вибір файлу завдань таким способом еквівалентний відкриття файлу завдань з головного меню одним з двох способів, зазначених в табл. 2.4.

Список, що випадає 10 (рис. 2.1) служить для швидкого вибору завдання на плавку в рамках поточного файлу завдань і поточного проекту. За допомогою цього елемента головної форми користувач може легко перейти до іншого завданням на плавку зі списку завдань поточного файлу TSK, не відкриваючи редактор завдань. Рекомендовані матеріали відкритого таким чином завдання автоматично проплавляються.

Вид форми редактора завдання на плавку наведено на рис. 2.2.

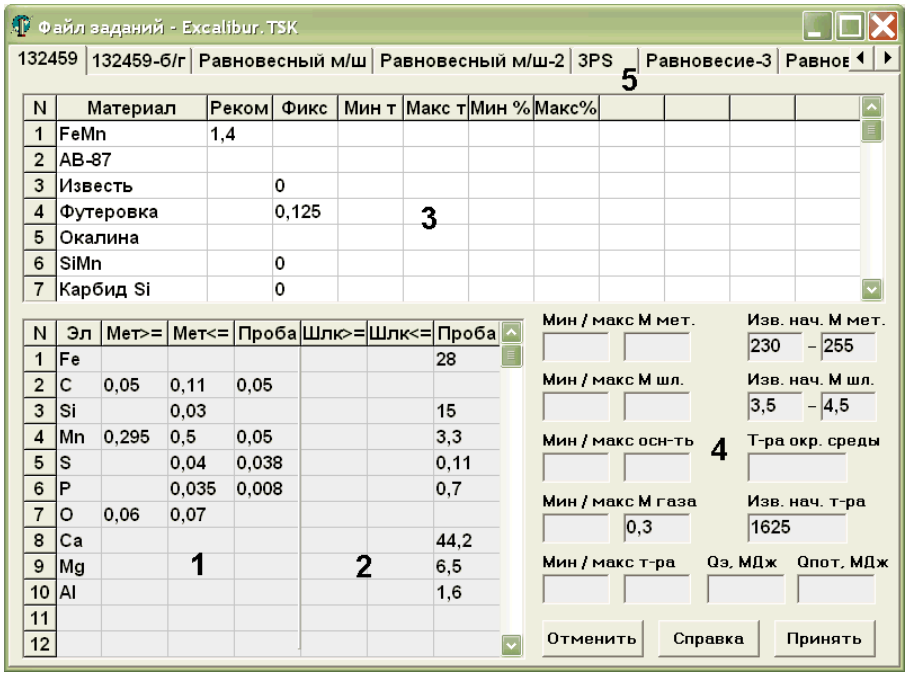


Рисунок 2.2 – Форма редактора завдання на плавку

Елементи форми редактора завдання на рис. 2.4 позначені цифрами, які відповідають нумерації нижченаведених пунктів з поясненнями.

Редактор завдання на плавку викликається вибором пункту меню **Завдання → Редактор** завдання, або натисканням функціональної клавіші F5. Поля форми редактора завдання автоматично заповнюються даними з поточного завдання на плавку.

Всі поля форми редактора завдання є редагованими і можуть використовуватися для завдання всіляких обмежень до зворотній задачі і вихідних даних до прямої задачі. Активний елемент форми підсвічується білим кольором, тоді як інші мають сірий відтінок.

Внесені зміни або приймаються натисканням кнопки **Прийняти** з подальшим проплавленням рекомендованих матеріалів, або скасовуються натисканням кнопки **Скасувати.**

Форма редактора завдання має контекстне спливаюче меню (рис. 2.3), активується натисканням правої кнопки миші. З його допомогою виконуються різні дії над завданнями.

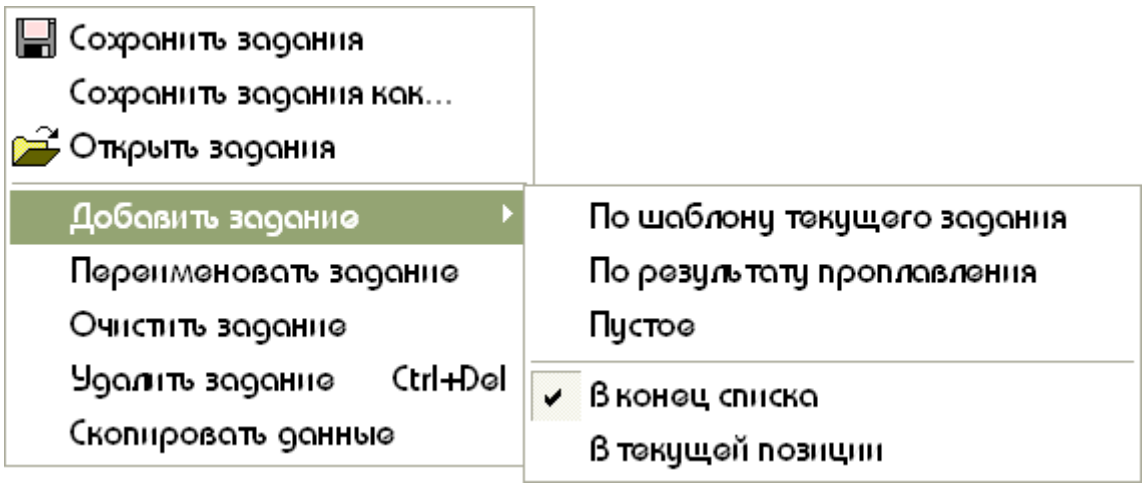


Рисунок 2.3 – Контекстне спливаюче меню форми редактора завдання

У табл. 2.6 наведені структура контекстного меню і функціональне призначення відповідних команд.

Таблиця 2.6 – **Структура и команди контекстного меню редактора завдання**

Перший рівень	**Другий рівень / поєднання клавіш**	**Функціональне призначення**
Зберегти завдання		Зберегти всі завдання на плавку в поточному файлі завдань (TSK).
Зберегти завдання як		Зберегти всі завдання на плавку в файлі завдань (TSK) з ім'ям, відмінним від імені поточного файлу завдань.
Відкрити завдання		Відкрити файл завдань на плавку (TSK).
Добавити завдання	По шаблону поточного завдання	Додати нове завдання на плавку, копіюючи всі дані поточного завдання.
	По результату проплавлення	Додати нове завдання на плавку з параметрами вихідних металу і шлаку, отриманими в результаті проплавлення або оптимізації поточного завдання.
	Пусте	Додати нове пусте завдання на плавку.
	В кінець списку	Додаються завдання поміщати в кінець списку завдань.
	В поточній позиції	Додаються завдання поміщати в поточну позицію списку завдань.

Перейменувати завдання		Перейменувати поточне завдання на плавку.
Очистити завдання		Очистити поточне завдання на плавку.
Видалити завдання	Ctrl-Del	Видалити поточне завдання на плавку зі списку завдань.
Скопіювати дані		Скопіювати дані з поточного завдання в усі наступні завдання: вихідну масу шлаку, обмеження по масі газу, список контрольованих елементів, пробу шлаку.

В колонках **Мет>** = і **Мет <=** таблиці 1 (рис. 2.2) задаються нижню і верхню обмеження за змістом елементів в металі в масових відсотках. Якщо обмеження відсутнє, відповідна осередок повинна бути порожньою. Як правило, немає необхідності ставити обмеження щодо вмісту заліза.

В колонках **Шлк>** = і **Шлк <=** таблиці 2 (рис. 2.2) задаються нижню і верхню обмеження за змістом елементів в шлаку в масових відсотках. Якщо обмеження відсутнє, відповідна осередок повинна бути порожньою. Як правило, немає необхідності ставити обмеження щодо вмісту кисню.

У колонці **Проба** задається хімічний аналіз проби вихідного шлаку в масових відсотках. Відсутність даних про зміст елемента в пробі шлаку, крім кисню, інтерпретується як зміст даного елемента в шлаку на рівні слідів. Вміст кисню в пробі шлаку ігнорується.

За замовчуванням хімічний склад шлаку в таблиці задається у вигляді масових відсотків оксидів для елементів з позитивною валентністю і масових відсотків інших елементів. Коли меню «Елементний склад шлаку» хімічний склад шлаку задається в масових відсотках елементів.

Таблиця 3 (рис. 2.2) в колонці **Матеріал** містить список контрольованих матеріалів, тобто матеріалів, на які накладено будь-які обмеження. Все маси задаються в тоннах.

У колонці **Реком** задаються рекомендовані маси матеріалів, які автоматично проплавляються при відкритті завдання на плавку будь-яким

способом. Ці маси не впливають на результат оптимізації матеріалів, але в той же час використовуються в якості першого наближення, якщо вимкнена опція «Автоматичний пошук поч. наближення в зворотній задачі ». Користувач може використовувати дане поле, наприклад, для завдання фактичної віддачі матеріалів в даній плавці.

У колонці **Фікс** задаються обов'язкові матеріали, тобто матеріали з фіксованою масою. При оптимізації маси цих матеріалів залишаються постійними. Фіксована маса матеріалів, заборонених до використання при оптимізації, дорівнює нулю.

В колонках **Мін т** и **Макс т** задаються відповідно мінімальна і максимальна маса матеріалів. Наприклад, залишок даного матеріалу на складі або в бункері може бути вказаний в полі Макс т.

В колонках **Мін%** и **Макс%** задаються відповідно мінімально та максимально допустимий відсоток даного матеріалу в загальній масі завантажених матеріалів. Наприклад, при розрахунку завалювання можна задати% змісту легковагій стружки в певному інтервалі.

Панель 4 (рис. 2.2) містить кілька редагованих полів, що використовуються в прямій і зворотній завдання. Значення цих полів вказані в табл. 2.7.

Таблиця 2.7. **Редаговані поля завдання на плавку**

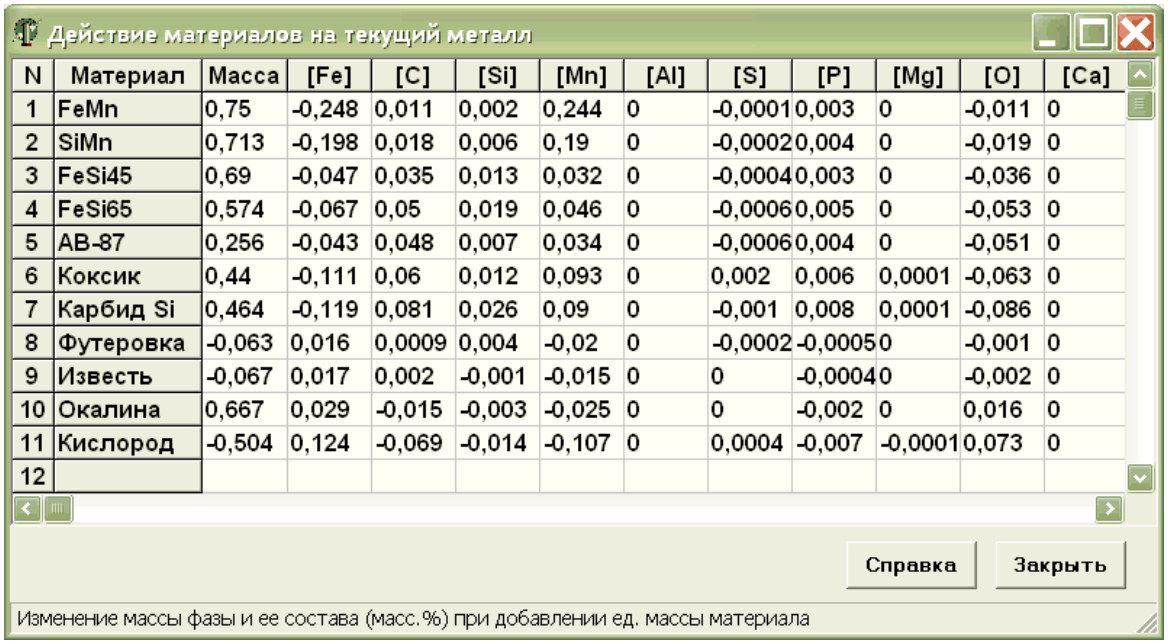
Поле	Значення
Від. поч. М мет.	Відома початкова маса металу - нижній і верхній межі, тонн. Здається обов'язково при легуванні.
Від. поч. М шл.	Відома початкова маса шлаку - нижній і верхній межі, тонн. Здається обов'язково при легуванні.
Мин / макс М мет.	Мінімальна та максимальна допустима маса металу, тонн. Здається обов'язково при розрахунку завалювання.
Мин / макс М шл.	Мінімальна та максимальна допустима маса шлаку, тонн.
Мин / макс осн-ть	Мінімальна та максимальна допустима основність шлаку.
Мин / макс М газа	Мінімальна та максимальна допустима маса газу, тонн. Здається при розкисленні киплячій і напівспокійну стали.

Мин / макс т-ра	Мінімальна та максимальна допустима температура, С. В стадії розробки алгоритму.
Т-ра навк. середи	Температура навколишнього середовища, С. За замовчуванням приймається рівною 20С. Має суттєве значення для кінцевої температури системи, якщо маси завантажених матеріалів великі, наприклад, при розрахунку завалювання.
Від. поч т-ра	Відома початкова температура металу і шлаку, С. Якщо температура не вказана, вона за замовчуванням приймається рівною 1600С. Ця величина копіюється в поле Темп. вих., З на головній формі програми.
Qэ, МДж	Прихід енергії в систему з енергоносіями, МДж.
Qпот, МДж	Теплові втрати, МДж.

У верхній частині форми редактора матеріалів знаходиться елемент управління вкладками, за допомогою якого користувач може швидко перейти до іншого завданням на плавку. Кожна вкладка відповідає своєму завданню. Перехід до іншого завданням синхронізований з списком, що випадає вибору завдання на плавку, розташованим на головній формі.

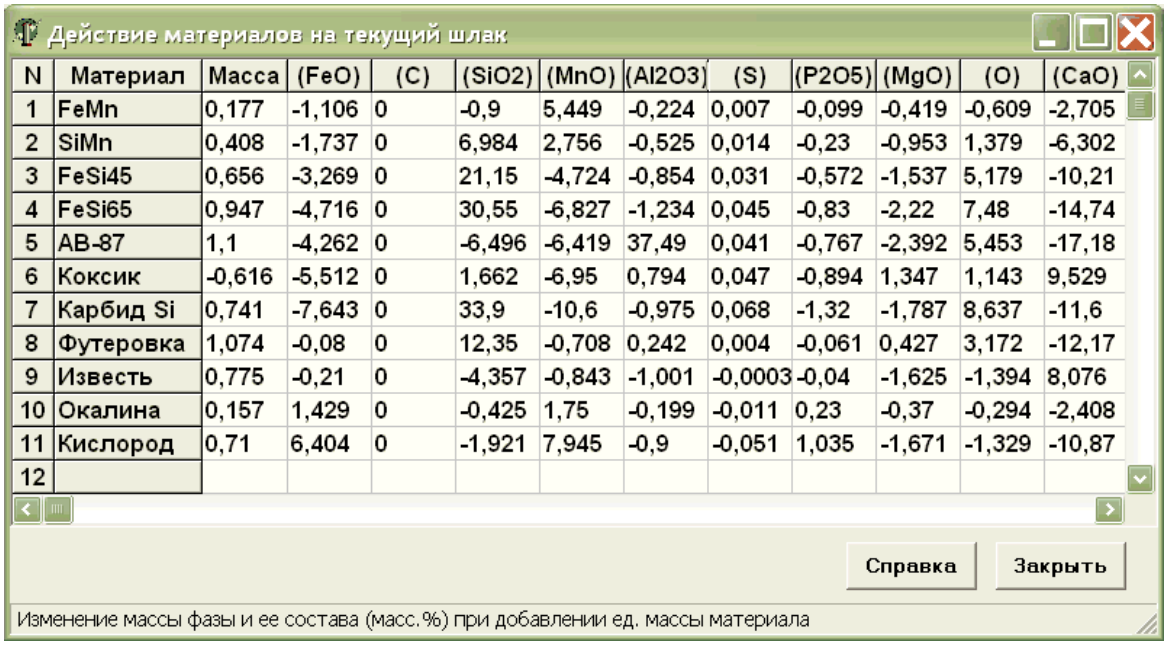
Всі зміни, внесені користувачем на будь-якому завданні, зберігаються, якщо не була натиснута кнопка **Скасувати**. Таким чином, можна редагувати ряд завдань, не закриваючи форму редактора завдання.

На формі ефективності використовуваних матеріалів (рис.2.4 - 2.6) відображається зміна маси і хімічного складу фаз (мас.%) При додаванні в систему одиниці маси матеріалу. Ця форма доступна через пункт меню **Матеріали → Ефективність**. Перемикання між металом, шлаком і газом проводиться за допомогою контекстного меню.



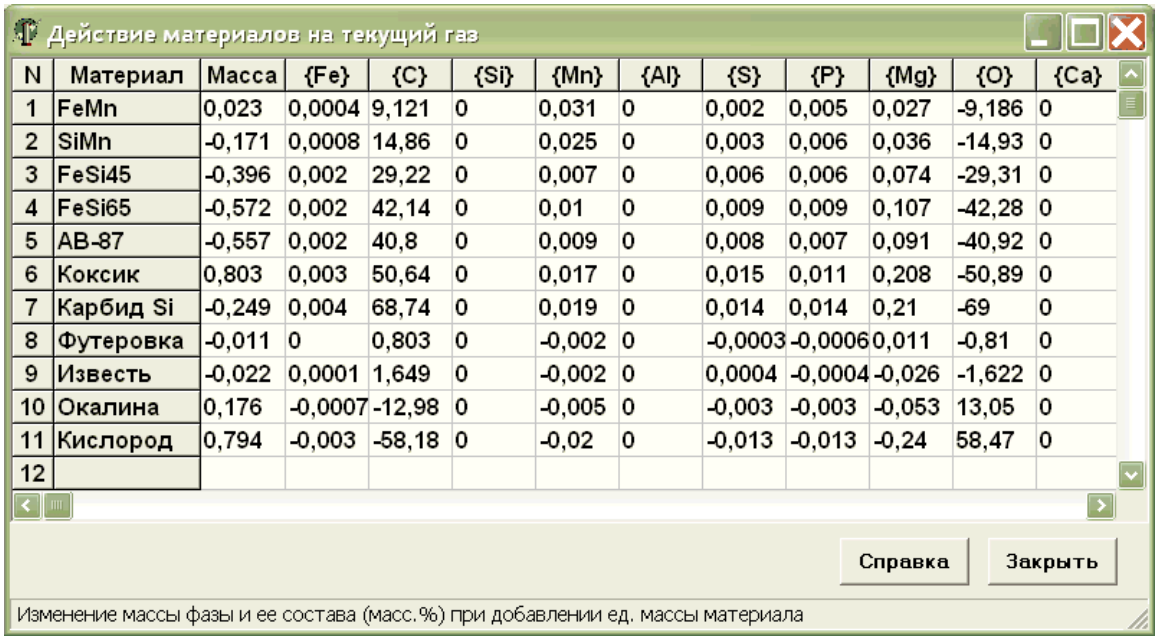
N	Материал	Масса	[Fe]	[C]	[Si]	[Mn]	[Al]	[S]	[P]	[Mg]	[O]	[Ca]
1	FeMn	0,75	-0,248	0,011	0,002	0,244	0	-0,0001	0,003	0	-0,011	0
2	SiMn	0,713	-0,198	0,018	0,006	0,19	0	-0,0002	0,004	0	-0,019	0
3	FeSi45	0,69	-0,047	0,035	0,013	0,032	0	-0,0004	0,003	0	-0,036	0
4	FeSi65	0,574	-0,067	0,05	0,019	0,046	0	-0,0006	0,005	0	-0,053	0
5	АВ-87	0,256	-0,043	0,048	0,007	0,034	0	-0,0006	0,004	0	-0,051	0
6	Коксик	0,44	-0,111	0,06	0,012	0,093	0	0,002	0,006	0,0001	-0,063	0
7	Карбид Si	0,464	-0,119	0,081	0,026	0,09	0	-0,001	0,008	0,0001	-0,086	0
8	Футеровка	-0,063	0,016	0,0009	0,004	-0,02	0	-0,0002	-0,0005	0	-0,001	0
9	Известь	-0,067	0,017	0,002	-0,001	-0,015	0	0	-0,0004	0	-0,002	0
10	Окалина	0,667	0,029	-0,015	-0,003	-0,025	0	0	-0,002	0	0,016	0
11	Кислород	-0,504	0,124	-0,069	-0,014	-0,107	0	0,0004	-0,007	-0,0001	0,073	0
12												

