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_____ Інтегрована система контролю сталеплавильного виробництва ПК "Майстер" на ПАТ "Запоріжсталь"_____
_____
_____

Виконала: студентка _2_курсу, групи *8.1363-мчм-з*

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

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

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

Запоріжжя - 2024 року

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

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

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

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*

Ю.О. Бєлоконь

"_01_" ____05_____2024 року

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

Адамович Наталія Віталіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта)*Інтегрована система контролю сталеплавильного виробництва ПК "Майстер" на ПАТ "Запоріжсталь"*

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 № 363-с.

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

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Розширення функціональних можливостей системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер» з урахуванням оперативних даних про витрату кисню і природного газу на печах і даних про поточний стан кисневих фурм.*

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

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Літературний огляд	*Харченко О.В., доцент*		
Розрахунково-дослідницька частина	*Харченко О.В., доцент*		
Індивідуальне завдання	*Харченко О.В., доцент*		
Охорона праці та техногенна безпека	*Харченко О.В., доцент*		
Нормоконтроль	*Воденнікова О.С., 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 _____ *Н.В. Адамович*
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 119 с., 6 табл., 28 рис., 35 джерел.

МАРТЕНІВСЬКИЙ ЦЕХ, «МЕТАЛ-ШЛАК-ГАЗ», ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС, УДОСКОНАЛЕННЯ, ДСПА-1, ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ, «ЗАПОРІЖСТАЛЬ», ХІМІЧНИЙ СКЛАД, «МАЙСТЕР», СТАЛЬ.

Об’єкт дослідження – технологічний процес виплавки сталі у мартенівському цеху металургійного комбінату ПАТ "Запоріжсталь".

Мета роботи – розширити функціональні можливості системи контролю сталеплавильного виробництва «Майстер» з урахуванням оперативних даних про витрату кисню і природного газу на печах і даних про поточний стан кисневих фурм.

Методи дослідження – термодинамічний аналіз системи «метал-шлак-газ» сталеплавильної ванни, включаючи високотемпературну реакційну зону; моніторинг системи «Майстер» у реальному часі.

У першому розділі детально описано значення ПАТ «Запоріжсталь» у розвитку української металургії, його роль у національній економіці, розглянуті обставини, з якими зіткнувся комбінат в останні роки. Описано програмний комплекс «Майстер», його призначення, функції, структуру, складові частини.

Другий розділ присвячено створенню і дослідженню термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ», яка є основою моделювання теплових та хімічних процесів, що відбуваються в сталеплавильній ванні.

У третьому розділі розглянуто удосконалення програмного забезпечення технологічних процесів на підприємстві, включаючи усі компоненти програмного комплексу «Майстер», для оптимізації виробництва, а також удосконалення програми «Хімлаборант» для автоматизації аналізу хімічного складу.

У четвертому розділі розглядаються основні небезпечні та шкідливі чинники, які можуть впливати на працівників мартенівського цеху під час наукових досліджень, а також пропонуються заходи для їх мінімізації.

ABSTRACT

Master's qualification work: 119 p., 6 tables, 28 figures, 35 sources.

OPEN-HEARTH SHOP, "METAL-SLAG-GAS", SOFTWARE COMPLEX, IMPROVEMENT, DSPA-1, THERMODYNAMICAL MODEL, "ZAPORYZHSTAL", CHEMICAL COMPOSITION, "MASTER", STEEL.

Object of the study – technological process of steelmaking in the open-hearth shop of the metallurgical plant of PJSC "Zaporizhstal".

Purpose of the work – to expand the functional capabilities of the steelmaking production control system "Master" taking into account operational data on the consumption of oxygen and natural gas in the furnaces and data on the current state of oxygen lances.

Research methods – thermodynamic analysis of the "metal-slag-gas" system of the steelmaking bath, including the high-temperature reaction zone; monitoring of the steelmaking control system "Master" in real time.

First section describes in detail the significance of PJSC "Zaporizhstal" in the development of Ukrainian metallurgy, its role in the national economy, considers the circumstances that the plant has encountered in recent years. The "Master" software package is described, its purpose, functions, structure, and components.

Second section is devoted to the creation and study of a thermodynamic model of the "metal-slag-gas" system, which is the basis for modeling thermal and chemical processes occurring in the steelmaking bath.

Third section considers the improvement of the software for technological processes at the enterprise, including all components of the "Master" software complex, to optimize production.

Fourth section considers the main dangerous and harmful factors that may affect workers in the open-hearth workshop during scientific research, and also proposes measures to minimize them.

ЗМІСТ

ВСТУП 10

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ 12

1.1 ПАТ «Запоріжсталь», як основа української промисловості 12

1.1.1 Воєнний період для комбінату 12

1.1.2 Нові марки сталі 14

1.1.3 Забезпечення виробництва спокійних марок сталей на ДСПА-1 ПАТ «Запоріжсталь» 15

1.2 Загальні відомості про програмний комплекс «Майстер» 19

1.2.1 Структура ПК «Майстер» 21

1.2.2 Інтерфейс користувача ПК «Майстер» 23

1.2.3 Блок управління 29

РОЗДІЛ 2 ТЕРМОДИНАМІЧНА ТА ТЕПЛОВА МОДЕЛІ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ РІДКОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ВАННИ 33

2.1 Теплова модель системи «метал-шлак-газ» 33

2.1.1 Розв'язання векторного рівняння стану термодинамічної системи «метал-шлак-газ» 34

2.1.2 Система «метал-шлак» 36

2.1.3 Система «метал-газ» 37

2.1.4 Рівняння теплового балансу 38

2.1.5 Ентальпія системи та її складових 38

2.1.6 Ентальпія системи у кінцевому стані 39

2.1.7 Ентальпія системи у початковому стані 40

2.1.8 Розразунок стандартних ентальпій фаз та матеріалів 42

2.1.9 Тепловий ефект хімічних реакцій 44

2.1.10 Теплові ефекти матеріалів 44

2.1.11 Розрахунок кінцевої температури системи 47

2.2 Термодинамічна модель високотемпературної реакційної зони рідкої сталеплавильної ванни 48

2.2.1 Системи залізо-кисень, залізо-кисень-вуглець. Методика дослідження 50

2.2.2 Видалення домішок із газової фази. Методика дослідження 66

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «МАЙСТЕР» 81

3.1 Удосконалення програми «Майстер» 81

3.2 Удосконалення програми «Хімлаборант» 86

3.3 Удосконалення програм роботи зі спектральними приладами експрес-аналізу зразків металу «Spectro» та «SpectroL» 87

3.4 Оптимізація управління сталеплавильним процесом на основі термодинамічного моделювання 88

3.5 Узагальнення удосконалень та впроваджень 90

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 94

4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища мартенівського цеху при проведенні наукових досліджень 94

4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища мартенівського цеху 97

4.3 Заходи з електробезпеки 98

4.4 Заходи пожежної безпеки 100

4.5 Інженерна розробка захисту оператора печі від ураження електричним струмом 102

4.6 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії при обробці результатів наукових досліджень 108

4.7 Електробезпека 111

4.8 Пожежна та техногенна безпека 112

ВИСНОВКИ 114

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 116

ВСТУП

Сталева промисловість відіграє ключову роль у світовій економіці, охоплюючи широкий спектр найважливіших матеріалів для виробництва, виготовлення продукції та забезпечення зайнятості. Однак складність виробничих процесів, що характеризуються низьким споживанням енергії, складністю технологічних етапів та суворими вимогами до якості, створює серйозні проблеми. Ці виклики вимагають надійних та ефективних систем управління для забезпечення стабільності, ефективності та конкурентоспроможності сталеливарної галузі.

Сучасне металургійне виробництво неможливо уявити без великих печей, станів, великої кількості працівників та високотехнологічного обладнання. У своїй основі сучасні технології включають впровадження інформаційних технологій та автоматизованих систем управління, що є критично важливим для оптимізації процесів виробництва в умовах великої конкуренції серед металургійних гігантів. Зокрема, ПАТ «Запоріжсталь» у м. Запоріжжя вимушене впроваджувати передові рішення для підвищення економічної ефективності, автоматизації та оптимізації виробничих процесів. Одним з таких рішень є система ПК «Майстер», що забезпечує моніторинг та управління сталеплавильним виробництвом у реальному часі.

Актуальність дослідження полягає у необхідності подальшого вдосконалення інтегрованих систем управління сталеплавильними процесами для забезпечення високої ефективності, зниження витрат та покращення якості продукції. З огляду на постійно зростаючі вимоги до конкурентоспроможності металургійних підприємств, дослідження та оптимізація системи ПК «Майстер» є важливим кроком для підтримки стабільності та розвитку виробничих потужностей.

Мета роботи полягає у вдосконаленні інтегрованої системи контролю сталеплавильного виробництва ПК «Майстер» шляхом розробки пропозицій

щодо її оптимізації, покращення точності прогнозування та ефективності управління технологічними процесами.

Об'єкт дослідження – це система автоматизованого управління сталеплавильним виробництвом ПК «Майстер», що використовується на ПАТ «Запоріжсталь».

Предмет дослідження – це процеси контролю та управління сталеплавильним виробництвом, зокрема вдосконалення алгоритмів прогнозування та оптимізації параметрів плавки в реальному часі за допомогою системи ПК «Майстер».

Інтегровані системи управління сучасними виробничими процесами, як показує дослідження, створюють можливості для автоматизації та оптимізації процесів, підвищення ефективності роботи підприємства, мінімізації ризиків та забезпечення дотримання найвищих стандартів якості продукції. Водночас існуючі проблеми з адаптацією та інтеграцією нових технологічних досягнень у складі таких систем потребують постійного вдосконалення та дослідження для забезпечення належної гнучкості та продуктивності у реальних виробничих умовах.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 ПАТ «Запоріжсталь», як основа української промисловості

ПАТ «Запоріжсталь» - це одно з найбільших металургійних підприємств з повним циклом виробництва України. Воно було засновано у 1933 році та розташовано у колисці українського козацтва – у м. Запоріжжя. Підприємство входить до металургійної групи «Метінвест», яка в свою чергу входить до групи компаній «Систем Кепітал Менеджмент» (СМК), яку очолює український бізнесмен Рінат Ахметов.

«Запоріжсталь» є одним із ключових гравців української металургійної галузі завдяки своїм масштабам виробництва та якості продукції, що випускається. В останні роки підприємство активно займається модернізацією своїх потужностей, впроваджуючи сучасні технології, спрямовані на підвищення продуктивності та зниження витрат [6].

Сьогодні завод входить до складу промислового холдингу Metinvest Group, що дозволяє йому інтегруватися у міжнародні ланцюжки поставок та конкурувати на глобальному ринку металургійної продукції. Завдяки цьому Запоріжсталь продовжує розвиватися, зберігаючи свої позиції у галузі та роблячи внесок у економічний розвиток регіону.

1.1.1 Воєнний період для комбінату

Ситуація після початку повномасштабного вторгнення Російської Федерації на територію України складається буде напруженою та важкою для підприємств групи «Метінвест» та на «Запоріжсталі», зокрема. З лютого 2022 року підприємство зазнало значних труднощів, які вплинули на всі сфери діяльності підприємства.

У перші місяці війни комбінат був вимушений частково призупинити виробництво для забезпечення безпеки та здоров’я працівників та збереження обладнання. В окремі періоди була призупинена робота

доменних та мартенівських печей, через що підприємство зазнало неабияких фінансових втрат.

Через руйнування логістичних шляхів, а саме, пошкодження залізничної інфраструктури та обмеження доступу до портів через загрозу обстрілів, обсяги виробництва на ПАТ «Запоріжсталь» зменшилось у декілька разів, у порівнянні з довоєнним часом.

Логістика для ПАТ «Запоріжсталь» складається з неабиякими труднощами. Морський транспорт є одним з основних каналів експорту металопродукції. Однак через Однак, через воєнний стан багато портів у Чорному та Азовському морях стали недоступними або працюють під суровими обмеженнями. Це ускладнило не лише експорт готової продукції, а й ще імпорт сировини. У зв’язку з цим, підприємству довелося шукати нові шляхи постачання руди, зокрема, переорієнтовуватися на сухопутні маршрути з інших країн або внутрішніх джерел.

Через війну «Запоріжсталь» втратила зв’язок із низкою країн, які були ключовими партнерами як в імпорті сировини, так і в експорті готової продукції. Раніше «Запоріжсталь» отримувала сировину, зокрема коксівне вугілля та інші компоненти через транзитні маршрути через Росію. Також, частина сировини та обладнання надходили з країн ЄС з таких як Італія, Польща, Німеччина та Румунія, але через труднощі поставки стали менш регулярними.

Європейські країни, країни близького сходу, Китай, Індія та інші були важливими ринками збуту для продукції ПАТ «Запоріжсталь», особливо гарячого прокату та сталевих листів. Однак, через логістичні проблеми та блокаду портів експорт до ЄС значно скоротились.

Однак, через втрату доступу до портів та морських шляхів, «Запоріжсталь» почала активно використовувати залізничну інфраструктуру для експорту продукції. Підприємство почало адаптувати свою продукцію до стандартів ЄС, щоб змінити позиції на європейському ринку.

ПАТ «Запоріжсталь» розвиває нові партнерські відносини з європейськими виробниками сталі для обміну технологіями, та сумісних проєктів, спрямованих на підтримку виробництва.

Оскільки традиційні постачальники стали недоступними, підприємство почало шукати альтернативні джерела сировини. Нині розвиваються нові канали постачання коксівного вугілля з Польщі, Чехії та навіть з віддалених країн Африки, таких як Південноафриканська Республіка.

«Запоріжсталь» також посилює свою присутність на внутрішньому ринку попиту на металургійну продукцію з боку будівельної та інфраструктурної галузей. Завдяки цьому підприємство підтримую стабільний рівень виробництва та забезпечує надходження доходів у складний період.

Підсукуючи усе вищезазначене, завдяки оперативним заходам та переорієнтації на нові ринки, «Запоріжсталь» змогла частково компенсувати втрати, спричинені війною та зберегти конкурентоспроможність на міжнародній арені. Це дало змогу підприємству розширити сортамент продукції та, завдяки новим відносинам з європейськими партнерами, ввести експериментальні плавки сталі марок сталі, які раніше не виготовляли на підприємстві.

1.1.2 Нові марки сталі

Основною причиною розширення сортаменту є потреба у підвищенні якості продукції та розширенні асортименту для задоволення вимог клієнтів з різних галузей. Сучасна промисловість вимагає матеріалів з підвищеною міцністю, стійкістю до корозії та здатністю витримувати екстремальні температури.

З листопаду 2022 року, завдяки новим економічним зв’язкам, на підприємство прийшли нові замовлення на товарний слябінг, та відповідно, а марки сталі з додатковими вимогами до хімічного складу для відповідності маркам-аналогам ЄС Активів A120-180, A240, A320-240, B100 згідно

Каталогу марок сталі TDC 01/2022 відповідними органами поставки на європейські підприємства для подальшої переробки до судосталі. Але «Запоріжсталь» стикнулась з певними перешкодами. Необхідно отримати сертифікат на нові сталі та прокат.

Вимоги для отримання сертифікації:

1) Виробник впровадив та підтримує затверджену систему забезпечення якості, що відповідає стандартам ISO 9001.

2) Комбінат має необхідні виробничі та випробувальні потужності та кваліфікаційний персонал для нагляду за діяльністю з контролю якості.

3) Провести приймальні випробування із задовільними результатами відповідно до встановленої програми.

У вересні 2023р. отримано сертифікати якості на всю лінійку: марки A, B, D, E, AH32/36, DH32/36, EH32/36 розміром 150-250×1000-1500×4000-9500mm.

Результат роботи – це відвантаження товарних слябів з початку 2023 року із сталі марок A120, A160, A180, A340 товщиною 150-200мм. 71057,61тн із сумарним економічним ефектом 4,973млн доларів.

1.1.3 Забезпечення виробництва спокійних марок сталей на ДСПА-1 ПАТ «Запоріжсталь»

Двохванна мартенівська піч ДСПА-1 – це модернізований тип мартенівської печі, призначений для більш ефективного виробництва сталі. Вона є складним металургійним агрегатом, у якому реалізовано принцип двохванного процесу. Конструкція включає дві робочі ванни, що дозволяє організувати безперервний виробничий цикл, значно підвищуючи продуктивність та знижуючи енерговитрати.

ДСПА-1 складається з двох ванн, кожна з яких виконує певні функції:

1. Перша ванна: тут здійснюється основний процес плавлення сталі. У неї завантажується шихта, що складається з металобрухту, чавуну та флюсів.

2. Друга ванна: виконує функцію підготовки нової порції сировини [7].

Схема устрою робочого простору ДСПА-1 наведена на рис. 1.1.

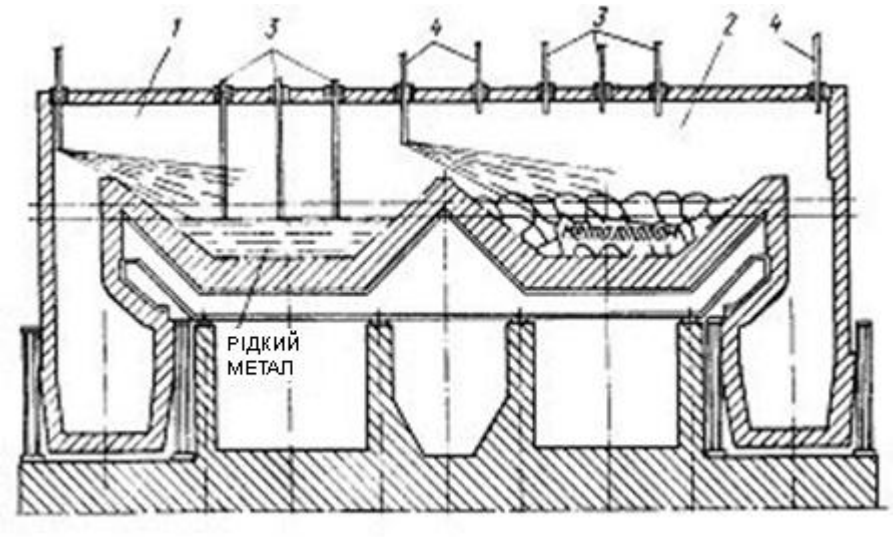


Рисунок 1.1. Схема двохванної мартенівської печі:
1 – ванна I; 2 – ванна II; 3 – кисневі фурми; 4 – паливно-кисневі пальники

Двохванна мартенівська піч має два робочих простора (ванни), перекриті одним високо розташованим склепінням. Шлак періоду плавлення, що має 20 – 24 % сумарного FeO і основність 1,6–2,0, при продуванні ванни киснем спінюється. Тому для нормальної роботи печі такої конструкції повинні мати глибші ванни, ніж звичайні мартенівські печі такої ж садки [7].

Кожен робочий простір має вікна завалок, сталевипускний отвір, паливно-кисневі пальники та кисневі фурми, що вводяться через амбразури в склепіння. Двохванні печі оснащені двома голівками, вертикальними каналами, шлаковиками, системою димоходів і перекидними клапанами. Оскільки в таких печах відсутні регенератори, температуру відхідних газів знижують, подаючи воду в шлаковики для охолодження кладки нижньої частини печі. Це дозволяє утворювати рихлий шлак та зменшує трудомісткість робіт із очищення шлаковиків [8].

У металургії сталі існує кілька типів, кожен з яких має специфічні властивості, що визначають його використання у різних галузях промисловості. Однією з таких категорій є спокійні сталі, які характеризуються мінімальним вмістом розчиненого кисню і мають покращені механічні властивості. Ці сталі знаходять широке застосування в

машинобудуванні та інших галузях, де потрібна висока міцність та в'язкість матеріалу. У цій роботі розглядаються особливості виробничого процесу отримання спокійних сталей, їх характеристики та сфери застосування [9].

Спокійні сталі - це сталеві сплави з мінімальним вмістом розчиненого кисню, які отримують за допомогою спеціальних технологій дегазації, наприклад додаванням деоксидантів, таких як алюміній, магній і кальцій. Це дозволяє уникнути утворення газових бульбашок у металі, які можуть погіршувати його механічні властивості. На відміну від шумних сталей, де рівень розчиненого кисню залишається вищим, спокійні сталі забезпечують кращі характеристики міцності та в'язкості, що робить їх ідеальними для високонавантажених виробів [9].

Після ознайомлення з роботою ДСПА-1 стало очевидно, що надійна та ефективна робота таких агрегатів безпосередньо впливає на процеси в сталеливарній промисловості. Одним із яскравих прикладів застосування сучасних технологій є Запоріжсталь, де активно використовується інноваційне обладнання для плавки сталі.

Згідно з ДСТУ EN 10025:2019 на ПАТ «Запоріжсталь» було прийнято рішення по виготовленню дослідних партій товарних слябів зі сталі марки S235JR з додатковими вимогами до хімічного складу для відповідності маркам-аналогам за євростандартами A120, A160 та A180 [15].

Виплавка проводиться з розрахунком одержання металу з хімічним складом у ковшевій пробі, зазначеним в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – **Хімічний склад сталі S235JR з додатковими вимогами, %**

Марка сталі	C	Mn	Si	S*	P*	Cr	Ni	Cu	Al
				Не більше					
S235JR	0,08-0,17	0,45-1,4	0,01-0,55	0,035	0,035	0,30	0,30	0,30	0,02-0,10
A120	0,08-0,10	0,60-0,70	0,15-0,30	0,015	0,020	0,07	0,05	0,07	0,02-0,07
A160	0,11-0,13	0,65-0,85	0,15-0,30	0,015	0,020	0,07	0,05	0,07	0,02-0,07
A180	0,10-0,12	0,85-1,00	0,15-0,30	0,015	0,020	0,07	0,05	0,07	0,02-0,07

*Примітка: призначення металу плавок, на яких не забезпечені цільові значення за вмістом сірки та фосфору, призначаються в рамках програми робіт з фактичним вмістом сірки та фосфору до 0,035%.

Процес десульфурації та дефосфорації в ДСПА-1 на даний момент не забезпечує досягнення низьких меж вмісту сірки та фосфору у сталі на випуску. Це значно обмежує якість готової продукції, оскільки домішки залишаються на неприпустимому рівні. Крім того, у сталерозливному ковші спостерігається процес рефосфорації. Це відбувається через надходження фосфору з феросплавів та легуючих матеріалів, що використовуються у процесі обробки сталі. Слабка оптимізація технологічних процесів сприяє накопиченню цих домішок, що ще більше посилює проблему.

Однією із суттєвих проблем є використання великої кількості вуглецю. Це негативно впливає на якість поверхні слябу, збільшуючи вміст небажаних включень у металі. У результаті страждає як зовнішній вигляд продукції, а й її механічні властивості.

Причинами вищезгаданих технологічних проблем є кілька факторів. Важливу роль грає використання низькоякісного флюсу. Дешевший вапняк, застосовуваний у процесі, не забезпечує необхідного ступеня дефосфорації та десульфурації. Висока зольність та недостатня активність цього матеріалу знижують ефективність очищення сталі. Додатково на процес негативно впливає обмеження обсягу шлаку, що видаляється з ДСПА-1, а також складність наведення нового шлаку. Неможливість повної ізоляції пічного шлаку призводить до збільшення вмісту домішок у сталі.

Ще однією важливою проблемою є відсутність ефективної системи відсікання або відведення шлаку при випуску сталі з печі в сталерозливний ківш. Попадання шлаку в ківш значно знижує чистоту сталі та сприяє процесу рефосфорації. Крім того, технології розкислення та легування сталі, що виконуються безпосередньо під час випуску, посилюють ситуацію.

Зокрема, розкислення сприяє попаданню пічного шлаку в сталерозливний ківш, що збільшує накопичення додаткових домішок у процесі обробки.

Особливості виробництва сталі марки S355J2 також потребують окремої уваги. Порівняно з маркою S235J2, процеси відновлення фосфору та сірки зі шлаку відіграють важливішу роль. Це пов'язано з тим, що для S355J2 застосовується значно більша кількість марганцевих феросплавів – їх обсяг збільшується приблизно в 2,5 рази. Таке збільшення призводить до посилення ступеня відновлення фосфору із шлаку та додаткового внесення фосфору в сталь. Високий обсяг феросплавів також сприяє зростанню вмісту інших шкідливих домішок, що погіршує якість сталі.

Для вирішення зазначених проблем рекомендується впровадити кілька покращень у технологічний процес. По-перше, необхідно використовувати флюси з підвищеною активністю, такі як плавлений вапняк, який забезпечить більш ефективну дефосфорацію та десульфурацію. По-друге, слід оптимізувати процеси видалення шлаку та наведення нового, а також розробити методи ефективного відсікання шлаку при випуску. Технологія попереднього розкислення сталі може значно знизити вплив пічного шлаку. Також важливо здійснювати суворий контроль якості феросплавів для мінімізації вмісту фосфору та інших домішок. Нарешті, підвищення ефективності процесів десульфурації та дефосфорації можливе через впровадження нових добавок та покращення температурного режиму обробки сталі.

1.2 Загальні відомості про програмний комплекс «Майстер»

Металургія – це галузь, що повинна постійно вдосконалюватися. ПАТ «Запоріжсталь» не є виключенням. Для підвищення конкурентоспроможності у 2013 році керівництвом підприємства було прийняло рішення ввести в експлуатацію новий сучасний програмний комплекс «Майстер», який набагато спростив контроль за виробництвом та якістю продукції комбінату.

Країни європейського світу також активно використовують інтегровані системи контролю за виробництвом, наприклад, Німеччина на своєму металургійному підприємстві такому як ThyssenKrupp активно використовує програму SIMATIC PCS 7. Завдяки точному контролю параметрів плавки, прокатки та інших металургійних процесів, підприємство скорочує витрати та підвищує продуктивність [2].

До особливостей програми SIMATIC PCS 7, що застосовується на підприємстві ThyssenKrupp у Німеччині можна віднести:

• Гнучкість та масштабованість: система підходить як для невеликих ділянок, так і для великих промислових комплексів. Вона може об'єднувати управління усіма виробничими процесами одному підприємстві.

• Інтеграція з ERP-системами: дозволяє зв'язати дані з рівнем управління підприємством, наприклад, SAP, що допомагає ефективно планувати ресурси.

• Моніторинг у реальному часі: система збирає дані з усіх датчиків, обладнання та аналізує їх з метою виявлення відхилень.

• Підтримка штучного інтелекту: дозволяє прогнозувати можливі аварії, аналізувати великі обсяги даних та пропонувати оптимальні рішення [2].

Ще один приклад європейського використання систем контролю на підприємстві демонструє Швеція на своєму металургійному комбінаті ArcelorMittal використовується система ABB Ability™. Це флагманська система автоматизації від ABB, розроблена керувати складними виробничими процесами. вона здатна контролювати виробничі лінії, аналізувати знос обладнання та мінімізує викиди CO_2 в атмосферу. Також, ця система оснащена візуалізацією даних, що допомагає оператору працювати із системою завдяки 3D-графіки та інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів. Ця система контролює не тільки технологічні процеси, а й ще енергетичні затрати, що є вкрай важливим для металургійних підприємств [3].

Програмний комплекс (далі ПК) «Майстер» призначений для розрахунку оптимальних кількостей розкислювачів і легуючих матеріалів при виробництві сталі в мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь». Критерієм оптимальності служить мінімум вартості набору матеріалів що забезпечують виконання всіх заданих обмежень за хімічним складом сталі, окислення металу в ковші, масі газу, масам матеріалів [1].

Основною ціллю цієї програми є підвищення ефективності виробництва, зниження кількості витрат на сировину та допоміжні матеріали завдяки оптимізації процесів, а також контроль якості продукції.

З введенням ПК «Майстер» на підприємстві було зменшено простій обладнання, знижено кількість помилок через людський фактор, підвищено швидкість та точність контролю за якістю продукції.

1.2.1 Структура ПК «Майстер»

Програмний комплекс «Майстер» складається з п’яти компонентів, що тісно взаємодіють між собою:

1. Програма «Майстер» – це основна програма. Використовується для розрахунку оптимальних пропорцій і прогнозування хімічного складу ківшевої проби з урахуванням даних приладу Multilab «Celox», а також для розрахунку кількості розкислювачів і легуючих матеріалів.
2. Програма «Конвертор» – забезпечує безперебійну роботу програмного комплексу «Майстер» у фоновому режимі.
3. Програма «Хімлаборант» – призначена для ведення та перегляду електронного журналу плавок у мартенівському цеху експрес-лабораторії.
4. Програма «Спектро» – відповідає за налаштування технологічних параметрів і коригувань для забезпечення правильної роботи програм «СпектроL» і «Хімлаборант».
5. Програма «СпектроL» – виконує автоматичне коригування хімічного складу металевих проб і швидке отримання результатів квантометричного аналізу для програми «Хімлаборант» [10].