Рисунок 2.4 – Дія матеріалів на масу і склад металу



N	Материал	Масса	(FeO)	(C)	(SiO2)	(MnO)	(Al2O3)	(S)	(P2O5)	(MgO)	(O)	(CaO)
1	FeMn	0,177	-1,106	0	-0,9	5,449	-0,224	0,007	-0,099	-0,419	-0,609	-2,705
2	SiMn	0,408	-1,737	0	6,984	2,756	-0,525	0,014	-0,23	-0,953	1,379	-6,302
3	FeSi45	0,656	-3,269	0	21,15	-4,724	-0,854	0,031	-0,572	-1,537	5,179	-10,21
4	FeSi65	0,947	-4,716	0	30,55	-6,827	-1,234	0,045	-0,83	-2,22	7,48	-14,74
5	АВ-87	1,1	-4,262	0	-6,496	-6,419	37,49	0,041	-0,767	-2,392	5,453	-17,18
6	Коксик	-0,616	-5,512	0	1,662	-6,95	0,794	0,047	-0,894	1,347	1,143	9,529
7	Карбид Si	0,741	-7,643	0	33,9	-10,6	-0,975	0,068	-1,32	-1,787	8,637	-11,6
8	Футеровка	1,074	-0,08	0	12,35	-0,708	0,242	0,004	-0,061	0,427	3,172	-12,17
9	Известь	0,775	-0,21	0	-4,357	-0,843	-1,001	-0,0003	-0,04	-1,625	-1,394	8,076
10	Окалина	0,157	1,429	0	-0,425	1,75	-0,199	-0,011	0,23	-0,37	-0,294	-2,408
11	Кислород	0,71	6,404	0	-1,921	7,945	-0,9	-0,051	1,035	-1,671	-1,329	-10,87
12												

Рисунок 2.5 – Дія матеріалів на масу і склад шлаку



N	Материал	Масса	{Fe}	{C}	{Si}	{Mn}	{Al}	{S}	{P}	{Mg}	{O}	{Ca}
1	FeMn	0,023	0,0004	9,121	0	0,031	0	0,002	0,005	0,027	-9,186	0
2	SiMn	-0,171	0,0008	14,86	0	0,025	0	0,003	0,006	0,036	-14,93	0
3	FeSi45	-0,396	0,002	29,22	0	0,007	0	0,006	0,006	0,074	-29,31	0
4	FeSi65	-0,572	0,002	42,14	0	0,01	0	0,009	0,009	0,107	-42,28	0
5	АВ-87	-0,557	0,002	40,8	0	0,009	0	0,008	0,007	0,091	-40,92	0
6	Коксик	0,803	0,003	50,64	0	0,017	0	0,015	0,011	0,208	-50,89	0
7	Карбид Si	-0,249	0,004	68,74	0	0,019	0	0,014	0,014	0,21	-69	0
8	Футеровка	-0,011	0	0,803	0	-0,002	0	-0,0003	-0,0006	0,011	-0,81	0
9	Известь	-0,022	0,0001	1,649	0	-0,002	0	0,0004	-0,0004	-0,026	-1,622	0
10	Окалина	0,176	-0,0007	-12,98	0	-0,005	0	-0,003	-0,003	-0,053	13,05	0
11	Кислород	0,794	-0,003	-58,18	0	-0,02	0	-0,013	-0,013	-0,24	58,47	0
12												

Рисунок 2.6 – Дія матеріалів на масу і склад газу

Величини, наведені в таблицях, розраховані за допомогою фазових концентраційних операторів в поточному стані рівноваги системи. Вони дозволяють класифікувати і ранжувати матеріали по їх дії на маси і хімічний склад фаз. Будь-яка зміна умов розкислення, легування і т.д. призводить до зміни всіх величин ефективності матеріалів. Наприклад, видалення сірки відбувається більш інтенсивно при більш глибокому розкисленні металу.

Підпрограма кінетики руху системи до рівноваги включається шляхом вибору пункту меню **Графіки → Кінетика** релаксації, або натисканням комбінації клавіш Ctrl-K.

Теоретичні основи моделювання кінетики руху системи до рівноваги з деякого нерівноважного стану, тобто релаксації системи розглянуті в роботі [18]. Рушійною силою міжфазного масопереносу є різниця хімічних потенціалів елементів на кордоні розділу фаз. На рис 2.7 і 2.8 показані типові траєкторії релаксації елементів до рівноважного стану в металі і шлаку при додаванні кремнію і кисню в розкислення сталь при 1600С.

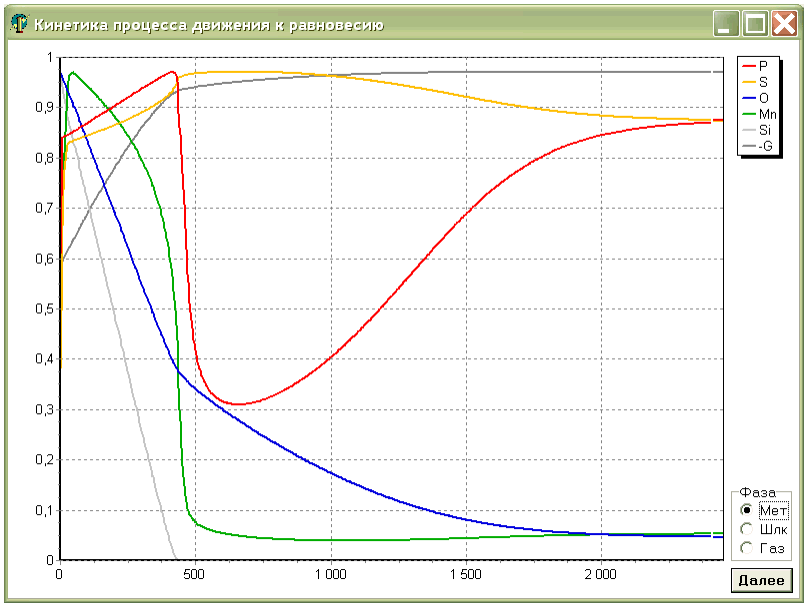


Рисунок 2.7 – Траєкторія релаксації елементів в металі

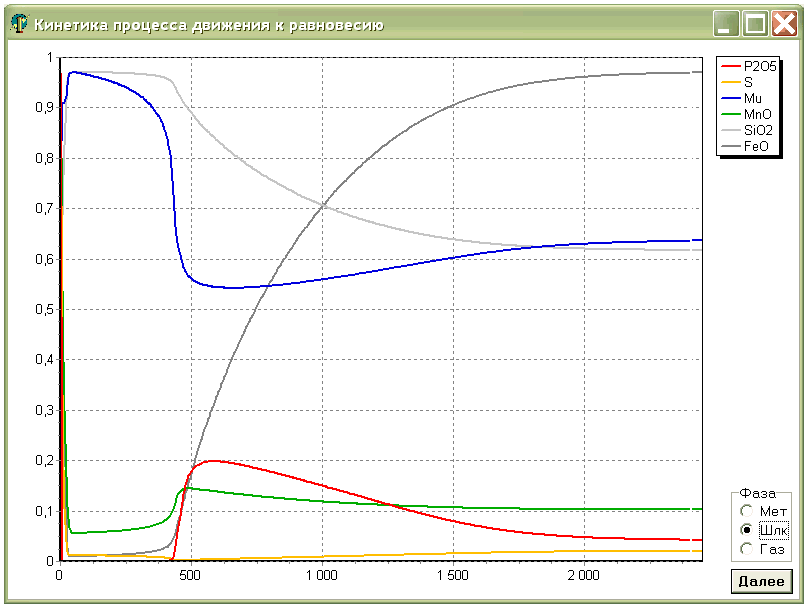


Рисунок 2.8 – Траєкторія релаксації елементів в шлаку

На рис 2.7 показано також зміну інтегральної енергії Гіббса. Згідно з другим законом термодинаміки ця величина в стані рівноваги прагне до мінімуму. На графіку показана величина -G, яка прагне до максимуму.

У цій версії програми побудова траєкторій релаксації елементів реалізовано без урахування газової фази.

Склад шлаку вказаний у виді вмісту відповідних оксидів (FeO, SiO_2, MnO, Al_2O_3, P_2O_5, CrO, CaO).

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОЗКИСЛЕННЯ-ЛЕГУВАННЯ В ПРОЦЕСІ ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

3.1 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 09Г2С

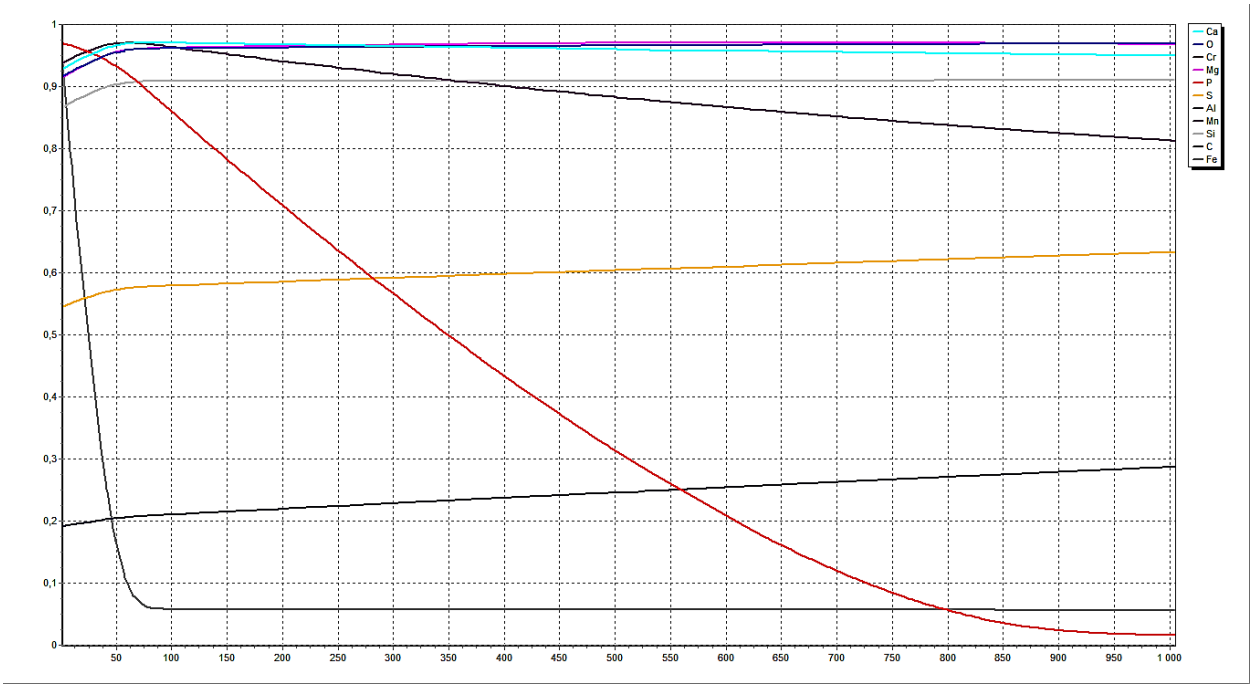


Рисунок 3.1 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 09Г2С при витримці 1 секунда

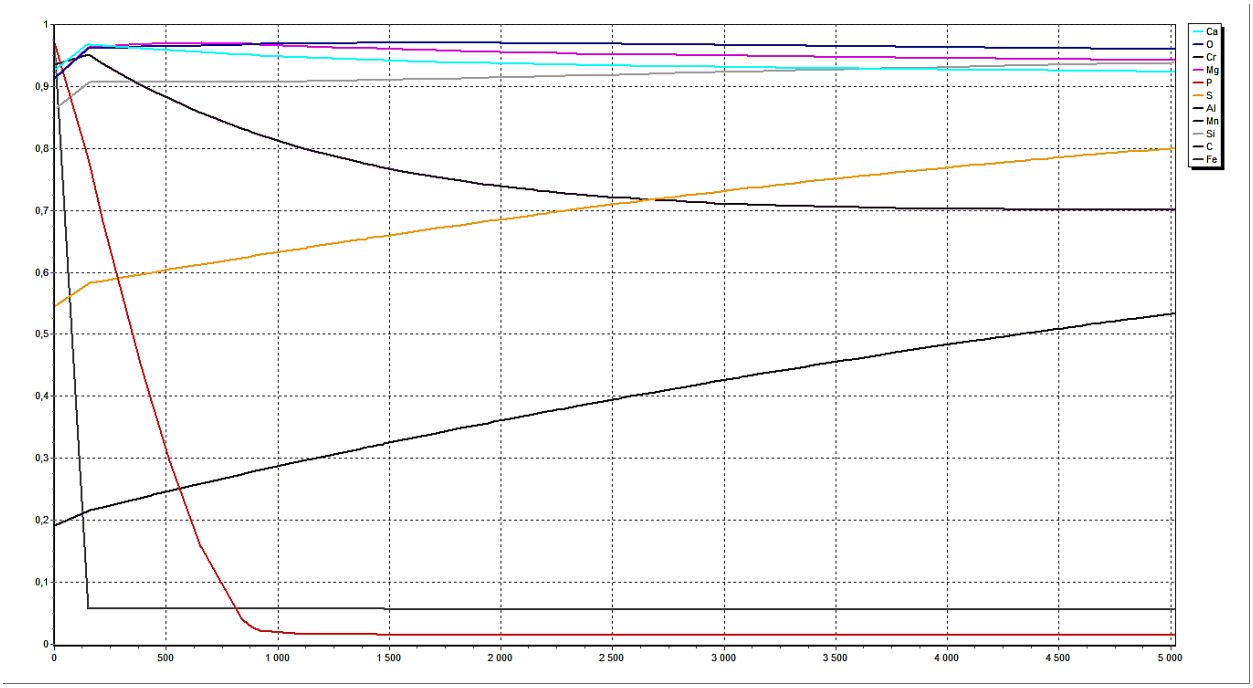


Рисунок 3.2 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 09Г2С при витримці 5 секунд

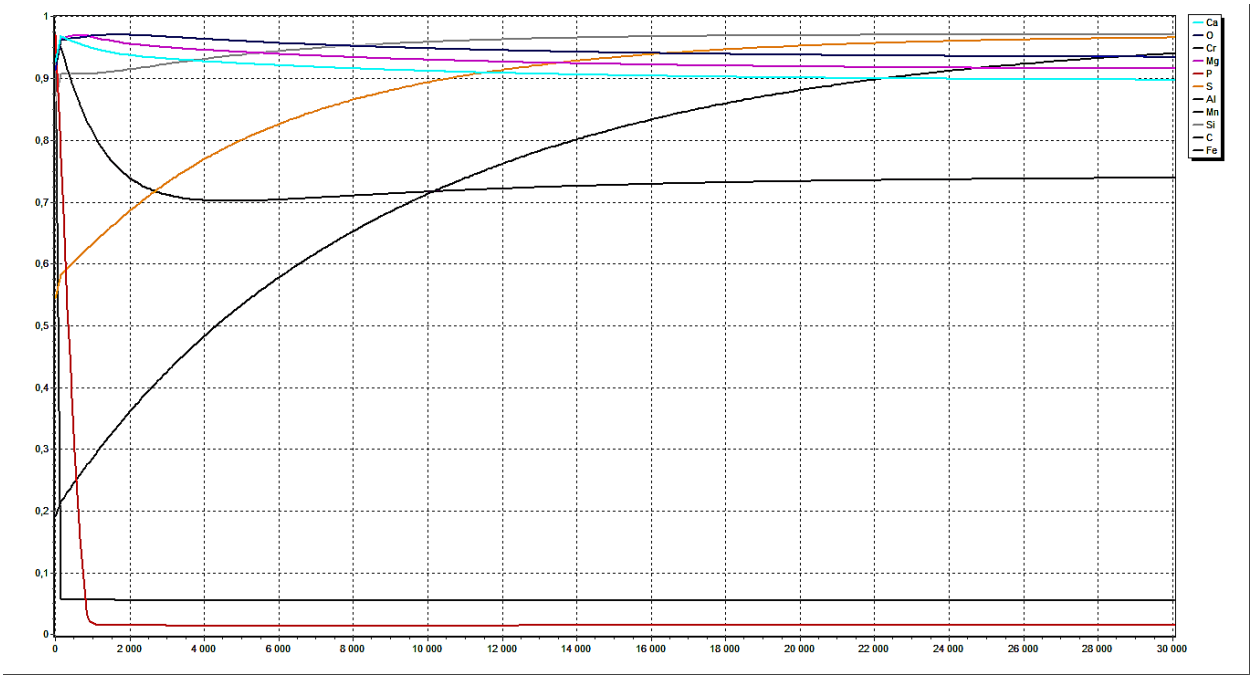


Рисунок 3.3 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 09Г2С при витримці 30 секунд

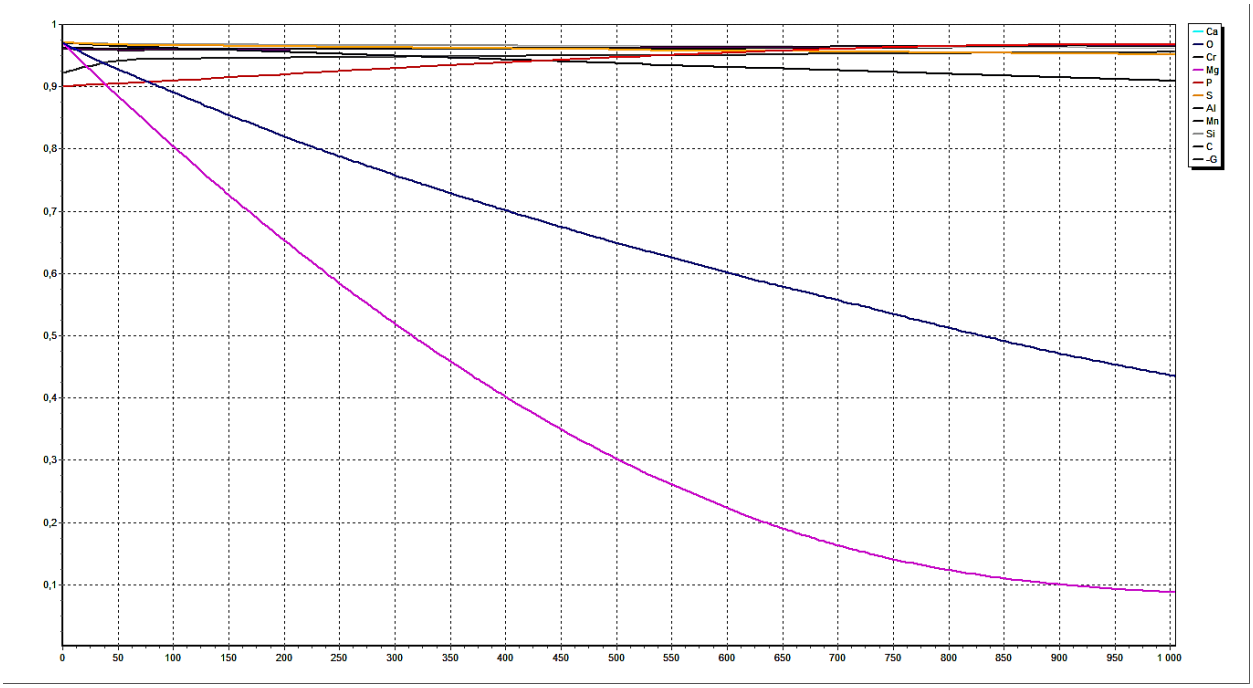


Рисунок 3.4 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 09Г2С при витримці 1 секунда

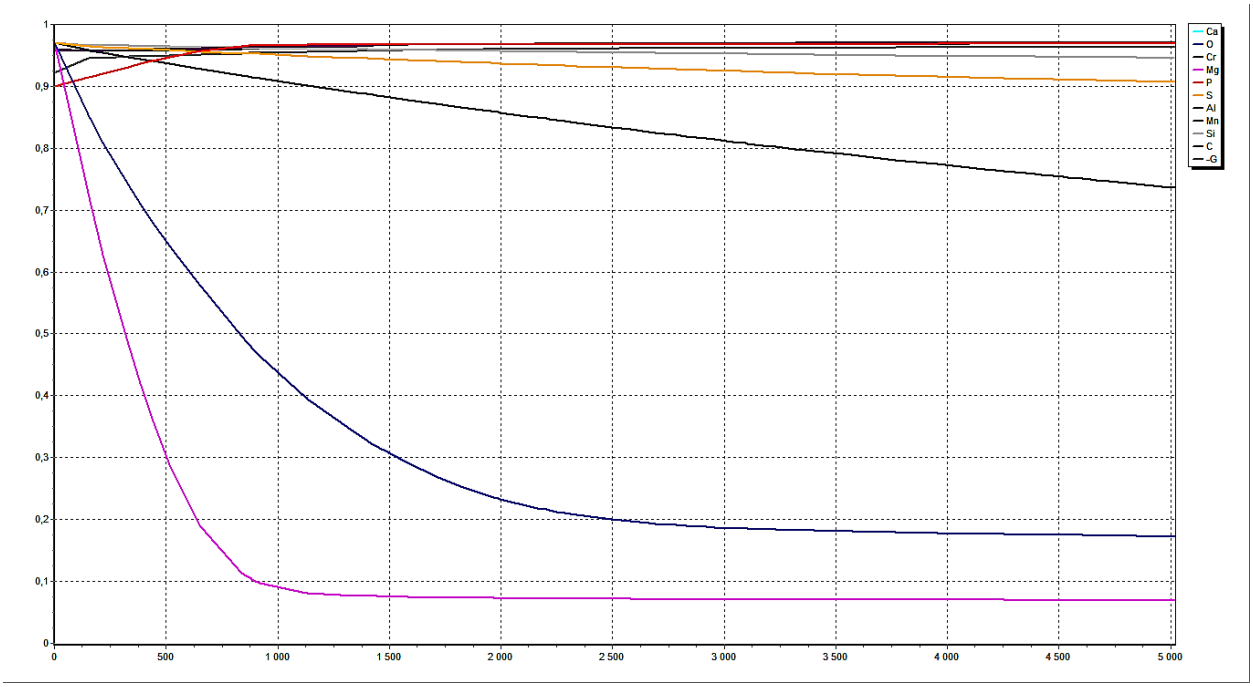


Рисунок 3.5 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 09Г2С при витримці 5 секунд

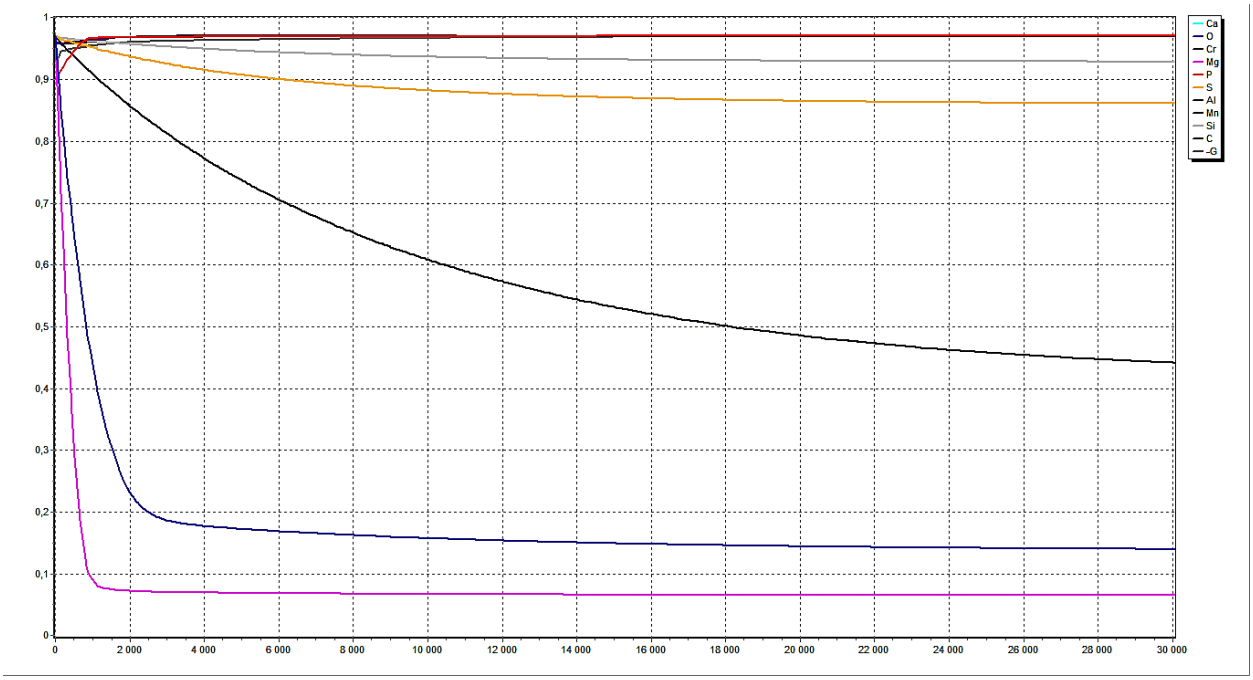


Рисунок 3.6 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 09Г2С при витримці 30 секунд

Елементи в металі відновлюються практично одночасно при русі до рівноваги, і тільки на відновлення алюмінію потрібно значно більше часу.

Дуже сильно підвищується рівень вмісту алюмінію на 0,114%, і кремнію на 0,065% в металі. Помітно різке зниження кисню до 0,008% в

металі до рівноважного значення, одночасно з цим сильно зростає його вміст у шлаку на 67,91%. Кількість сери в металі знижується незначно, але її вміст у шлаку 0,391%. Вміст вуглецю в металі зростає на 0,065%.

Таблиця 3.1 – **Початкові і кінцеві концентрації елементів в металі і шлаку при розкисленні-легуванні сталі 09Г2С**

М / Ш	Вміст хімічних елементів в металі і шлаку, мас. %										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	-	0,05	0,005	0,12	-	0,04	0,015	-	-	0,062	-
М кін	97,71	0,115	0,664	1,33	0,114	0,034	0,029	0,0002	-	0,008	-
Ш поч	25	-	20	5	1,5	0,3	0,2	3	-	-	45
Ш кін	0,743	-	14,35	1,998	10,39	0,391	0,002	4,226	-	67,91	-

3.2 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 12ГС

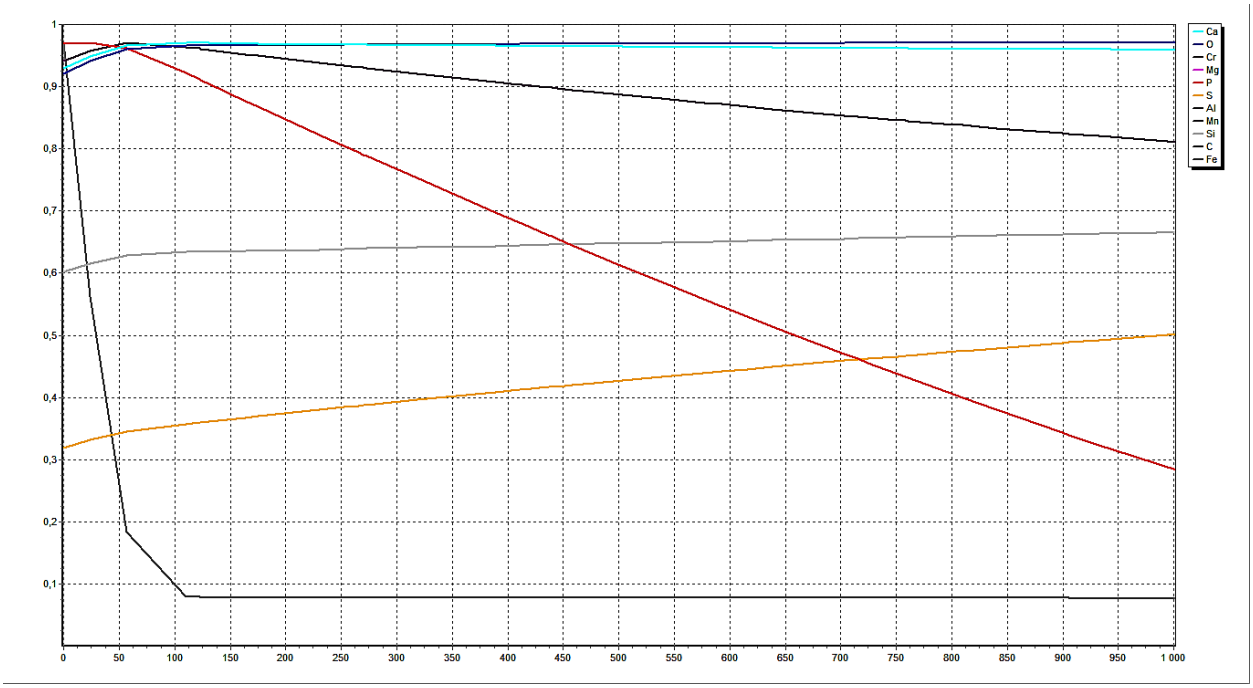


Рисунок 3.7 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 12ГС при витримці 1 секунда

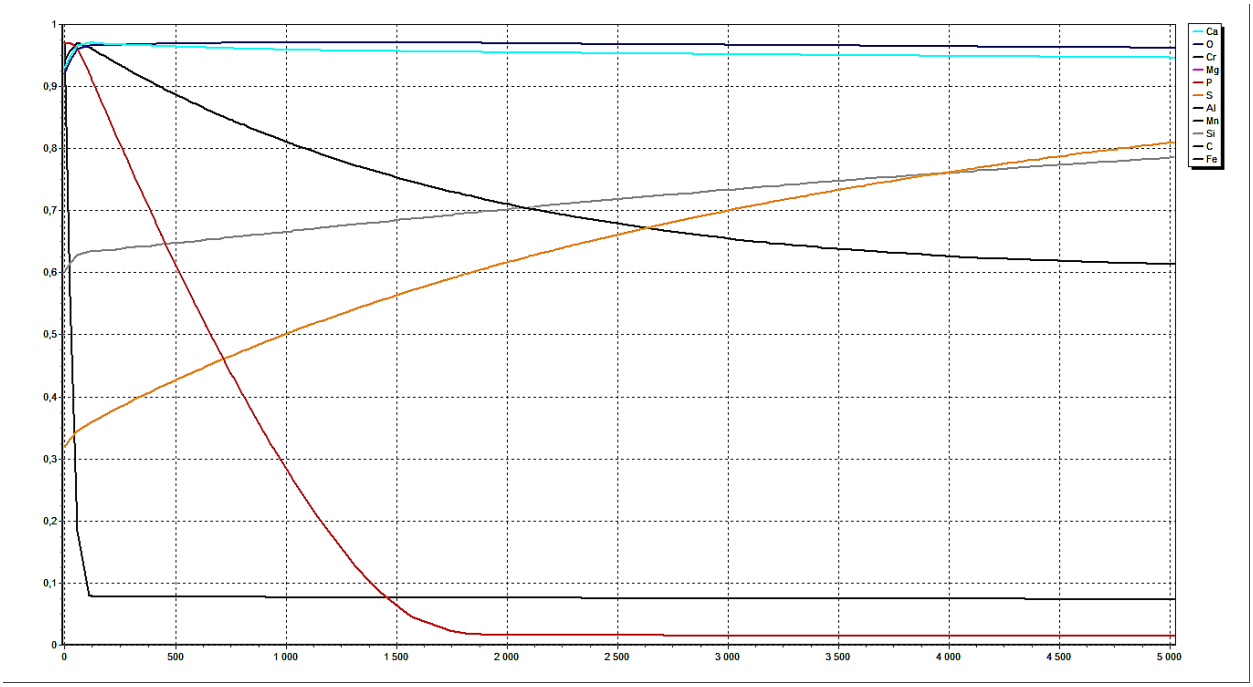


Рисунок 3.8 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 12ГС при витримці 5 секунд

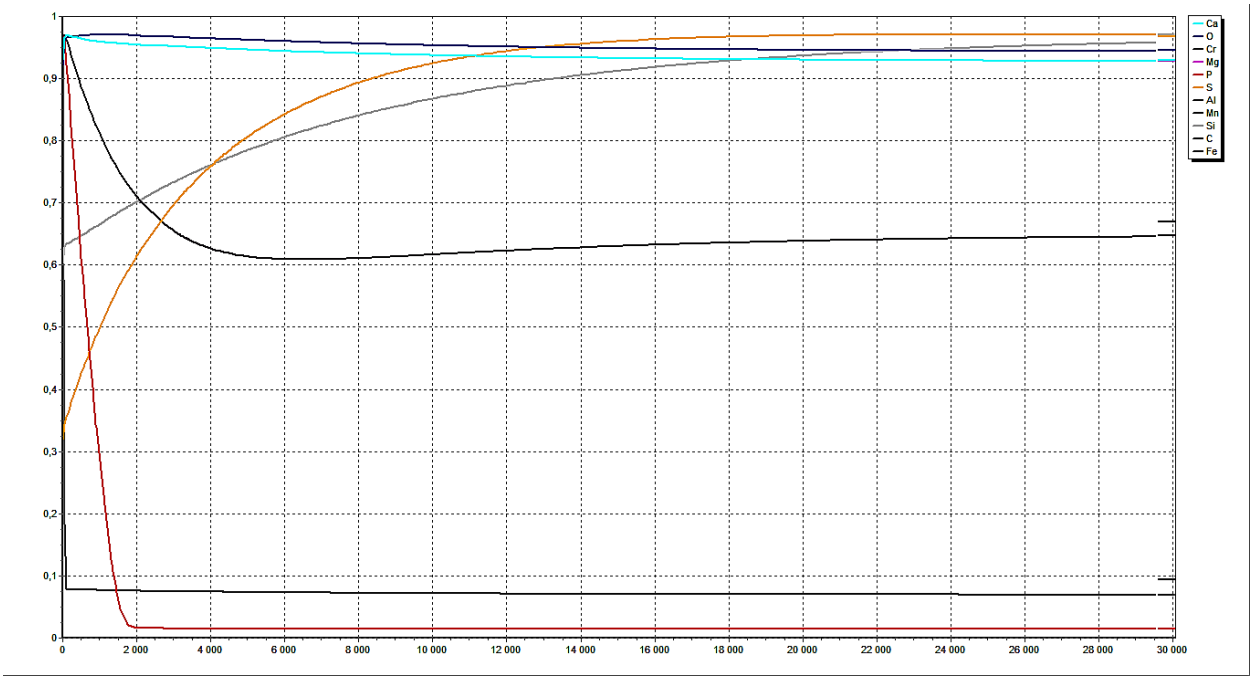


Рисунок 3.9 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 12ГС при витримці 30 секунд

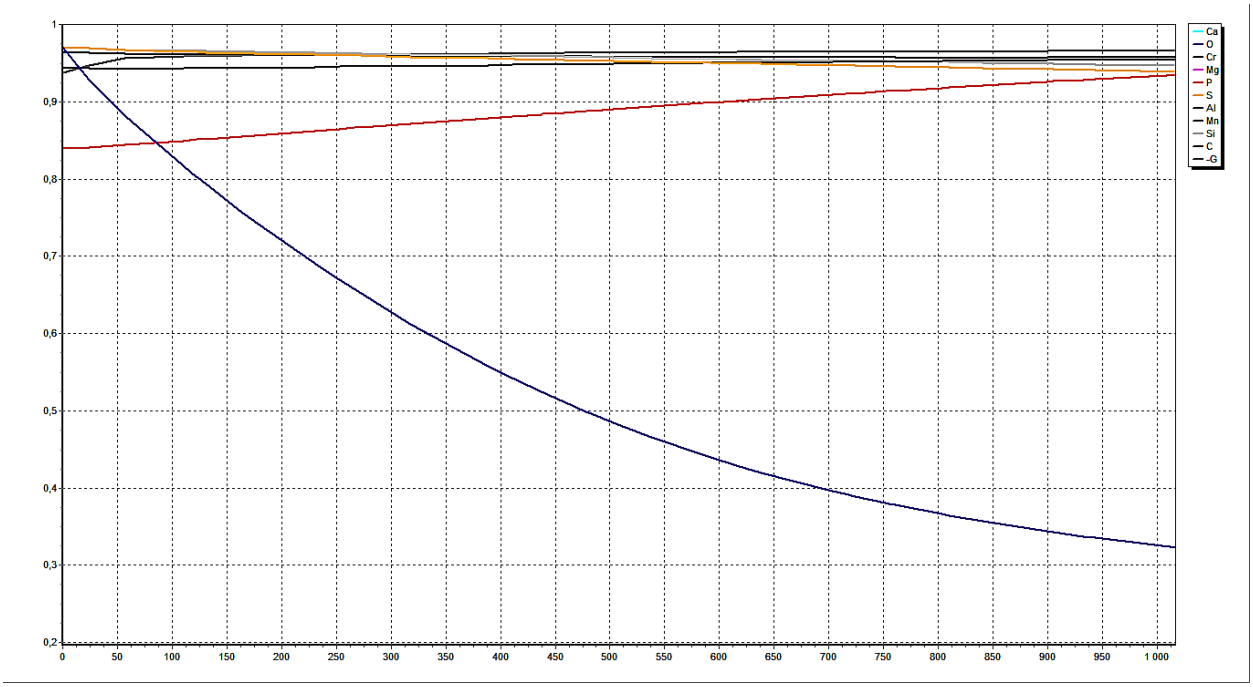


Рисунок 3.10 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 12ГС при витримці 1 секунда

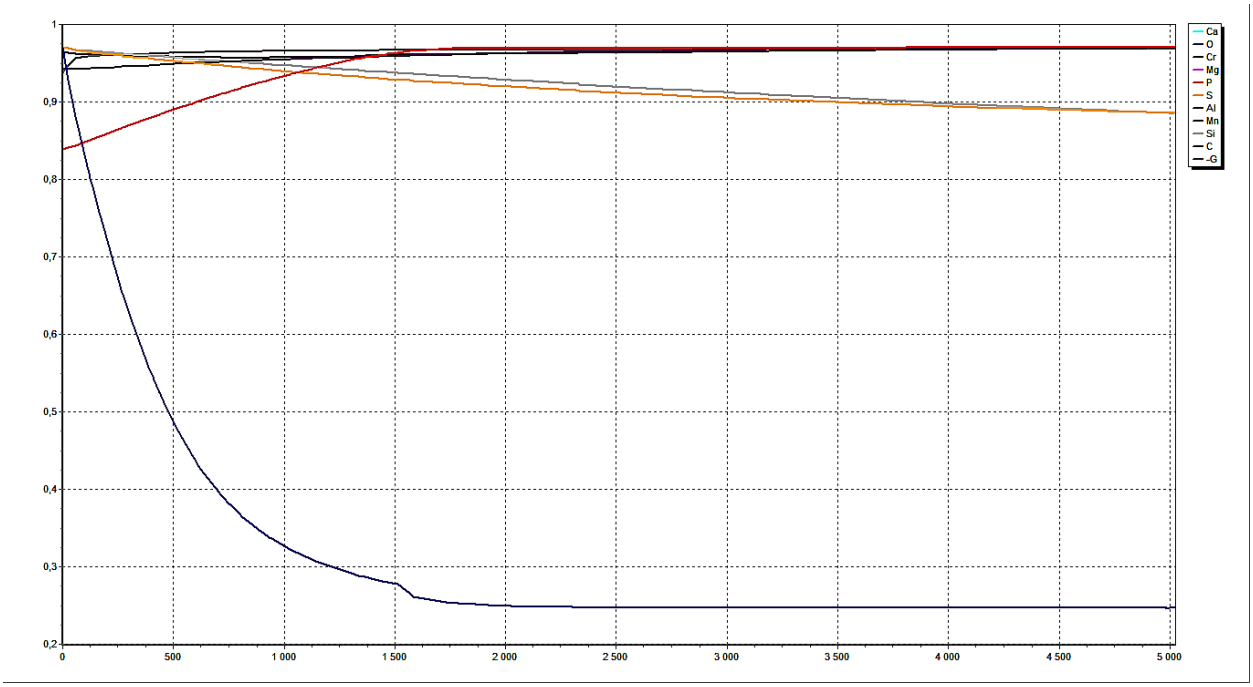


Рисунок 3.11 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 12ГС при витримці 5 секунд

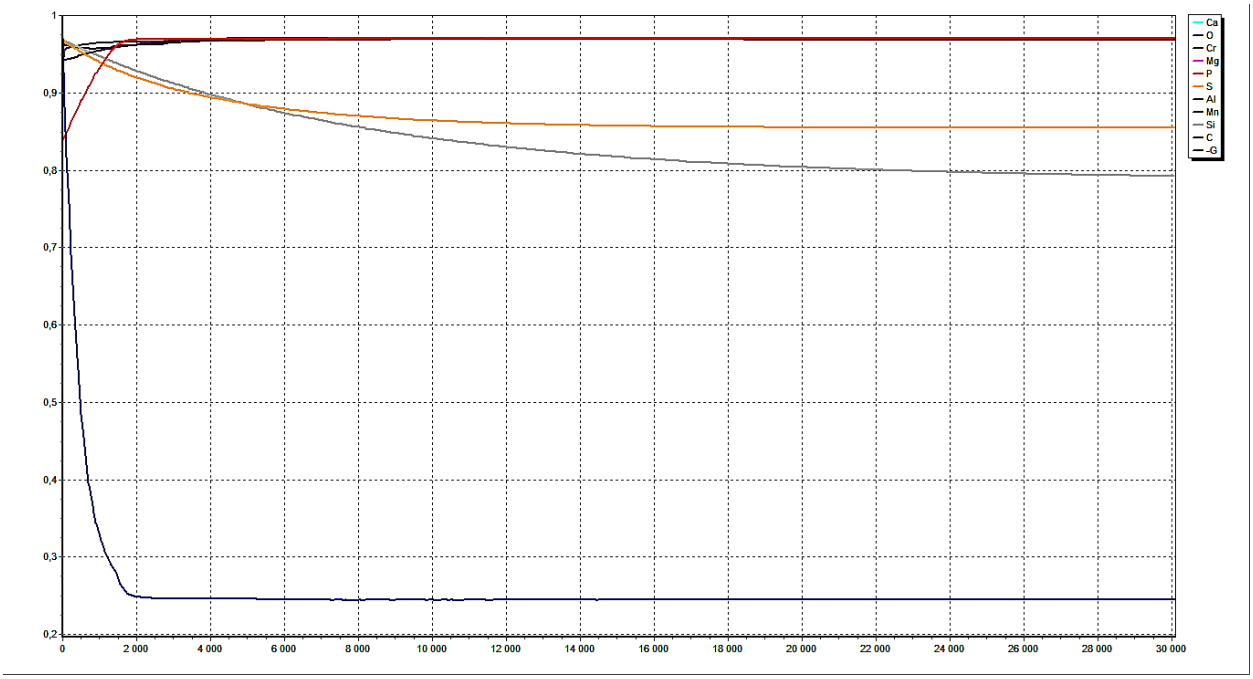


Рисунок 3.12 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 12ГС при витримці 30 секунд

Кількість алюмінію в металі підвищується на 0,009%. Вміст кисню значно знижується в металі на 0,027%. Кількість сірки в шлаку підвищується на 0,174%, одночасно знижуючись в металі на 0,005%. Вміст кальцію в шлаку значно збільшується. Вміст вуглецю в металі збільшується на 0,084%.