У інформаційній базі ІОС, розробленій фахівцями відділу АСУ ТП разом з працівниками мартенівського та обтискного цехів, а також службою ВТК, було реалізовано низку завдань, що становлять частину системи оперативного управління виробництвом на цих ділянках. Одним із важливих етапів стала інтеграція ІОС із системою «Замовлення», що дозволила автоматично передавати основні дані паспорта плавки на ПЕВМ, зменшуючи при цьому витрати часу на повторне введення цієї інформації.

До складу користувачів системи входять різні підрозділи комбінату, зокрема економіст мартенівського цеху, хімлабораторія, а також представники обтискного цеху, що забезпечує всебічну підтримку оперативного управління виробництвом у комплексі «Сталь – прокат».

Програма «Сталь – прокат» забезпечує моніторинг та підтримку плавок через усі етапи виробничого процесу. Вона автоматично формує та надає актуальну інформацію про ситуацію на ділянках і в суміжних виробничих зонах, що дає змогу оперативно ухвалювати рішення. Програмне забезпечення дозволяє аналізувати звітні дані про роботу агрегатів, результативність змін, а також ефективність обробки кожної конкретної плавки (рис. 1.2).

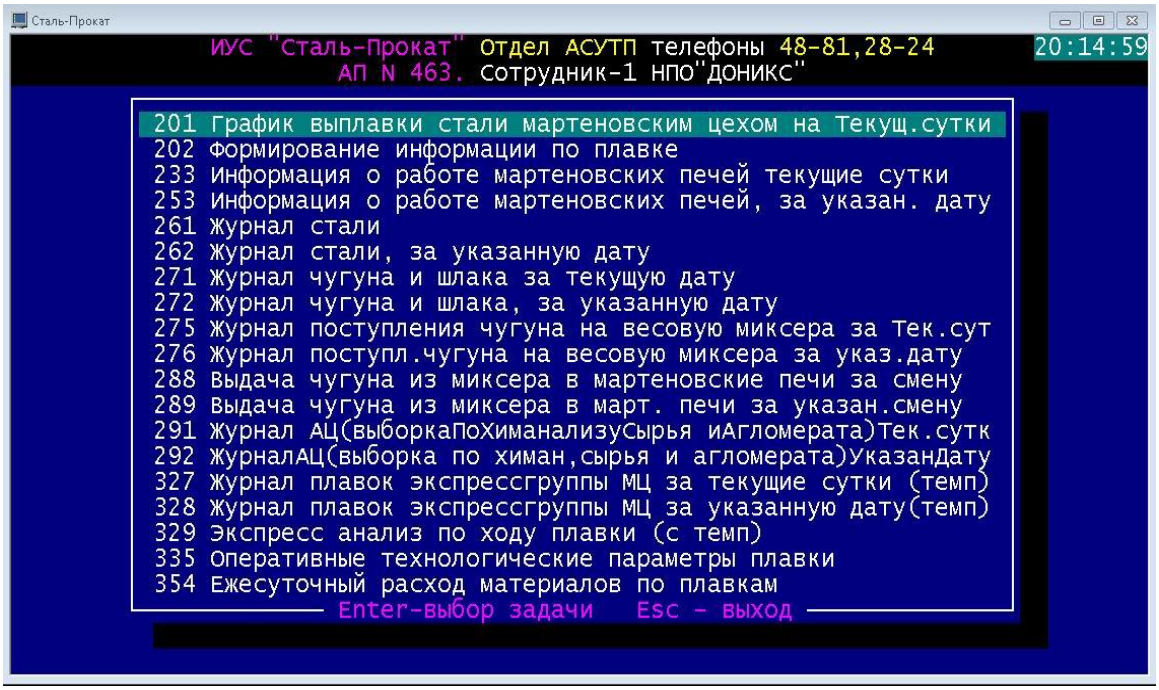


Рисунок 1.2 – Головна форма ІОС «Сталь – прокат»

ІОС має централізовану структуру обробки та зберігання даних про хід виробництва. Для доступу до системи використовуються як відеотермінали, так і автоматизовані робочі місця (АРМ) для керівництва, що дає змогу персоналу оперативно реагувати на зміни і коригувати виробничі процеси [14].

Однак варто зазначити, що програма «Сталь – прокат» уже є застарілою і на даний момент активно розглядаються варіанти її оновлення або заміни на більш сучасні системи. Це дозволить значно підвищити ефективність управління, автоматизації виробничих процесів і забезпечення кращої інтеграції з іншими технологічними лініями. Відповідно, проект нової системи передбачає модернізацію інтерфейсу, удосконалення процесів збору та аналізу даних для покращення якості прийняття рішень на всіх етапах виробництва.

1.2.2 Інтерфейс користувача ПК «Майстер»

Інтерфейс – це засіб взаємодії між людиною та системою (наприклад, комп'ютером, програмою, приладом) або між різними системами. Він відіграє ключову роль у зручності та ефективності роботи.

Програма «Майстер» має простий, зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс (рис. 1.3), що дозволяє працювати з нею навіть маючи мінімальні базові знання з інформатики та технології в галузі чорної металургії, не втрачаючи ефективності в роботі.

Ключові елементи програми "Майстер" показано на головній формі, приклад якої наведено на рисунку 1.3.

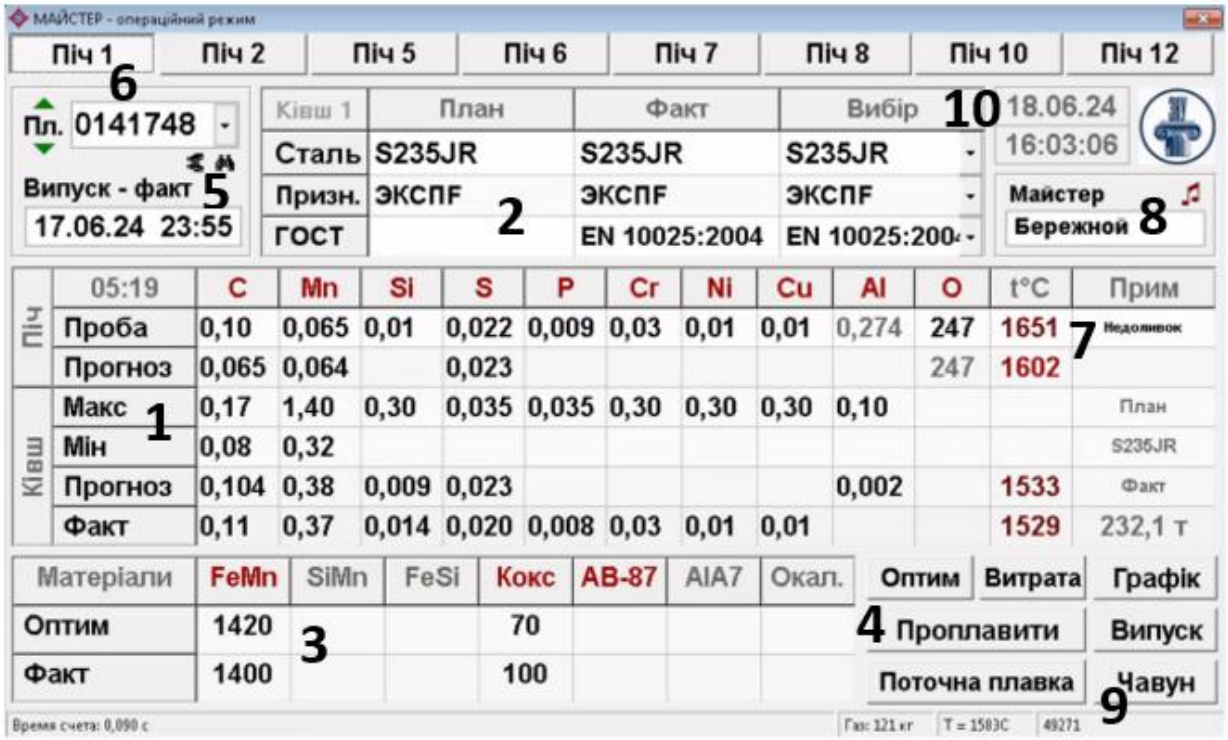


Рисунок 1.3 – Головна форма ПК «Майстер»:

1 - таблиця хімічних складів; 2 – таблиця планових і фактичних значень плавки; 3 – рядок матеріалів; 4 – блок управління; 5 – панель пошуку плавок; 6 – елемент управління «вкладки»; 7 – поле «Температура»; 8 – випадний список майстрів печей; 9 – рядок стану; 10 – хронометр

Таблиця хімічних складів (рис. 1.3, поз. 1) містить кілька рядків, значеннння яких приведено у таблиці 1.2. Усі хімічні склади вимірюються у відсотках.

Редаговані елементи таблиці можна виділити, навівши вказівник миші на осередок та натиснувши ліву кнопку миші. Для переходу в режим редагування осередку можна скористатися одним із наступних способів:

- натисканням клавіші F2;
- натисканням клавіші Enter;
- натисканням цифрової клавіші, що відповідає першій цифрі вводимого числа;
- натисканням лівої кнопки миші.

Таблиця 1.2 – **Значення рядків таблиці хімічних складів**

Боковик	Редаго-вана	Значення
Час приходу експрес-аналізу проби металу або виміру Celox	ні	У заголовках стовпців вказані символи хімічних елементів.
Проба № чи Celox (мигання зеленим кольором при приході проби або синім кольором при вимірі окисленості)	так	Дані хімічного експрес-аналізу проби металу з печі. Відображаються автоматично безпосередньо після видачі даних лаборантом по кожній пробі. У останньому стовпці наводиться примітка по цій пробі. Час приходу даних (видачі експрес-аналізу) відображається у боковику нульового рядка. У стовпці О сірим кольором відображається розрахункове значення окисленості металу в печі. Якщо робився вимір окисленості, значення О автоматично вводиться в таблицю і відображається чорним кольором.
Макс / Мін	так	Максимальний (мінімальне) вміст хімічного елементу, що регламентується ГОСТ або ТУ в готовій сталі. Для кисню це оптимальна окисленість металу в ковші, така, що не регламентується стандартом.
Прогноз	ні	Розрахунковий середній вміст хімічного елементу в ківшевійпробі. Якщо довірчий інтервал розрахункового вмісту виходить за межі заданого в рядках Мін і Макс, цифри, що відображаються, виділяються відтінками червоного кольору. Прогноз відображається для елементів, що містяться в пробі металу, а також для кремнію і кисню.
Факт	ні	Фактичний вміст хімічного елементу в ківшевій пробі за даними ЦХЛ. Відображається у міру поступання даних в систему "Сталь-прокат" / Oracle.

У процесі введення вмісту елементів допускається використання як коми, так і крапки в якості десяткового роздільника. Для спрощення введення можна використовувати натуральні числа, що сприймаються програмою як соті частки відсотка для елементів C, Mn, Cr, Ni, Cu, і як тисячні частки відсотка для Si, S, P. Наприклад, введення числа 7 в осередок вуглецю буде еквівалентне 0,07%, а введення числа 35 в осередок для сірки – 0,035%.

Якщо в складі металу міститься елемент з високим вмістом (1% і більше), його слід вводити через десяткову крапку або кому.

Після редагування та натискання клавіші Enter програма автоматично перераховує оптимальний набір матеріалів. В іншому випадку, після редагування, майстер повинен натискати кнопки "Оптимізувати" або "Проплавити" залежно від завдання.

Якщо програма не знаходить оптимального набору матеріалів, рядок матеріалів і рядок прогнозу очищаються. Для отримання прогнозу в цьому випадку слід вручну ввести маси матеріалів.

Через 2 години після випуску плавки майстром, або в режимі перегляду (пошуку) плавок редагування таблиці хімічних складів не допускається.

Наведенням покажчика миші на клітину таблиці хімічних складів Проба № і вибором з меню, що випадає і автоматично з'являється, можна переглядати усі попередні проби металу по цій плавці. Час вступу і номера попередніх пробвиділяються синім кольором. Через 15 секунд після перегляду попередніх пробв таблиці автоматично відновлюються дані про останню пробу [11].

Отримання даних про експрес-аналіз проби металу або вимірювання окисленості за допомогою Celox супроводжується звуковим сигналом, якщо підключено відповідне акустичне обладнання. Протягом 2 хвилин бокова панель рядка хімічного аналізу проби буде мигати: зеленим кольором при надходженні даних з хімічної лабораторії і синім – при вимірюванні окисленості за допомогою Celox.

Таблиця планових і фактичних значень плавки (рис. 1.3, поз. 2) служить для відображення марки сталі, призначення сталі і стандарту - ДСТУ або ТУ.

У верхній лівій клітині цієї ж таблиці відображається номер ковша. Ця ж клітина служить також кнопкою для перемикання між ковшами.

У колонці План-містяться планові показники плавки: марка сталі, призначення сталі і ДСТУ (ТУ).

До прийняття плавки майстром в колонці Вибір містяться три випадающих списка, що дозволяють майстрові оперативно коригувати планові показники по марці сталі, призначенню і ДСТУ (ТУ).

Марку і призначення сталі майстер приймає до виконання, проте марці і призначенню сталі може відповідати ДСТУ (ТУ). В цьому випадку плановий ДСТУ (ТУ) виділяється сірим кольором, а майстрові надаєтьсяможливість вибрати необхідний стандарт з списку, що випадає.

Крім того, майстер має можливість вибирати марку сталі і переглядати усі допустимі призначення і відповідні стандарти. При інтерактивному виборі марки сталі, призначення або стандарту програма автоматично перераховує оптимальний набір матеріалів, якщо до цього часу поступили дані експрес-аналізу проби металу, що містять, принаймні, вуглець і марганець, або дані виміру окисленості Celox [11].

Після завершення випуску плавки та отримання даних від ЦХЛ щодо хімічного складу ківшевої проби, колонка "Вибір" замінюється на колонку "Факт", де відображаються фактична марка сталі, її остаточне призначення та відповідний ДСТУ (ТУ). При цьому відсутня можливість інтерактивного вибору марки сталі, її призначення або ДСТУ (ТУ).

Рядок матеріалів (рис. 1.3, поз. 3) є багатофункціональним елементом інтерфейсу, що складається з шести полів для введення та відображення мас матеріалів у кілограмах. Після оптимізації в цих полях відображається рекомендований набір матеріалів, який є результатом розрахунку програми для майстра. У разі відсутності оптимального набору матеріалів, поля очищуються разом із рядком прогнозу.

Користувач може ввести маси матеріалів до 9999 кг у кожне з полів редагування. Під час введення або зміни маси матеріалів автоматично відбувається їх проплавлення з відповідним оновленням прогнозу в таблиці хімічних складів.

Для редагування маси матеріалу потрібно підвести курсор до відповідного поля та натиснути ліву кнопку миші. Навігація між полями

здійснюється за допомогою миші або клавіші Tab (для переходу до наступного поля) і Shift+Tab (для повернення до попереднього). Після натискання клавіші Enter для редагування маси матеріалу, система автоматично переходить до наступного поля для введення.

Кожне поле редагування має контекстне меню, яке відкривається при натисканні правої кнопки миші. Через це меню можна:

- призначити матеріалу один з трьох атрибутів оптимізації, визначених у таблиці 1.3, що автоматично перераховує оптимальний набір матеріалів;
- очистити поле редагування для конкретного матеріалу (пункт "Очистити");
- встановити атрибут "Дозволити усім матеріалам одночасно";
- очистити всі поля редагування.

Таблиця 1.3 – **Атрибути оптимізації матеріалу і їх значення**

Атрибут	Колір ярлика	Колір кнопки	Значення
Дозволити	Темно-червоний	Зелений	Матеріал дозволений до вільного використання при оптимізації, проте в результаті оптимізації матеріал не обов'язково буде використаний.
Заборонити	Сірий	Червоний	Матеріал заборонений до використання при оптимізації.
Зафіксувати	Бордовий	Оливковий	Матеріал зафіксований на певному рівні, який зберігається при оптимізації. Для фіксації матеріалу необхідно заздалегідь задати відповідне значення в полі редагування.

Для зручності роботи з атрибутами оптимізації, кожне поле має асоційовану панель кольорових кнопок, яка з’являється автоматично, коли курсор знаходиться на полі [11].

Кнопка фіксації матеріалу затінена і недоступна, якщо в полі редагування відсутня маса матеріалу. Остання (темно-сіра) кнопка служить для очищення поля даного матеріалу.

Завершуючи роботу з плавкою, майстер заносить в поля редагування фактичні маси матеріалів, віддані в кожен ківш, і натискає кнопку Прийняти для запису даних про плавку у базу даних.

1.2.3 Блок управління

(рис. 1.3, поз. 4) містить великі кнопки, які дозволяють майстру виконувати основні операції в процесі роботи з програмою.

Панель пошуку плавок (рис. 2.2, поз. 5) містить випадаючий список номерів плавок, поле для відображення дати та часу випуску, а також кнопку для пошуку плавок за датою та іншими параметрами.

В залежності від того, чи була плавка випущена, на панелі відображається фактичний або плановий час випуску з відповідними позначками "Випуск - факт" або "Випуск - план".

Випадаючий список дозволяє перейти до плавок, випущених за останні три доби. Інформація про вибрану плавку відображається на формі. Якщо плавка ще не прийнята майстром, відображення може змінюватися в залежності від цього.

Якщо потрібної плавки немає у списку, можна натискати кнопку пошуку (або використовувати комбінацію клавіш Ctrl - F). Відкриється форма з календарем для вибору періоду проведення плавок (рис. 1.4). Далі можна вибрати один або кілька атрибутів плавки, таких як група сталі, марка, призначення сталі або майстер. Для початку пошуку потрібно натиснути кнопку "Пошук" (або комбінацію клавіш Ctrl - S).

Після пошуку у випадному списку плавок будуть відображатися лише знайдені записи. За замовчуванням він позиціонується на першу знайдену плавку.

Для повернення в основний режим досить натискати одну з таких кнопок:

- кнопку × під кнопкою пошуку, яка з'являється в режимі пошуку;
- кнопку "Відміна" у формі пошуку;
- функціональну клавішу Esc, якщо відкрита форма пошуку плавок [12].

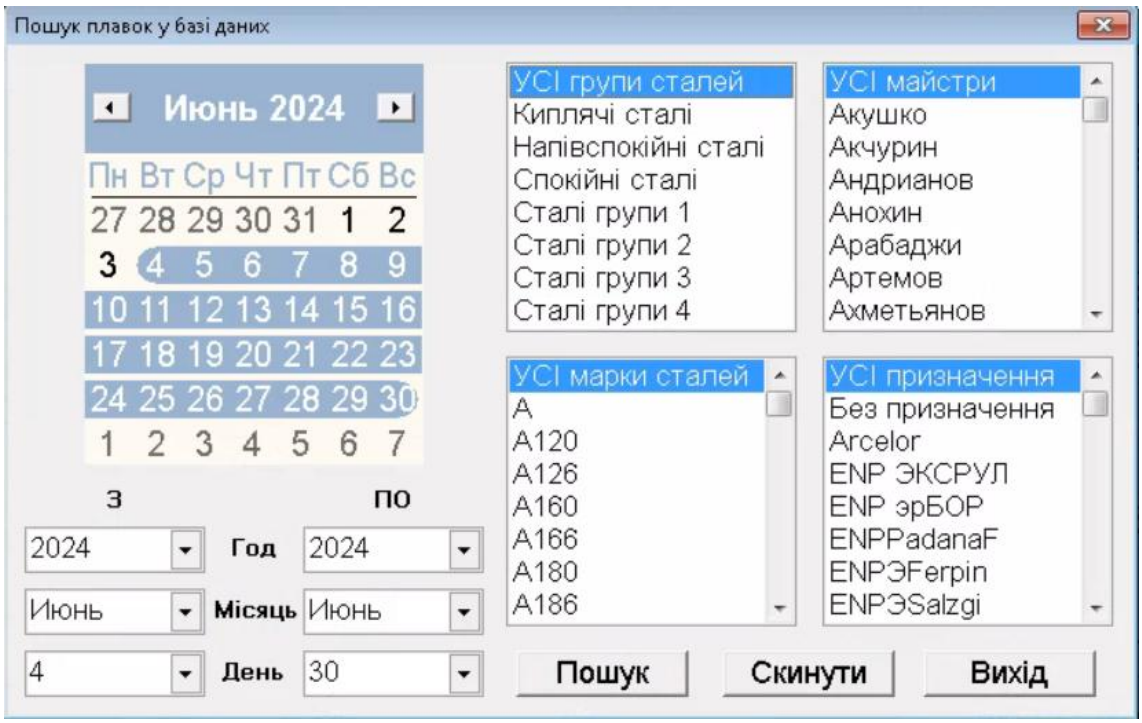


Рисунок 1.4 - Форма пошуку плавок у базі даних

Після введення даних експрес-аналізу останньої проби металу, програма автоматично повертається до основного режиму роботи. Випадаючий список плавок переміщується на поточну плавку, а в полі для дати та часу відображається планова інформація про дату і час випуску.

Елемент управління "вкладки" (рис. 1.3, поз. 6) служить для перемикання між печами шляхом наведення на них покажчика миші і натиснення лівої кнопки. Для перемикання між печами можна використати також функціональні клавіші F1..F12.

Майстер може працювати в операційному режимі тільки на тих печах, які дозволені йому в налаштуваннях термінального сеансу (наприклад, печах одного блоку). По усіх інших печах програма працює в режимі перегляду.

При вступі даних про експрес-аналіз останньої проби металу програма автоматично включає вкладку відповідної печі [12].

У редаговане поле "Температура" (рис. 1.3, поз. 7) вводяться дані про безперервні та разові вимірювання температури на момент відбору проби металу. Якщо натиснути ліву кнопку миші на написі "Температура", що є кнопкою, відкривається графік, що відображає температуру та хімічний склад проби по вуглецю та марганцю Графік оновлюється кожні 30 секунд.

Якщо в полі "Температура" немає актуального значення, майстер повинен ввести його вручну. Якщо температура не введена, автоматично приймається стандартне значення 1627°С. У разі, якщо введена температура перевищує 1500°С і введення завершується натисканням клавіші Enter, програма автоматично перераховує оптимальний набір матеріалів, запускаючи процес проплавлення [12].

Випадний список майстрів печей (рис. 1.3, поз. 8) доступний під час роботи з програмою "Майстер" в операційному режимі. Список заповнюється даними, отриманими від служб АСУ ТП.

Рядок стану (рисунок 1.3, поз. 9) використовується для відображення підказок щодо елементів форми програми, на які вказує покажчик миші. Також в рядку стану відображається службова інформація про плавку, зокрема маса газу (кг), що утворюється в ковші, температура металу в ковші (°С) без урахування теплових втрат, а також вартість легування (грн) [12].

У верхньому правому куті форми знаходиться хронометр (рис. 1.3, поз. 10), який показує поточну дату та час.

У програмі також є можливість переглядати актуальні дані про масу та хімічний склад чавуну, замовленого на плавку, а також інформацію про випуски чавуну з доменних печей. Для цього потрібно натиснути лівою

кнопкою миші на кнопку з позначенням "Ч" (яка знаходиться зліва від кнопки "Прийняти").

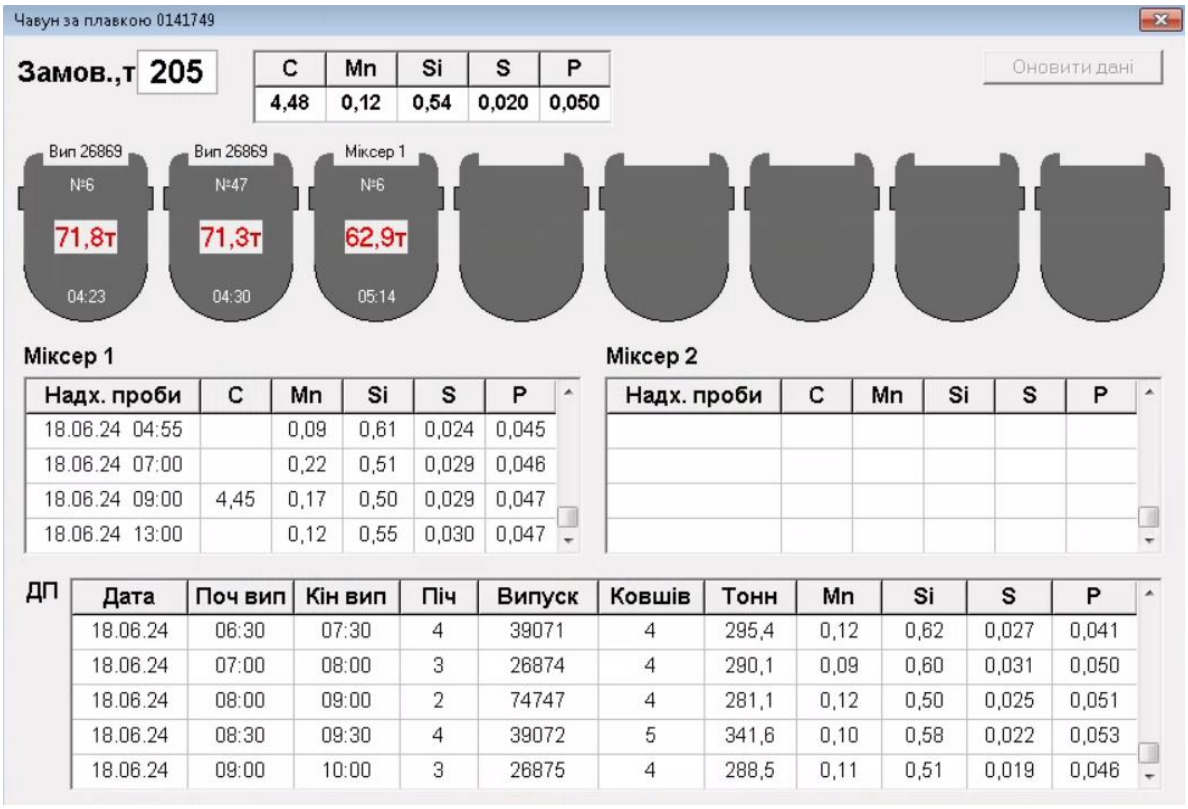


Рис. 1.5 - Форма перегляду даних про чавун

У верхній частині форми відображено схематичне зображення ковшів-чавуновозів у порядку їх черговості. Для кожного ковша вказано джерело чавуну, номер ковша, маса чавуну (нетто) та час наливання.

У таблицях для міксерів № 1 і № 2 зазначено дату і час отримання проби чавуну, а також відповідні дані хімічного аналізу по кремнію, марганцю, сірці та вуглецю.

Нижня таблиця містить основну інформацію про випуски чавуну з доменних печей: дата та час початку і завершення випуску, номер печі, номер випуску, кількість ковшів і хімічний склад чавуну [12].

РОЗДІЛ 2 ТЕРМОДИНАМІЧНА ТА ТЕПЛОВА МОДЕЛІ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ РІДКОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ВАННИ

2.1 Теплова модель системи «метал-шлак-газ»

Теплова модель системи «Метал-шлак-газ» є важливою складовою для оптимізації сталеплавильних процесів, оскільки дозволяє точно прогнозувати температурні зміни та динаміку енергетичних потоків у плавильних печах. Вона охоплює три основні фази: металеву, шлакову та газову, що взаємодіють у процесі плавки металу. Модель дозволяє розраховувати ключові параметри процесу, зокрема температуру, склад металу, шлаку та газів, ще до початку фактичних вимірювань, що значно покращує управління виробництвом.

Металева фаза у тепловій моделі характеризується основними параметрами, такими як температура металу, яка є критично важливою для визначення його властивостей та подальшої обробки. Модель враховує теплоту плавлення, теплопередачу та інші термодинамічні фактори, що дозволяють прогнозувати поведінку металу під час плавки.

Шлак у сталеплавильному процесі утворюється внаслідок окислення домішок металу, таких як вуглець, сірка та фосфор. Теплова модель цієї фази передбачає розрахунок температури шлаку, його хімічний склад та взаємодію з металом. Важливою є також здатність моделі визначати теплообмін між шлаком та металом, що впливає на ефективність процесу плавки.