Таблиця 3.2 – **Початкові і кінцеві концентрації елементів в металі і шлаку при розкисленні-легуванні сталі 12ГС**

М / Ш	Вміст хімічних елементів в металі і шлаку, мас. %										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	-	0,06	0,005	0,05	-	0,04	0,015	-	-	0,035	-
М кін	98,42	0,144	0,532	0,825	0,009	0,035	0,025	0,0001	-	0,008	-
Ш поч	25	-	20	5	1,5	0,1	0,4	3	-	-	45
Ш кін	0,894	-	20,74	1,683	1,354	0,274	0,003	4,207	-	-	70,84

3.3 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 14ХГС

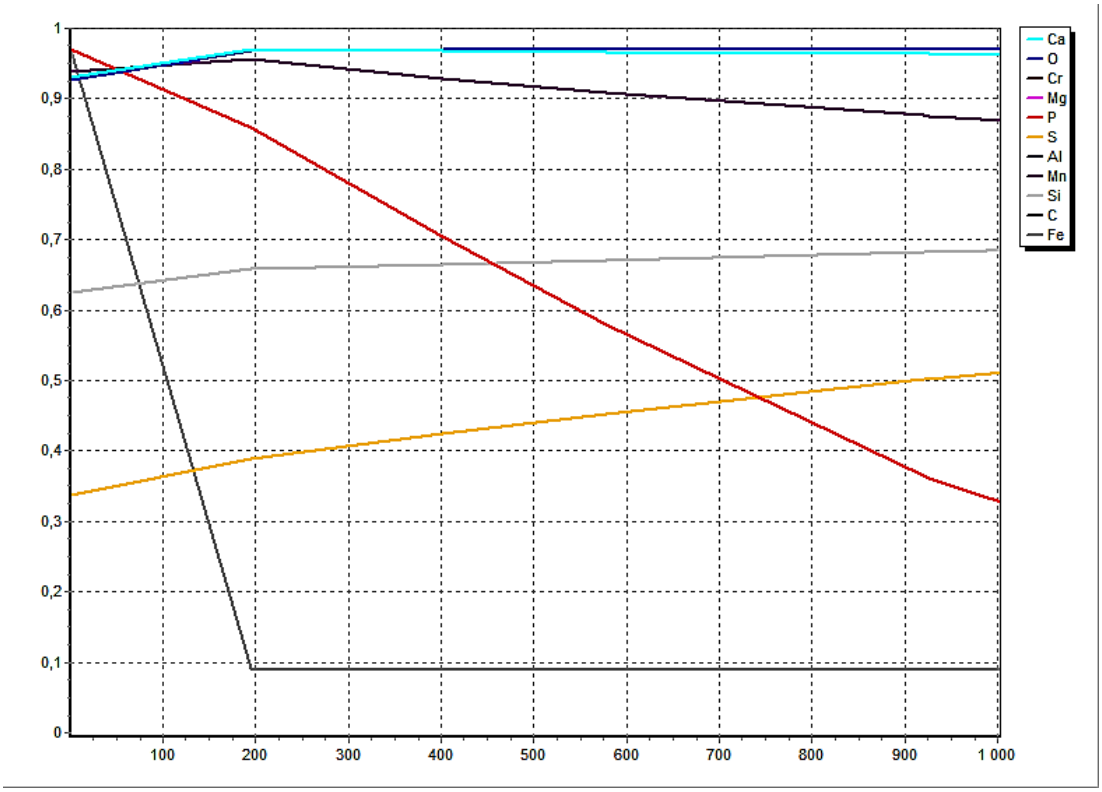


Рисунок 3.13 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 14ХГС при витримці 1 секунда

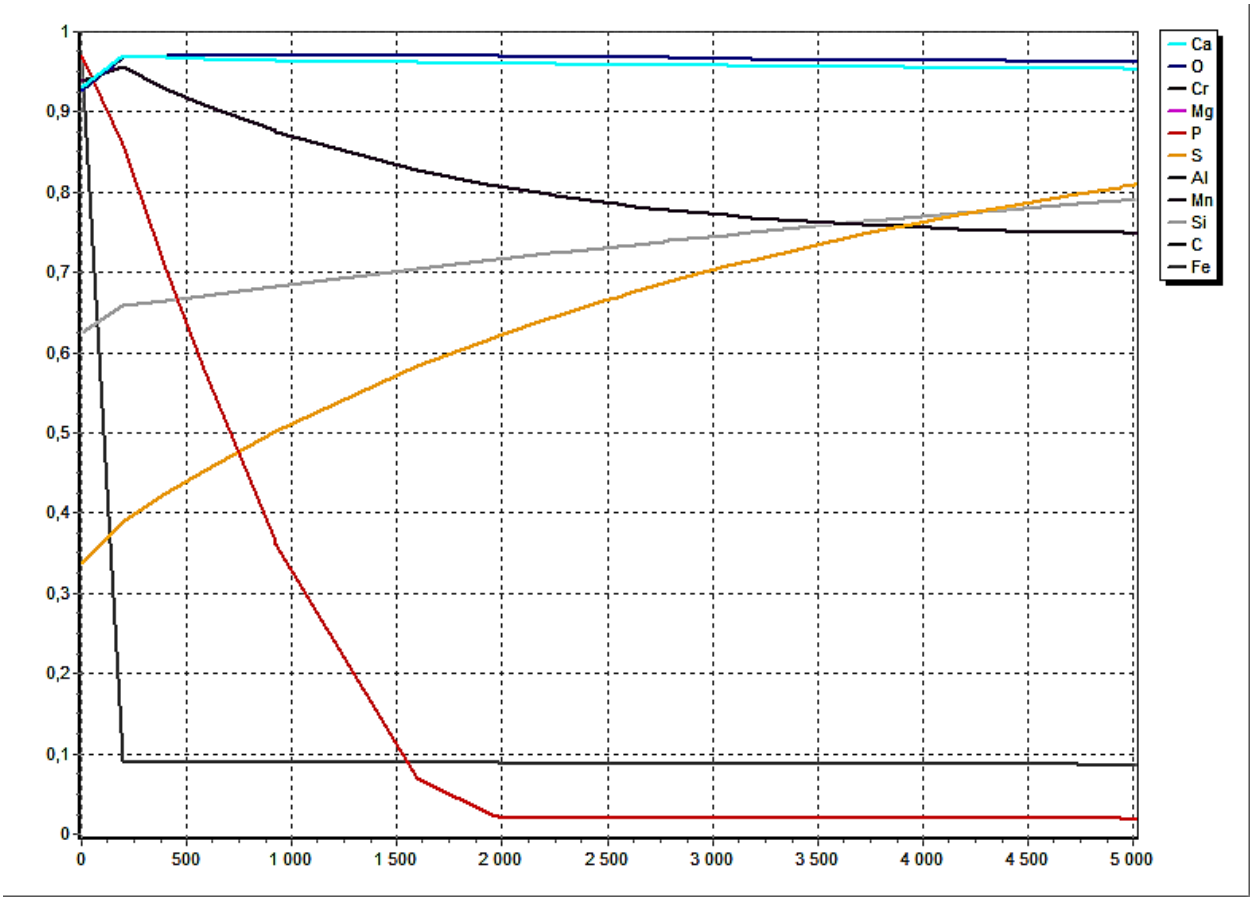


Рисунок 3.14 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 14ХГС при витримці 5 секунд

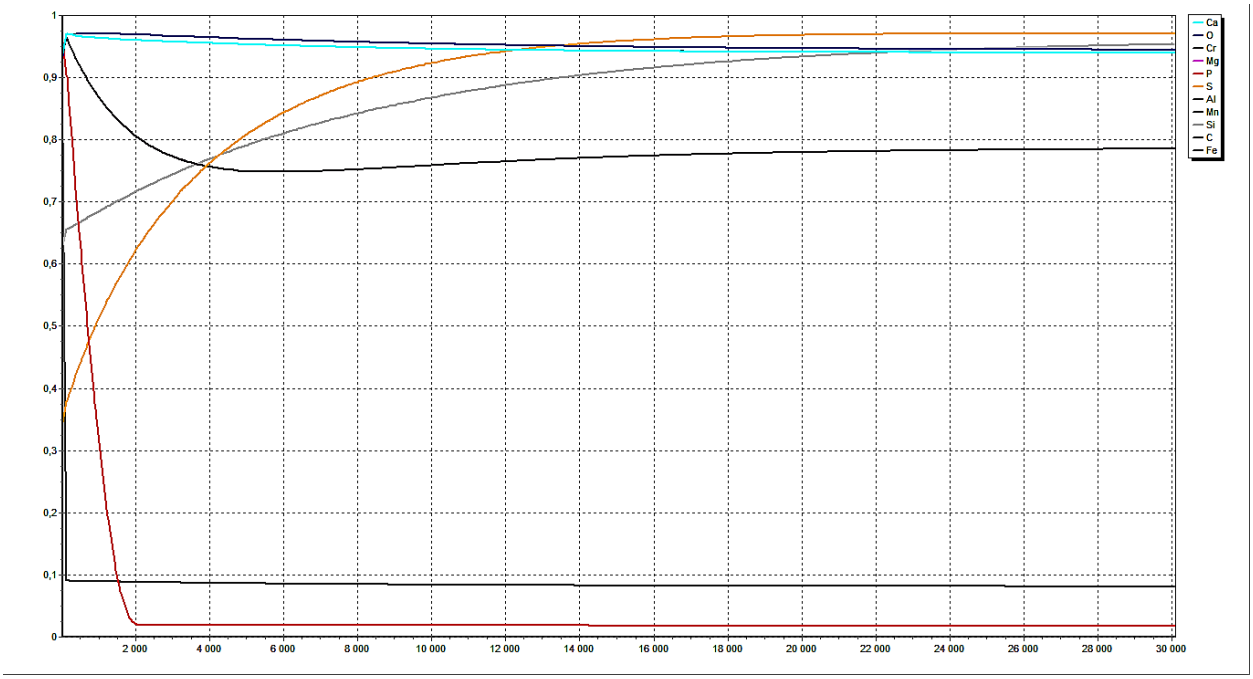


Рисунок 3.15 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 14ХГС при витримці 30 секунд

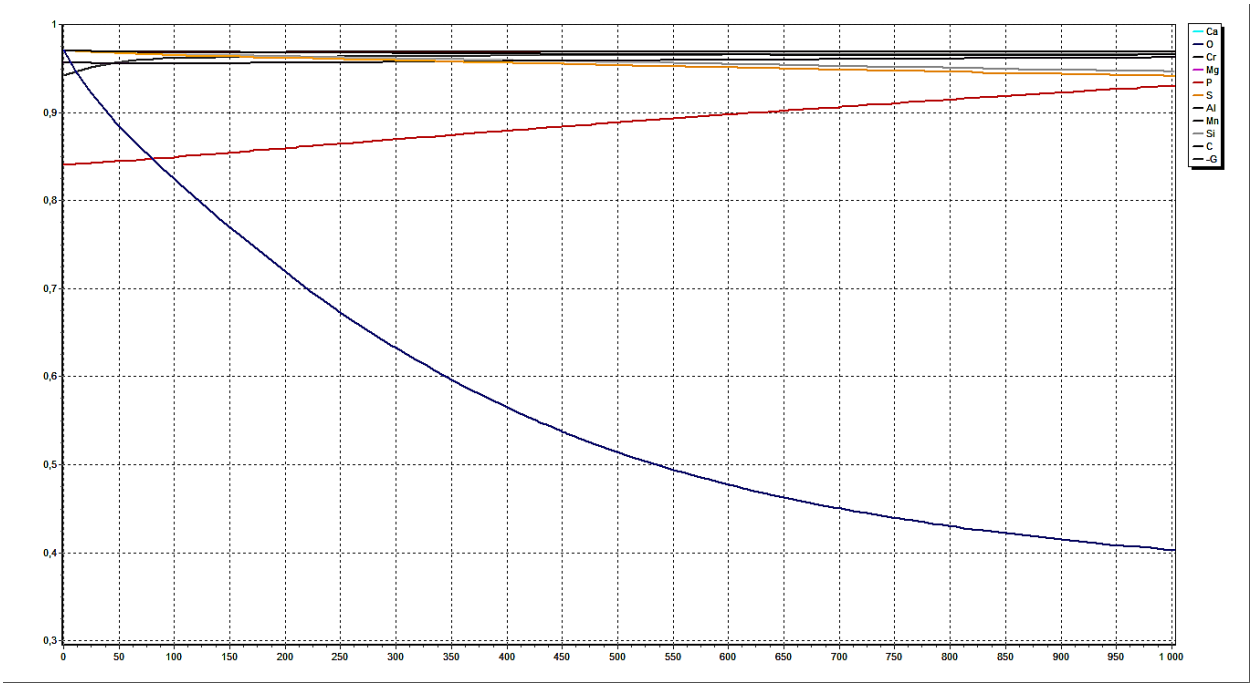


Рисунок 3.16 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 14ХГС при витримці 1 секунда

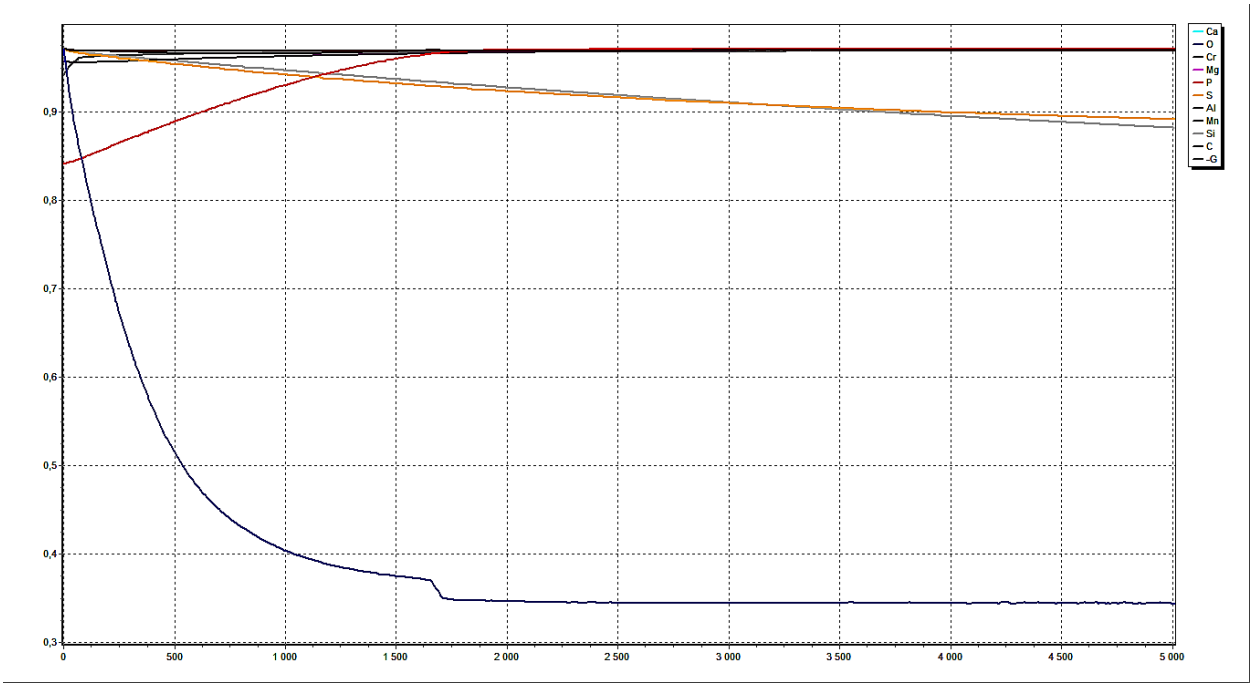


Рисунок 3.17 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 14ХГС при витримці 5 секунд

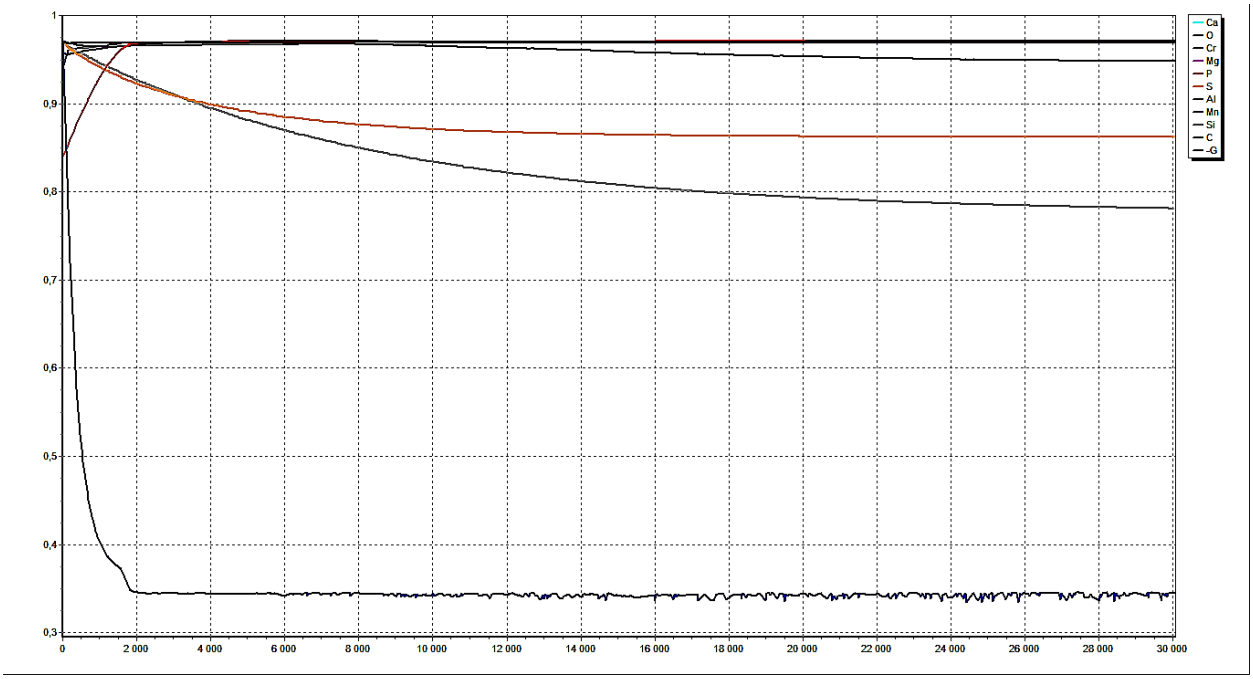


Рисунок 3.18 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 14ХГС при витримці 30 секунд

Помітно підвищується рівень вмісту алюмінію на 0,01%, і кремнію на 0,441% в металі. Кількість кисню значно зменшилася в металі на 0,019%. Кількість сірки в металі знижується незначно на 0,005%, але її вміст у шлаку збільшився на 0,159%. Магній збільшується як в шлаку так і в металі на 0,0001% і 1,245% відповідно. Кількість вуглецю в металі збільшується майже в два рази.

Таблиця 3.3 – **Початкові і кінцеві концентрації елементів в металі і шлаку при розкисленні-легуванні сталі 14ХГС**

М / Ш	Вміст хімічних елементів в металі і шлаку, мас. %										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	-	0,08	0,005	0,05	-	0,04	0,015	-	0,05	0,027	-
М кін	97,86	0,153	0,446	0,929	0,01	0,035	0,026	0,0001	0,535	0,008	-
Ш поч	25	-	20	5	1,5	0,1	0,4	3	-	-	45
Ш кін	0,967	-	18,98	1,915	1,488	0,259	0,004	4,245	0,017	-	72,12

3.4 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 30ГС

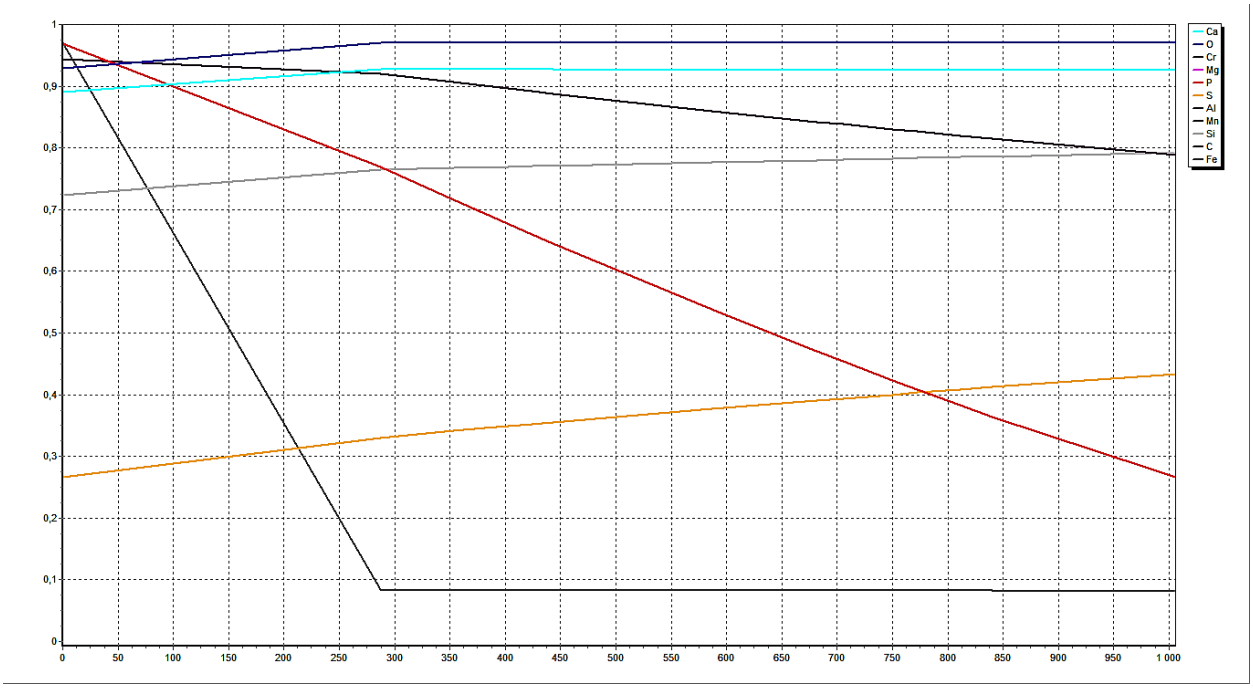


Рисунок 3.19 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 30ГС при витримці 1 секунда

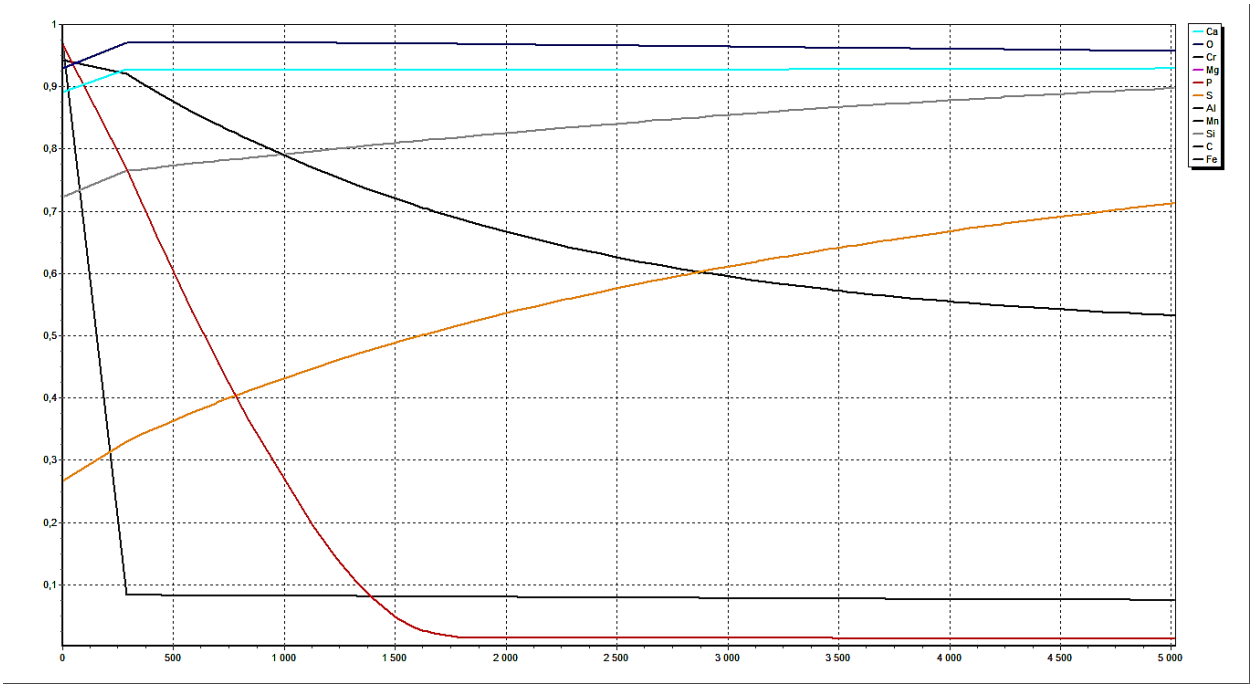


Рисунок 3.20 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 30ГС при витримці 5 секунд

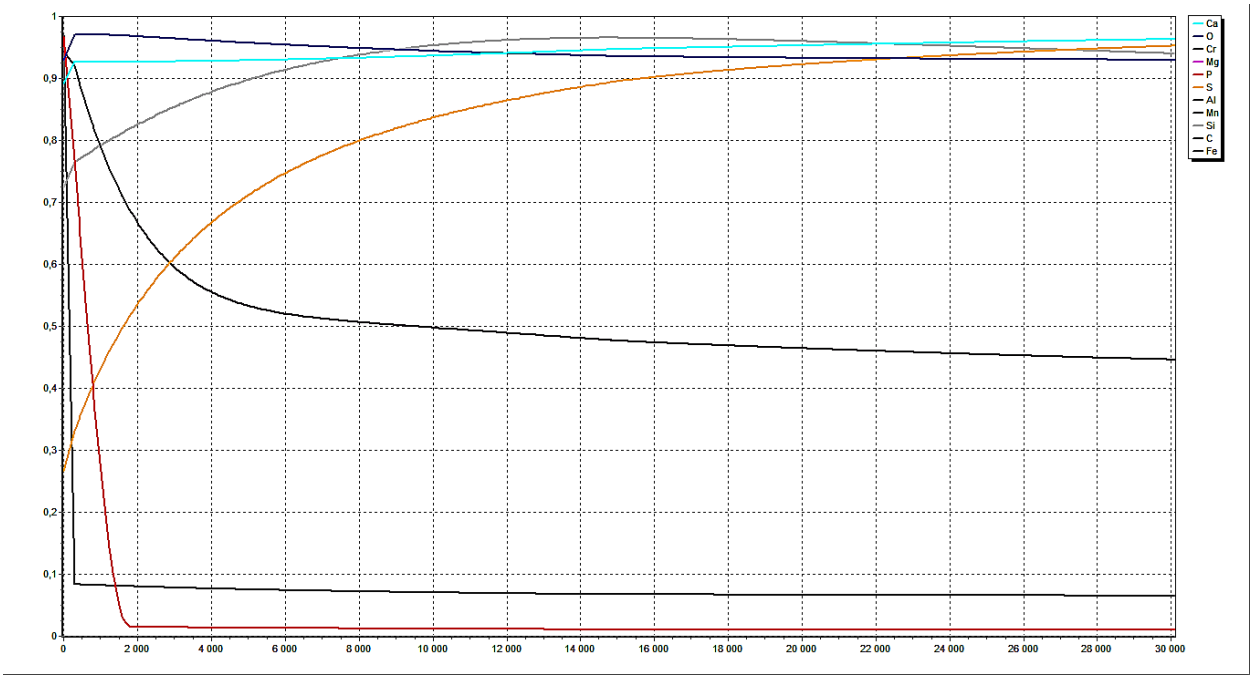


Рисунок 3.21 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 30ГС при витримці 30 секунд

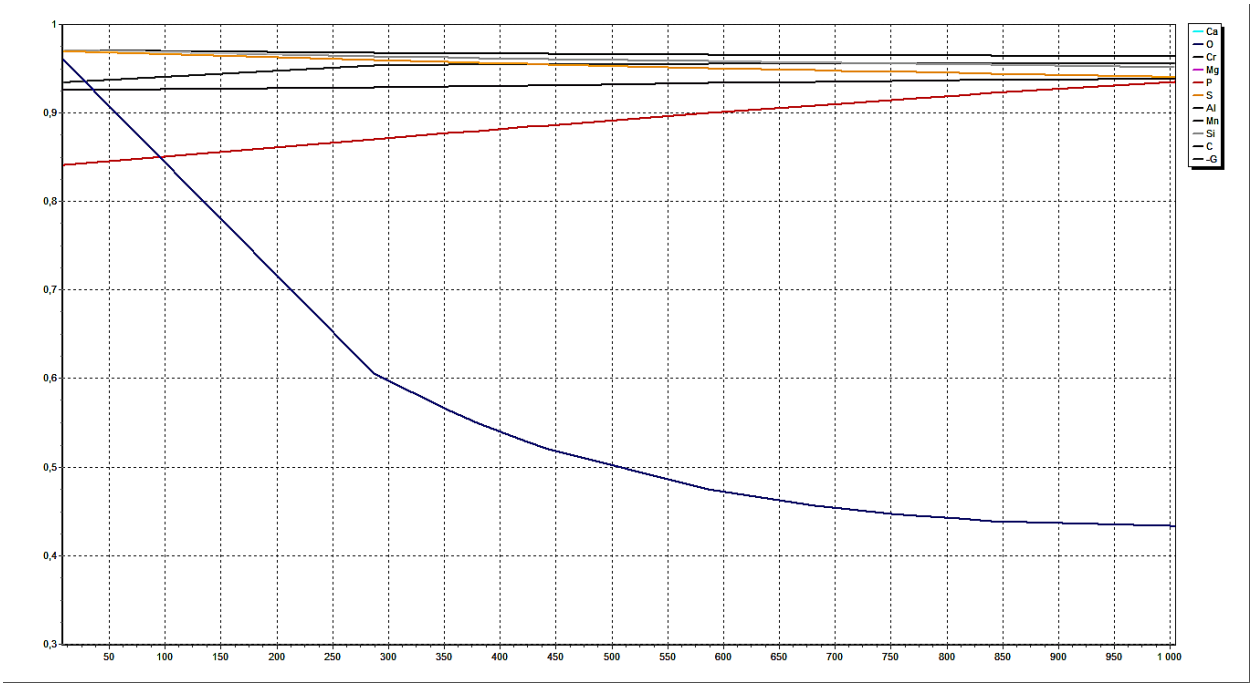


Рисунок 3.22 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 30ГС при витримці 1 секунда

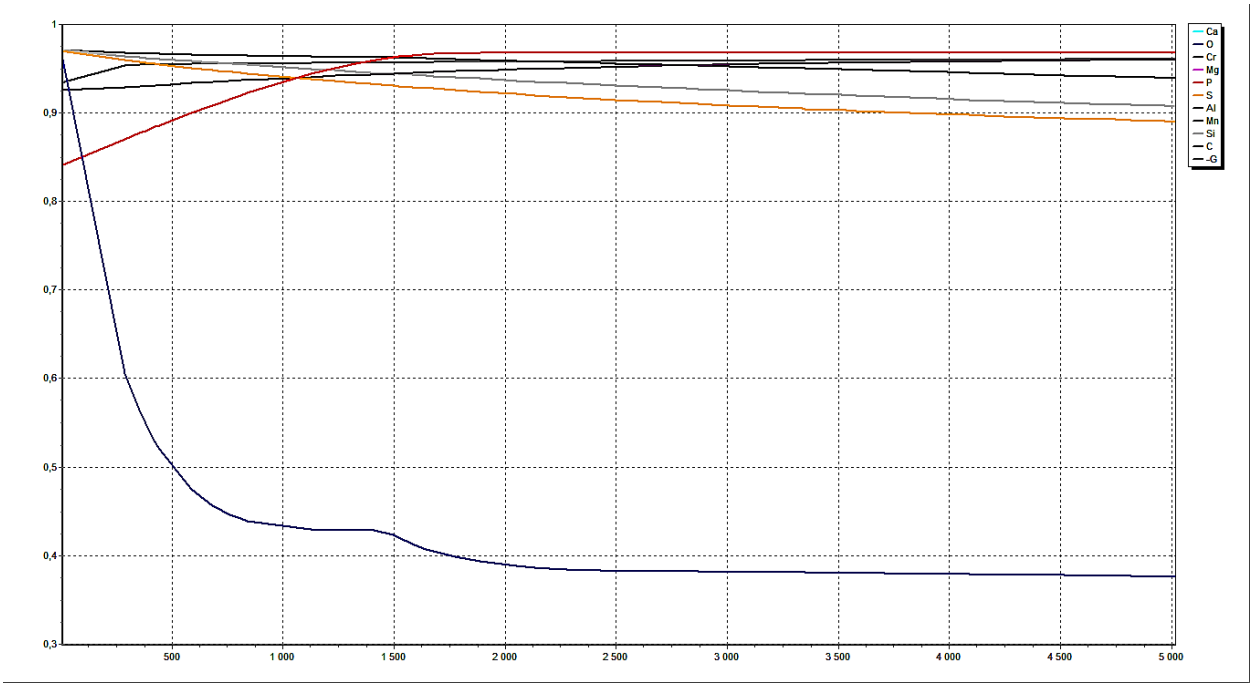


Рисунок 3.23 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 30ГС при витримці 5 секунд

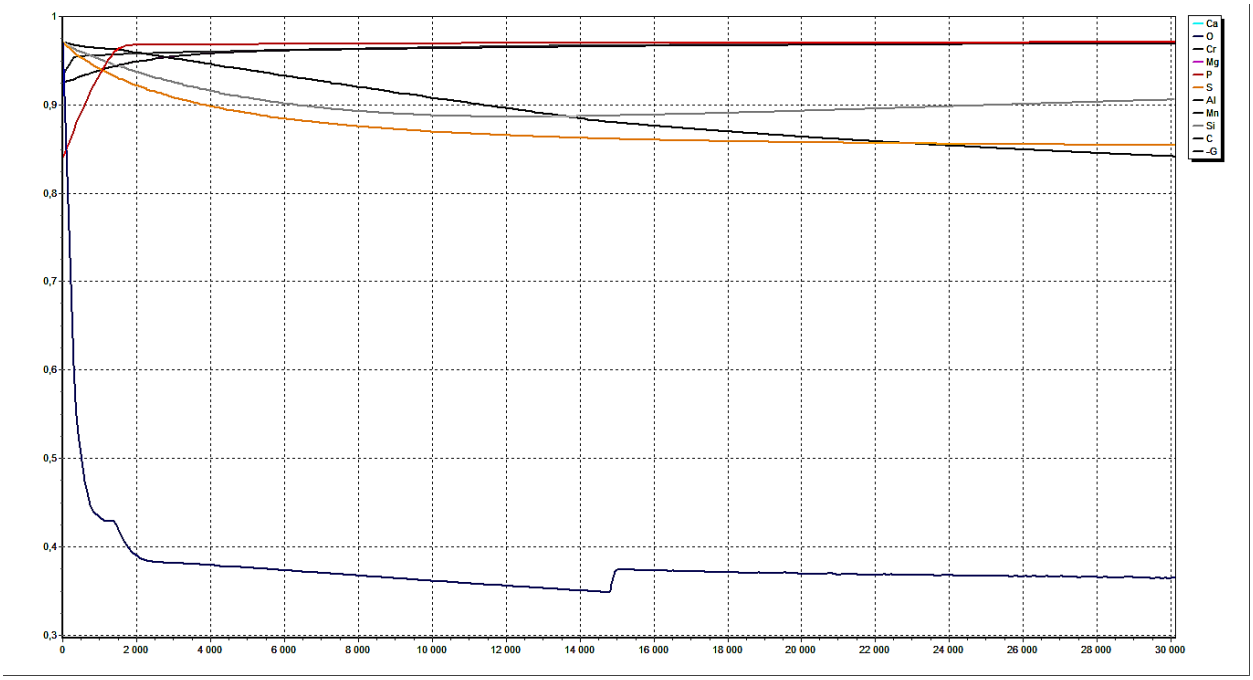


Рисунок 3.24 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 30ГС при витримці 30 секунд

Найбільш помітне зниження кількості кисню і сірки в металі, зміст яких сильно знизилася на 0,013% і 0,005% відповідно. Вміст сірки в шлаку збільшилось на 0,207%. Магній відновлюється в металі і його зміст підвищилося на 0,0002%. Кількість алюмінію в металі підвищився на 0,009%,

а в шлаку знизилася на 0,275%. Так само спостерігається помітне збільшення кремнію в металі на 0,516%.