Газова фаза, що складається з продуктів реакцій окислення, таких як оксид вуглецю (CO) та інші гази, має значний вплив на енергетичні витрати процесу. Модель прогнозує температуру газів, їхній склад і теплопередачу між газовими продуктами та іншими фазами. Це дозволяє не тільки точніше визначати енергетичні витрати, але й сприяє зменшенню викидів шкідливих газів.

Теплова модель системи «Метал-шлак-газ» інтегрується з іншими компонентами автоматизованої системи управління для сталеплавильного процесу, що дозволяє здійснювати реальний моніторинг та оперативне коригування технологічних параметрів на основі прогнозованих даних. Адаптація моделі до реальних умов виробництва забезпечує більш точне регулювання температури та складу матеріалів, що знижує енерговитрати, покращує якість продукції та зменшує виробничі витрати.

Важливою особливістю цієї моделі є можливість оперативного коригування прогнозних розрахунків на основі результатів експрес-аналізів. Це забезпечує більш точне управління параметрами плавки в реальному часі, дозволяючи оперативно реагувати на зміни у складі матеріалів та енергетичних потоках. Таким чином, теплові моделі системи «Метал-шлак-газ» є потужним інструментом для підвищення ефективності та стабільності сталеплавильного процесу.

2.1.1 Розв'язання векторного рівняння стану термодинамічної системи «метал-шлак-газ»

Зведення векторного рівняння стану термодинамічної системи «метал-шлак-газ» до системи трьох нелінійних рівнянь (2.1) дозволяє визначити шукані маси хімічних елементів у металі, шлаку та газі за фіксованих тиску і температури. Однак розподіл елементів між фазами значною мірою залежить від температури.

$$\begin{cases} F_1 = -\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i v_i A_i}{1+A_i+B_i} = 0 \\ F_2 = \frac{N}{1+\exp(Y)[1+\exp(-Z)]} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i A_i}{1+A_i+B_i} = 0 \\ F_3 = \frac{N}{1+\exp(Y)[1+\exp(-Y)]} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i B_i}{1+A_i+B_i} = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

де ΔH – зміна ентальпії системи «метал-шлак-газ»; $\Delta H=H(T)-H_0;H(T)$, H_0 – ентальпія системи відповідно в кінцевому та початковому станах; QL – теплові втрати.

Температура, у свою чергу, визначається тепловими ефектами хімічних реакцій, які супроводжують перерозподіл елементів між фазами, наприклад, при додаванні в систему окиснювачів або розкислювачів. Крім того, кінцева температура системи залежить від теплофізичних властивостей компонентів (стандартних ентальпій і теплоємностей) і визначається рівнянням теплового балансу.

Для знаходження рівноважного складу та кінцевої температури системи необхідно одночасно вирішувати рівняння матеріального та теплового балансу. Включення рівняння теплового балансу переводить температуру до переліку шуканих параметрів нарівні з масами хімічних елементів у фазах.

Таким чином, у загальному вигляді пряма задача формулється як розширене векторне рівняння стану термодинамічної системи «метал-шлак-газ» [16]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m},\bar{\mathbf{m}}_{[]},\bar{\mathbf{m}}_{()},\bar{\mathbf{m}}_{\{\}},p,T,\Delta Q)=\mathbf{0}, \tag{2.2}$$

де m – вектор мас елементів у системі; $\bar{\mathbf{m}}_{[]},\bar{\mathbf{m}}_{()},\bar{\mathbf{m}}_{\{\}}$ - шукані вектори рівноважних мас елементів у металі, шлаку та газовій фазі; p, T – тиск та температура в системі; ΔQ – кількість поглиненого або втраченого системою тепла з відповідним знаком.

Векторне рівняння стану (2.2) є системою рівнянь матеріального та теплового балансу термодинамічної системи «метал-шлак-газ», записаною в загальному вигляді. Згортка цієї системи до еквівалентної системи чотирьох рівнянь виконується аналогічно до згортки векторного рівняння до системи нелінійних рівнянь (2.1).

Додамо до системи рівнянь матеріального балансу рівняння теплового балансу. Тоді система чотирьох рівнянь, що виражають рівновагу в термодинамічній системі «метал-шлак-газ», запишеться так:

$$\begin{cases} F_1 = -\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i v_i A_i}{1+A_i+B_i} = 0 \\ F_2 = \frac{N}{1+\exp(Y)[1+\exp(-Z)]} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i A_i}{1+A_i+B_i} = 0 \\ F_3 = \frac{N}{1+\exp(Y)[1+\exp(-Y)]} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i B_i}{1+A_i+B_i} = 0 \\ F_4 = \Delta \mathrm{H} - \Delta Q = 0 \end{cases}, \quad (2.3)$$

де ΔH – зміна ентальпії системи «метал-шлак-газ»; $\Delta H = H(T) - H_0$;H(T), H_0 – ентальпія системи відповідно в кінцевому та початковому станах; Q_L – теплові втрати; Q_L – теплова енергія енергоносіїв.

Для ефективного розв’язання поставленої задачі використовують методи чисельного моделювання, які дозволяють врахувати:

1. Залежність теплових ефектів реакцій від складу фаз.
2. Нелінійність рівнянь, що описують фазовий розподіл.
3. Вплив додаткових факторів, таких як початкові умови системи (тиск, температура) і властивості залучених елементів.

Запропонований підхід дозволяє отримати як рівноважний розподіл мас елементів між фазами, так і кінцеву температуру системи, враховуючи всі суттєві параметри.

2.1.2 Система «метал-шлак»

Система «метал-шлак» визначає взаємодію між рідким металом і шлаком, що впливає на розподіл елементів, очищення металу та його властивості. У цій системі відбуваються:

- обмін елементами між фазами;
- окислювально-відновні реакції;
- формування складу металу та шлаку залежно від температури, хімічного потенціалу та властивостей компонентів.

Взаємодія цих процесів забезпечує рівновагу системи й оптимізацію характеристик металу.

За відсутності у системі газової фази система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} F_1 = -\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i v_i A_i}{1+A_i+B_i} = 0 \\ F_2 = \frac{N}{1+\exp(Y)} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i A_i}{1+A_i} = 0 \\ F_4 = \mathrm{H}(T) - H_0 + Q_L = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Системі відповідають смінні μ_e, Y, T та матриця Якобі:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \nu_i^2 \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \nu_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \nu_i \left(h_i^M - h_{(i)}^M\right) \\ \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \nu_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \frac{N_s^2}{N} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_{(i)}^2}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \left(h_i^M - h_{(i)}^M\right) \\ \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \nu_i \left(h_i^M - h_{(i)}^M\right) & \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \left(h_i^M - h_{(i)}^M\right) & C_P \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

2.1.3 Система «метал-газ»

За відсутності шлаку система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} F_3 = \frac{N}{1+\exp(Z)} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i B_i}{1+B_i} = 0 \\ F_4 = \mathrm{H}(T) - H_0 + Q_L = 0 \end{cases}. \quad (2.6)$$

Системі відповідають змінні Z,T та матриця Якобі:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{N_g^2}{N} - \sum_{i=1}^{k} \frac{n_{(i)}^2}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \left(h_i^M - h_{(i)}^M\right) \\ \sum_{i=1}^{k} n_{(i)} \left(h_i^M - h_{(i)}^M\right) & C_P \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

2.1.4 Рівняння теплового балансу

Останнє рівняння у системі (2.3)

$$F_4 = \Delta H - \Delta Q = H(T) - H_0 - Q_E + Q_L = 0 \qquad (2.8)$$

є рівнянням теплового балансу термодинамічної системи «метал-шлак-газ». Воно засноване на термохімічному законі Кіргофа, згідно з яким зміна ентальпії системи $\Delta H = H(T) - H_0$ при постійному тиску в ізобарному процесі дорівнює кількості поглиненого або втраченого системою тепла ΔQ з відповідним знаком, тобто різниця теплової енергії , що надійшла в системуу вигляді електроенергії та інших енергоносіїв Q_E та теплових витрат Q_L [17].

Для термічних сталеплавильних процесів, таких як кисневий конверторний, величина Q_E дорівнює нулю. Це означає, що процес не потребує зовнішнього додаткового тепла для підтримки високої температури. Висока температура забезпечується за рахунок тепла, що виділяється внаслідок хімічних реакцій окислення домішок металу та заліза, зокрема внаслідок взаємодії кисню з вуглецем, кремнієм, марганцем та іншими елементами. Ці екзотермічні реакції не тільки сприяють підвищенню температури, але й забезпечують ефективне очищення металу від шкідливих домішок, що покращує якість кінцевого продукту.

2.1.5 Ентальпія системи та її складових

У всіх розрахунках ентальпію системи та її складових обчислюємо одним із наступних еквівалентних способів (див., наприклад, [18]):

1) За рівнянням Гіббса-Гельмгольця: $H = G - T(\frac{\partial G}{\partial T})_P$; (2.9)

2) За рівнянням Вант-Гоффа: $H = (\frac{\partial(\frac{G}{T})}{\partial(\frac{1}{T})})_P$; (2.10)

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

3) За відомою активністю: $h_i^M = -RT^2(\partial(\frac{lna_i}{\partial T})_P$; (2.11)

4) За відомим коефіцієнтом активності: $h_i^M = R(\partial ln\gamma_i/\partial(\frac{1}{T}))_P$; (2.12)

Ентальпія та теплоємність змішування розраховуються відповідно до розроблених моделей багатокомпонентних розчинів у металевій [20,21] та шлаковій фазі [22]. З огляду на ефективність обчислень, переважним методом є чисельне диференціювання інтегральних та парціальних енергій Гіббса за температурою, за умови, що одержані значення точно збігаються з результатами аналітичних розрахунків до п’ятого знаку.

Таким чином, інтегральні та парціальні ентальпії обчислюються на основі енергії Гіббса та її похідних, що дозволяє точно врахувати енергетичні зміни в системі. Ентальпійна теплова модель, разом з відповідним рівнянням теплового балансу, є ключовими компонентами термодинамічної моделі, побудованої на методі хімічних потенціалів Гіббса. Це дозволяє інтегрувати теплові ефекти в процесах, таких як фазові переходи, хімічні реакції та зміни складу матеріалів, забезпечуючи більш точне моделювання та прогнозування поведінки системи в реальних умовах.

2.1.6 Ентальпія системи у кінцевому стані

У кінцевому стані система «метал-шлак-газ» з температурою Т має інтегральну ентальпію:

$$H(T) = H°(T) + H^M(T) = H_m(T) + H_s(T) + H_g(T), \quad (2.13)$$

де H°(T) – стандартна інтегральна ентальпія системи при температурі Т;

$H^M(T)$ – інтегральна ентальпія змішування системи при температурі Т;

$H_s(T), H_g(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевих металу, шлаку та газової фази при температурі Т.

Ентальпії металу, шлаку та газу складаються з ентальпій у стандартному стані та ентальпій змішування:

$$H_m(T) = H_m(T) + H_m^M(T); \quad (2.14)$$

$$H_s(T) = H_s^\circ(T) + H_s^M(T) \quad (2.15)$$

$$H_g(T) = H_g^\circ(T) + H_g^M(T); \quad (2.16)$$

де $H°_m(T), H_s^\circ(T), H_g^\circ(T)$ – інтегральні ентальпії фаз у стандартному стані;

$H_m^M(T), H_s^M(T), H_g^M(T)$ – інтегральні ентальпії змішування фаз.

Інтегральні стандарти ентальпії, у свою чергу, обчислюється через парціальні вилечини:

$$H_m^\circ(T) = \sum_{i=1}^k n_{[i]} h_{[i]}^\circ(T); \quad (2.17)$$

$$H_s^\circ(T) = \sum_{i=1}^k n_{(i)} h_{(i)}^\circ(T); \quad (2.18)$$

$$H_g^\circ(T) = \sum_{i=1}^k n_{\{i\}} h_{\{i\}}^\circ(T); \quad (2.19)$$

де $h_{[i]}^\circ(T)$, $h_{(i)}^\circ(T)$, $h_{\{i\}}^\circ(T)$ – парціальні стандартні ентальпії в металі, шлаку та газовій фазі при температурі Т.

Відповідно до єдиного стандартного стану $h_{[i]}^\circ = h_{(i)}^\circ = h_{\{i\}}^\circ = h_i^\circ$, тому

$$H^\circ(T) = H_m^\circ(T) + H_s^\circ(T) + H_g^\circ(T) = \sum_{i=1}^k \left[n_{[i]} h_{[i]}^\circ(T) + n_{(i)} h_{(i)}^\circ(T) + n_{\{i\}} h_{\{i\}}^\circ(T) \right] = \sum_{i=1}^k n_i h_i^\circ(T), \quad (2.20)$$

де n_i – числа молей і-го елемента в системі; $h_i^\circ(T)$ – парціальна стандартна ентальпія і-го елемента в будь-якій фазі.

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

$$H^M(T) = H_m^M(T) + H_s^M(T) + H_g^M(T) = \sum_{i=1}^k \left[n_{[i]} h_{[i]}^M(T) + n_{(i)} h_{(i)}^M(T) + n_{\{i\}} h_{\{i\}}^M(T) \right], \quad (2.21)$$

2.1.7 Ентальпія системи у початковому стані

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

$$H_0 = H_0^{\circ} + H_0^{\text{M}} = H_{ms0}(T_0) + \sum_{j=1}^{M} H_j\,(T_j), \qquad (2.22)$$

де H_0° - інтегральна стандартна ентальпія системи у початковому стані;

H_0^{M} - інтегральна ентальпія змішування системи у початковому стані;

$H_{ms0}(T_0)$ - інтегральна ентальпія підсистеми початкових металу та шлаку, що мають температуру T_0;

$H_j(T_j)$ - інтегральна ентальпія 1-го матеріалу з температурою T_j.

При обчисленні термодинамічних функцій початкового стану підсистеми «метал-шлак» кожен матеріал розглядається як незалежна термодинамічна система в загальному випадку, при цьому компоненти системи «метал-шлак-газ» не обов'язково перебувають у рівновазі. У деяких випадках, для спрощення розрахунків, можна розглядати початкові метал і шлак як єдиний матеріал з фіксованою масою, що дозволяє сконцентрувати увагу на термодинамічних функціях системи в цілому.

Термодинамічні функції початкових металу та шлаку обчислюються подібно до функцій кінцевого стану, але на основі заданої температури. При цьому важливо враховувати, що при високих температурах компоненти можуть бути в різних фазах (рідкій, твердій чи газоподібній), що впливає на зміну ентальпії, вільної енергії та інших термодинамічних параметрів.

Для підсистеми «метал-шлак» розрахунок ентальпії здійснюється через суму ентальпій кожного компонента. Це дозволяє отримати загальну характеристику енергетичного стану підсистеми. Важливо відзначити, що на початкових етапах плавки метал і шлак можуть перебувати в різних фазах і не знаходитися в рівновазі, що ускладнює розрахунки. Тому необхідно враховувати динамічні зміни температури, складу та енергії в процесі плавки,

що дозволяє більш точно моделювати термодинамічні функції системи «метал-шлак-газ».

Для інтегральної стандартної ентальпії підсистеми «метал-шлак» маємо:

$$H_j^\circ = \sum_{i=1}^{k}\left[n_{[y]}h_{[i]}^\circ(T_j) + n_{(y)}h_{(i)}^\circ(T_j) + n_{\{y\}}h_{\{i\}}^\circ(T_j)\right] = \sum_{i=1}^{k} n_{ij}h_i^\circ(T_j) \qquad (2.23)$$

Тут парціальні стандартні ентальпії мають той самий сенс, що й підсистеми «метал-шлак».

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

$$H_j^M = \sum_{i=1}^{k}\left[n_{[y]}h_{[i]}^M(T_j) + n_{(y)}h_{(i)}^M(T_j) + n_{\{y\}}h_{\{i\}}^M(T_j)\right] \qquad (2.24)$$

Для і-го матеріалу у твердому стані стандартна ентальпія обчислюється наступним чином:

$$H_j^\circ = \sum_{i=1}^{k}\left[n_{[y]}h_{[i]}^{℃}(T_j) + n_{(y)}h_{(i)}^{℃}(T_j)\right] = \sum_{i=1}^{k} n_{ij}h_i^{℃}(T_j) \qquad (2.25)$$

де $h_{[i]}^{℃}(T_j)$, $h_{(i)}^{℃}(T_j)$ - парціальні стандартні ентальпії і-го елемента в металевій та неметалевій частинах.

2.1.8 Розразунок стандартних ентальпій фаз та матеріалів

Розрахунок стандартних ентальпій фаз і матеріалів здійснюється на основі припущення, що внесок окремих елементів в ентальпію металевої, неметалевої та газової фаз є адитивним. У неметалевій фазі елементи з позитивною валентністю зазвичай розглядаються як частина оксидів, що також відображає їх роль у процесах окислення.

Температурний інтервал для обчислення ентальпії конденсованих фаз умовно поділяється на дві області: низькотемпературну та високотемпературну. Поділ здійснюється через температуру фазового перетворення, найчастіше температуру плавлення. Залежно від фактичної температури матеріалів, ентальпія завантажуваних компонентів обчислюється в одній з цих областей. Ентальпія розплавленого металу та шлаку визначається тільки в високотемпературній області, незалежно від температури плавлення чистих металів або їх оксидів. Це обумовлено тим, що в розплавах завжди є енергія, необхідна для руйнування кристалічних решіток, що не залежить від того, чи відбулося пряме плавлення чи розчинення металу (оксиду). Тому високотемпературні залежності ентальпії $H_m(T)$ та $H_s(T)$ екстраполюються в область робочих температур розплавів.

Низькотемпературні залежності ентальпій для більшості матеріалів можна апроксимувати квадратичними поліномами, з точним підходом до температури 298,15 К. Це дозволяє мінімізувати похибки при розрахунках, оскільки більшість матеріалів завантажуються при стандартних умовах. Водночас високотемпературні залежності $H_m(T)$, $H_g(T)$ та $H_s(T)$ добре апроксимуються лінійними рівняннями, що дає змогу точніше передбачати зміни ентальпії при високих температурах.

Часто в термохімічних таблицях індивідуальних речовин та їх сполук наводяться величини теплового вмісту на певній температурі, зазвичай 7°C, що являє собою різницю між стандартними ентальпіями H(T) та H(298,15). Це важливе значення для точних розрахунків енергетичних характеристик матеріалів у різних умовах, оскільки різниця між стандартними ентальпіями забезпечує можливість коректного прогнозування енергетичних процесів в умовах виробництва.

До цього можна додати, що точність таких розрахунків значною мірою залежить від точності даних про властивості матеріалів у різних фазах. У зв'язку з цим, постійне оновлення термохімічних таблиць та вдосконалення моделей термодинамічних функцій є необхідними для забезпечення високої

точності прогнозування та оптимізації технологічних процесів в металургії та інших галузях.

2.1.9 Тепловий ефект хімічних реакцій

Тепловий ефект хімічних реакцій, узгоджений із термодинамічною моделлю, був розрахований в роботах [21; 22]. Цей ефект дорівнює зміні ентальпії змішування системи із зворотним знаком:

$$Q_r = -\Delta H^M = H_0^M - H^M(T) \tag{2.26}$$

Слід враховувати, що отриманий вираз можна обчислити лише за відомих кінцевого складу і температури системи, тобто після або під час вирішення прямої задачі, а не до її вирішення.

У багатьох відомих теплових моделях, зокрема в роботах, таких як [23], тепловий ефект хімічних реакцій обчислювався як сума теплот реакцій окислення, що розглядалися як окрема стаття в тепловому балансі. Однак в аналізованому підході немає необхідності окремо записувати хімічні реакції або виділяти величину тепла, пов'язану з конкретною реакцією Qr. Це тепло неявно включається в рівняння теплового балансу, що дозволяє спростити розрахунки і зменшити складність моделювання.

Цей підхід дає змогу здійснювати більш ефективний і інтегрований аналіз термодинамічних процесів, де всі впливи хімічних реакцій враховуються через загальні зміни в тепловому балансі, без необхідності окремо враховувати кожну реакцію. Таким чином, модель стає більш гнучкою і зручнішою для застосування в реальних умовах, особливо в процесах, де багато хімічних реакцій взаємодіють одночасно. (2.8).

2.1.10 Теплові ефекти матеріалів

Залежно від поточного стану системи «метал-шлак-газ», теплові ефекти матеріалів, що використовуються при виплавці, розкисленні, легуванні та позапічній обробці сталі, можуть бути як позитивними, так і негативними. Це означає, що введення в розплав певних матеріалів може призводити як до підвищення, так і до зниження температури розплаву. Теплові ефекти матеріалів, зокрема феросплавів, обумовлені складною взаємодією елементів, що входять до їх складу, з рідкою сталлю та шлаком. Основними складовими цієї взаємодії є:

1. Поглинання фізичного тепла розплаву матеріалом, що вводиться в систему, з навколишнього середовища. Цей ефект може мати як позитивний, так і негативний характер, залежно від температури і теплових властивостей матеріалу.

2. Неідеальність багатокомпонентного металевого розчину. Відхилення від закону Рауля можуть призвести як до поглинання, так і до виділення теплоти. Наприклад, розплави заліза з алюмінієм та кремнієм мають значне відхилення від цього закону, і додавання матеріалів з такими елементами дає значний позитивний тепловий ефект, незалежно від ступеня окиснення системи [18; 34].

3. Взаємодія елементів з розчиненим у рідкому металі киснем, що призводить до утворення оксидної фази, тобто до процесу розкислення. Цей ефект значною мірою залежить від ступеня окиснення системи «метал-шлак-газ». Для окислених систем, зокрема для кремній- та алюмінійвмісних матеріалів, цей процес часто супроводжується значним екзотермічним ефектом, що може істотно впливати на температуру розплаву [26].

Ці три складові теплової взаємодії мають важливе значення при виборі матеріалів для оптимізації процесів сталеплавильного виробництва та досягнення бажаних характеристик сталі, зокрема її складу, температури та якості.

У загальному випадку тепловий ефект визначається приватною похідної температури системи «метал-шлак-газ» T щодо маси M

матеріалу,що витрачається, щодо витраченої електроенергії або щоо шлаку. Для матеріалутепловий ефект має розмічність [К/кг]або [К/т] та виначається виразом:

$$W = \partial T / \partial M \tag{2.27}$$

Часто витрату матеріалів визначають відносно маси рідкого металу M_m. В цьому випадку тепловий ефект має розмірність [К/(кг/т)] і визначається приватною похідною щодо питомої маси матеріалу:

$$W = \partial T / \partial (\frac{M}{M_m}) \tag{2.28}$$

Визначення теплового ефекту матеріалу за формулами (2.27) або (2.28) с нетривіальним завданням. Для цього необхідно неявно продиференціювати систему рівнянь матеріального та теплового балансів (2.3) за масою даного матеріалу M_j [26]:

$$\begin{bmatrix} \partial \mu_e / \partial M_j \\ \partial Y / \partial M_j \\ \partial Z / \partial M_j \\ \partial T / \partial M_j \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial M_j \\ \partial F_2 / \partial M_j \\ \partial F_3 / \partial M_j \\ \partial F_4 / \partial M_j \end{bmatrix}, \tag{2.29}$$

де F_1, F_2, F_3, F_4 – ліві частини системи рівнянь (2.3)

J – функціональна матриця Якобі системи рівнянь (2.3), яка виражається виразом (2.4).

Аналітичний вираз для парціальних ентальній, що входять у вираз для матриці Якобі (2.3), існує тільки для металу та шлаку [20-22]. Тому доцільно визначати їх чисельним диференціюваниям парціальної енергії Гіббса кожної

із фаз, включаючи газову, щодо температури, використовуючи рівняння Гіббса- Гельмгольц (2.29)

Вектор похідних за масами матеріалів у правій частині (2.29) визначається виразом, отриманим диференціюванням складної функції за кількістю молей кожного хімічного елемента в системі:

$$\begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial M_j \\ \partial F_2 / \partial M_j \\ \partial F_3 / \partial M_j \\ \partial F_4 / \partial M_j \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{k} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial n_i} \frac{\partial n_i}{\partial M_j} = \sum_{i=1}^{k} \begin{bmatrix} \frac{n_{(i)} v_i}{n_i} \\ \frac{n_{(i)}}{n_i} - \frac{N_s}{N} \\ \frac{n_{(i)}}{n_i} - \frac{N_g}{N} \\ h_i^M - H_j^M \end{bmatrix} \frac{B_{ij}}{A_i}, \tag{2.30}$$

де B_{ij} – масова частка і-го хімічного елемента в j-му матеріалі;

H_j^M – мольна ентальпія j-го матеріалу;

h_i^M – парціальна мальна ентальпія і-го елемента в системі, що визначається виразом (2.5);

A_i – атомна маса і-го хімічного елемента.

Отримані формули дозволяють не лише визначати теплові ефекти матеріалів, але й оцінювати їх вплив на фазовий і хімічний склад системи «метал-шлак-газ». Це відбувається внаслідок перерозподілу хімічних елементів між компонентами системи. Крім того, ці ж формули застосовуються для вирішення зворотної задачі, що полягає в розрахунках температурних обмежень та коригуванні хімічного складу металу та шлаку, з урахуванням специфічних вимог процесу. Це дозволяє з високою точністю прогнозувати поведінку матеріалів у різних технологічних умовах і оптимізувати параметри процесу плавки та очищення..

2.1.11 Розрахунок кінцевої температури системи

Кінцевою температурою системи є температура T, за якої виконується рівняння теплового балансу (2.7). Нехай система знаходиться поблизу

кінцевої температури за температури $\tilde{T}$, але рівняння теплового балансу не виконано: $F(\tilde{T}) \neq 0$. Завдання полягає у знаходженні кінцевого прирощення ΔT, такого, щоб$T = \tilde{T} + \Delta T$. Розкладемо рівняння теплового балансу (2.7) у лінійний ряд Тейлора за температурами поблизу точки $\tilde{T}$:

$$F(T) = F\left(\tilde{T}\right) + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)\left(T - \tilde{T}\right) = 0, \tag{2.31}$$

З якого отримаємо, що

$$\Delta T = T - \tilde{T} = -\frac{\frac{F(\tilde{T})}{\partial F}}{\partial T} = -\frac{F(\tilde{T})}{\frac{\partial (H(T) - H_0)}{\partial T}} = -F(\tilde{T})/C_p(\tilde{T}), \tag{2.32}$$

де $C_p(\tilde{T})$ – повна телоємність системи «метал-шлак-газ).

Таким чином, кінцева температура системи визначається за формулою:

$$T = \tilde{T} + \Delta T = \tilde{T} - F(\tilde{T})/C_p(\tilde{T}). \tag{2.33}$$

Ряд послідовних наближень дозволяє визначити кінцеву температуру з необхідною точністю, за умови, що зміна температури незначно впливає на розподіл елементів між фазами. Як перше наближення доцільно використовувати початкову температуру металу та шлаку, що спрощує початковий етап розрахунків.

У загальному випадку для точного визначення кінцевої температури застосовується рівняння теплового балансу прямої задачі. Однак, якщо обурюючі чинники, такі як завантаження матеріалів, подача електроенергії або теплові втрати, є незначними, а зміна температури ΔT мала, кінцеву температуру можна розрахувати за допомогою спрощеної формули.

Цей підхід ефективний для стабільних процесів, де взаємний вплив температури та фазового розподілу елементів мінімальний. У разі складніших умов необхідно розширити аналіз, враховуючи взаємозалежність теплових ефектів та фазового складу системи, щоб досягти максимальної точності розрахунків.

2.2 Термодинамічна модель високотемпературної реакційної зони рідкої сталеплавильної ванни

Дослідження високотемпературних реакційних зон (ВРЗ) у сталеплавильних процесах із продуванням киснем мають ключове значення як з теоретичної, так і з практичної точки зору. Вони визначають розвиток нових технологій і систем, що підвищують ефективність виробництва сталі, зокрема в конвертерних процесах або двохванних сталеплавильних агрегатах.

Концепція реакційних зон базується на принципі квазілокальної рівноваги, яка використовується для опису нерівноважних процесів, що виникають під час взаємодії матеріалів у рідкій ванні. Цей підхід є альтернативою розв’язанню системи кінетичних рівнянь, які визначають вміст хімічних елементів у металі, шлаку і газовій фазі. Важливим аспектом у вивченні реакційних зон є їхня межа та обсяг, що часто змінюються через динамічний характер сталеплавильних процесів. Це вимагає детального поділу зони на дрібніші структурні елементи з постульованою сталістю окремих параметрів.

Невід’ємною складовою цих досліджень є аналіз фазових рівноваг. Наприклад, існуючі діаграми стану для систем "залізо-кисень" або "залізо-кисень-домішковий елемент" недостатньо описують поведінку при температурах понад 2000 °C. Дані про тиск і склад газової фази за таких умов часто відсутні, що ускладнює точне моделювання процесів.