Таблиця 3.4 – **Початкові і кінцеві концентрації елементів в металі і шлаку при розкисленні-легуванні сталі 30ГС**

М / Ш	Вміст хімічних елементів в металі і шлаку, мас. %										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	-	0,1	0,005	0,05	-	0,04	0,015	-	-	0,022	-
М кін	98,21	0,373	0,521	0,817	0,009	0,035	0,024	0,0002	-	0,009	-
Ш поч	20	-	20	5	1,5	0,1	0,4	4	-	-	50
Ш кін	0,859	0,373	19,99	1,522	1,225	0,307	0,003	4,78	-	-	71,31

3.5 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 3ПС

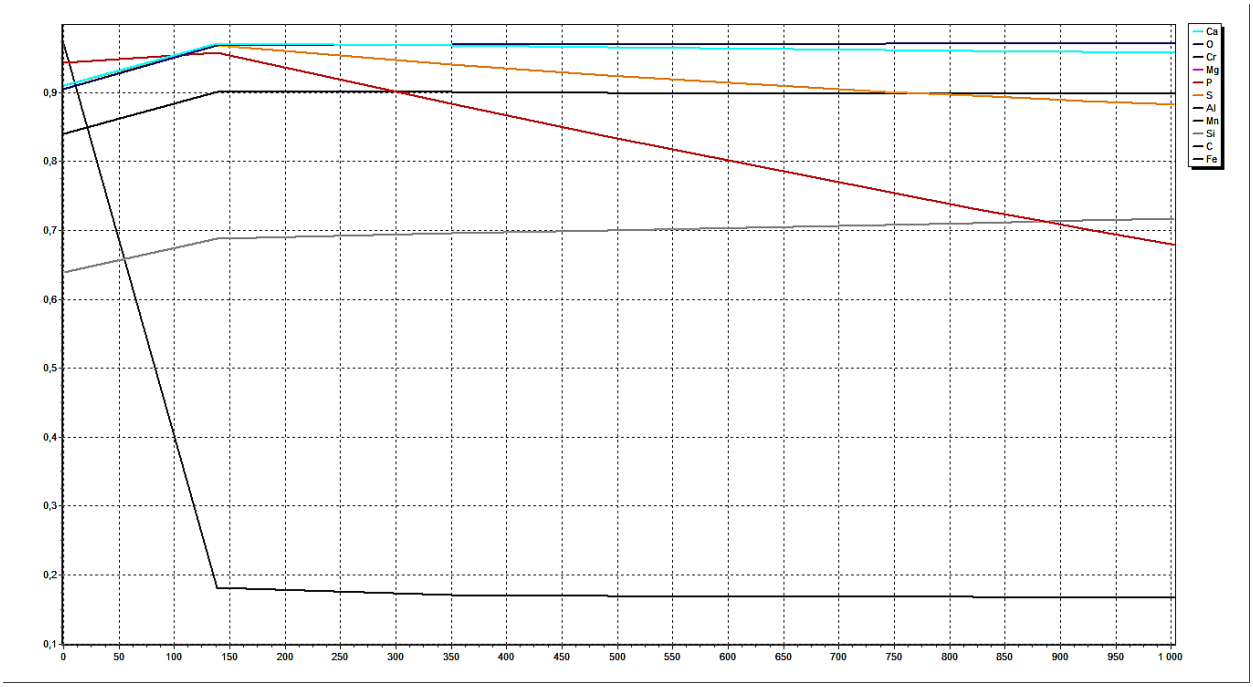


Рисунок 3.25 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 3ПС при витримці 1 секунда

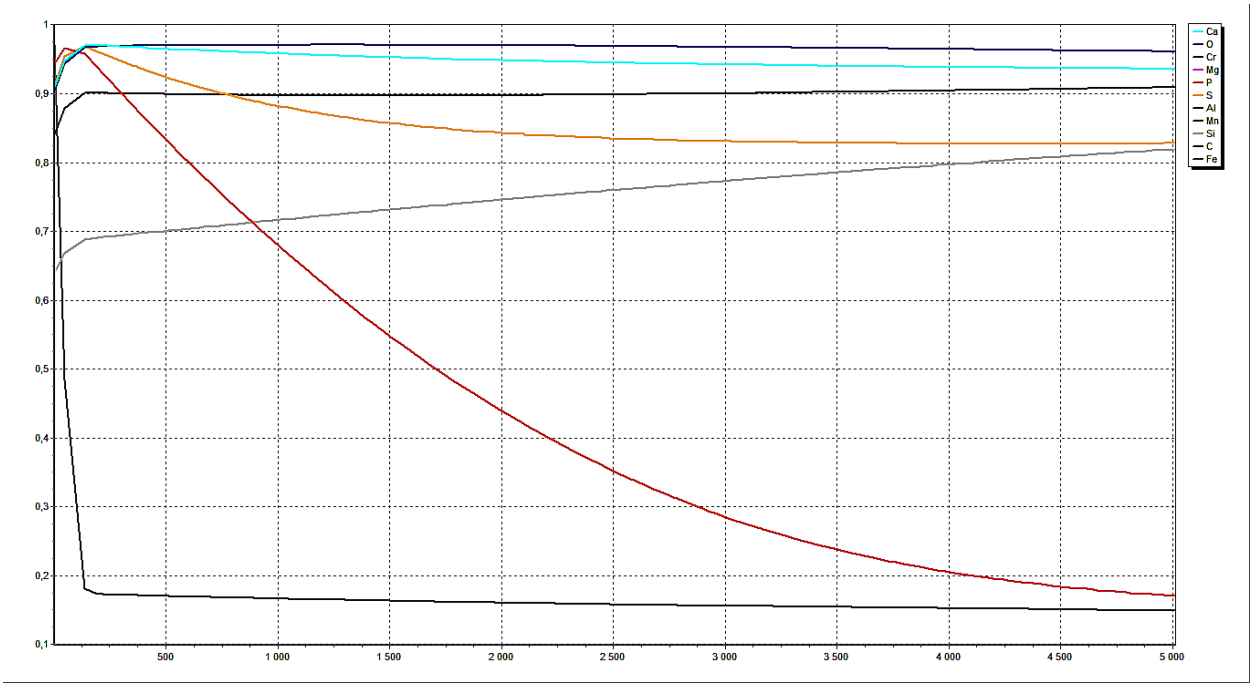


Рисунок 3.26 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 3ПС при витримці 5 секунд

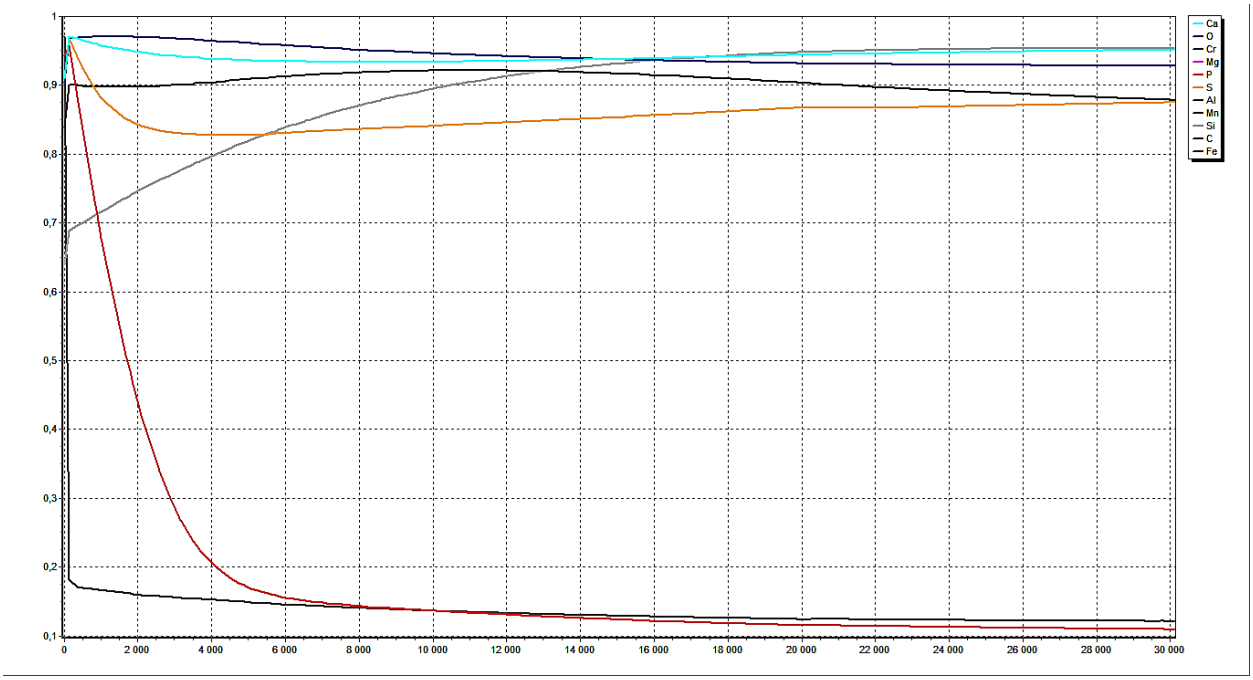


Рисунок 3.27 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 3ПС при витримці 30 секунд

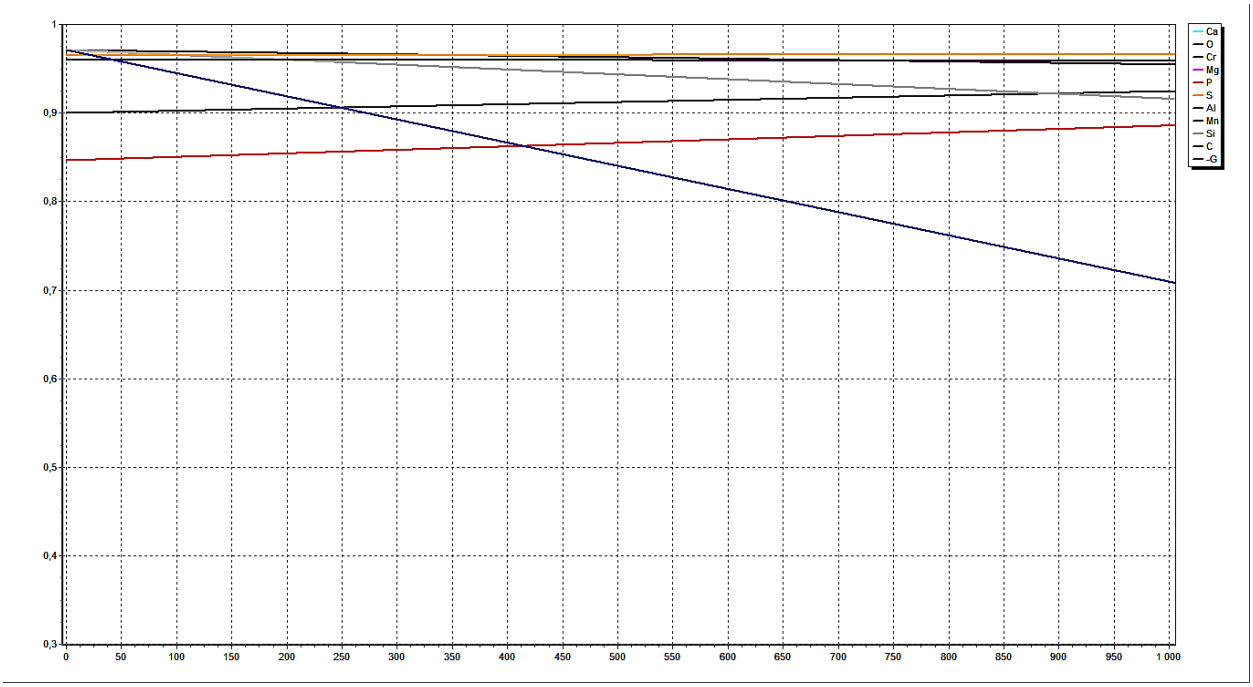


Рисунок 3.28 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 3ПС при витримці 1 секунда

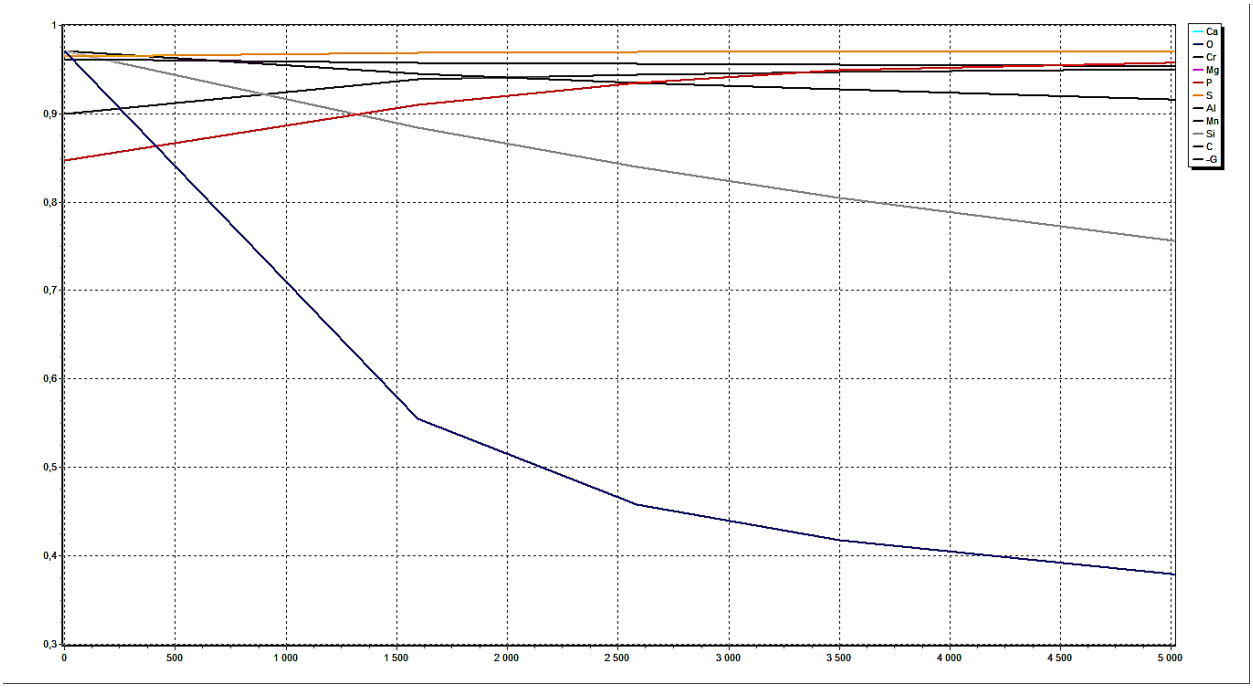


Рисунок 3.29 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 3ПС при витримці 5 секунд

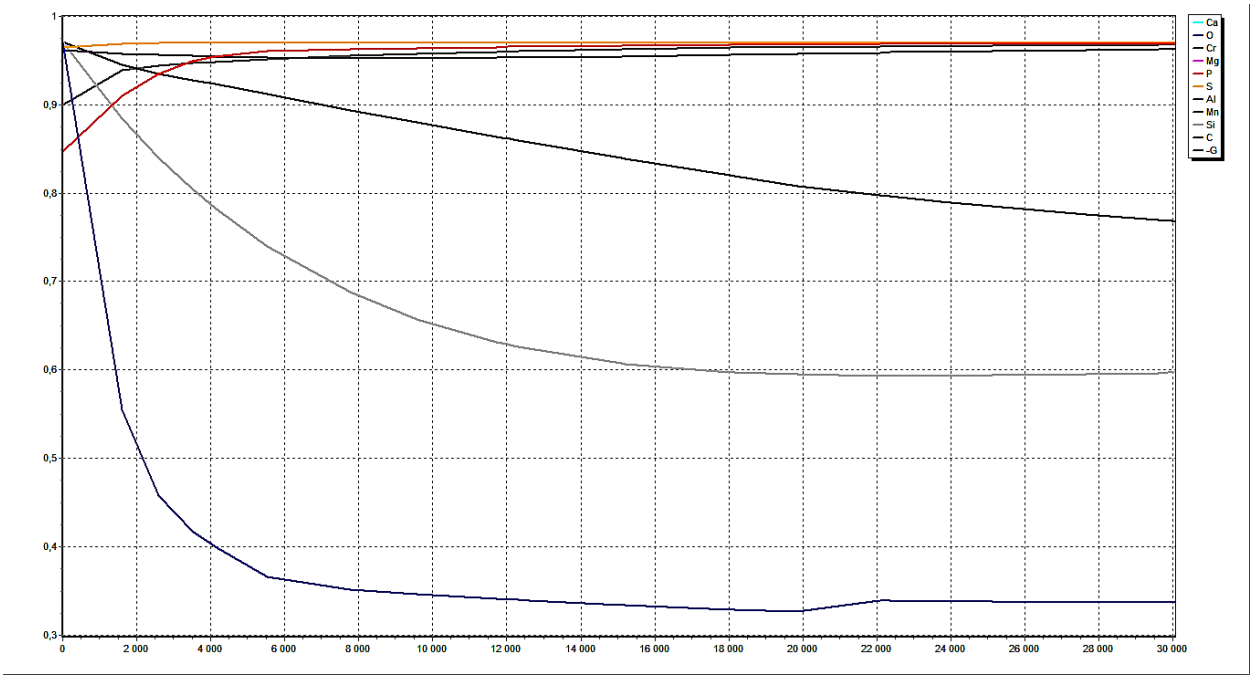


Рисунок 3.30 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 3ПС при витримці 30 секунд

Найбільш помітне зниження кількості кисню, вміст якого сильно знизилася на 0,039%. Вміст сірки в металі і шлаку майже не змінилась. Вміст вуглецю в металі підвищився на 0,109%. Кількість алюмінію в металі підвищився на 0,002%. Так само спостерігається помітне збільшення кремнію в металі на 0,118%.

Таблиця 3.5 – **Початкові і кінцеві концентрації елементів в металі і шлаку при розкисленні-легуванні сталі 3ПС**

М / Ш	Вміст хімічних елементів в металі і шлаку, мас. %										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	-	0,05	0,005	0,05	-	0,04	0,015	-	-	0,062	-
М кін	99,17	0,159	0,123	0,465	0,002	0,04	0,021	-	-	0,023	-
Ш поч	25	-	20	5	1,5	0,1	0,4	3	-	-	45
Ш кін	2,95	-	33,07	5,29	1,643	0,093	0,047	3,776	-	-	53,12

3.6 Дослідження кінетики виділення кисню під час розкислення-легування сталі 08КП

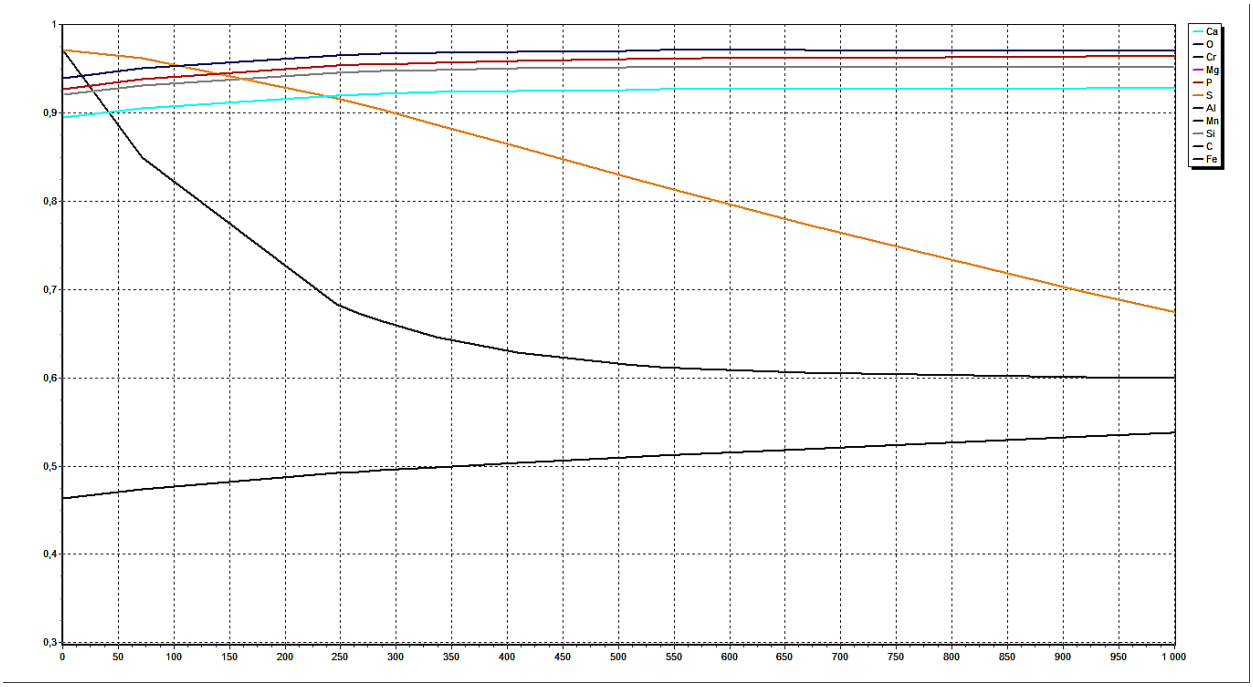


Рисунок 3.31 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 08КП при витримці 1 секунда