Також важливим є розрахунок взаємодії різних систем, таких як "метал-шлак-газ", які мають різні температури. У цьому контексті особливу увагу приділяють матеріальному і ентальпійному тепловому балансу, враховуючи хімічну взаємодію компонентів. Ключовим критерієм правильності таких розрахунків є відповідність результатів рівноважного стану всієї системи незалежно від обраної траєкторії технологічного процесу.

Термодинамічна рівновага в сталеплавильній системі описується інтегральними змінними, такими як енергія Гіббса, ентальпія та ентропія, які не залежать від траєкторії. У реальних умовах системи часто не досягають повної рівноваги через втрати речовини в газову фазу або низьку швидкість

тепло- і масообміну між фазами. Незважаючи на це, приведення системи до рівноважного стану з урахуванням втрат у газову фазу повинно давати однакові результати для будь-якої траєкторії процесу. Це забезпечує узгодженість розрахунків і дозволяє більш точно проектувати сталеплавильні процеси, покращуючи їхню ефективність і стабільність.

Таким чином, комплексний підхід до аналізу високотемпературних реакційних зон є основою для розвитку сучасних технологій, які забезпечують високоякісне виробництво сталі та зменшення витрат на її отримання.

2.2.1 Системи залізо-кисень, залізо-кисень-вуглець. Методика дослідження

Термодинамічний аналіз фізико-хімічних процесів у високотемпературній реакційній зоні рідкої сталеплавильної ванни під час її продування киснем є важливим етапом дослідження сталеплавильних процесів. Модельна система включає основні елементи: залізо, кисень та вуглець, які визначають основні закономірності хімічних перетворень у ванні.

Домішки, такі як кремній, марганець, сірка та фосфор, що неминуче присутні у реальних умовах, мають суттєвий вплив на хімічну взаємодію, фазові рівноваги та кінцеву якість сталі. Аналіз їхньої поведінки та механізмів видалення, зокрема через газову фазу, є важливим для розуміння ефективності процесів очищення та досягнення необхідних характеристик металу. Ці аспекти розглядаються в контексті оцінки впливу кожного з цих елементів на енергетичний баланс і міжфазну взаємодію в системі "метал-шлак-газ".

Особливу увагу приділяють механізмам окислення вуглецю, утворенню газових сполук і взаємодії оксидів із домішковими елементами, які суттєво впливають на склад і властивості шлаку, а також на втрати елементів через газову фазу. Аналіз таких процесів дозволяє не лише

моделювати поведінку системи, а й розробляти технології, які сприяють зниженню енерговитрат і втрат сировини.

Термодинамічний підхід до вивчення сталеплавильних процесів забезпечує глибоке розуміння їхньої сутності, дозволяючи вдосконалювати технології очищення сталі, покращувати якість кінцевого продукту та оптимізувати енерговитрати. Це сприяє підвищенню ефективності виробництва та стійкості сучасних металургійних процесів.

Універсальним інструментом дослідження високотемпературних реакційних зон (ВРЗ) є метод хімічних потенціалів Гіббса [11], реалізований у дослідницькому програмному комплексі «*Excalibur*» [23-25]. У цій програмі використовуються термодинамічні моделі багатокомпонентних конденсованих фаз для рідкого металу [20; 21] та шлаку [22]. З її допомогою моделюється високотемпературна реакційна зона навколо струменя кисню в рідкій сталеплавильній ванні. Передбачається, що загальний вміст кисню у ВРЗ є величиною, пропорційною інтенсивності продування киснем рідкої ванни.

При інтенсивності продування 4-5 м³/(т·хв) втрати заліза в газову фазу становлять 1-1,5% [26], що відповідає загальному вмісту кисню у ВРЗ на рівні 15-16%. У реальних умовах виробництва ця відповідність визначається шляхом адаптивного розрахунку, який враховує численні технологічні фактори на основі даних балансових плавок.

Середня початкова температура металу для моделювання становить 1500 °С, що відповідає стану, коли система "метал-шлак" уже сформована. Початковий вміст вуглецю в металі ВРЗ варіюється в межах від 0 до 4%, а загальний вміст кисню – від 0 до 18%. Початкова маса металу у ВРЗ у розрахунках приймалася рівною 100 т. Процеси у ВРЗ вважаються автотермічними, тобто такими, що відбуваються без зовнішніх джерел тепла або підведення енергоносіїв.

Для повнішого опису процесів у зоні нижнього продування враховується додатковий феростатичний тиск, який може досягати 100-200

кПа залежно від глибини рідкого металу на певному етапі плавки та конструктивних особливостей сталеплавильного агрегату. Збільшення тиску створює специфічні умови для перенесення маси та тепла, що впливає на кінетику реакцій і ефективність вилучення домішок.

Додатково слід зазначити, що модельні розрахунки, виконані на основі комплексу «*Excalibur»*, дозволяють не лише оцінювати втрати елементів і розподіл компонентів, але й формувати рекомендації щодо оптимізації параметрів продування, зокрема інтенсивності подачі кисню та конфігурації струменя. Це є важливим етапом вдосконалення сталеплавильних технологій, спрямованих на зниження витрат і покращення якості кінцевого продукту.

2.2.1.1 Температура реакційної зони

На рисунку 2.1 наведено результати розрахунків температури ВРЗ залежно від вмісту в ній кисню та початкового вмісту вуглецю в рідкому металі.

Рисунок 2.1 наочно демонструє, що збільшення інтенсивності продування має свої обмеження і не дозволяє довільно підвищувати температуру високотемпературної реакційної зони (ВРЗ), а також загальну температуру сталеплавильної ванни. Як видно з графіка, максимальна температура ВРЗ обмежена верхньою межею, що відповідає чорній кривій для системи Fe-O без вмісту вуглецю.

За умов, коли загальний вміст кисню у системі досягає 15-20%, температура у ВРЗ встановлюється на рівні 2928 °C, при цьому в зоні утворюється високотемпературна нонваріантна рівновага. У такому стані подальше збільшення вмісту кисню не спричиняє змін ані температури, ані хімічного складу фаз у системі. Цей ефект зумовлений термодинамічними обмеженнями, які визначають баланс між виділенням тепла від реакцій і розподілом елементів між фазами.

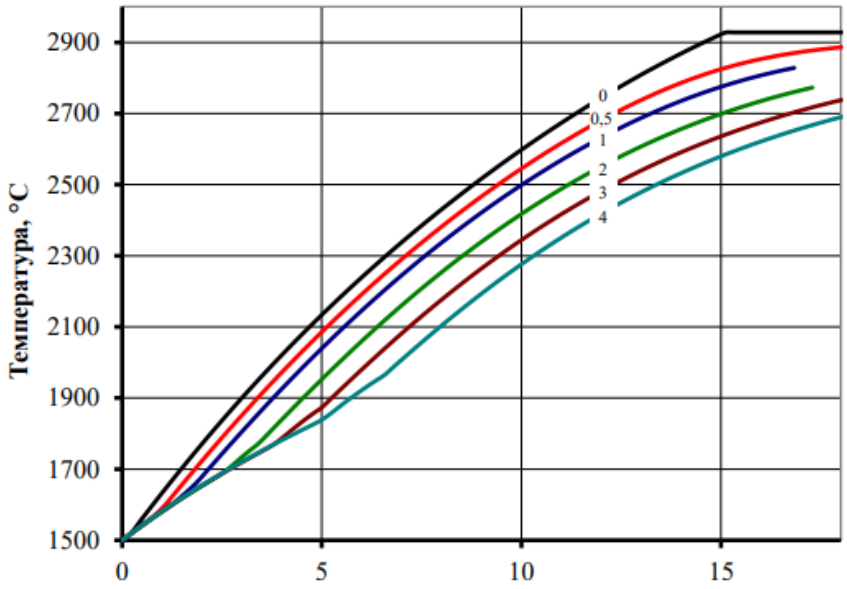


Рисунок 2.1 – вплив загального вмісту кисню у ВРЗ та початкового вмісту вуглецю в рідкому металі (цифри кривих мас.%) на температуру реакційної зони

Така особливість процесу є важливою для оптимізації сталеплавильних технологій, оскільки вона вказує на необхідність враховувати межі впливу кисневого продування для досягнення максимальної ефективності процесу без перевитрати ресурсів або погіршення якості металу.

Практично горизонтальна ділянка безвуглецевої (чорної) кривої на рис. 3.1 є раніше невідомим елементом фазової діаграми «залізо-кисень». При збільшенні загального вмісту кисню в безвуглецевій ВРЗ понад 15% починається виділення газової фази, основними компонентами якої є молекули Fe, FeO, O, O_2, FeO_2, та O_3 (у порядку зменшення парціального тиску). Це супроводжується зменшенням маси металевої фази та зростанням маси шлаку, що складається переважно з оксиду заліза.

Горизонтальна ділянка демонструє, що підвищення початкової температури металу понад 1500 °С має такий самий ефект, як і збільшення кисню у ВРЗ: відбувається перерозподіл мас фаз за незмінності їхнього хімічного складу та температури. При досягненні загального вмісту кисню в системі 20% спостерігається повне окиснення металу, після чого в системі

залишаються тільки шлак і газова фаза. Подальше збільшення кисню призводить до незначного підвищення температури, яка перевищує 2928 °С.

Для реакційних зон, що містять вуглець, температура зростає пропорційно загальному вмісту кисню до моменту повного вигоряння вуглецю до слідових концентрацій, що чітко видно на графіку рис. 3.6. Після цього характер кривої змінюється, наближаючись до безвуглецевого сценарію.

Підсумуючи усе вищезазначене, можемо зробити такий висновок: горизонтальна ділянка чорної кривої та її властивості вказують на обмеження в досягненні вищих температур шляхом збільшення вмісту кисню. Для ВРЗ з вуглецем досягнення більш високих температур залежить від вигоряння вуглецю. Ці закономірності є ключовими для розробки сталеплавильних технологій, оскільки дозволяють ефективно контролювати температурні режими та хімічний склад фаз у процесі продування киснем.

2.2.1.2 Вміст кисню у металі реакційної зони

На рис. 2.2 показано залежність вмісту кисню в металі від загального вмісту кисню у високотемпературній реакційній зоні (ВРЗ) та початкового вмісту вуглецю в металі. Ця залежність відповідає зміні температури системи, представленій на рис. 3.1. Максимальна розчинність кисню в металі при температурі 2928 °С становить 9,67%. При досягненні цього рівня вмісту кисню у безвуглецевій системі на графіку спостерігається горизонтальна ділянка, аналогічна тій, що характеризує температурний режим системи в стані нонваріантної рівноваги.

Для ВРЗ, що містять вуглець, криві на графіку лежать нижче за безвуглецеву криву, що відповідає нижчим температурам системи. Це зумовлено процесами окислення вуглецю, які знижують температуру системи через поглинання енергії під час хімічних реакцій.

Графік наочно демонструє, що вміст кисню в металі сильно залежить від початкової концентрації вуглецю: що більше вуглецю в металі, то

нижчою є концентрація кисню при досягненні термодинамічної рівноваги. Цей ефект зменшується із вигорянням вуглецю до слідових концентрацій, після чого характер кривих починає наближатися до безвуглецевої системи.

Такі залежності дозволяють чітко оцінювати взаємодію кисню та вуглецю в металі, забезпечуючи основу для точного управління хімічним складом сталі та температурними режимами в процесі сталеплавлення.

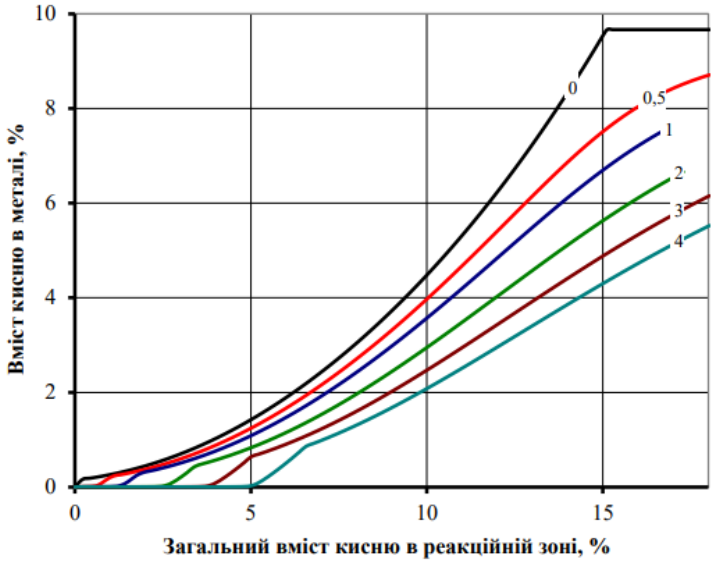
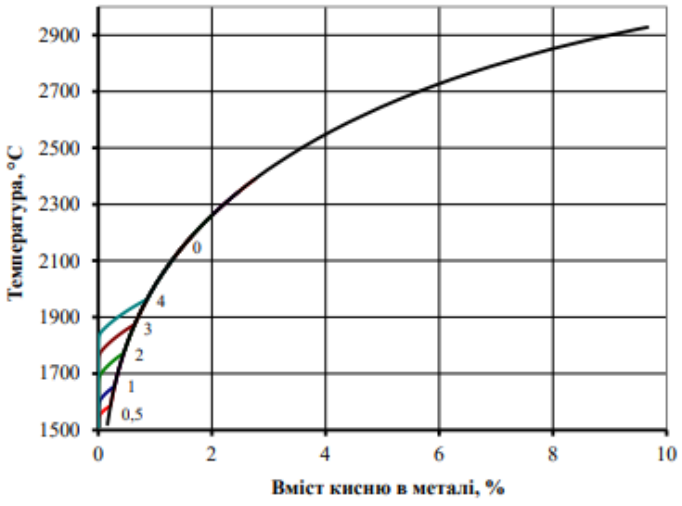


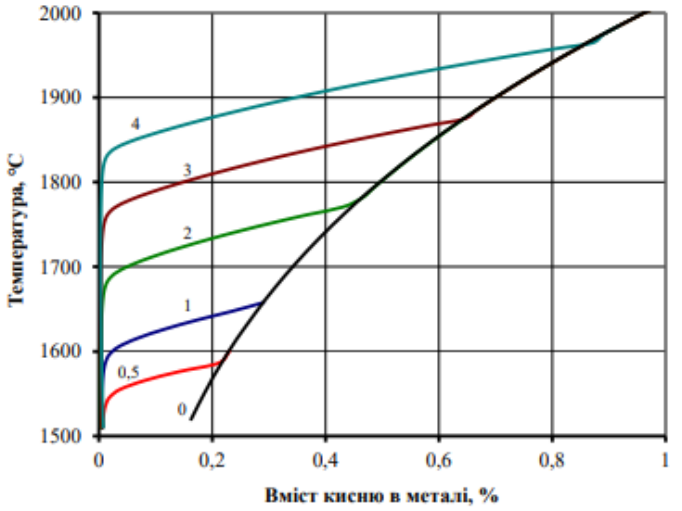
Рисунок 2.2 – Вплив загального вмісту кисню у ВРЗ та початкового вмісту вуглевю в рідкому металі (цифри у кривих мас.%) на вміст кисню в металі реакційної зони

2.2.1.3 Розчинність кисню у залізі як функція температури

Якщо представити дані тих же графіків (рис. 2.1 і 2.2) в координатах «X- вміст кисню в металі» і «Y температура», то стане очевидним, що вже при вмісті кисню в металі 1% практично весь вуглець йде в газову фазу і всі криві зливаються в одну криву криву розчинності кисню в залізі до граничної точки, що відповідає температурі системи 2928 °C. Ця залежність представлена на рис. 2.3. В інтервалі температур до 1800 °C точки безвуглецевої (чорної) кривої відповідають експериментальним даним Фонтани-Чіпмана [27].



а)



б)

Рисунок 2.3 – Розчинність кисню в залізі в залежності від температурипочаткового вмісту вуглецю в металі (цифри у кривих мас.%, у масштабі [O] 10% (а) і 1% (б)

2.2.1.4 Кратність шлаку та газової фази реакційної зони

На рис. 2.4 представлено залежність співвідношення маси шлаку та газової фази до маси металу в залежності від загального вмісту кисню у високотемпературній реакційній зоні (ВРЗ). Згідно з даними рис. 2.4, а, утворення оксидного шлаку при збільшенні вмісту вуглецю в металі ВРЗ відбувається за вищого загального вмісту кисню. Вуглецевмісні ВРЗ демонструють помітні відхилення кривих розчинності кисню порівняно з безвуглецевими ВРЗ, що підтверджується графіками на рис. 2.3 і 6. Точки

перетину кривих для ВРЗ з вуглецем і безвуглецевої кривої відповідають початку формування оксидного шлаку після практично повного окиснення вуглецю та його переходу в газову фазу.

Як видно з рис. 2.4, 6, у безвуглецевій ВРЗ газова фаза починає утворюватися лише при загальному вмісті кисню понад 15%. У той же час, для ВРЗ, що містять вуглець, формування газової фази спостерігається вже за будь-якого, навіть мінімального, вмісту кисню. При низькому вмісті кисню, а отже і за відносно низьких температур, газова фаза складається переважно з оксиду вуглецю (CO) і діоксиду вуглецю (CO_2). Підвищення вмісту кисню у ВРЗ понад 5% призводить до збільшення вмісту заліза в газовій фазі, що видно на рис. 2.5, а.

Результати дослідження вказують на те, що початок формування газової та шлакової фаз у ВРЗ значною мірою визначається вмістом вуглецю та кисню. Ці залежності є важливими для управління складом газової фази і шлаку, що, своєю чергою, впливає на кінцеву якість сталі та ефективність процесу сталеплавлення.

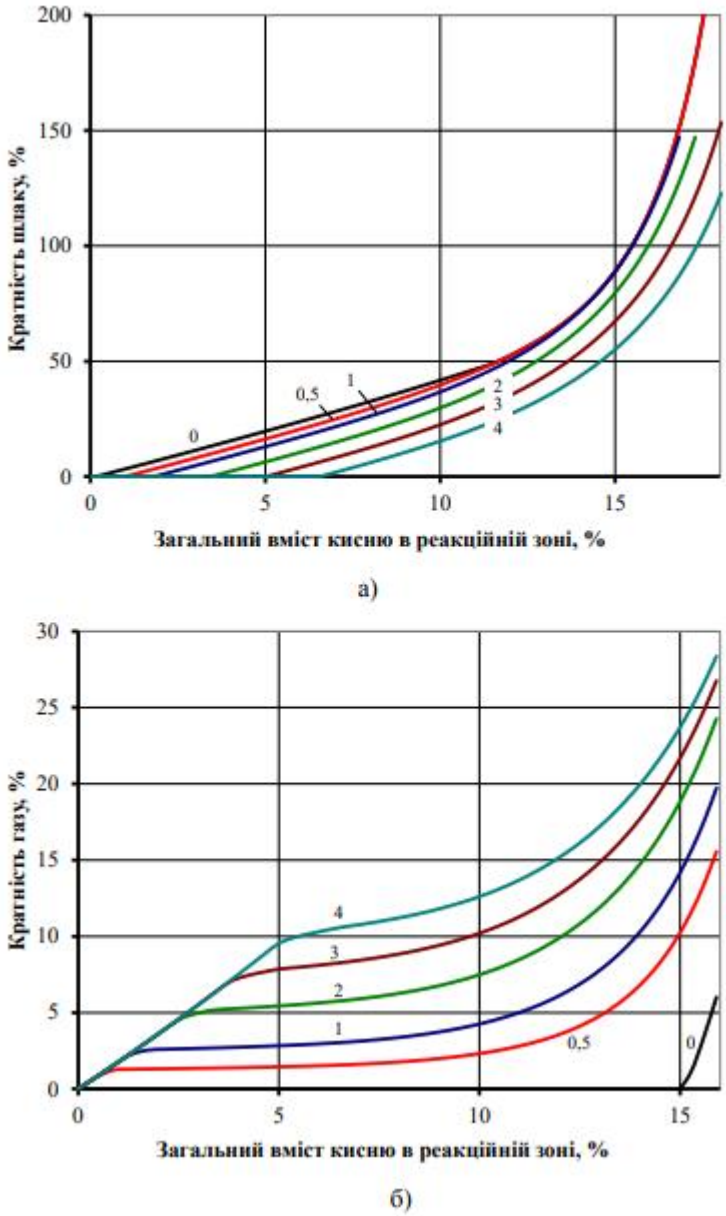


Рисунок 2.4 – Вплив загального вмісту та початкового вмісту вуглецю в металі (цифри у кривих у мас.%) на кратність шлакової (а) та газової (б) фаз ВРЗ відносно металу

Для реакційних зон (ВРЗ), що містять вуглець, кратність газової фази зростає пропорційно до загального вмісту кисню в інтервалі від 0 до 5%. У цей період відбувається активне окиснення вуглецю, що супроводжується його вигорянням до слідових концентрацій. Така динаміка подібна до зміни температури системи, як це показано на рис. 2.1.

Після вигоряння вуглецю інтенсивність виділення газової фази тимчасово знижується через зменшення кількості реакцій окиснення, що

супроводжуються викидом газових продуктів. Однак після досягнення загального вмісту кисню у ВРЗ понад 10% процес утворення газової фази знову прискорюється через активне формування молекул оксидів заліза, кисню та інших компонентів.

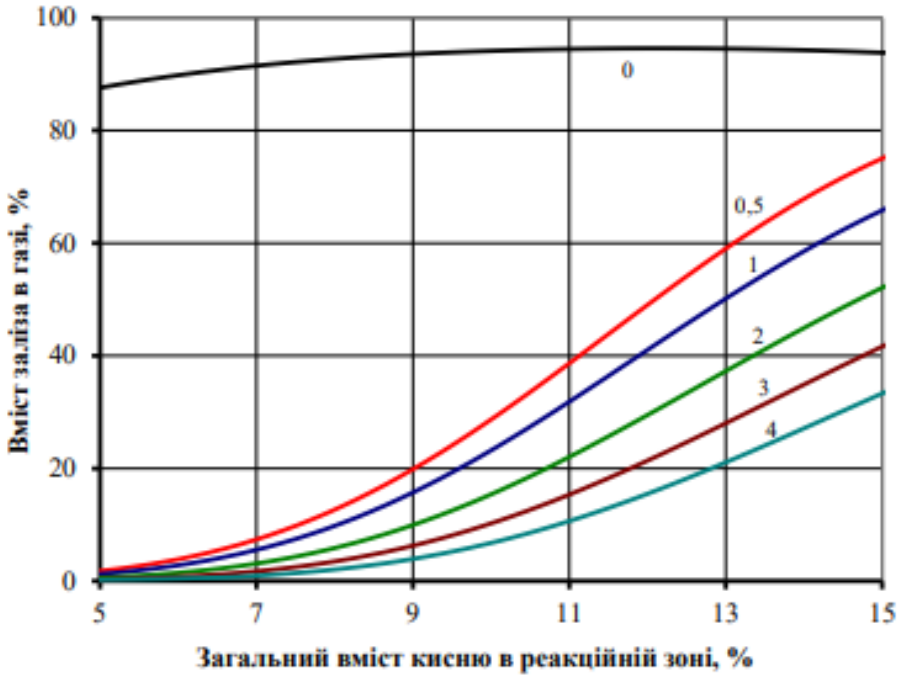
Аналіз показує, що наявність вуглецю у ВРЗ істотно впливає на інтенсивність утворення газової фази. Вуглець є основним генератором газових продуктів у початковій стадії процесу, однак після його вигоряння активне виділення газової фази продовжується за рахунок взаємодії інших компонентів, таких як залізо та кисень. Це підкреслює важливість оптимального регулювання вмісту вуглецю й кисню для забезпечення керованого перебігу хімічних реакцій і стабільності температурного режиму у сталеплавильних процесах.

2.2.1.5 Вміст заліза та вуглецю в газовій фазі

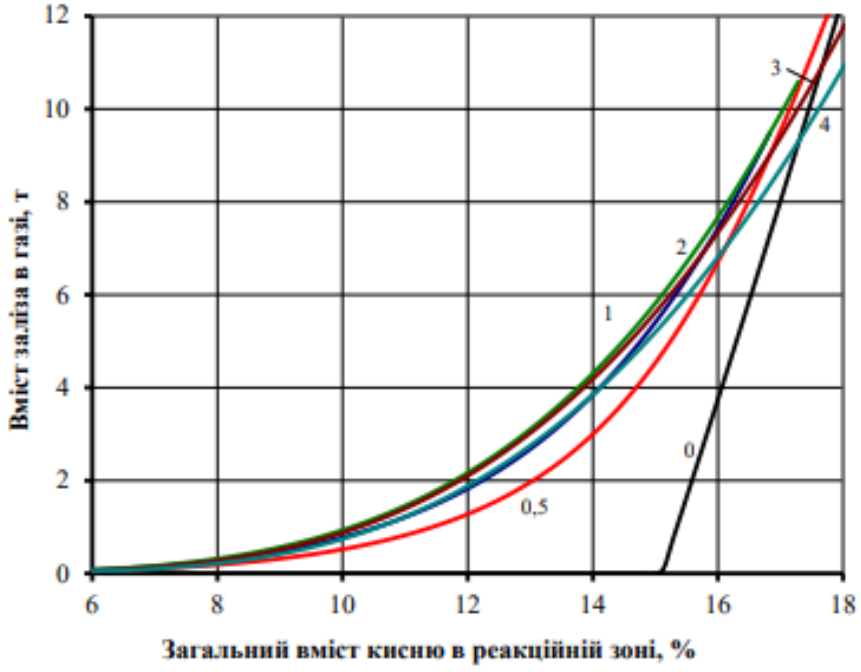
На рисунку 2.5 показано вплив загального вмісту кисню у ВРЗ на вміст заліза та вуглецю в газовій фазі. Як видно, вуглецевмісні ВРЗ, після вигоряння вуглецю з металу, при загальному вмісті кисню понад 5% демонструють інтенсивний перехід заліза в газову фазу. Цей процес супроводжується одночасним зниженням вмісту вуглецю та збільшенням вмісту заліза в газовій фазі. При порівнянні рисунків 2.5 та 2.6 можна зробити висновок, що при вмісті вуглецю в металі понад 0,1% рівень цього елементу в газі залишається високим (42,8%), що відповідає основному вмісту в газовій фазі монооксиду вуглецю CO (99,8%) з малою кількістю CO_2 (0,2%). При зниженні вмісту вуглецю в металі нижче 0,1% газова фаза поступово насичується атомарним залізом та сполуками FeO та FeO_2. При температурі 2928°C в системі Fe-O загальний вміст заліза в газовій фазі ВРЗ становить 93,75%, з яких 82,7% припадає на атомарне залізо. Оставшеся залізо реагує з киснем повітря або дуття, утворюючи оксид FeO, який покидає сталеплавильну ванну у вигляді бурого диму.

Збільшення вмісту кисню в ВРЗ понад 20% призводить до повного окислення металу. У таких умовах в газовій фазі значно зростає вміст молекулярного кисню, що, в свою чергу, знижує ефективність використання кисню в процесі виплавки сталі. При екстремально високому загальному вмісті кисню понад 28% більшість газової фази складається з молекул O_2. При загальному вмісті кисню 36% молекулярний кисень становить 81% від загального парціального тиску, атомарний кисень – 8,4%, атомарне залізо – 5,6%, FeO – 4,5%, FeO_2 – менше 0,5%.

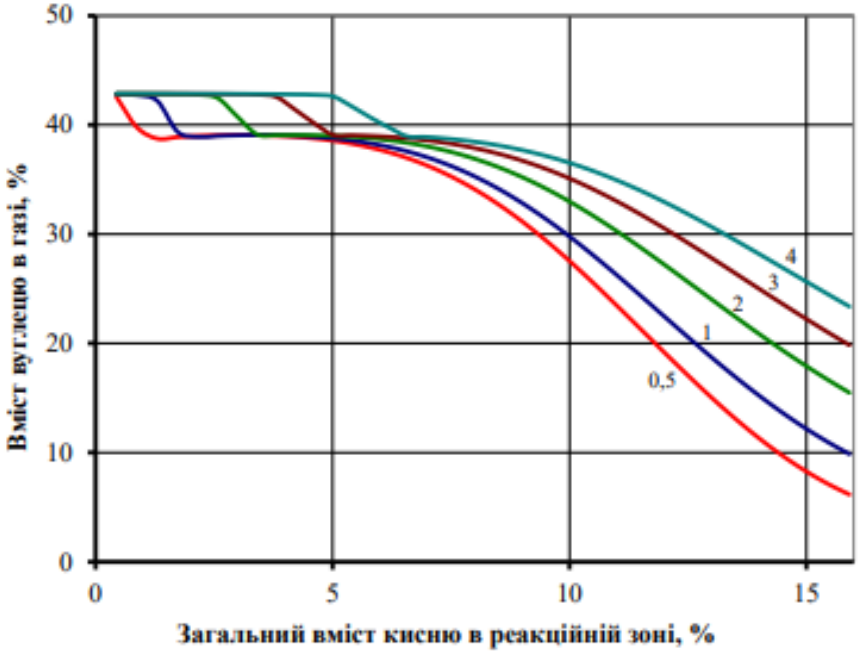
На основі даних, представлених на рисунках 2.4, 2.6 та 2.5, можна зробити висновок, що вуглець, який міститься в металі ВРЗ, є каталізатором переходу заліза в газову фазу та відповідно втрат заліза під час виплавки сталі. Це особливо добре ілюструється на рисунках 2.5 і 2.6, де вміст заліза в газовій фазі представлено в абсолютних одиницях. На цих графіках видно, що маса заліза в газі експоненційно зростає зі збільшенням загального вмісту кисню в ВРЗ, які містять вуглець. Однак різниця між кривими для різних вмістів вуглецю порівняно невелика. Лише при високому загальному вмісті кисню (понад 17%) безвуглецева (чорна) крива зрівнюється з кривими для вуглецевмісних матеріалів. У широкому інтервалі загального вмісту кисню, а отже, інтенсивності продування, присутність вуглецю в будь-якій концентрації не менше 0,5% призводить до інтенсивного переходу заліза в газову фазу. Цей ефект значно менше виражений при продувці знизу, коли феростатичний тиск зменшує утворення газової фази.


100
80
60
40
20
0
5
7
9
11
13
15
0
0,5
1
2
3
4
Вміст заліза в газі, %
Загальний вміст кисню в реакційній зоні, %

а)


12
10
8
6
4
2
0
6
8
10
12
14
16
18
0
0,5
1
2
3
4
Вміст заліза в газі, т
Загальний вміст кисню в реакційній зоні, %

б)



в)

Рисунок 2.5 – Вплив загального кисню та почтквого вмісту вуглецю в металі (цифри у кривих у мас. %) на вміст заліза (а,б) та вуглецю (в) у газовій фазі ВРЗ

2.2.1.6 Вміст вуглецю в металевій фазі

На рисунке 3.6 показана залежність концентрації вуглецю в металі реакційної зони від загального вмісту кисню у ВРЗ, а також початкового рівня вуглецю в металі. Очевидно, що ступінь окислення вуглецю у ВРЗ демонструє лінійну залежність від кількості кисню у ВРЗ, а значить, і від інтенсивності продування. Тільки в області низьких значень [C] спостерігається експоненціальне наближення до нульового рівня.

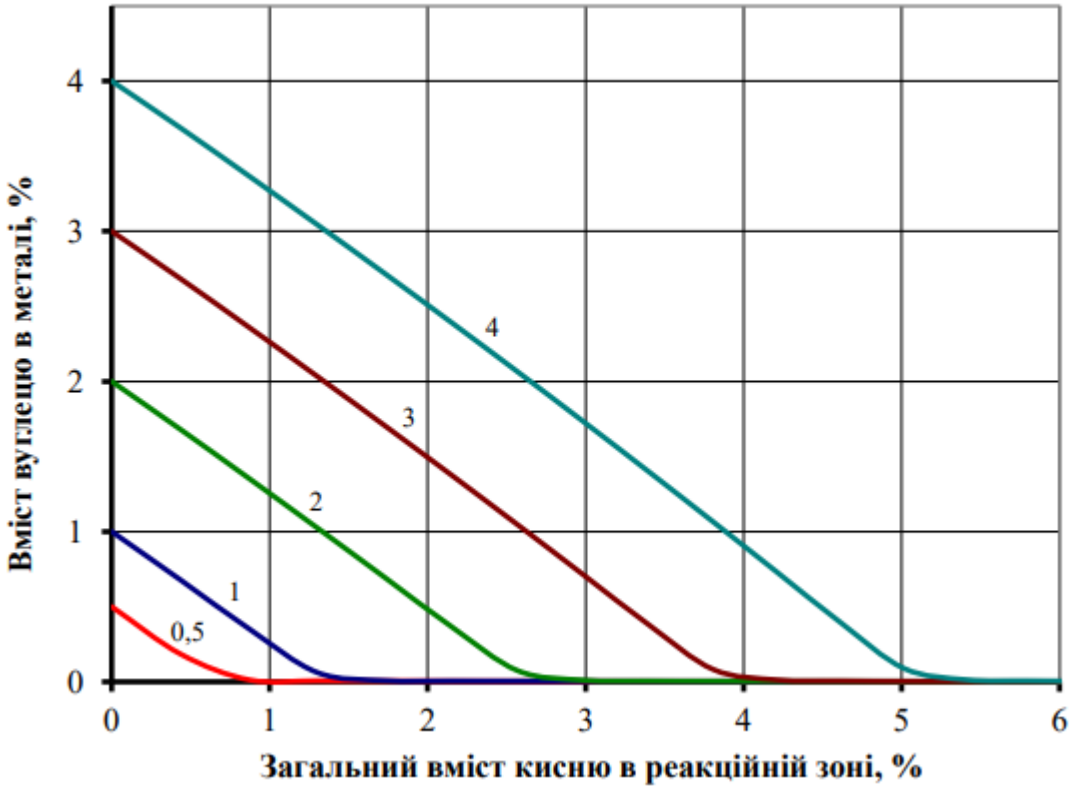


Рисунок 2.6 – вплив загального вмісту кисню та початкового вмісту вуглецю в металі (цифри у кривих у мас.%) на вміст вуглецю в металі реакційної зони

2.2.1.7 Високотемпературні фазові діаграми Fe-O і Fe-O-1%C

Аналіз отриманих в роботі даних дозволив побудувати новий фрагмент діаграми фазової рівноваги у системі «залізо-кисень» у високотемпературній ділянці, що показано на рис. 2.7.

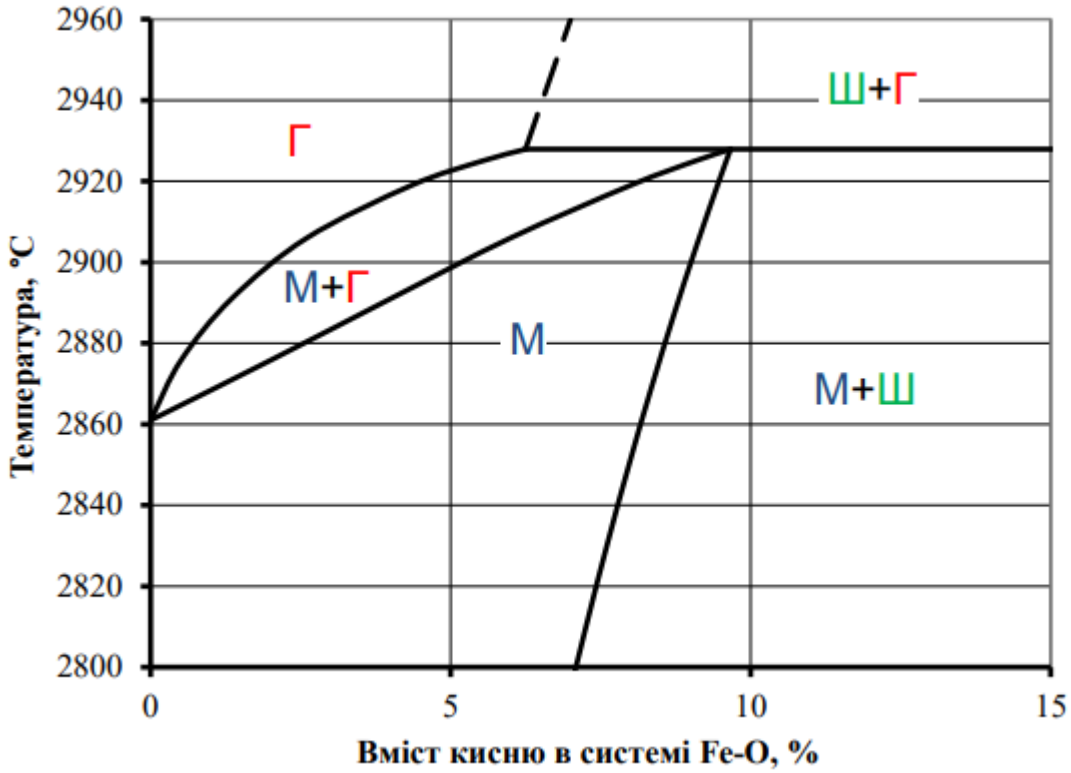


Рисунок 2.7 – Фрагмент діаграми фазової рівноваги у системі «залізо-кисень» у високотемпературній області при тиску 1 атм

На цій діаграмі виділено п’ять ключових фазових областей: «метал», «газ», «метал+газ», «метал+шлак» і «шлак+газ». Пунктирна лінія, що розділяє області газу та співіснування шлаку і газу, має передбачуваний характер. Згідно з діаграмою, при збільшенні вмісту кисню в системі розширюється температурний інтервал співіснування металевої та газової фаз, що досягає граничної температури 2928 °С. Співіснування трьох фаз – металевої, шлакової та газової – можливе вздовж горизонтальної перитектичної лінії при температурі 2928 °С, у широкому інтервалі концентрацій кисню. Цю лінію також можна визначити як ізотерму трифазної нонваріантної рівноваги, оскільки в межах цієї лінії склад фаз залишається постійним, а змінюються лише їхні відносні кількості. Крива, що розділяє області металу та співіснування металу і шлаку, відповідає високотемпературному фрагменту кривої розчинності кисню в рідкому залізі,

званої кривою Фонтани-Чіпмана (рис. 2.3). На цій лінії максимальний вміст кисню в металі становить 9,67% за температури 2928 °С.

Важливий вплив на рівноважну діаграму системи Fe-O має вуглець. Як видно на рис. 2.8, навіть низькі концентрації вуглецю радикально змінюють вигляд діаграми. Це пояснюється тим, що при високих температурах майже весь вуглець окислюється з утворенням газоподібних оксидів, через що на діаграмі практично не залишаються області без газової фази, за винятком дуже вузької ділянки при температурі менше 2873 °С. Особливу увагу привертає четверна точка з координатами 7,47% О і 2916 °С, де газова фаза становить 100%. Однак залежно від змін температури та вмісту кисню до газової фази можуть приєднуватися метал, шлак або комбінація металу й шлаку. Це дає змогу вивчати більш складні взаємодії фаз, що впливають на фізико-хімічні процеси, зокрема при виробництві сталі, а також на поведінку матеріалів в умовах високих температур.

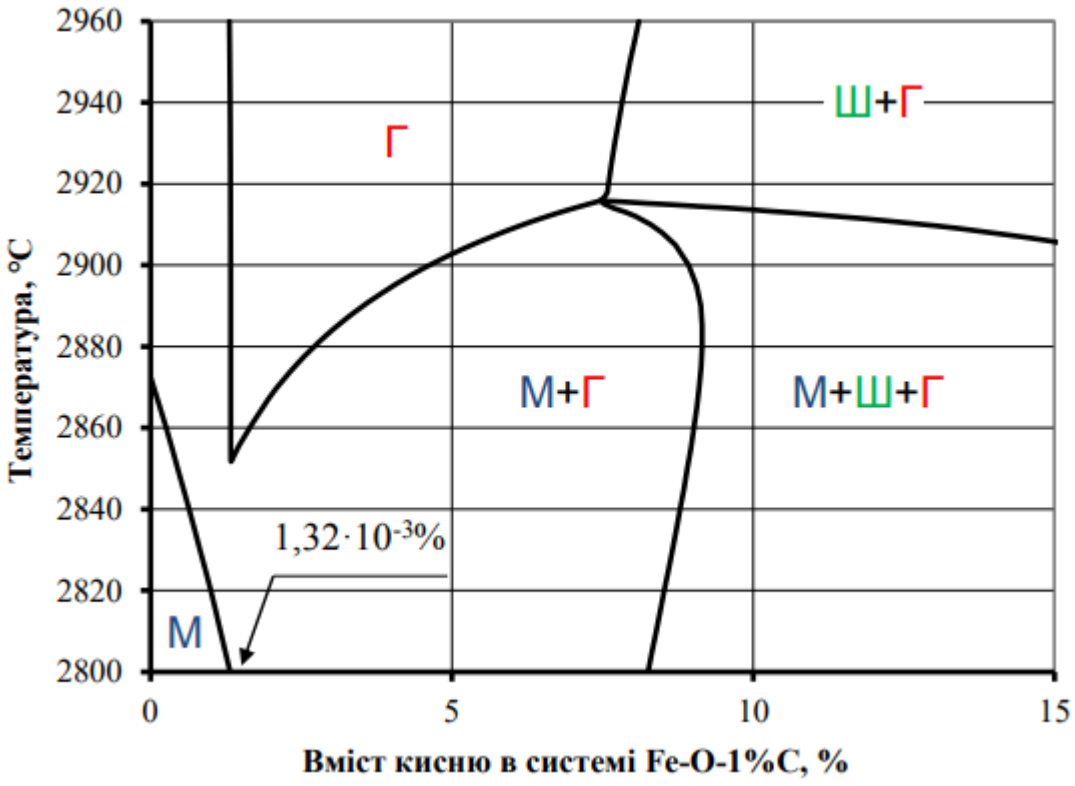


Рисунок 2.8 – Фрагмент діаграми рфазової діаграми у системі «залізо-висень-1%С» у високотемпературній області при тиску 1 атм

Ці результати мають велике значення для розуміння термодинамічних і кінетичних аспектів процесів у металургійній промисловості, зокрема для оптимізації процесів окиснення заліза, виготовлення спеціальних сталей, а також при розробці нових технологій обробки металів і сплавів при високих температурах.

2.2.2 Видалення домішок із газової фази. Методика дослідження

Видалення домішок із газової фази є ключовим етапом сталеплавильного процесу, оскільки саме на цьому етапі відбувається незворотне виведення хімічних елементів за межі робочого простору агрегату. Особливу увагу приділяють втратам заліза, які знижують економічну ефективність і продуктивність процесу. Очищення металу шляхом кисневого продування дає змогу суттєво знизити вміст небажаних домішок, але при цьому завжди існує ризик надмірних втрат заліза, що вимагає особливо точного регулювання технологічних параметрів.

Критично важливим аспектом є досягнення балансу між глибиною очищення металу та мінімізацією втрат заліза, що можливе лише при детальному розумінні фізико-хімічних процесів, які відбуваються в реакційній зоні. Тому вивчення поведінки домішок під час продування рідкого залізовуглецевого розплаву киснем дозволяє вдосконалити методи контролю та керування цим процесом на сучасному технологічному рівні.

У рамках роботи також враховуються динамічні процеси, які відбуваються не лише в рідкій фазі, а й у газовій. Особливе значення має дослідження взаємодії основних елементів системи "метал-шлак-газ", зокрема таких, як залізо, вуглець, кисень, а також домішкових елементів: кремнію, марганцю, алюмінію, сірки, фосфору, кальцію та магнію. Ці елементи, характерні для реальних умов сталеплавильних процесів, суттєво впливають на загальну хімічну рівновагу системи.

Додатково варто зазначити, що склад газової фази за високих температур може суттєво змінюватися. Особливу роль відіграє рівновага між

компонентами шлакової та газової фаз, яка визначає поведінку домішок у реакційній зоні. Використання сучасних термодинамічних моделей дозволяє з високою точністю прогнозувати такі зміни, що, у свою чергу, сприяє оптимізації технологічних параметрів. Наприклад, при моделюванні вважається, що середня температура металу становить близько 1500 °C, а вихідний склад ВРЗ формується переважно з металу з незначним впливом шлаку.

На основі термодинамічних розрахунків, заснованих на даних, наведених у довідкових виданнях Глушка [28] та базах «Астра» [29], можна будувати фазові діаграми рівноваги для систем Fe-O та Fe-O-C, які мають ключове значення для проєктування сталеплавильних процесів.

Особливості поведінки елементів у системі "метал-шлак-газ" значною мірою визначають кінцевий склад сталі. Наприклад, сірка та фосфор є одними з найшкідливіших домішок, оскільки їх висока концентрація у сталі призводить до погіршення її властивостей. Видалення цих елементів здійснюється через шлак, але частина їх переходить у газову фазу у вигляді сірчистого газу (SO_2) і оксиду фосфору (P_2O_5). Високотемпературне моделювання дозволяє прогнозувати ці переходи з високою точністю.

Також важливим є вплив таких домішкових елементів, як кремній, марганець, алюміній та кальцій. Їхнє видалення або залишковий вміст у сталі залежить від їхньої реакційної активності у відповідних термодинамічних умовах. Наприклад, кремній активно окиснюється з утворенням кремнезему (SiO_2), який переходить до шлаку. Алюміній, як сильний відновник, може взаємодіяти з киснем у системі, сприяючи зниженню його вмісту в сталі, що позитивно впливає на якість готового продукту.

Для оцінки процесів видалення домішок важливо враховувати термодинамічні властивості системи. Використання сучасних баз даних і програмних інструментів дозволяє моделювати поведінку компонентів у складних багатокомпонентних системах, що включають метал, шлак і газ.

Наприклад, визначення умов рівноваги для систем Fe-O, Fe-C-O або Fe-C-S дозволяє ефективно управляти процесом рафінування сталі.

Додатково важливим є контроль початкових умов процесу. Наприклад, температура металу в момент початку продування зазвичай становить близько 1500 °C, а вихідна кратність шлаку становить приблизно 0,01, що забезпечує переважне формування реакційної зони з металу. Зміна цих параметрів безпосередньо впливає на кінцеві показники очищення.

Таким чином, видалення домішок у процесі кисневого продування є складним багатофакторним явищем, що вимагає поєднання точних експериментальних даних і термодинамічного моделювання. Завдяки сучасним методам дослідження та комп'ютерного аналізу забезпечується можливість прогнозувати поведінку хімічних елементів у процесі очищення металу, оптимізуючи сталеплавильний процес і підвищуючи якість сталі.

Таблиця 2.1 - **Хімічний склад вихідного металу та шлаку, мас. %**

	Fe/FeO	C	Si/SiO_2	Mn/MnO	S	P/P_2O_5	Al/Al_2O_5	Ca/CaO	Mg/MgO
Метал	>99	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,01	<0,001	<0,001
Шлак	15	сл.	30	5	0,1	0,1	2,0	40	7,8

До вихідного металу (100 т) та шлаку (1 т) додають газоподібний кисень у кількості від 0 до 25 т, що відповідає загальному вмісту кисню в реакційній зоні (з урахуванням оксидів) від 0,36 до 20,1%. Останню величину для обраних вихідних даних можна пов'язати з інтенсивністю продування рідкої металевої ванни киснем простим емпіричним співвідношенням $O_{ВРЗ}$ 2,5±3,5•і, де інтенсивність продування і має розмірність м³/(т-хв) [30; 31; 32]. Тобто загальний вміст кисню в реакційній зоні пропорційний інтенсивності продування (якщо знехтувати малими величинами $O_{ВРЗ}$, які не характерні для основних режимів продування).

Збільшення кількості кисню в реакційній зоні забезпечує активніше окислення домішок, таких як кремній, марганець і фосфор, які переходять до

шлаку або газової фази. Проте важливо контролювати баланс між інтенсивністю продування та рівнем втрат заліза, щоб уникнути надмірного окислення основного металу.

Інструментом дослідження ВРЗ з домішками, як і для систем Fe-O та Fe-O-C, є метод хімічних потенціалів Гіббса [11], реалізований у дослідницькому програмному комплексі «Excalibur» [23-25], в якому використовуються термодинамічні моделі багатокомпонентних конденсованих фаз для рідких металу [20; 21; 33] та шлаку [22].

Додатково метод хімічних потенціалів дозволяє враховувати складні взаємодії компонентів системи "метал-шлак-газ", що сприяє більш точному прогнозуванню термодинамічної рівноваги при високотемпературних процесах. Це особливо важливо для розробки нових режимів продування, які забезпечують оптимальне очищення сталі від домішок при збереженні її фізико-хімічних властивостей.

2.2.2.1 Температура реакційної зони

На рисунку 2.9 представлено зміну температури ВРЗ залежно від значення $O_{ВРЗ}$. При досягненні максимального значення $O_{ВРЗ}$ у 20% (16,7 м³/(т·хв)) локальна температура у реакційній зоні сягає 2900 °С. Монотонний характер температурної залежності дозволяє відображати всі графіки у координатах «температура – вміст елемента в газовій фазі». У цьому випадку кожному максимуму вмісту елемента у газі відповідатиме певна характерна температура, яка може бути використана для визначення оптимальних умов перебігу процесів.

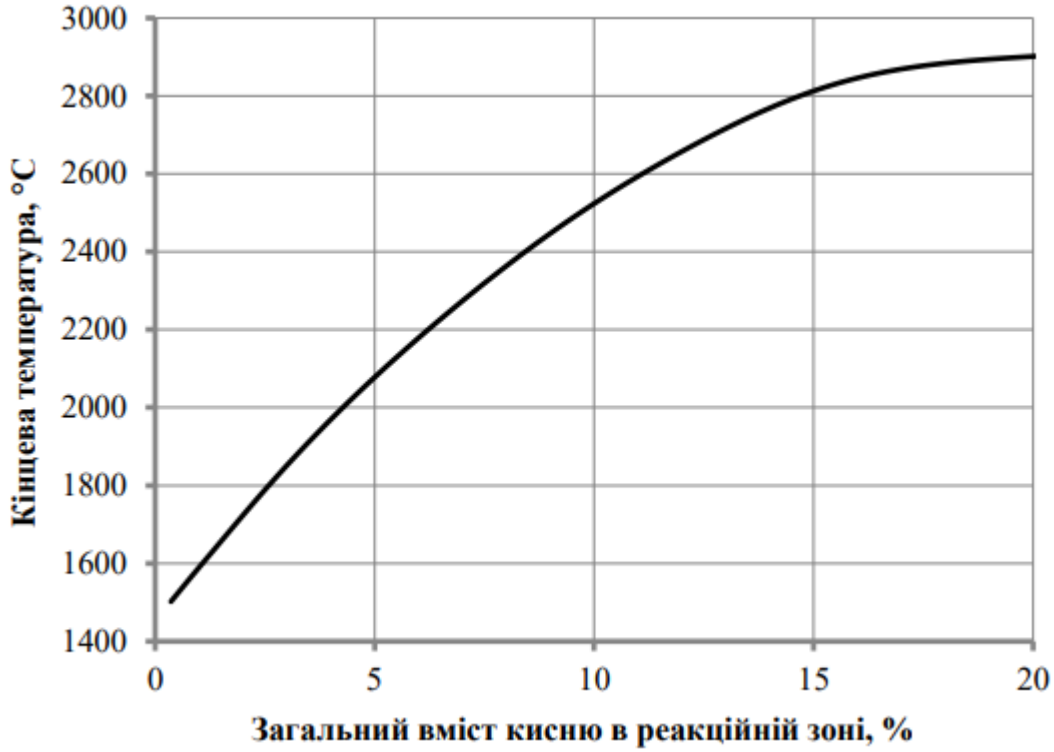


Рисунок 2.9 – Залежність кінцевої температури ВРЗ від загального вмісту кисню

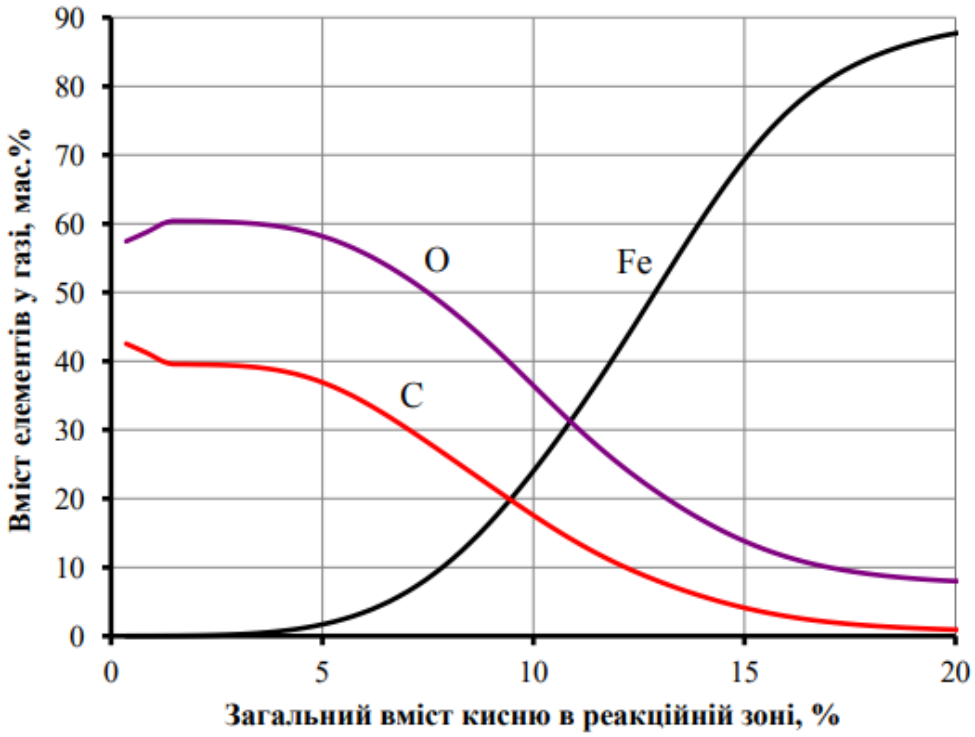
2.2.2.2 Елементний склад газової фази реакційної зони

На рисунку 2.10 представлено зміну складу газової фази ВРЗ у відносних одиницях залежно від загального вмісту кисню. Основною особливістю цього процесу є поступове збільшення концентрації заліза в газовій фазі до 88%. Це зумовлює зниження відносного вмісту інших елементів у газі при високому рівні кисню. Для домішок, таких як Si, Ca, Mg, P, S, Mn, характерна наявність максимумів на кривих залежності "Оврз – вміст елемента у газі". Згідно з рисунком 2.10, б, серед цих домішок найбільшої концентрації в газовій фазі досягає кремній (12,8%), тоді як максимальна концентрація фосфору становить близько 2%.

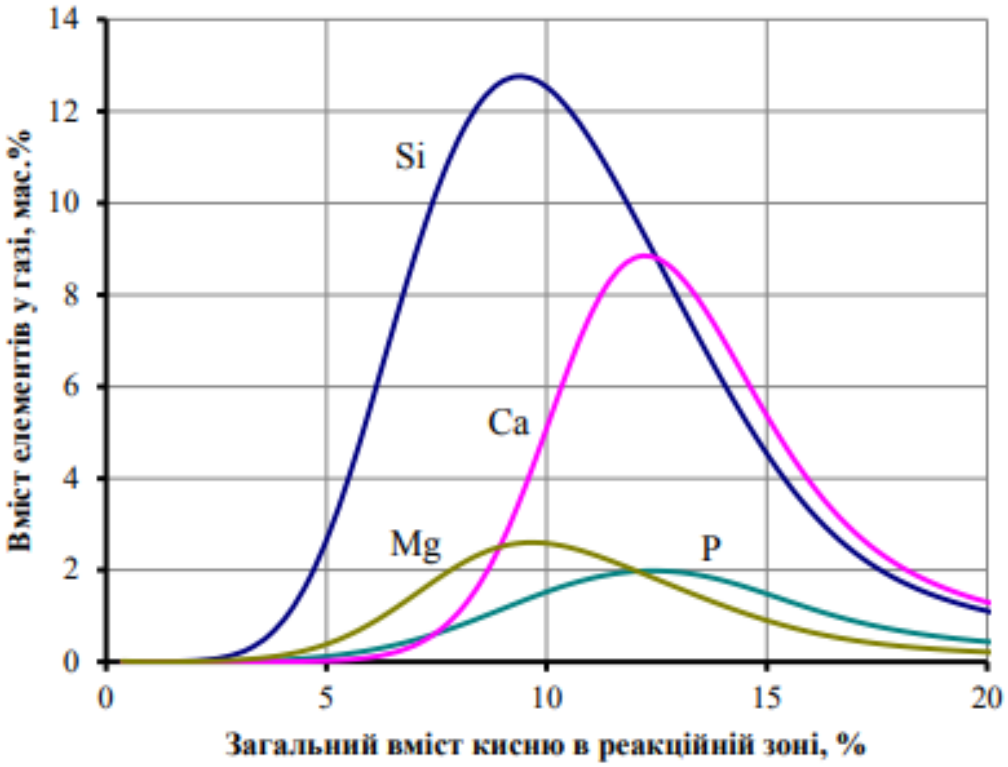
Домішки лужноземельних елементів, таких як кальцій та магній, зазвичай мають низьку розчинність у рідкому металі під час процесу окислювального рафінування, що пояснює їхній мінімальний вміст у газовій фазі за стандартних температур сталеплавильної ванни. Проте при високих

температурах реакційної зони (понад 2000 °C) відбувається суттєве зростання концентрацій цих елементів у газовій фазі. Це зумовлено перерозподілом кальцію і магнію, які переходять зі складу оксидного шлаку, де вони накопичуються через їхній первинний вміст у шихті або вогнетривкому футеруванні агрегату. У цих умовах концентрація кальцію в газовій фазі може досягати 9%, а магнію – 2,5%.