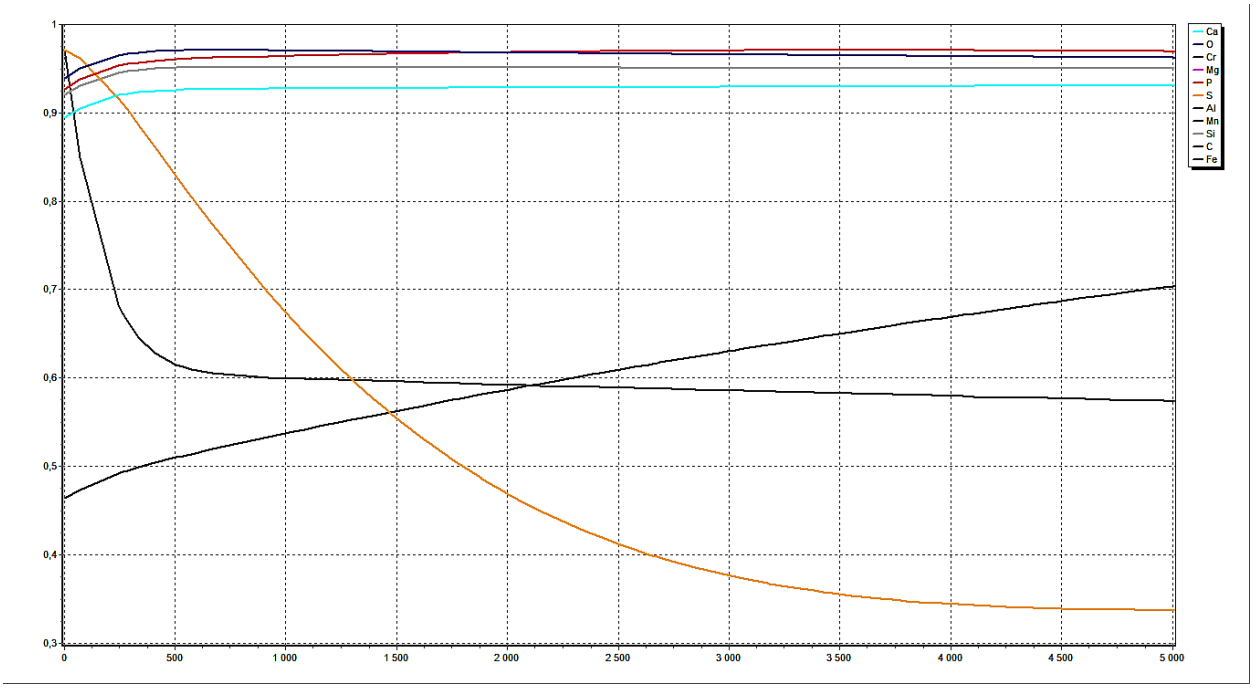


Рисунок 3.32 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 08КП при витримці 5 секунд

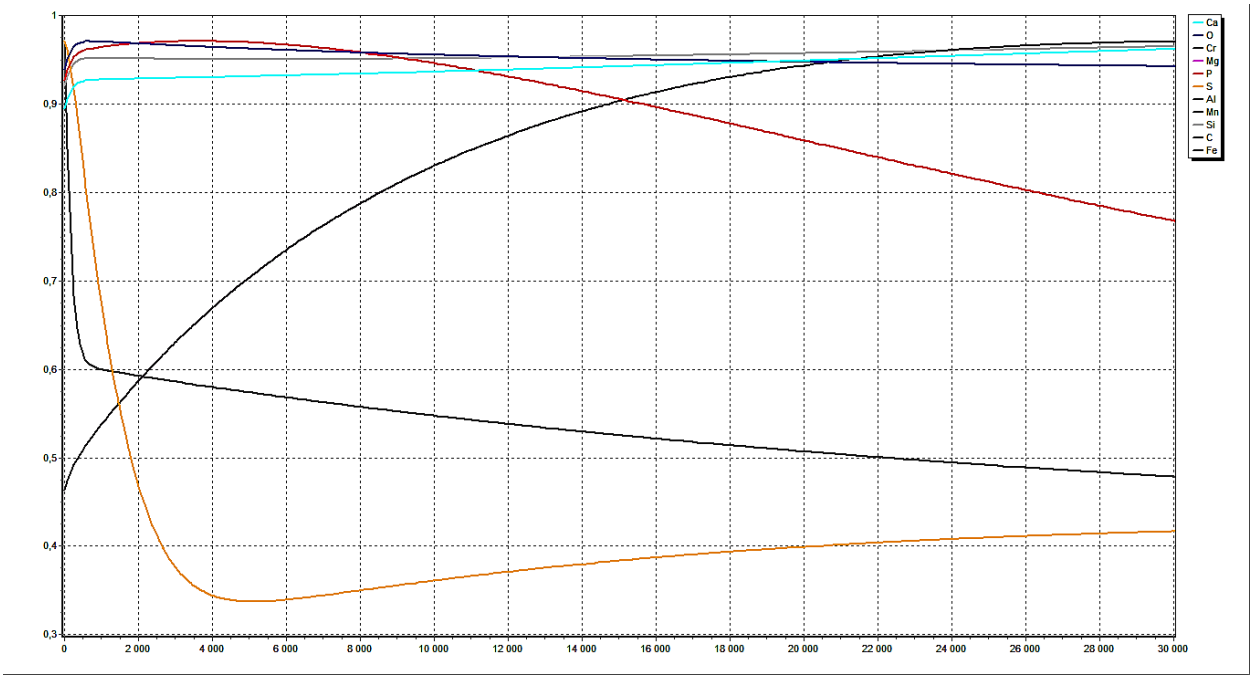


Рисунок 3.33 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в шлаку в процесі позапічної обробки сталі 08КП при витримці 30 секунд

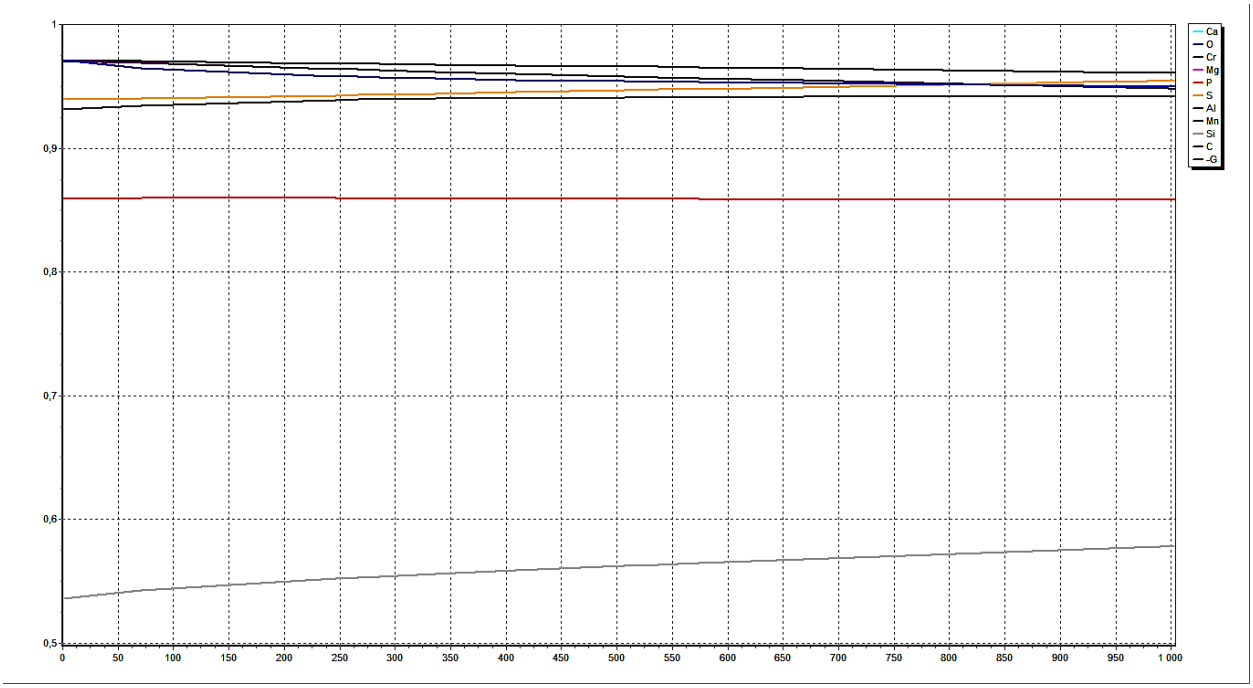


Рисунок 3.34 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 08КП при витримці 1 секунда

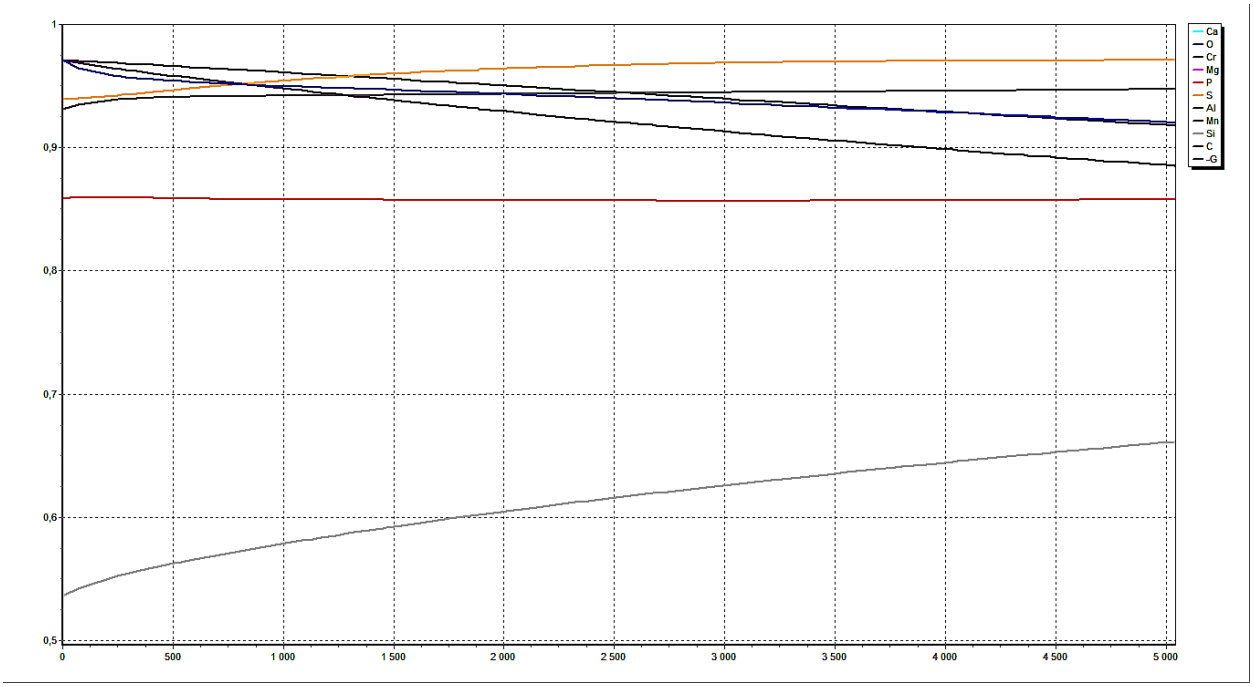


Рисунок 3.35 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 08КП при витримці 5 секунд

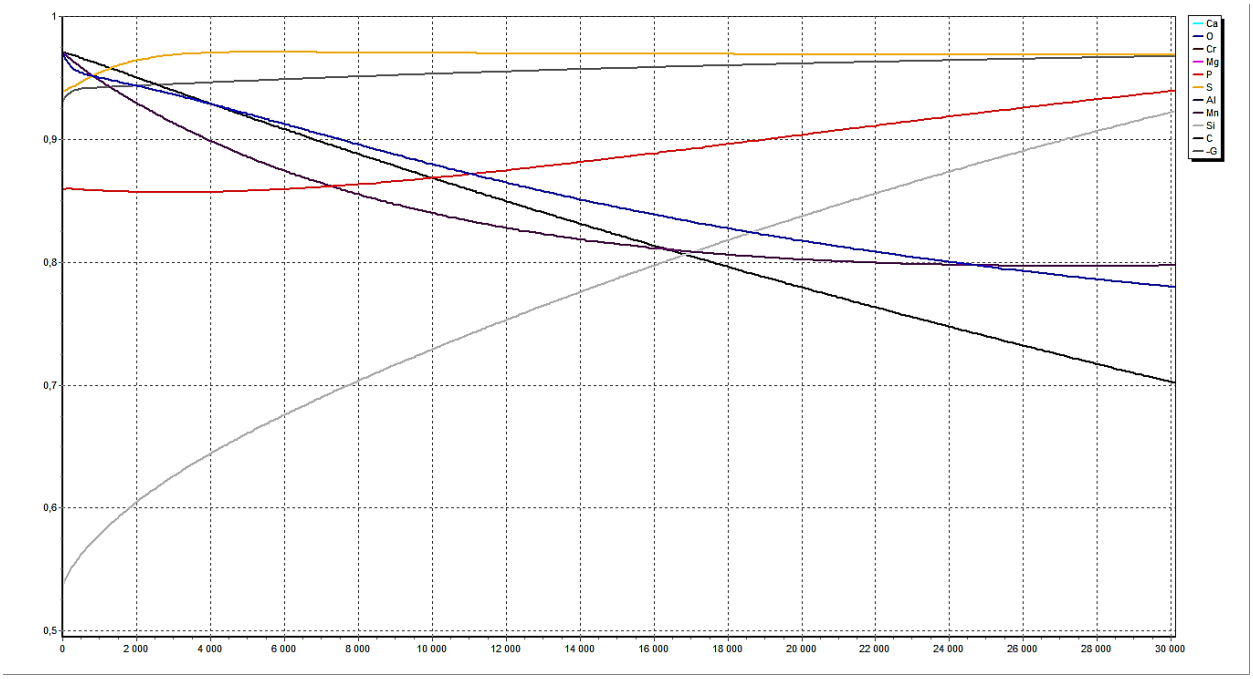


Рисунок 3.36 – Траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі в процесі позапічної обробки сталі 08КП при витримці 30 секунд

Рівень вмісту алюмінію в металі підвищується на 0,0005%, і кремнію на 0,014%. Кількість кисню зменшилася в металі на 0,011%. Кількість сірки в металі незначно росте на 0,001%, але її вміст у шлаку зменшився на 0,057%. Кількість вуглецю в металі збільшується на 0,014%.

Таблиця 3.6 – **Початкові і кінцеві концентрації елементів в металі і шлаку при розкисленні-легуванні сталі 08КП**

М / Ш	Вміст хімічних елементів в металі і шлаку, мас. %										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	-	0,05	0,005	0,05	-	0,035	0,005	-	-	0,062	-
М кін	99,5	0,064	0,012	0,329	0,0005	0,036	0,009	-	-	0,051	-
Ш поч	25	-	20	3	1,5	0,1	0,4	3	-	-	45
Ш кін	10,97	-	21,95	10,07	1,748	0,043	0,252	3,594	-	-	51,38

3.7 Дослідження кінетики видалення кисню під час розкислення-легування при різних значеннях тиску на прикладі сталі 12ГС

Експеримент по розкисленню-легуванню сталі марки 12ГС проводився при різних значеннях тиску в робочому просторі ковша. За допомоги учбово-дослідної програми «EXCALIBUR» була отримана залежність вмісту кисню в робочій зоні ковша від тиску і початкового вмісту кисню (рис. 3.37). Як видно з графіку, зміна тиску в різних шарах сталі дає нерівномірний розподіл вмісту кисню в різних шарах сталі. Цим пояснюється необхідність перемішування при будь-якій позапічній обробці.

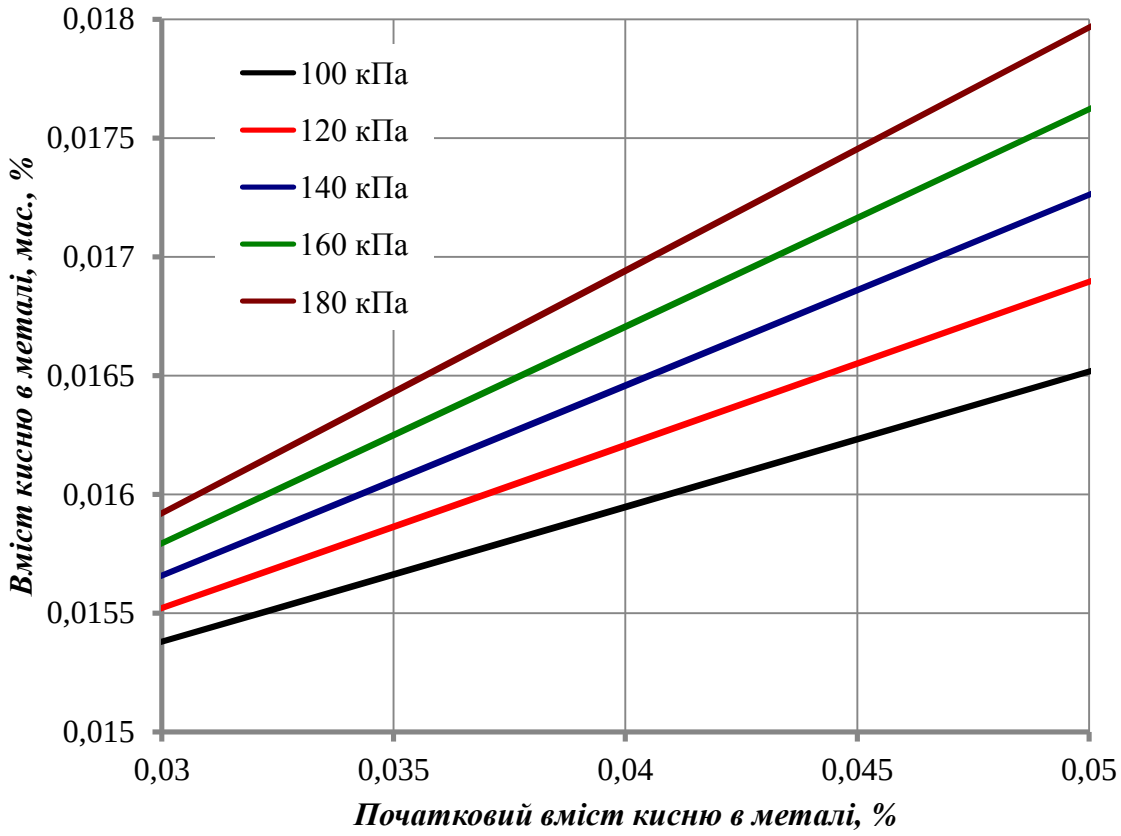


Рисунок 3.37 – Кінетика виділення кисню під час розкислення-легування сталі 12ГС при різних значеннях тиску

Ефективність обробки стали, в ковші багато в чому залежить від якості перемішування металевого і шлакового розплавів. Висока температура і хімічна агресивність сталевого розплаву виключає використання для цієї мети механічних мішалок. В даний час загальне визнання отримали два способи перемішування: продування розплаву нейтральними газами та електромагнітне перемішування. Пристрій для вдування газів в розплавлений метал повинно відповідати таким вимогам:

1. Газ, що подається, повинен диспергуватись у розплаві на якомога більшу кількість дрібних бульбашок. Це дозволяє інтенсифікувати продування без ризику надмірного галасу розплаву, освіти бризок і виплеск металу з ковша.

2. Пристрій повинен бути здатне, протистояти хімічним і термічному впливу металу і шлаку і розмивання потоками розплаву, що виникають під час продування.

3. Конструкція пристрою, повинна бути проста в обслуговуванні і легко замінюватися, при виробленні ресурсу.

4. Пристрій повинен бути недорогим, що не вимагає дефіцитних матеріалів.

Створено величезну кількість варіантів конструкцій дуттєвих пристроїв, але жодне з них не задовольняє всім перерахованим вимогам, тому пошуки оптимальних рішень тривають. Всі відомі конструкції дуттєвих пристроїв являють собою або газопроникні вставки, що встановлюються в футеровці днища ковша, або заглибні фурми («помилковий стопор»), або газ подається через шиберний затвор. Розглянути хоча б частину відомих варіантів конструкцій продувних пристроїв тут неможливо.