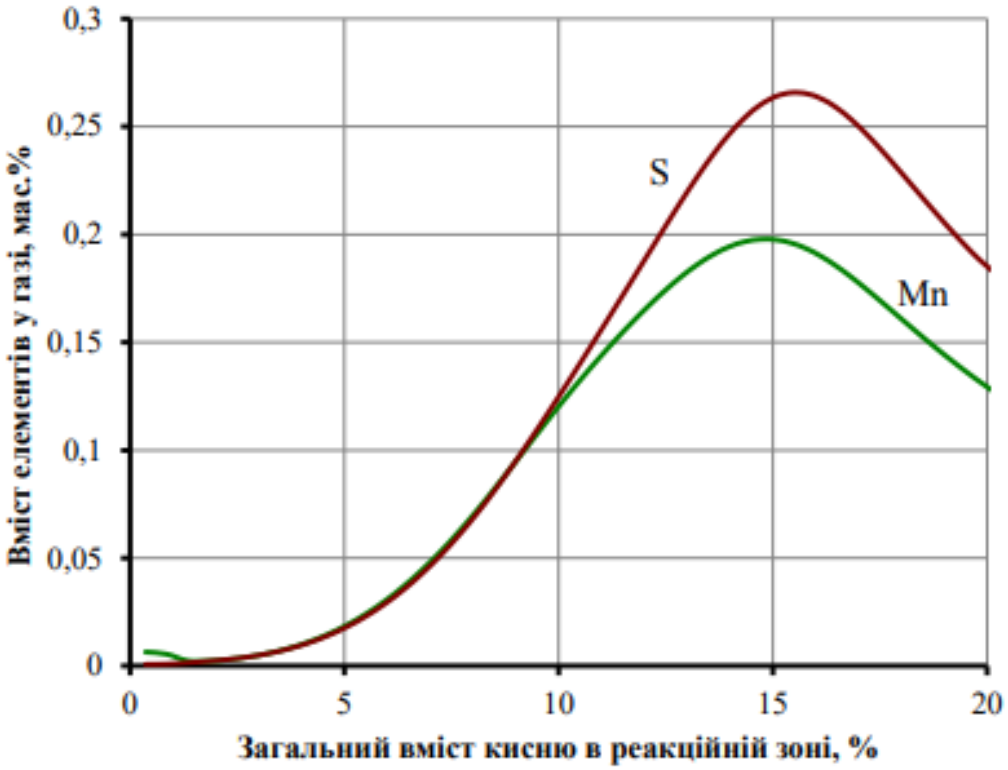
Додатково слід зазначити, що вплив високих температур на поведінку лужноземельних елементів відіграє ключову роль у формуванні кінцевого складу газової фази. Наприклад, у процесі рафінування підвищення температури сприяє не тільки випаровуванню елементів, але й зміні їхньої активності у взаємодії з іншими компонентами системи. Таким чином, точне моделювання термодинамічних характеристик газової фази дозволяє оптимізувати сталеплавильний процес, враховуючи особливості поведінки окремих домішок.



а)



б)



в)

Рисунок 2.10 – Залежність елементного складу фази ВРЗ (мас.;) від загального вмісту кисню: Fe, O, C (а), Si, P, Mg (б), Mn, S (в)

Для забезпечення точного аналізу процесу окислювального рафінування важливо враховувати не лише концентрації домішок у газовій фазі, що можуть значно перевищувати їх вміст у вихідному металі сталеплавильної ванни, а й абсолютні значення мас елементів у кожній фазі. Це дає змогу отримати повніше уявлення про перерозподіл домішок між фазами при конкретних умовах, таких як температура чи концентрація кисню в газовій фазі. Лише з урахуванням цих параметрів можна ефективно оцінити потенціал для видалення домішок у процесі рафінування.

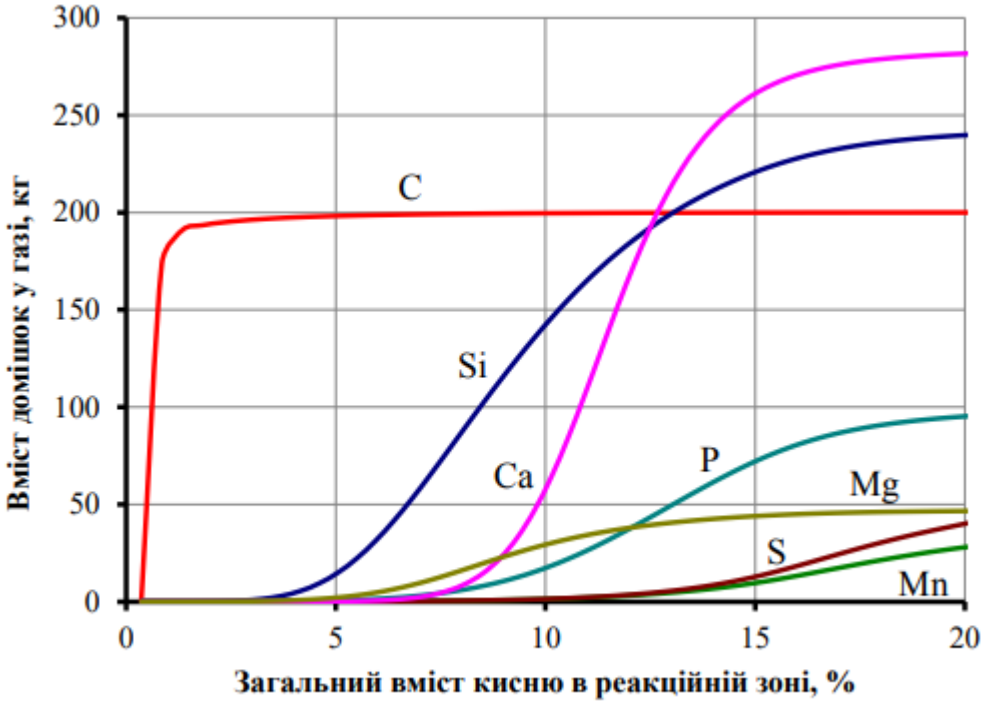
2.2.2.3 Склад газової фази в абсолютних одиницях

На рисунку 2.11 показано зміну складу газової фази ВРЗ в абсолютних одиницях (кілограмах) залежно від загального вмісту кисню. Як видно, вміст усіх хімічних елементів, включаючи домішки, монотонно зростає зі збільшенням загального вмісту кисню, попри характерні максимуми у відносних одиницях (див. рис. 2.10). Поведінка заліза відзначається різким збільшенням його вмісту при вмісті кисню понад 12%, що відповідає температурі ВРЗ вище 2600 °С і інтенсивності продування понад 4 м³/(т*хв). Для більшості домішок (окрім марганцю та сірки) характерні ділянки насичення, що означає досягнення горизонтальної фази при різних значеннях $O_{ВРЗ}$. При цьому координати максимального приросту маси домішок у газі збігаються з координатами максимумів їхнього відносного вмісту на рис. 2.10. Можна припустити, що марганець і сірка поводяться подібно, але при більш високих температурах (понад 2900 °С), які неможливо досягти в автотермічному процесі продування залізовуглецевого розплаву киснем.

Насичення газової фази вуглецем відбувається вже при загальному вмісті кисню в ВРЗ 5%, що відповідає температурі 2080 °С та інтенсивності продування 1,7 м³/(т*хв). Це означає, що вуглець з розплаву можна видалити, продуваючи його струменем кисню малої інтенсивності, що є практично корисним, зокрема, в електросталеплавильному виробництві.



а)



б)

Рисунок 2.11 – Залежність складу газової фази ВРЗ від загального вмісту кисню: а) Fe, O (т); б) C, Si, Ca, P, Mg, Mn, S (кг)

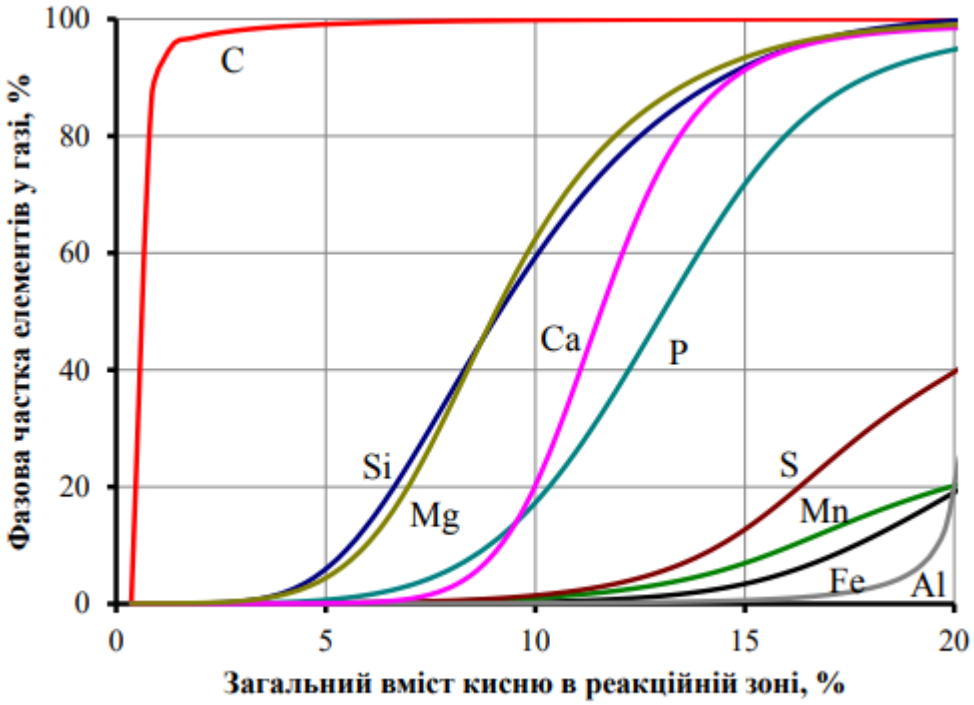
2.2.2.4 Фазовий склад реакційної зони

Слід зауважити, що склад газової фази ВРЗ в абсолютних одиницях, представлений на рис. 2.11, не дає повного пояснення явища насичення та виходу кривих на горизонталь при великих значеннях $O_{ВРЗ}$. Зокрема, немає чіткої інформації щодо можливості зміни траєкторії кривих поза межами дослідженого діапазону, тобто при $O_{ВРЗ}$ > 20%. Для роз'яснення цього питання на рис. 2.12 показано залежність фазової частки елементів у газовій фазі та фазового складу ВРЗ від загального вмісту кисню. Фазова частка елемента визначається як відсоткове відношення маси елемента в газі до маси цього елемента у всій системі «метал-шлак-газ».

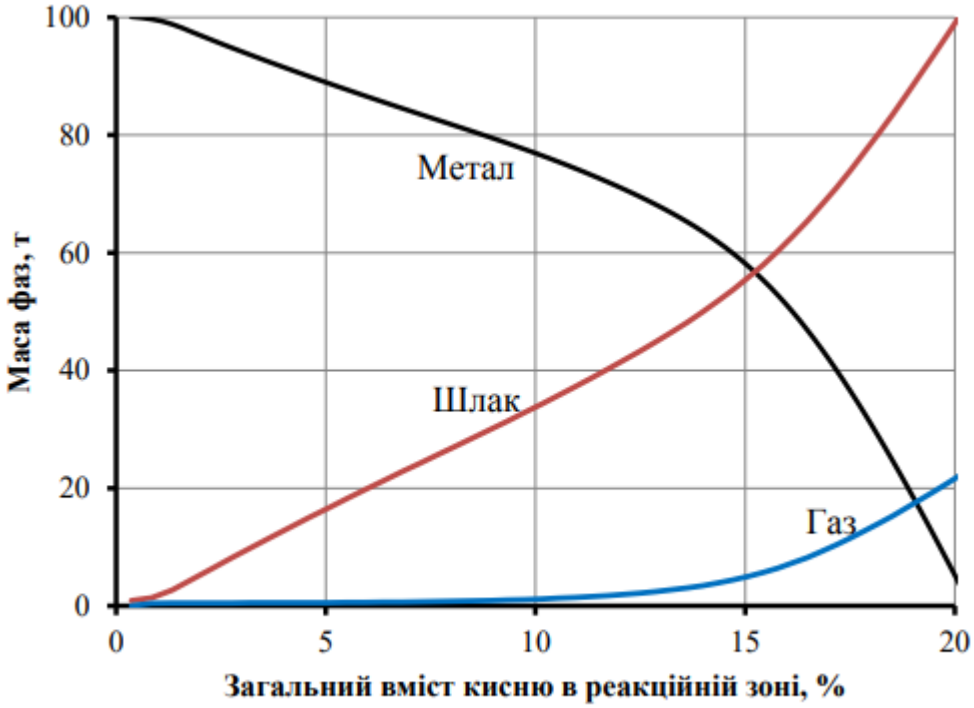
Хід кривих на рис. 2.12 пояснює поведінку ряду хімічних елементів, що зображені на рис. 2.11, зокрема, незалежно від їх початкового вмісту в металі, вони майже повністю переходять у газову фазу. Так, у діапазоні $O_{ВРЗ}$ = 5...15% відбувається майже повний синхронний перехід таких елементів, як Si, Ca, Mg, P з металу та шлаку в газову фазу. Інші елементи (Mn, S, Fe, Al) починають переходити в газову фазу лише при $O_{ВРЗ}$ > 10%. Однак навіть при максимальному вмісті кисню (20%) цей перехід залишається частковим. Особливе значення має залізо, яке, маючи високий вміст у ВРЗ, домінує за абсолютним і відносним вмістом у газовій фазі при великих значеннях $O_{ВРЗ}$

Вуглець, що майже повністю переходить у газову фазу ВРЗ при $O_{ВРЗ} \leq$ 5%, веде себе окремо, не потрапляючи до жодної з цих груп елементів.

Як видно з рис. 2.12, значне збільшення маси газової фази спостерігається при загальному вмісті кисню в ВРЗ понад 10%, що відповідає температурі вище 2500 °С та інтенсивності продування понад 3,3 м³/(т *хв). При максимальному вмісті кисню $O_{ВРЗ}$ (20%) маса газової фази ВРЗ, в якій основну частину займає залізо, перевищує 20 т. Одночасно відбувається практично повне окислення металу. Основним продуктом ВРЗ є високоокислений шлак, в якому оксиди заліза складають понад 90% при $O_{ВРЗ}$ > 4% та більше 99% при $O_{ВРЗ}$ > 12%.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Залежність фазової частки елементів у газовій фазі (а) та фазового складу ВРЗ (б) від загального вмісту кисню

У реальному сталеплавильному процесі вміст FeO в шлаку рідко перевищує 50%, що дозволяє зробити висновок, що шлак ВРЗ асимілюється сталеплавильною ванною, де частина оксидів заліза залишається в шлаку, а частина відновлюється. Відновлення відбувається двома можливими шляхами:

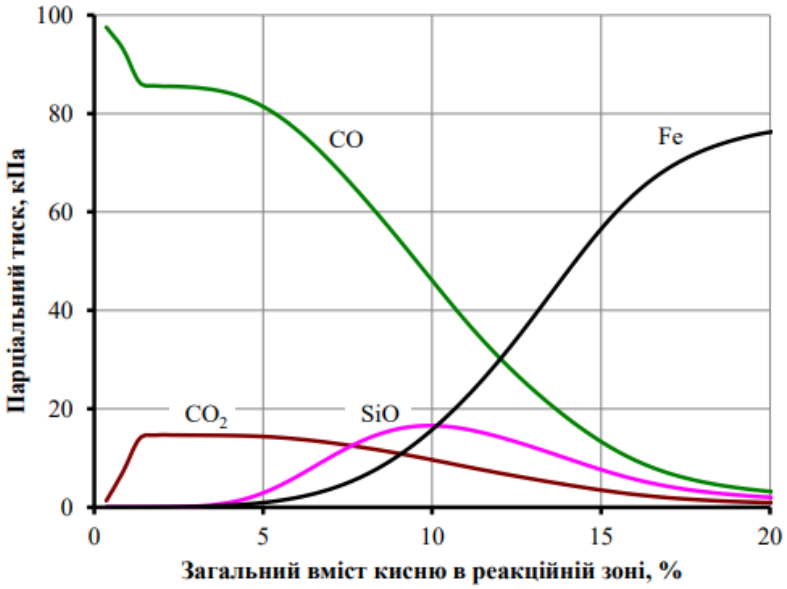
1) через взаємодію з залишковим металом сталеплавильної ванни на межі фаз «метал-шлак»;

2) через розкладання оксиду заліза внаслідок зміщення рівноваги реакції [Fe] + [O] = (FeO) в бік відновлення, що відповідає термодинамічним умовам у сталеплавильній ванні поза ВРЗ.

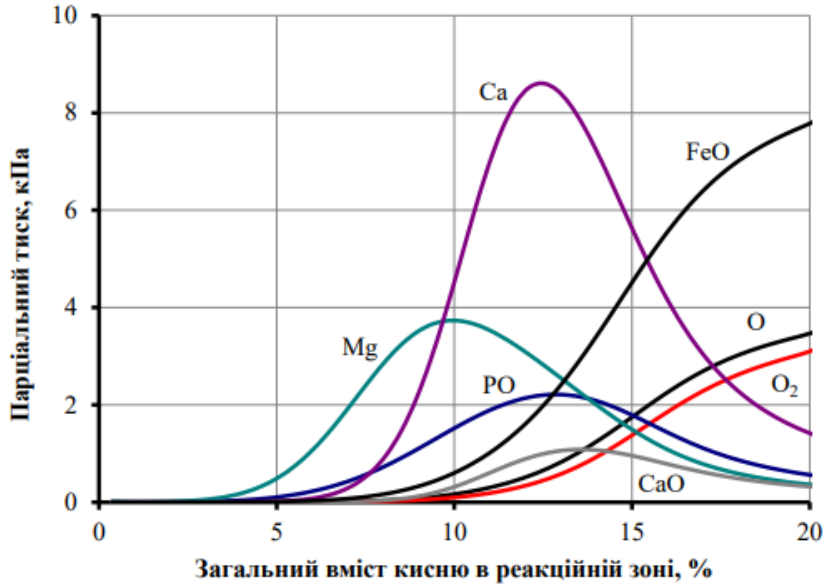
2.2.2.5 Молекулярний склад газової фази

На рисунку 2.13 представлений молекулярний склад газової фази ВРЗ у вигляді парціальних тисків окремих компонентів. Як показано, присутність кисню в газовій фазі на всьому протязі досліджуваного діапазону переважно обумовлена наявністю оксидів вуглецю, таких як CO і CO_2, які домінують при температурах до 2000 °C. Однак, коли загальний вміст кисню в ВРЗ перевищує 5% і температура підвищується вище 2000 °C, роль інших газоподібних сполук, таких як SiO і FeO, стає все більш помітною. При вмісті кисню понад 10% спостерігається не лише значне збільшення парціального тиску кисню у вигляді вільного кисню (O) та молекулярного кисню (O_2), але й суттєве зростання вмісту атомарного заліза та оксиду заліза (FeO).

З підвищенням вмісту кисню в газовій фазі також спостерігається зміна в складі інших компонентів, що вказує на зміну хімічних процесів в ВРЗ. Зокрема, при високих температурах та високому вмісті кисню інтенсивно відбувається окислення металу, що призводить до утворення додаткових оксидів, таких як FeO і SiO. Цей процес зумовлює поступове збільшення маси газової фази і зміну її складу, що має важливе значення для контролю сталеплавильного процесу.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Парціальний тиск молекулярних та атомарних газіву газовій фазі ВРЗ: а) CO, CO_2, Fe, SiO; б) Ca, FeO, Mg, O, O_2, PO, CaO

Відхід кремнію в газову фазу здебільшого обумовлений утворенням газоподібного оксиду SiO, максимальна концентрація якого досягається при вмісті кисню в ВРЗ $O_{ВРЗ}$ = 9%. Кальцій і магній переважно переходять у газову фазу в атомарному стані, і максимальні їх концентрації спостерігаються відповідно при $O_{ВРЗ}$ = 12,4% та 10%. Фосфор у газовій фазі

присутній переважно у вигляді монооксиду PO, що визначає його поведінку в процесі окислювального рафінування.

Окрім основних сполук, існує ще кілька десятків газоподібних сполук, парціальні тиски яких варіюються в межах від 0,01 до 1 кПа (наприклад, Mn, SiO_2, MgO, PO_2, *SO*, SO_2 та інші). Ці сполуки мають значний внесок у загальний склад газової фази, хоча їх концентрації можуть бути порівняно малими. Варто зазначити, що хоча сотні інших сполук мають зникаюче малу концентрацію і не представлені на графіках, їх наявність також має значення, оскільки в окремих випадках вони можуть істотно впливати на загальний хімічний баланс і характеристики газової фази, особливо в умовах високих температур та великих вмістів кисню.

Таким чином, навіть менш помітні компоненти можуть мати значний вплив на процеси рафінування і загальний склад газової фази ВРЗ.

2.2.2.6 Висновки

1. Досліджено вплив загального вмісту кисню на ключові параметри ВРЗ, зокрема температуру, кратність шлаку та газу, а також хімічний склад металевої та газової фаз. Виявлено, що збільшення інтенсивності продування не призводить до пропорційного зростання температури ВРЗ та сталеплавильної ванни, що накладає обмеження на ефективність процесу. Окрім того, проаналізовано вплив початкового вмісту вуглецю в металі на параметри ВРЗ. Встановлено, що вуглець, присутній в металі, сприяє каталізу відходу заліза в газову фазу, що веде до значних втрат металу під час плавки сталі. Також побудовано фрагменти діаграм фазової рівноваги для систем «залізо-кисень» та «залізо-кисень-1% C» в умовах високих температур.

2. Загальна тенденція поведінки домішок у ВРЗ полягає в тому, що різні домішки досягають максимуму концентрації в газовій фазі за певної температури, що залежить від інтенсивності продування. Максимуми концентрацій пояснюються тим, що концентрація заліза в газовій фазі поступово наближається до граничного значення (майже 90%). Ці максимуми

вказують на початок інтенсивного видалення певної домішки. У абсолютних одиницях, при збільшенні температури, відхід цієї домішки в газову фазу не зменшується, і в загальному випадку максимуми не спостерігаються.

3. За температурою та ступенем видалення домішок у газову фазу, їх можна поділити на три групи:

а) Вуглець, який майже повністю видаляється при відносно низькому загальному вмісті кисню в ВРЗ та температурах до 2000 °С.

б) Кремній, кальцій, магній та фосфор, що практично повністю відходять у газову фазу при температурах 2100...2800 °С.

в) Марганець, сірка, залізо та алюміній, які частково видаляються при температурах вище 2600 °С.

4. При загальному вмісті кисню в ВРЗ понад 15%, зростання температури різко сповільнюється, досягаючи межі 2900 °С при $O_{ВРЗ}$ = 20%. В цей період, поряд з домішками, у газову фазу інтенсивно переходить залізо. Крім того, утворюється значна кількість шлаку, переважно складаючись з оксидів заліза.

Таким чином, продування сталеплавильної ванни киснем з інтенсивністю понад 5 м/(т-хв) є недоцільним, оскільки не призводить до суттєвого підвищення продуктивності сталеплавильного агрегату. Це також спричиняє великі втрати заліза, що негативно позначається на техніко-економічних показниках плавки сталі.

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «МАЙСТЕР»

Удосконалення у металургії та на металургійних комбінатах спрямоване на підвищення ефективності виробництва, зниження витрат, покращення якості продукції та мінімізацію впливу на довкілля.

За останній час на ПАТ «Запоріжсталь» також було застосовано удосконалення щодо ПК «Майстер».

Удосконалення ПК «Майстер було проведено за наступними напрямків:

- Збільшення стійкості алгоритмів у разі виникнення нештатних ситуацій.

- Розробка та впровадження вдосконалених термодинамічних моделей системи «метал-шлак-газ».

- Підвищення точності обробки та деталізації відображення хімічного складу сталей у програмному забезпеченні.

- Реалізація концепції реакційної зони сталеплавильної ванни для точнішого прогнозування температури металу і концентрації вуглецю у сталі.

- Переклад інтерфейсу програмного забезпечення українською мовою.

- Розширення інструментальних і діагностичних можливостей компонентів.

3.1 Удосконалення програми «Майстер»

Головну форму прграми «Майстер» було приведено у відповідність функціональних мождивостей програми (рис.3.1). Також, форму було переведено на українську мову.

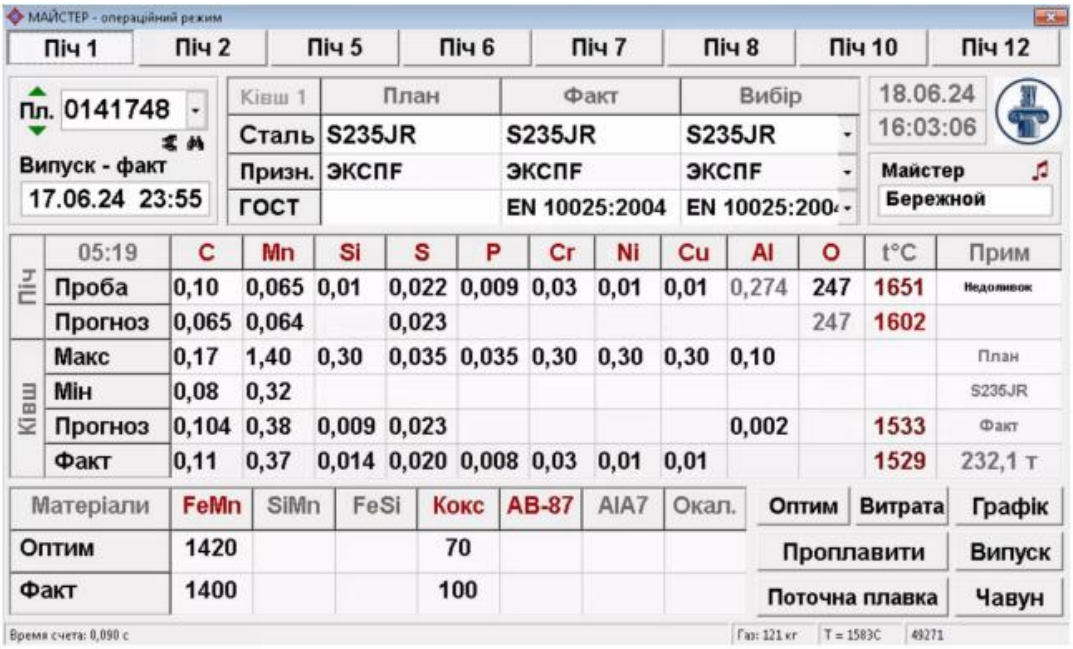


Рисунок 3.1 – Головна форма програмного комплексу «Майстер»

Інтерфейс форми даних по чавуну, також, було змінено (рис. 3.2). Був здійснений переклад на українську мову, додано додатковий хімічний елемент такий як фосфор (P), а також зверху форми додано загальний хімічний склад по всих міксерам.

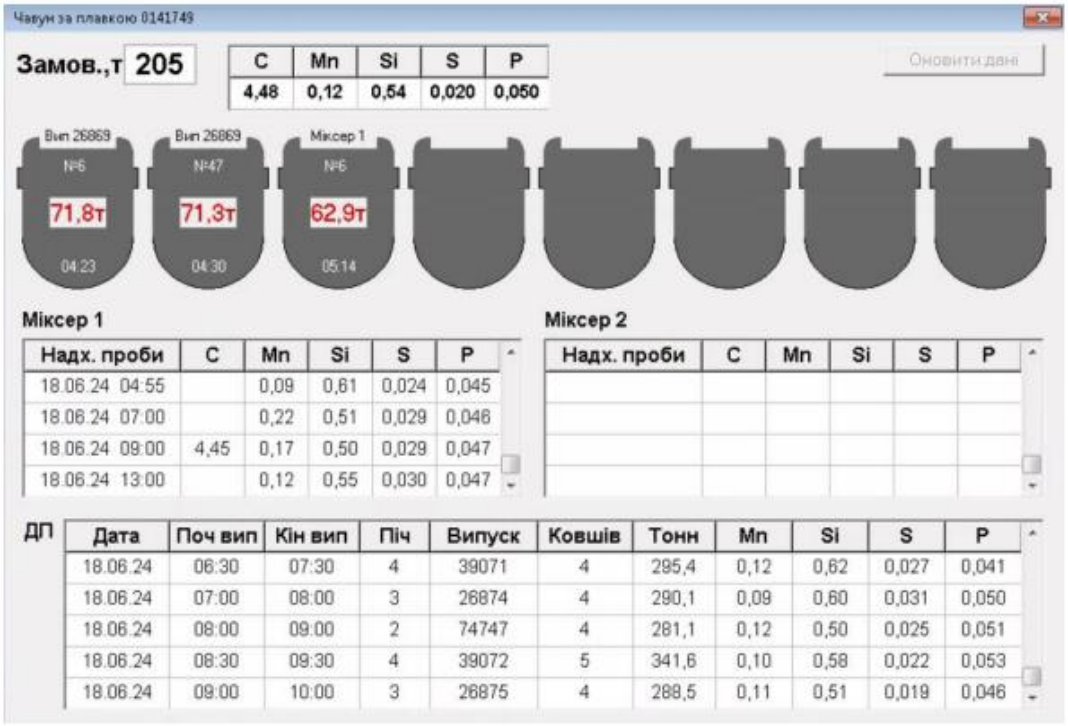


Рисунок 3.2 – Форма даних по чавуну

Ще одних удосконалень зазнала форма пошуку плавок (рис. 3.3).

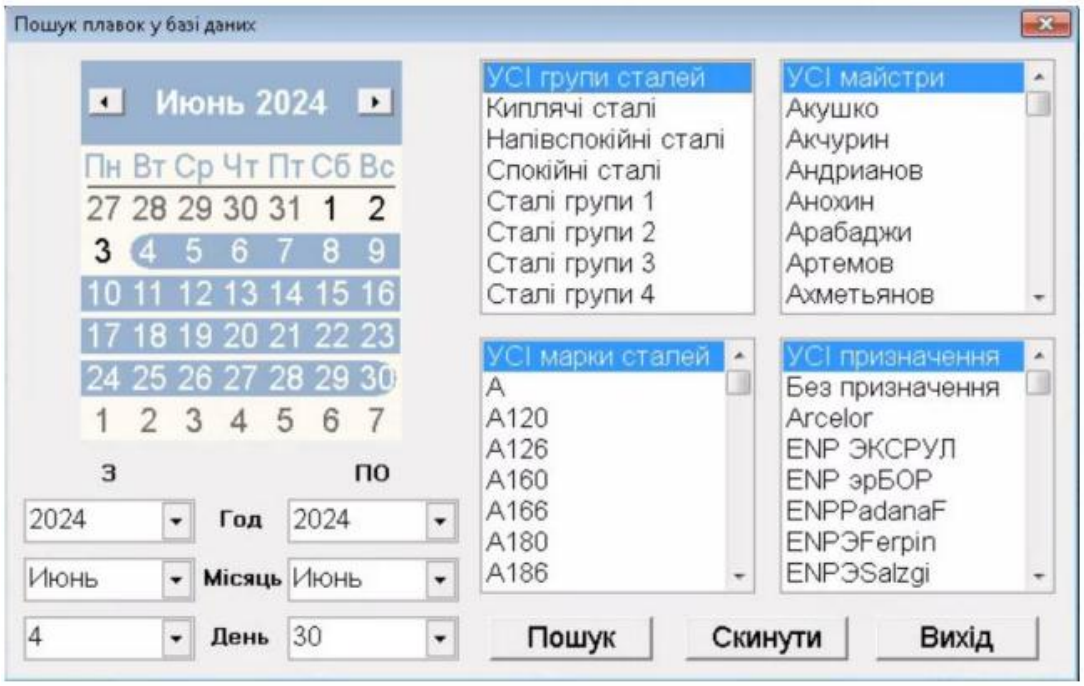


Рисунок 3.3 – Форма пошуку плавок

Форму було переведено на українську мову, а також було вибудовано більш зрозумілий та приємний до сприйняття інтерфейс.

Форму графічного відображення витрат кисню, природного газу, температури та хімічного складу металу адаптовано до функціональних можливостей системи (рис. 3.4). Вона містить дані експрес-аналізів зразків і температури металу в печі, зокрема результати вимірювань приладом «Multilab Celox». Періоди плавки розмежовані вертикальними та горизонтальними лініями відповідно до технологічної карти, номер якої вказано у заголовку графіка. Прогноз вуглецево-температурного стану плавки відображається у верхньому лівому куті форми великим шрифтом. Для відкриття форми використовується кнопка «Витрата».

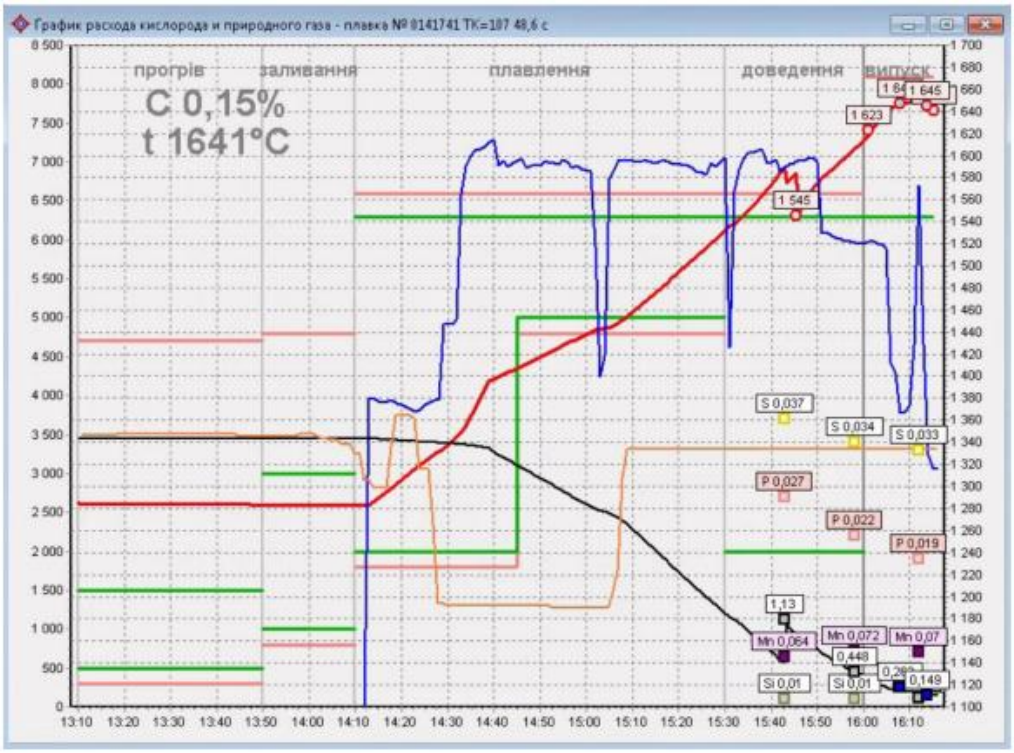


Рисунок 3.4 – Форма графічного відображення витрати кисню, природного газу, теператури та хімічного складу металу

За допомогою кнопки «Витрата» включається відображення траєкторії поточної плавки в координатах «параметри – час». Для поточної (не випущеної) плавки часова координата відображається у реальному масштабі. В якості поточних параметрів плавки використовуються:

- температура сталеплавильної ванни, °С (жирна червона лінія);
- разові виміри фактичної температури металу, °С (червоні кружки);
- вміст вуглецю в металі, %*10^3 (жирна чорна лінія);
- миттєва витрата кисню, $м^3$/г (жирна синя лінія);
- миттєва витрата природного газу, $м^3$/г (жирна зелена лінія);
- середньозважене положення трьох фурм, м*10^3 (помаранчева лінія);

У таблиці 3.1 наведено кольоровий код ліній і геометричних фігур графіку, що зображений на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – **Кольоровий код ліній і геометричних фігур на графіку**

Фігура	Колір	Колір штриховки	Значення
Вертикальні лінії	Світло-сірий	-	Поділ плавки на періоди
Вертикальна лінія	Темно-сірий	-	Час випуску плавки
Лінія	Красний	-	Прогноз температури
Лінія	Чорний	-	Прогноз вмісту вуглецю
Лінія	синій	-	Миттєва втрата кисню
Лінія	Зелений	-	Миттєва втрата природного газу
Лінія	Помаранчевий	-	Середнє інверсне положення фурм дуття
Квадрат	Чорний	Сірий	Експрес-аналіз вуглецю
Квадрат	Чорний	Синій	Замір вмісту вуглецю приладом
Квадрат	Темно-сірий	Сірий	Експрес-аналіз кремнію
Квадрат	Темно-фіолетовий	Фіолетовий	Експрес-аналіз марганцю
Квадрат	Темно-жовтий	Жовтий	Експрес-аналіз сірки
Квадрат	Темно-рожевий	Рожевий	Експрес-аналіз фосфору
Паралельні горизонтальні лінії	Світло-зелений	-	Рекомендований діапазон миттєвої витрати кисню у відповідності до технологічної карти
Паралельні горизонтальні лінії	Рожевий	-	Допустимий діапазон миттєвої витрати кисню у відповідності до технологічної карти

Результуючи усе вищеперелічуване, можемо зробити висновок, що всі ці зміни покращили ефективність роботи, завдяки більш приємному та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу. Переклад на українську мову охоплює одразу декілька областей. По-перше, згідно закону України «Про

забезпечення функціонування української мови як державної», який забовязує використовувати українську мову в офіційній документації, діловодсту листуванні та програмному забезпеченні, яке використовується у роботі. По-друге, перехід на українську мову дозволяє стандартизувати внутрішні та зовнішні комунікації, що спрощує робочі процеси. Також, багато компаній свідомо підтримують розвиток державної мови, що демонструє їхню соціальну відповідальність та повагу до культури країни, а це, в свою чергу, може підвищити конкурентоспроможність на українському ринку, бо україномовні клієнти та партнерипозитивно сприймають використання українсько мови. Це сприяє покращенню іміджу підприємтва та зміцненю ділових відносин.

3.2 Удосконалення програми «Хімлаборант»

Остаточний вигляд головної форми програми «Хімлаборант», що представлений на рисунку 3.5, відображає всі ключові функціональні можливості, необхідні для ефективного виконання лабораторних завдань.

Програму було також переведено на українську мову. Додано хімічний елемент, такий як алюміній (Al). Було оптимізовано зовнішній вигляд форми. Наразі можливо побачити які використано спектролаби (11997, 11997).

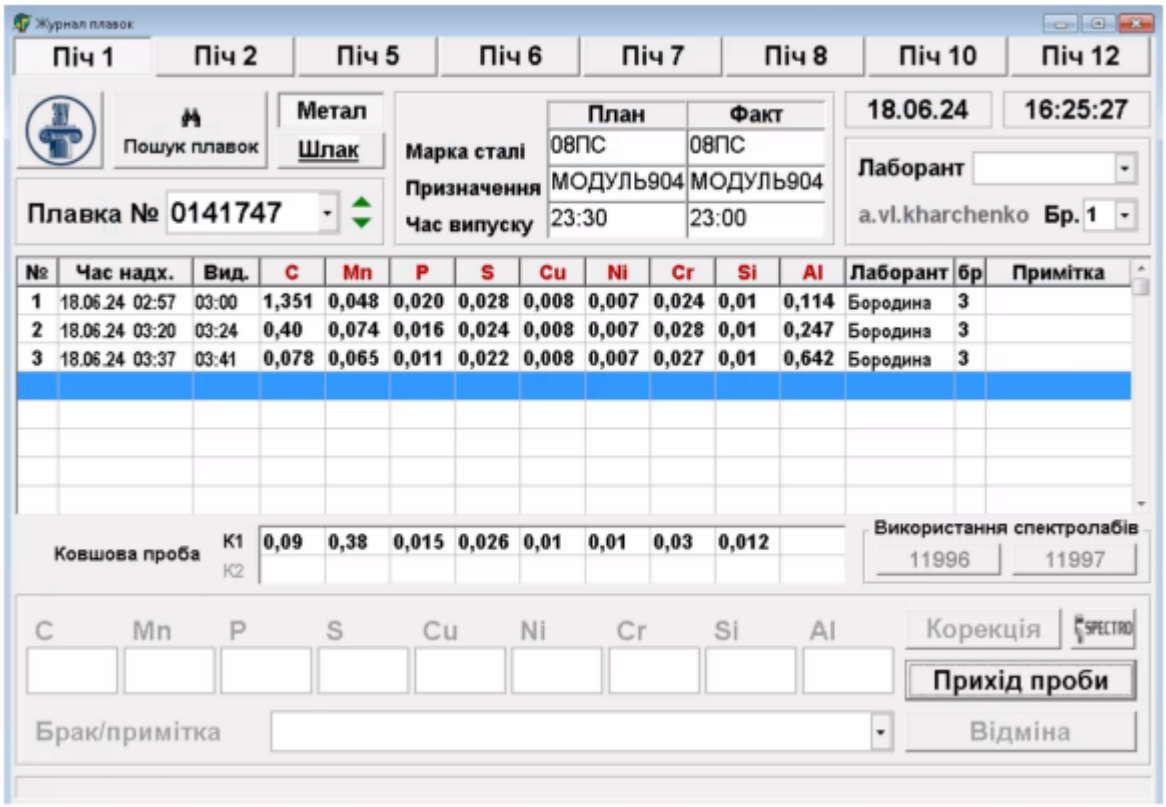


Рисунок 3.5 – Головна форма програми «Хімлаборант»

3.3 Удосконалення програм роботи зі спектральними приладами експрес-аналізу зразків металу «Spectro» та «SpectroL»

Уніфіковані модулі для квантометричних приладів «Spectrolab» у програмах «Spectro», «SpectroL» та «Хімлаборант» були удосконалені за такими критеріями:

- Збільшено розрядність обробки та відображення даних по окремих хімічних елементах (Si, Al).
- Розширено набір стандартних зразків до 150 одиниць.
- Збільшено кількість аналітичних записів до 6 блоків.
- Додано можливість задавати кількість зчитувальних блоків як додатковий параметр в налаштуваннях програми.

Удосконалення уніфікованих модулів для квантометричних приладів «Spectrolab» в програмах «Spectro», «SpectroL» та «Хімлаборант» суттєво підвищило їх функціональні можливості та продуктивність. Зокрема,

збільшення розрядності обробки та відображення даних для хімічних елементів, таких як кремній та алюміній, дозволяє отримувати точніші результати аналізу, що є критичним для високотехнологічних виробництв. Розширення набору стандартних зразків до 150 одиниць надає більшу гнучкість у роботі з різними матеріалами, а збільшення кількості аналітичних записів до 6 блоків відкриває нові можливості для одночасного аналізу великої кількості параметрів. Додаткова можливість задавати кількість зчитувальних блоків у налаштуваннях програми дозволяє користувачам оптимізувати процес роботи, адаптуючи систему до конкретних умов виробництва або лабораторії. Це значно підвищує ефективність і точність аналізу, що є важливим аспектом для забезпечення високої якості продукції.

3.4 Оптимізація управління сталеплавильним процесом на основі термодинамічного моделювання

Щоб максимально підвищити ефективність управління параметрами сталеплавильного процесу, на основі даних, що надаються ПАТ «Запоріжсталь», була створена термодинамічна модель сталеплавильної ванни. Вона враховує три основні фази – металеву, шлакову та газову – і дозволяє прогнозувати основні параметри плавки ще до початку фактичних вимірювань температури та хімічного складу металу. Важливою перевагою цієї моделі є можливість оперативного коригування розрахункових траєкторій на основі результатів експрес-аналізів, що забезпечує більш точний контроль процесу.

Відмінною рисою розробленої системи є детальне моделювання високотемпературної реакційної зони (ВРЗ), що утворюється в місці подачі кисню у рідкий метал. Саме ВРЗ є ключовим фактором, що визначає динаміку та ефективність сталеплавильного процесу. Температура в цій зоні перевищує 2000°C, що сприяє інтенсивному окисленню домішок, зокрема вуглецю, та утворенню оксидів і шлакової фази. Високотемпературні умови

також призводять до випаровування частини металу, який окислюється та утворює характерний бурий дим.

На основі схеми взаємодії сталеплавильної ванни з ВРЗ, що зображена на рис. 3.6, була створена робоча гіпотеза для алгоритму прогнозних розрахунків. Відповідно до цієї схеми, основні матеріали – чавун, брухт та вапняк – подаються у ванну. Кисень, що вдувається через спеціальні фурми, утворює стабільну реакційну зону, яка суттєво відрізняється за хімічним складом і температурними характеристиками від основної маси металу.

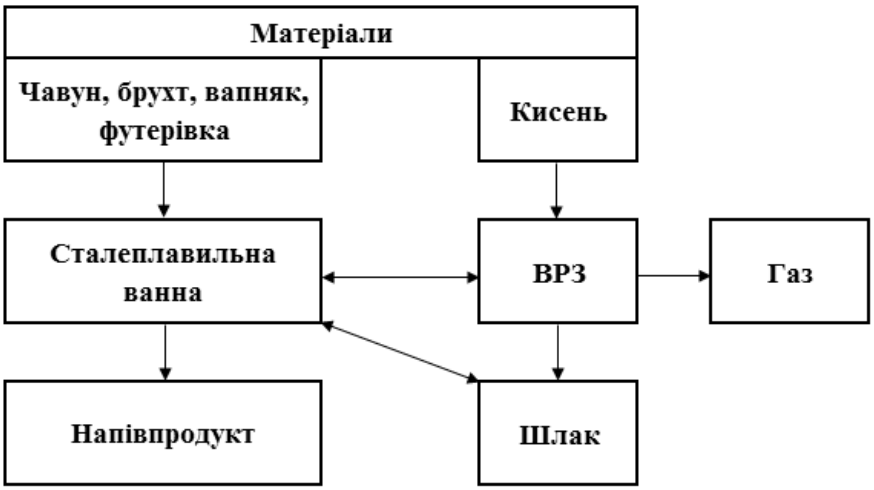


Рисунок 3.6 – Схема взаємодії сталеплавильної ванни з високотемпературною реакційною зоною

У ВРЗ відбувається активне окислення домішок і утворення значної кількості газоподібних продуктів, зокрема оксиду вуглецю (CO). Частина газів виходить з робочого простору печі, проте значна кількість тепла залишається в системі, що дозволяє знизити енерговитрати. Шлак, що утворюється у цій зоні, залишається у ванні та збагачений оксидами заліза. Деякі з цих оксидів відновлюються в процесі взаємодії зі сталевою ванною, що додатково підвищує ефективність плавки.

Однак важливо зазначити, що всі спроби ускладнити модель шляхом введення додаткових ВРЗ не призвели до суттєвого покращення роботи алгоритму. Тому система «ПК Майстер» була оптимізована для забезпечення балансу між точністю розрахунків і швидкістю обробки даних. Це дозволяє

ефективно контролювати параметри плавки в режимі реального часу, знижувати втрати металу та оптимізувати використання енергії й сировини.

Таким чином, система «ПК Майстер» стала ключовим інструментом для оптимізації киснево-конвертерного виробництва на ПАТ «Запоріжсталь». Вона дозволяє не тільки підвищити якість сталі, але й значно знизити виробничі витрати за рахунок точного прогнозування та своєчасного коригування технологічних параметрів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства та його продукції.

3.5 Узагальнення удосконалень та впроваджень

Удосконалення програмного забезпечення для металургійних підприємств, зокрема програмних комплексів «Майстер», «Хімлаборант» та уніфікованих модулів для спектральних приладів «Spectrolab» в програмах «Spectro», «SpectroL», є важливим етапом у розвитку та вдосконаленні виробничих процесів. Ці заходи спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат і поліпшення якості продукції, що є ключовими факторами для успішного функціонування металургійного комбінату в умовах сучасної конкуренції.

Перше важливе удосконалення стосується переведення програмного забезпечення на українську мову, що відповідає вимогам українського законодавства щодо використання державної мови в офіційних документах, діловодстві та програмному забезпеченні. Цей крок дозволяє стандартизувати внутрішні та зовнішні комунікації, спрощує робочі процеси та робить їх більш прозорими для всіх співробітників. Крім того, переклад на українську мову підтримує культурні та соціальні ініціативи компанії, підвищуючи її репутацію і конкурентоспроможність на українському ринку. Такий підхід демонструє соціальну відповідальність компанії та її повагу до державних стандартів і культури.

Другим значущим напрямком удосконалення є збільшення розрядності обробки та відображення даних по окремих хімічних елементах (Si, Al) в програмних комплексах. Це дозволяє отримувати більш точні і детальні результати аналізу, що критично важливо для високоточних металургійних процесів. Завдяки цьому, програми стали більш зручними та ефективними для контролю якості металу, а також дозволяють своєчасно виявляти відхилення у складі, що може призвести до порушень технології виробництва.

Розширення набору стандартних зразків до 150 одиниць стало ще одним важливим удосконаленням. Це дозволяє більш гнучко підходити до роботи з різними матеріалами, забезпечуючи зручність та точність вимірювань. Збільшення кількості аналітичних записів до 6 блоків також сприяло підвищенню точності та детальності аналізів, що є важливим для оцінки різних параметрів продукції одночасно.

Додатково, з’явилася можливість задавати кількість зчитувальних блоків як додатковий параметр в налаштуваннях програми. Це дає користувачам змогу адаптувати програмне забезпечення під конкретні умови роботи, оптимізуючи процес аналізу і обробки даних.

Удосконалення інтерфейсу програм також не залишилося поза увагою. Зміни в оформленні головних форм і форм пошуку плавок, а також адаптація до функціональних можливостей системи, зробили роботу з програмами більш інтуїтивно зрозумілою та приємною для користувачів. Покращений інтерфейс сприяє більш швидкому прийняттю рішень, зменшує кількість помилок та дозволяє працівникам зосередитися на важливих аспектах технологічного процесу, а не на складнощах використання програмного забезпечення.

Впровадження цих удосконалень безпосередньо вплинуло на якість та ефективність роботи. В результаті впровадження нових функцій було досягнуто значного покращення в точності прогнозування температури металу та вмісту вуглецю у сталі, що, в свою чергу, сприяло підвищенню

стабільності та ефективності металургійних процесів. Оновлені програми тепер дозволяють більш точно відображати витрати кисню, природного газу та хімічний склад металу, що дає змогу оптимізувати технологічні процеси та забезпечити більш високу якість продукції.

Загалом, усі ці удосконалення сприяли значному підвищенню продуктивності та точності роботи, що є важливим кроком у досягненні високих стандартів виробництва та якості продукції. Це дозволяє підприємствам не лише підвищити ефективність внутрішніх процесів, але й покращити свою позицію на ринку, забезпечуючи сталі конкурентні переваги в умовах глобалізації та постійних змін у вимогах до металургійної продукції.

Таким чином, удосконалення програмного забезпечення, зокрема програми «Майстер», «Хімлаборант» та «Spectro», значно покращило функціональні можливості підприємств і надає можливість для подальшого розвитку та адаптації технологічних процесів до сучасних вимог ринку. Ці зміни демонструють ефективність стратегічного підходу до модернізації металургійних процесів та забезпечують більш високу якість і конкурентоспроможність продукції підприємств.

Розробка термодинамічної моделі сталеплавильної ванни для ПАТ «Запоріжсталь» стала важливим кроком у підвищенні ефективності управління сталеплавильним процесом. Ця модель дозволяє прогнозувати основні параметри плавки, такі як температура та хімічний склад металу, ще до проведення фактичних вимірювань. Вона враховує три ключові фази – металеву, шлакову та газову – і забезпечує більш точне управління процесом завдяки можливості оперативного коригування розрахункових траєкторій на основі результатів експрес-аналізів. Такий підхід дозволяє своєчасно коригувати технологічні параметри, що сприяє стабільності та ефективності плавки.

Особливістю розробленої моделі є детальне моделювання високотемпературної реакційної зони (ВРЗ), що утворюється при подачі

кисню у рідкий метал. Саме ця зона є критичним елементом, що визначає динаміку сталеплавильного процесу, адже температура у ВРЗ може перевищувати 2000°С, що активізує окислювальні процеси, зокрема окислення вуглецю. Високі температури також сприяють утворенню оксидів, що збагачують шлак і частково відновлюються в процесі взаємодії з металом, підвищуючи ефективність плавки. Прогнозування процесів, що відбуваються в цій зоні, дозволяє зменшити енергетичні витрати за рахунок збереження тепла в системі та покращити контроль за складом шлаку.

Однак важливо зазначити, що надмірне ускладнення моделі шляхом додавання додаткових ВРЗ не призвело до значного покращення роботи алгоритму, тому система «ПК Майстер» була оптимізована для досягнення балансу між точністю розрахунків і швидкістю обробки даних. Такий підхід дозволяє ефективно працювати в режимі реального часу, здійснюючи точний контроль технологічних параметрів, що є критично важливим для забезпечення стабільності та продуктивності плавки.

У підсумку, система «ПК Майстер» стала ключовим інструментом для оптимізації киснево-конвертерного виробництва на ПАТ «Запоріжсталь». Завдяки точному прогнозуванню параметрів плавки і оперативному коригуванню технологічних процесів, підприємство змогло значно знизити витрати на енергію, сировину і метал, що також сприяло підвищенню якості виробленої сталі. Це, в свою чергу, дозволило покращити техніко-економічні показники і підвищити конкурентоспроможність як самого підприємства, так і його продукції на ринку.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища мартенівського цеху при проведенні наукових досліджень

Мартенівський цех є важливим елементом металургійного виробництва, проте він також пов'язаний з високими температурами, підвищеним тиском та утворенням великої кількості вибухонебезпечних газів. Оскільки цей процес проходить у несприятливих кліматичних умовах, робітники піддаються постійному впливу високих температур, теплового випромінювання, запиленості та загазованості, що значно ускладнює умови праці.

Основним джерелом забруднення атмосфери в цеху є мартенівська піч, яка виділяє значну кількість газів. Газові викиди часто виникають при порушенні газодинамічних параметрів процесу, що може призвести до витікання великих язиків полум'я з-під заслінок вікон печі або перекидання клапанів. Особливо небезпечними є періоди, коли вікна печі відкриті, а також при випуску та розкислюванні сталі в ковші.

Серед газів, що потрапляють у робочу зону, найбільш небезпечним є оксид вуглецю (CO), який є продуктом неповного згоряння органічного палива. Потрапляючи в організм людини, чадний газ може викликати кисневе голодування та призвести до серйозних проблем зі здоров'ям. Іншим небезпечним газом є сірчистий ангідрид (SO_2), який має дратівливу дію на органи дихання і утворюється в результаті згоряння сірки, що міститься в сировині.

Оксиди азоту, що утворюються в зоні високих температур через окислення азоту в повітрі, також становлять небезпеку для здоров'я. Вони можуть викликати роздратування та опіки слизових оболонок. Оксиди марганцю та хрому, які утворюються під час мартенівської плавки, є

токсичними і можуть спричинити серйозні органічні ураження внутрішніх органів, таких як печінка та нирки.

Пил та гази також виділяються під час перевантаження, транспортування матеріалів та інших операцій, що включають роботу з порошками. Висока температура в робочому просторі призводить до випаровування металу та шлаку, що потім конденсується у вигляді пилу дрібних частинок. Крім того, пил утворюється при заправці поду, укосів, підсипанні порогів та заливці чавуну в піч. Не герметичність устаткування під час операцій зі шихтою також сприяє проникненню пилу в робочу зону.

Пил, що потрапляє в організм через дихальні шляхи, шкіру або через заковтування, може спричинити пневмоконіози, фібрози, хронічні бронхіти, а також різні шкірні захворювання, що є характерними для металургійних виробництв.