3.7.1 Електромагнітне перемішування

При цьому способі перемішування розплаву в ковші використовуються електродинамічні явища, що виникають при взаємодії рідкого металу з «біжучим» магнітним полем. Поле створюється електромагнітом, статор якого мають у зовнішній поверхні стін ковша (рис. 3.38). Електромагніти (циліндричний або плоскі) розміщуються стаціонарно на спеціальному стенді, куди встановлюється ківш з металом після випуску плавки з печі. У деяких варіантах конструкцій циліндричні статори розміщені на сталевоза. Обмотка статора складається з декількох котушок, які різними способами можуть підключатися до перетворювача, що генерує систему двофазних струмів низької частоти (0,8 - 1 Гц). Силу струму в кожному електромагніт можна плавно змінювати від нуля до максимуму - близько 1000 А і тим самим регулювати інтенсивність руху металу. Перемикання обмоток в різні поєднання дає можливість змінювати напрямок лотків. В цілому електромагнітна система перемішування (ЕМП) дозволяє тонко регулювати

швидкість і напрямок потоків в залежності від розв'язуваної на конкретному етапі рафінування завдання. При газовому перемішуванні це зробити важко. Так, у агрегату «піч-ківш» ємністю 150 т, обладнаного ЕМП, зв'язок між максимальним значенням вертикальної складової швидкості розплаву Wм і силою струму лінійна: Wм = (6,9 - 7,1) ·10-4I, м / с.

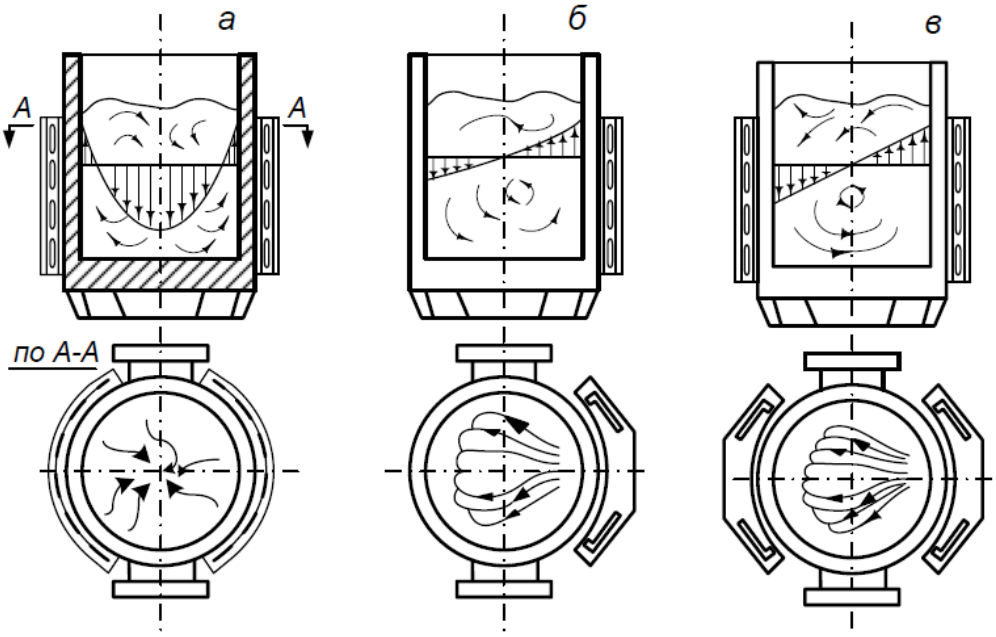


Рисунок 3.38 – Циркуляція металу в ковші при індукційному перемішуванні і розподіл величини вертикальної складової швидкості потоків при циліндричному індукторі (а), плоскому (б) і при двох плоских індуктори з протилежними напрямками руху магнітного поля

У період нагрівання сталі в ковші електричними дугами швидкий і рівномірний нагрів досягається при Wм = 0,5 м / с. У цьому випадку коефіцієнт використання активної потужності електродугового нагрівання (Ка = Рм / Ра) де Рм - активна потужність, що витрачається на нагрів металу, Ра - підводиться активна потужність досягає значення 0,45. Подальше посилення перемішування не призводить до його збільшення. Така ж швидкість достатня і для усереднення розплаву за хімічним складом протягом 7 - 8 хв. після присадки 2 т легуючих добавок. При вакуумуванні для більш повного видалення водню і розкислення вуглецем необхідна швидкість wm = 0,7 м / с. Така ж швидкість потрібна для видалення неметалевих включень після розкислення алюмінієм. На малюнку 2.49

наведено оптимальний режим швидкостей розплаву при позапічної обробці конструкційної сталі на цій установці. Переваги електромагнітного перемішування очевидні. Однак комплект обладнання дуже дорогий, хоча б тому, що кожух у ковшів виготовляється з немагнітної сталі.

Електромагнітне перемішування має сенс встановлювати на агрегатах комплексної обробка стали, призначених дня виробництва високоякісних марок сталі з застосуванням під час рафінування порошкоподібних матеріалів, вакуумування і ін. Виробляє такі агрегату з ЕМП шведська фірма ASEA-SKF. Незважаючи на високу вартість, багато заводів набувають такі установки.

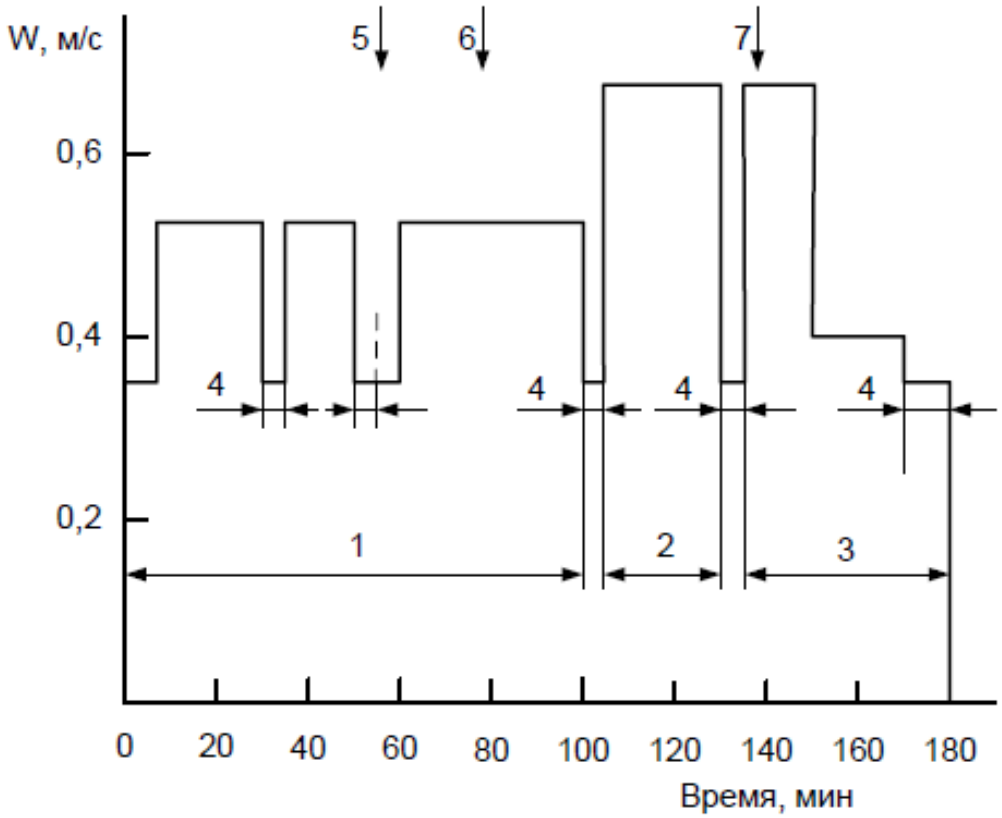


Рисунок 3.39 – Режим електромагнітного перемішування в процесі обробки стали в коші: 1 - попередній нагрів металу; 2 - вакуумування 3 - доведення за хімічним складом і нагрів до температури випуску, 4 - відбір проб і вимірювання температури; 5 - присадка шлакоутворюючих; 6 - легування; 7 - розкислення алюмінієм

Обстеження ковшових установок рафінування сталі ємністю від 10 до 300 т дозволило зіставити ефективність перемішування металу продуванням аргоном і електромагнітним способом. Експлуатаційні витрати для ЕМП нижче, а капітальні вище, ніж при продувці. Технологічні переваги щодо зниження вмісту неметалевих включень, газів і шкідливих домішок - за продувкою аргоном, але показники по витраті електроенергії і ковшовим вогнетривами краще у ЕМП, правда лише в тому випадку, якщо рафінування проводиться при тонкому шарі синтетичного шлаку. При роботі на пінистому шлаку, який екранує футеровку ковша від радіаційного впливу електродуги, витрата вогнетривів мало відрізняється від витрати при використанні аргону. Вибір методу перемішування повинен проводитися з урахуванням цих обставин.

3.8 Висновки

1. Одним з перспективних підходів при описі кінетики процесів взаємодії фаз полягає у використанні термодинамічних моделей розрахунку рівноважного складу системи «метал-шлак-газ».
2. Розглянуті теоретичні основи прямої і зворотної задачі термодинамічного аналізу на основі моделі колективізованих електронів, диференціальних коефіцієнтів засвоєння (фазових операторів). Модель колективізованих електронів (МКЕ) заснована на методі хімічних потенціалів Гіббса з урахуванням електронного вкладу.
3. З використанням учбово-дослідницької програми «Excalibur проведено обчислювальний експеримент для моделювання кінетики розкислення сталей 09Г2С, 12ГС, 14ХГС, 30ГС, 3ПС, 08КП. Побудовані графіки траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі і в шлаку при процесі позапічної обробки сталі. За допомогою побудованих графіків можливо передбачити кінетику руху елементів до рівноваги і зупинити процес розкислення-легування при отриманні сталі оптимального складу.

4. Була отримана залежність вмісту кисню в робочій зоні ковша від тиску і початкового вмісту кисню. Зроблений висновок, що зміна тиску в різних шарах сталі дає нерівномірний розподіл вмісту кисню в цих шарах сталі. Цим пояснюється необхідність перемішування сталі при будь-якій позапічній обробці.

5. В цілому моделювання кінетичних особливостей розкислення дозволяє підвищити ефективність виробництва, отримати відчутний економічний ефект за рахунок економії феросплавів, оптимального розкислення-легування сталі на установці піч-ківш за допомогою інтелектуального ядра програми «Excalibur». Крім того, застосування цієї системи дозволяє підвищити культуру виробництва сталі і зменшити залежність технологічного ланцюга від кваліфікації сталеварів, тощо.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів конвертерного цеху

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

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.

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/ ($м^2$*ч). Особливо великому тепловому опроміненню піддаються конверторники при узятті проби, вимірі температури, огляді і ремонті горловини конвертора. Температура повітря при проведенні окремих операцій навіть на відстані від 2 до 3 м від джерела тепловипромінювання дуже висока, особливо в літній час (досягає 45-50° С) при зовнішній температурі повітря +23^{0}С.

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 не приємне відчуття.

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.

При тривалому перебуванні людини в зоні теплового променистого потоку, як і при систематичній дії високої температури, різко порушується тепловий баланс в організмі. Порушується робота терморегулювального апарату, посилюється діяльність серцево-судинною і дихальною 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.

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 вісімдесяти часток мають розміри до 5 мкм. Кількість пилу з частинками більше 1 мкм складає усього 5-15%. Такий пил повітряними потоками відноситься від конвертора на великі відстані і довгий час не осідає.

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 її здатністю викликати, професійні захворювання легенів, в першу чергу пневмоконіози.

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

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

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

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.

Джерелами шуму в цеху є працюючий конвертер, технологічне устаткування(мостові крани, насоси, автонавантажувачі і т. ін.), 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 дБА. При подальшому зростанні звукового тиску виникає больове відчуття.

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

Нормативне значення гранично допустимого рівня шуму, що впливає на оператора поста управління, складає 80 дБА, а фактичне значення - 85 дБА, 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.

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 т. п.

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

Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів та карта умов праці для робочого місця плавильника сталі представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Оцінка факторів виробничого трудового процесу плавильника сталі

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	3 клас: шкідливі та небезпечні умови та характер праці			Трива-лість дії фактора за зміну, %
				1 ст.	2 ст.	3 ст.	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3: 1 клас небезпеки Ангідрід хромовий Марганцю оксид	 0,01 0,05	 0,014 0,4	1,4 р			89,3
	3 клас небезпеки Ангідрід сірчастий Вуглецю оксид	 10,0 20,0	 6,4 17,9				
2	Пил, переважно фіброгенної дії, мг/м^3	4	237,3			59,3р	89,3
3	Шум, дБА	80	85		5		89,3
4	Вібрація (загальна),дБ	92	95		3		89,3
5	Мікроклімат у приміщенні (теплий період): - температура, ^{o}C;	15-26	38,2			12	89,3
	- швидкість руху повітря, м/с;	0,2-0,6	0,33				
	- відносна волога повітря, %;	55	30				
	-інфрачервоне випромінювання, Вт/м2	1401-2800	1420		1420		
6	Тяжкість та напруженість праці	Категорія праці – тяжка, III напружена					

Таким чином, проведений аналіз умов праці дозволяє зробити висновок про перевищення нормативних показників по рівню інфрачервоного випромінювання, шуму, вібрації. Перевищує допустимі

концентрації також кількість пилу та оксиду марганцю у повітрі робочої зони. Все це дозволяє віднести умови праці до III класу 3 ступеня. За показниками робоче місце слід вважати з особливо шкідливими і важкими умовами праці.

4.2 Заходи з поліпшення умов праці

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 печей, 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.

Гази від склепіння печей очищаються установкою мокрого типу: труба Вентурі і краплевловлювач. Зонт печей має один рукавний фільтр напірного типу на два джерела викиду.

Шум є загальнобіологічним подразником і в певних умовах може впливати на всі органи і системи організму людини. При дуже великому звуковому тиску може відбутися розрив барабанної перетинки. 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.

У конвертерному і завантажувальному прольотах передбачається природна аерація за допомогою аераційних ліхтарів і припливна вентиляція окремих ділянок. При відборі проб і вимірах температури через горловину конвертера застосовують спеціальні візки з теплозахисними екранами і обдування спеціально встановлюваними вентиляторами.

Систему подання і завантаження сипких матеріалів в конвертер зазвичай виконують з герметизацією місць запилення, відсмоктуванням і очищенням газів від пилу. У ковшовому прольоті виділяється пил(при ломці футерування), тепло і NO_2 при розігріванні ковшів. У прольоті передбачають природну аерацію і установку витяжних парасольок над стендами для розігрівання ковшів і ломки футерування.

4.3 Заходи з електробезпеки

Безпека експлуатації електроустановок забезпечується наступними захисними заходами: недоступність струмоведучих частин, застосування ізоляції, блокування, застосування малої напруги, застосування трифазного струму з ізольованою нейтраллю, захисне заземлення, а для пересувних електроустановок – захисне відключення. Підлоги робочого майданчика навпроти льотки печі, а також робочих майданчиків обслуговування електродів виконують неелектропровідними.

При обслуговуванні електроустановок застосовують основні і додаткові захисні засоби. До основних відносяться захисні засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу установки і при користуванні якими допускається безпосередній дотик до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою. До додаткових відносяться засоби захисту, що підсилюють дію основних засобів і які забезпечують безпеку при напрузі дотику і кроковій напрузі. До засобів індивідуального захисту відносяться: ізолююча штанга,

ізолюючі кліщі, діелектричні боти, діелектричні рукавички, ізолюючі підставки.

4.4 Заходи пожежної безпеки

Будівлю конвертерного цеху (пічний проліт) по вибуховій і пожежній небезпеці можна віднести до приміщення категорії Г. В цеху дуже багато джерел виникнення пожежної небезпеки: високотемпературний продукт при виході з льотки печі при розливанні, потужне електроустаткування, велике кабельне господарство і т.д. Причинами пожеж і вибухів в цеху можуть стати завалення в піч сирих матеріалів, зіткнення розплавленого металу і шлаку з водою, несправності електромереж і електроустаткування і ін.

Виробничі приміщення цеху залежно від приналежності до певної категорії пожежної небезпеки обладнані різними засобами пожежогасіння. Корпус готової продукції обладнаний пожежними щитами з інвентарем, ящиками з піском, пожежними кранами з шлангом. Шихтове відділення обладнане пожежними кранами, вогнегасниками і ящиками з піском.

Для попередження пожеж, що виникають від коротких замикань, на лініях і відгалуженнях 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.

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.

4.5 Заходи індивідуального захисту

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.

В даний час для захисту від пилу застосовують безклапанний респіратор «Пелюстка» і клапанні респіратори: з ватним фільтром, з фетровим фільтром, з паперовим фільтром. Ефективність респіратора «Пелюстка» досягає 100% за умов нормальної вологості повітря.

ВИСНОВКИ

1. Одним з перспективних підходів при описі кінетики процесів взаємодії фаз полягає у використанні термодинамічних моделей розрахунку рівноважного складу системи «метал-шлак-газ».

2. Розглянуті теоретичні основи прямої і зворотної задачі термодинамічного аналізу на основі моделі колективізованих електронів, диференціальних коефіцієнтів засвоєння (фазових операторів). Модель колективізованих електронів (МКЕ), заснована на методі хімічних потенціалів Гіббса з урахуванням електронного вкладу.

3. З використанням учбово-дослідницької програми «Excalibur проведено обчислювальний експеримент для моделювання кінетики розкислення сталей 09Г2С, 12ГС, 14ХГС, 30ГС, 3ПС, 08КП. Побудовані графіки траєкторії руху до рівноваги концентрацій елементів в металі і в шлаку при процесі позапічної обробки сталі. За допомогою побудованих графіків можливо передбачити кінетику руху елементів до рівноваги і зупинити процес розкислення-легування при отриманні сталі оптимального складу.

4. Була отримана залежність вмісту кисню в робочій зоні ковша від тиску і початкового вмісту кисню. Зроблений висновок, що зміна тиску в різних шарах сталі дає нерівномірний розподіл вмісту кисню в цих шарах сталі. Цим пояснюється необхідність перемішування сталі при будь-якій позапічній обробці.

5. В цілому моделювання кінетичних особливостей розкислення дозволяє підвищити ефективність виробництва, отримати відчутний економічний ефект за рахунок економії феросплавів, оптимального розкислення-легування сталі на установці піч-ківш за допомогою інтелектуального ядра програми «Excalibur». Крім того, застосування цієї системи дозволяє підвищити культуру виробництва сталі і зменшити залежність технологічного ланцюга від кваліфікації сталеварів, тощо.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. P1ockinger E., Wahlster M. Untersuchungen uber die Bildung und Abscheidung von Desoxydations produkten. *Stahl und Eisen*, 1995, № 10.
2. Samarin A.M., Mtshedischwili W.A., Awerin W.W. Bedingungen des Losens und Entfernens von Sauerstoff bei der Desoxydation von Metallschmelzen, *Neue Hütte*, 4, 1992.
3. Koch W. Analitische Untersuchungen, ber die beim Zusatz Kalziumhaltiger Desoxydations begierungen zu Eisenschmelzen auf tretenden Reaktionen. *Stahl und Eisen*, 1991, № 24.
4. Wahlster M. und Feldhaus W. Beitrag zur Desoxydation des Stahles mit technischen Kalzium-Silizium-Aluminium-Legierungen. *Stahl und Eisen*, 1992, № 4.
5. Харченко О.В. EXCALIBUR версія 1.95. Інтерфейс користувача. Запоріжжя. 2015. 88 с.
6. Харченко О. В., Пономаренко А. Г., Храпко С. А. Розробка інформаційно–технологічної системи "Форвард" для управління металургійними процесами в реальному масштабі часу. *Вісті ВНЗ. Чорна металургія*. 1991. № 12. С. 89–91.
7. Колосов А. Ф., Литвин Л. М., Лук'янченко В. В. Освоєння системи "Електронний порадник сталевара" на металургійному заводі "Криворіжсталь". *Зб. праць ДонНТУ*. 2005. С. 46–48.
8. Фомін Н. А., Чухов І. І., Кошелєв А. Є. Автоматизована система розрахунку шихти при виробництві сталі в потужних електропечах. *Зб. праць ДонНТУ*. 2006. №3. С. 45–46.
9. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Термодинамічне моделювання системи метал-шлак-газ з урахуванням тепла хімічних реакцій. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. №8. С. 40-43.
10. Lupis C. H. P. Chemical Thermodynamics of Materials. Prentice Hall, 1993. 602 p. ISBN-13 978-0444007797.

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

12. 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.

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

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

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

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

17. Довгонюк С. В., Пономаренко О. Г. Коефіцієнти активності елементів у газовій фазі. *Зб. наукових праць ДонНТУ*. 2003. С. 25-28.

18. 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.

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