Теплове випромінювання в мартенівському цеху походить від факела полум'я, нагрітих до високих температур вогнетривких футеровок, розплавленого металу та шлаку. Це випромінювання особливо небезпечне при відкритих вікнах печі. Інфрачервоне випромінювання здатне негативно впливати на центральну нервову систему людини, спричиняти підвищене серцебиття, коливання артеріального тиску, а також порушувати водно-сольовий баланс організму, що може призвести до теплового удару при тривалому впливі високих температур.

Шум в мартенівському цеху виникає через аеродинамічні та термічні явища в процесі плавки, а також через роботу машин і механізмів. Надмірний шум негативно впливає на працездатність, знижує продуктивність праці та має шкідливий вплив на серцево-судинну та центральну нервову систему, спричиняючи загальне зниження здоров'я працівників.

Гігієнічна характеристика трудового процесу та оцінка чинників виробничого середовища для робочих місць сталеварів мартенівського цеху є важливими для розробки заходів із забезпечення безпеки праці та зниження ризиків для здоров'я працюючих в таких умовах [34].

Для робочого місця сталевара пічного прольоту дана гігієнічна характеристика трудового процесу і оцінка чинників виробничого середовища (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – **Оцінка чинників виробничого і трудового процесу на робочому місці сталевара мартенівської печі**

Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови, характер праці			Час дії чинника за зміну %
			I ст.	II ст.	III ст.	
1. Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3						
I клас небезпеки:						
- Ангідрид хромовий;	0,01	0,059	-	-	5,9	94
- Оксиди нікелю.	0,05	0,015	-	-	-	
II клас небезпеки:						
- Оксиди марганцю.	0,3	0,27	-	-	-	94
III клас небезпеки:						
- Сірчистий ангідрид;	10	28,5	2,85	-	-	94
- Оксиди азоту;	5	35,5	-	-	7,1	
- Вуглецю оксид.	20	42	2,1	-	-	
2. Пил, переважно фіброгенної дії, мг/м^3	4	143	-	-	35,8	100
3. Вібрація, дБ	92	98	-	6	-	94
4. Шум, дБА	80	96	-	-	16	94
5. Мікроклімат в приміщенні (теплий період):						
- Температура повітря, °С	18-21	41	-	-	20	94
- Швидкість руху повітря, м/с	0,5	0,47	-	-	-	
- Відносна вологість повітря,	40-60	35	-	-	-	
6. Інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	140	5220	-	-	5220	57
7. Тяжкість і напруженість праці	Категорія тяжкості – важка (III), праця дуже напружена					

Гігієнічна оцінка умов праці на робочому місці сталевара мартенівської печі: умови і характер праці відносяться до III класу 3 ступеню. Атестація робочого місця: робоче місце має в наявності 2 чинника I ступеню, 1 чинник II ступеню і 6 чинників III ступеню. За показниками робоче місце слід важати з особливо шкідливими і особливо важкими умовами праці.

4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища мартенівського цеху

Ефективним засобом для боротьби з тепловими надлишками у мартенівському цеху є аерація. Вона дозволяє забезпечити значний повітрообмін у виробничих приміщеннях при мінімальних експлуатаційних витратах [34]. Аерація сприяє зниженню температури в цеху, що особливо важливо для забезпечення безпеки праці та комфорту робітників.

Для контролю над пилом і надмірним теплом у мартенівському виробництві ефективно застосовуються аспіраційні системи, що здійснюють відсмоктування запиленого повітря з робочих зон та фільтрацію перед його викидом в атмосферу. Цей метод дозволяє значно знизити концентрацію шкідливих часток у повітрі та покращити умови праці.

З метою зменшення рівня шуму, що може суттєво впливати на здоров'я робітників, необхідно звукоізолювати приміщення, в яких постійно перебувають люди, зокрема пости управління мартенівськими печами та кімнати відпочинку. Для зниження шуму від агрегатів використовуються звукоізолюючі кожухи, виготовлені зі сталі товщиною 2–3 мм. Вони покривають шумні вузли агрегатів, а внутрішні поверхні облицьовують звукопоглинальними матеріалами. Окрім того, для зменшення шуму в повітроводах застосовуються плавні переходи між трубопроводами та глушники, що дозволяють мінімізувати аеродинамічні шуми. Індивідуальний захист від шуму включає використання протигаласливих вкладишів "Беруш", що є важливим елементом захисту слуху робітників [35].

Щодо захисту від теплових випромінювань, то для зменшення їх впливу на організм робітників важливо використовувати теплоізоляцію для поверхонь, що випромінюють тепло, а також застосовувати екранування робочих місць. Важливим аспектом є швидке виконання операцій, пов'язаних з відкриттям вікон, заливкою чавуну, викачуванням шлаку та розливанням сталі, що дозволяє мінімізувати час перебування працівників під впливом високих температур. Не менш важливі природна аерація та механічна вентиляція, які забезпечують циркуляцію повітря і знижують температуру в робочих зонах.

Засобами індивідуального захисту від теплових випромінювань є спецодяг, виготовлений з матеріалів, стійких до високих температур і променистої енергії, таких як сукно, брезент або хімічно оброблені тканини з металевим покриттям. Для захисту очей використовуються спеціальні окуляри або щитки зі скла, що мають жовто-зелений або синій відтінок, які ефективно блокують шкідливі промені. Також важливим елементом є спеціальне шкіряне взуття, яке захищає від теплового випромінювання та інших небезпек [34].

Для підтримки оптимального рівня гідратації працівників у мартенівському цеху, вживаються заходи щодо організації питного режиму. Робітникам забезпечують підсолену газовану воду, білково-вітамінні напої та інші засоби для збереження водно-сольового балансу, що допомагає запобігти перегріванню організму в умовах високих температур. Встановлення таких систем є важливим заходом для збереження здоров'я працівників та підвищення їхньої працездатності в умовах високих температур і напруженого виробничого процесу.

4.3 Заходи з електробезпеки

Електробезпека у виробничих приміщеннях мартенівського цеху має вирішальне значення через наявність кількох чинників, що підвищують

ризик ураження електричним струмом. Зокрема, приміщення пічного і розливного прольотів, а також міксерного відділення характеризуються наявністю струмопровідних металевих підлог і високих температур повітря, що створює особливо небезпечні умови для роботи персоналу.

Крім того, важливим є дотримання правил класифікації зон за рівнем небезпеки. Основні виробничі приміщення цеху, незважаючи на використання природного газу та мазуту як палива, не належать до вибухонебезпечних зон. Проте зони класу П-IIа, до яких відносяться кабельні тунелі, галереї та пости управління, характеризуються наявністю твердих горючих речовин і потребують особливих заходів для забезпечення безпеки роботи електрообладнання.

У таких приміщеннях допускається встановлення електроустаткування закритого та захищеного виконання. Вибір типу обладнання залежить від умов експлуатації. Наприклад, для стаціонарних машин мінімальний ступінь захисту оболонок має бути IP 44, а для пересувних механізмів – IP 54 [34].

У пожежонебезпечних зонах електропроводка повинна виконуватись відкритим способом по конструкціях, що не згорають. Використовуються ізольовані проводи марки АППР, АПВ, АППВ, а також проводка в сталевих трубах дротом ПРТО або АПРТО. У пустотах будівельних конструкцій, що не згорають, застосовуються проводи марок АПВ і ПВ. Використання неізольованих проводів у будь-яких умовах категорично заборонено.

Для живлення обладнання напругою 380/220 В у цеху використовується чотиридротяна мережа трифазного струму із глухозаземленою нейтраллю, що забезпечує ефективний розподіл електроенергії та підвищує рівень безпеки.

В умовах мартенівського цеху використовуються такі типи електродвигунів:

- трифазні асинхронні двигуни серії АОЗ;
- асинхронні короткозамкнуті двигуни серії 4А в закритому виконанні, що обдувається;

- вибухозахищені короткозамкнуті двигуни серії ВАО, що працюють на напрузі 6 кВ.

Для запобігання ураження електричним струмом у мартенівському цеху впроваджені наступні заходи безпеки [35]:

- використання якісної ізоляції струмопровідних частин (гумова, поліхлорвінілова, нейритова, паперова, просочена мастилоканіфоллю);
- знижена напруга для переносного електроінструменту та світильників (42 В у приміщеннях без підвищеної небезпеки та 12 В у приміщеннях з підвищеною небезпекою);
- подвійна ізоляція струмопровідних частин у корпусі електрообладнання;
- занулення електроустановок як основний захід захисту;
- застосування автоматичних пристроїв захисного відключення;
- недоступне розташування струмопровідних частин для персоналу.

Для захисту персоналу також використовуються діелектричні засоби індивідуального захисту: рукавички, боти, килимки, інструменти з ізольованими рукоятками та покажчики напруги.

Таким чином, ефективна організація електробезпеки у мартенівському цеху базується на суворому дотриманні вимог стандартів і правил, що враховують специфіку роботи в умовах підвищеної температури, струмопровідних поверхонь і ризику займання горючих матеріалів.

4.4 Заходи пожежної безпеки

Природний газ, який використовується в мартенівському виробництві, є легкозаймистою речовиною, що створює потенційні ризики займання та вибухів. Займання можливе за умови утворення вибухонебезпечних сумішей газу з повітрям, що найчастіше трапляється через несправності обладнання або порушення правил експлуатації. Найнебезпечніші ситуації виникають у

мартенівських печах, трубопроводах і пиловловлювачах. Окрім вибухів, можливі раптові займання, які, як правило, призводять до важких опіків персоналу. Такі випадки можливі під час зупинки печі, заміни фурм, підготовки шлакових або сталевих льотків.

Крім газових вибухів, у мартенівських цехах виникають ситуації, пов'язані з вибухами через взаємодію рідких продуктів плавки (сталі або шлаку) з вологою. Такі вибухи супроводжуються сильним звуком, викидом розплавлених матеріалів і утворенням іскор, що може спричинити серйозні наслідки для здоров’я персоналу та цілісності обладнання [35].

Пічний проліт мартенівського цеху класифікується як приміщення категорії Г за пожежонебезпекою. Це означає, що у приміщенні присутні негорючі речовини в гарячому, розжареному чи розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням тепла, утворенням іскор чи полум’я. Крім того, будівля цеху належить до II ступеня вогнестійкості, оскільки основні несучі конструкції виконані з важкозаймистих матеріалів із межею вогнестійкості від 0,25 до 2 годин [4].

Склад паливно-мастильних матеріалів цеху відноситься до пожежонебезпечної зони П-I, оскільки тут зберігаються горючі рідини з температурою займання понад 61 °С. У той час пічний проліт цеху визначається як зона В-Іа через можливість утворення вибухонебезпечних сумішей горючих газів і повітря у разі аварій або пошкодження обладнання. У цих зонах використовується вибухозахищене електрообладнання з підвищеною надійністю [4].

Для попередження вибухів, пов’язаних із рідкими продуктами плавки, суворо забороняється контактувати розплавлений метал чи шлак із вологою. З цією метою забезпечують ретельне просушування ковшів і жолобів, підтримують сухість робочих зон, інструментів і обладнання. Не допускається кидати в жолоби із розплавленим металом вологі або холодні предмети, включно зі скрапом чи сміттям [35].

Будівлі мартенівського цеху обладнані подвійними стрижневими громовідводами для захисту від ударів блискавки. Це гарантує запобігання прямому впливу блискавок і можливим вторинним пошкодженням [35].

У разі пожежі забезпечується швидка евакуація персоналу через заздалегідь спроєктовані евакуаційні маршрути. Максимальна допустима довжина шляху евакуації становить 100 м, що відповідає чинним нормам безпеки для категорії В. Це дає змогу уникнути умов, що загрожують життю, таких як висока температура, дефіцит кисню або задимлення.

Цех обладнано автоматичною системою пожежної сигналізації, яка здійснює моніторинг, виявлення пожеж, подачу тривожних сигналів, відключення вентиляції та управління системою сповіщення [35].

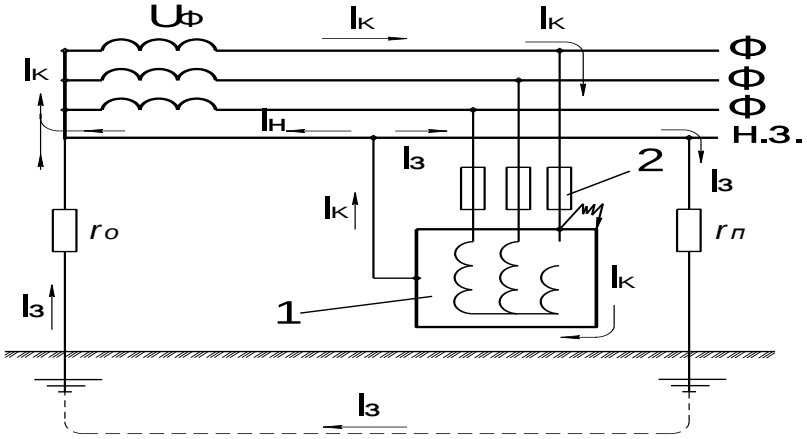
У пічному прольоті встановлено систему порошкового пожежогасіння, яка ефективно ліквідовує загоряння, пов’язані з розплавленими металами, карбідом кальцію або іншими специфічними речовинами. Як гасильні матеріали використовуються порошкові суміші ПС і ПСБ, основними компонентами яких є кальцинована сода і бікарбонат натрію [35].

Для локалізації пожеж у цеху використовуються хімічні пінні вогнегасники ОХП-10, вуглекислотні вогнегасники (ВВ-2, ВВ-5, ВВ-8), а також пересувні модифікації (ВВ-25, ВВ-80), які забезпечують оперативність і гнучкість у гасінні пожеж .

4.5 Інженерна розробка захисту оператора печі від ураження електричним струмом

При сполученні металевих конструкцій, які знаходяться під напругою, з іншими елементами електричної системи виникає серйозна небезпека поразки електричним струмом. Основним методом захисту від цього є захисне занулення, схема якого показана на рисунку 4.1. Захисне занулення працює таким чином, що пробій на корпус призводить до короткого замикання між фазним і нульовим дротами, що викликає великий струм

через систему захисту, що швидко відключає пошкоджене устаткування від електричної мережі.



1 – трансформатор; 2 – апарати захисту від струмів КЗ (запобіжники); $r_п$ – опір повторного заземлення нульового проводу; r_0 – опір робочого заземлення нейтралі трансформатору; $I_к$ – струм короткого замкнення; $I_з$ – струм замкнення на землю; $I_н$ – частина струму короткого замкнення, який тече через нульовий захисний провідник; Ф – фазні провідники; Н.З. – нульовий захисний провідник

Рисунок 4.1 – Принципова схема захисного занулення

На схемі видно, що при замиканні на корпус фаза підключається до нульового дроту, що забезпечує протікання струму короткого замикання через систему захисту (плавкий запобіжник або автоматичний вимикач). Це дозволяє швидко відключити пошкоджене обладнання, мінімізуючи небезпеку для людей. Щоб система захисту спрацювала ефективно, струм короткого замикання повинен бути достатньо великим. Для цього необхідно, щоб струм був в три рази більший за номінальний струм плавкої вставки запобіжника. Ця умова забезпечується, якщо провідник нульового захисту має провідність не менше 50 % від провідності фазного дроту. Нульовими проводами можуть бути сталеві смуги, металеві оболонки кабелів, конструкції будівель або навіть підкранові шляхи.

Необхідно перевірити дотримання умов спрацьовування захисту. Для цього необхідно визначити найменші допустимі умовами спрацьовування

захисту $I_{к.}$:

$$I_к \geq К I_{ном}, \quad (4.1)$$

де К – коефіцієнт кратності номінального струму;

$I_{ном}$ – номінальний струм плавкої вставки запобіжника, А.

Найменше допустиме значення струму короткого замкнення $I_к$:

$$I_к = 3 \cdot 75 = 225 \text{ А}.$$

З даних [48] знаходимо повний опір трансформатора $z_т$=0,195 Ом. Визначаємо опіри фазного і нульового захисного провідників $R_{ф,}$ $X_ф$, $R_{н.з}$, $X_{н.з}$, $X_п$ на ділянці лінії l = 200 м.

Шуканий опір фазного провідника визначаємо по формулі:

$$R_ф = \rho \cdot l / S_ф, \quad (4.2)$$

де ρ – питомий опір провідника, для міді дорівнює 0,018 Ом·мм^2/м [35];

$S_ф$ – перетин фазного провідника, мм^2; $S_ф$=25 мм^2.

$$R_ф = 0{,}018 \cdot 200/25 = 0{,}144 \text{ Ом}.$$

Оскільки фазний дріт мідний, то $X_ф$ = 0, для нульового захисного провідника також $X_{н.з}$ = 0, тому ними нехтуємо; коли фазний і нульовий провідники розташовані в безпосередній близькості один від одного, опір $X_п$ невеликий і їм також можна знехтувати.

$$R_{н.з} = \rho \cdot l / S_{н.з}, \quad (4.3)$$

де $S_{н.з}$ – перетин нульового провідника, мм^2; $S_{н.з}$=14 мм^2 [48];

$$R_{н.з} = 0{,}018 \cdot 150/14 = 0{,}193 \text{ Ом.}$$

Знаходимо дійсне значення струму однофазного короткого замикання, який проходить по петлі фаза-нуль, при замиканні фази на корпус двигуна, по формулі:

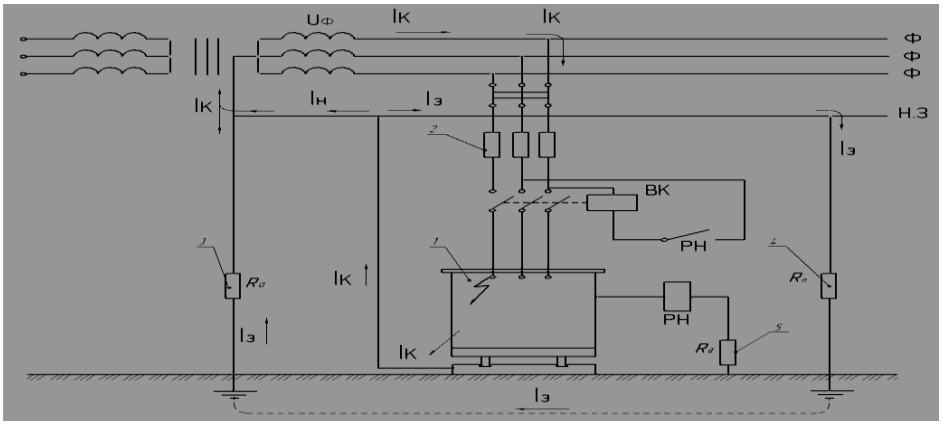
$$I_к = \frac{U_ф}{z_m/3 + \sqrt{(R_ф + R_{н.з})^2 + (X_ф + X_{н.з} + X_п)^2}}, \quad (4.4)$$

де $U_ф$ – фазна напруга мережі, В;

$z_т$ – повний опір трансформатора, Ом.

$$I_к = \frac{220}{0{,}195/3 + \sqrt{(0{,}144 + 0{,}193)^2}} = 547 \ A..$$

Перевіримо, чи забезпечено належне відключення в мережі з мідним нульовим захисним проводом перетином 14 мм². Лінія 380/220В живиться від трансформатора потужністю 400 кВА, з'єднаного за схемою У/УН. На кінці лінії є занулений споживач енергії, електродвигун, який захищений запобіжником номінальним струмом 75 А. Коефіцієнт кратності струму для цього запобіжника дорівнює 3. Таким чином, мінімальний струм короткого замикання, необхідний для спрацьовування захисту, складає 225 А.



1 – трансформатор; 2 – апарати захисту від струмів КЗ (запобіжники); $R_п$ – опір повторного заземлення нульового проводу; R_0 – опір робочого заземлення нейтралі трансформатору; $R_д$ – опір допоміжного заземлення трансформатору; $I_к$ – струм короткого замкнення; $I_з$ – струм замкнення на землю; $I_н$ – частина струму короткого замкнення, який тече через нульовий захисний провідник; ВК – відключаюча катушка автоматичного вимикача; РН – реле напруження; Ф – фазні провідники; Н.З. – нульовий захисний провідник

Рисунок 4.2 – Принципова схема захисного відключення

Розрахуємо опір фазного і нульового провідників на відстані 200 м. Для фазного провідника, перетином 25 мм², опір становить 0,144 Ом. Нульовий захисний провідник з перетином 14 мм² має опір 0,193 Ом. Знаходимо струм короткого замикання, який протікає через петлю фаза-нуль при замиканні фази на корпус, за формулою. Отримуємо значення струму 547 А, що значно перевищує мінімально допустимий струм для спрацьовування захисту (225 А). Це підтверджує, що система занулення працює правильно.

Знайдемо опір допоміжного заземлення $r_В$, при якому УЗВ спрацьовуватиме, з рівняння напруги спрацьовування реле U_c:

$$U_c = U_д \frac{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}}{\sqrt{(R_p + r_B)^2 + X_p^2}}, \quad (4.5)$$

де $R_р$ и $X_р$ – активний і індуктивний опіри обмотки реле, Ом;

$U_д$ – допустима напруга дотику, В.

Підставляємо відповідні значення в рівняння (4.5) напруги спрацьовування реле та отримуємо:

$$30 = 42 \cdot \frac{\sqrt{400^2 + 200^2}}{\sqrt{(400 + r_Â)^2 + 200^2}};$$

$$1764 \cdot (400^2 + 200^2) = 900 \cdot [(400 + r_B)^2 + 40000];$$

Отже

$$r_В^2 + 800 \cdot r_В - 552000 = 0.$$

Звідки знаходимо опір допоміжного заземлення:

$$r_B = \frac{-800 + 1687{,}6}{2} = 444 \ Ом.$$

Таким чином, якщо напруга дотику досягне 42 В, то пристрій захисного відключення спрацьовуватиме при опірі допоміжного заземлення $r_В$=444 Ом.

Зважаючи на можливу віддаленість електродвигуна від трансформатора, в деяких випадках можуть виникнути проблеми із забезпеченням надійного занулення. Для того, щоб гарантувати безпеку, необхідно забезпечити правильне відключення установки при замиканні фази на корпус. Для цього встановлюють захисне відключення, яке реагує на потенціал корпусу (рис. 3.2). Використовують реле напруги з

спрацьовуванням при 30 В. Знайдемо опір допоміжного заземлення, при якому система спрацює, використовуючи рівняння для напруги спрацьовування реле. Отримуємо опір допоміжного заземлення 444 Ом, що дозволить пристрою захисного відключення спрацьовувати при напрузі дотику 42 В.

В результаті перевірки стало зрозуміло, що система занулення забезпечує належну захисну здатність при правильному підборі матеріалів і характеристик проводів. Проте для гарантування повної безпеки, особливо при великих відстанях між трансформатором і споживачем, необхідно додатково використовувати захисні пристрої, такі як реле напруги та допоміжне заземлення, що дозволяє забезпечити надійне відключення при замиканні фази на корпус.

Важливість належного занулення та застосування додаткових систем захисту, таких як реле напруги, не можна недооцінювати. Це дозволяє не тільки забезпечити безпеку працівників, а й мінімізувати ризики пошкодження обладнання в разі короткого замикання.

4.6 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії при обробці результатів наукових досліджень

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

- оптимальна температура повітря – 22 ^{o}C (допустима – 20-24 ^{o}C);

- оптимальна відносна вологість – 40-60% (допустима – не більше 75%);

- швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с.

Умови праці в лабораторії характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

У зв'язку з тим, що природне освітлення лабораторії здійснюється через віконні отвори і є дуже слабким, на робочому місці має застосовуватися також штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають в міру необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість.

Виконаємо розрахунок штучного освітлення по методу світлового потоку.

Довжина приміщення – 8 м, ширина – 6 м, висота – 3 м. Розрахункова висота: h = 3 - 0,8=2,2 м (0,8 м – висота розрахункової поверхні).

Площа приміщення: $S = 6 \cdot 8 = 48\,\text{м}^2$.

Визначимо індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{(A + B) \cdot h}, \tag{4.6}$$

де A и B – довжина та ширина приміщення, м;

h – висота підвісу світильників над розрахунковою поверхнею, м.

$$i = \frac{6 \cdot 8}{(6 + 8) \cdot 2{,}2} = 1{,}56.$$

Оскільки стіни і стеля лабораторії бетонні, то приймаємо коефіцієнт віддзеркалення стелі і стенів $\rho_п$ = 50 %, $\rho_с$ = 30 % відповідно.

Знаходимо коефіцієнт використання світлового потоку η = 50 %.

Необхідний світловий потік ламп світильників:

$$F = \frac{E \cdot k_з \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta}, \tag{4.7}$$

де E – найменша нормована освітленість, E = 300 лк, так як розряд зорових робіт дорівнює 3;

$k_з$ – коефіцієнт запасу, $k_З$ = 1,4 (для приміщень, пов'язаних з роботою в лабораторії);

S – площа приміщення, м^2;

z – поправочний коефіцієнт для переходу від найменшої освітленості до середньої (зазвичай значення його набувають в межах 1,1 – 1,2), z = 1,1;

N – кількість світильників;

η – коефіцієнт використання, тобто відносна доля потоку лампи, падаюча на поверхню S.

Розрахуємо за формулою (4.7) добуток $F \cdot N$:

$$F \cdot N = \frac{300 \cdot 1{,}4 \cdot 48 \cdot 1{,}1}{0{,}5} = 44352 \text{ лм.}$$

Знайдемо необхідне число ламп. Для освітлення виробничих приміщень вибір джерел світла проводять з врахуванням освітленості. При освітленості від 150 до 300 лк доцільно застосовувати джерела світла типа ЛБ, ДРЛ, ЛБХ. Вибираємо люмінесцентні лампи типа ЛХБ80 (2×80 Вт); довжина лампи – 1,5 м, ширина – 0,4 м, світловий потік даної лампи – 3840 лм.

Отже, потрібне число ламп:

$$N = \frac{44352}{3840} \approx 12 \text{ шт.} \qquad (4.8)$$

Оскільки світильники дволампові, то для забезпечення нормальної потужності освітлення лабораторії необхідно 6 світильників. Приймаємо, що кількість світильників по довжині складатиме 2 шт., а по ширині – 3 шт.

Світильники з люмінесцентними лампами в основному розташовують рядами. Ряди слід орієнтувати паралельно стіні з вікнами. Потрібно встановити два світильники в ряд. Застосовуємо світильники ШОД (оскільки ШОД дає більш рівномірне освітлення) з люмінесцентними лампами ЛХБ потужністю 2×80 Вт і з потоком 3840 лм. Схема розташування світильників представлена на рис. 4.3.

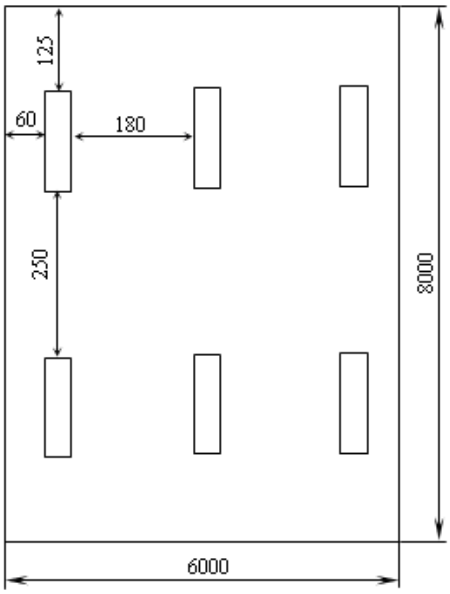


Рисунок 4.3 - Схема розташування світильників

$$la = \frac{1}{2} \cdot La, \tag{4.9}$$

$$lв = \frac{1}{3} \cdot Lb \tag{4.10}$$

$$la = 1{,}25 \text{ м}, \; lв = 0{,}6 \text{ м},$$

де L – відстань між сусідніми світильниками (рядами люмінесцентних світильників);

La – відстань між сусідніми світильниками по довжині приміщення, La = 2,5 м;

$Lв$ – відстань між сусідніми світильниками по ширині приміщення, $Lв$ = 1,8 м;

l – відстань від крайніх світильників або рядів світильників до стіни.

4.7 Електробезпека

Приміщення лабораторії згідно з ПБЕ (Правилами безпеки електричних установок) віднесене до 1 класу – без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Це приміщення є сухим, безпиловим, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами та малим числом заземлених електричних приладів. Однак, не зважаючи на це, основними причинами поразки працівників лабораторії електричним струмом є: контакт з металевими неструмоведучими частинами електрообладнання, які можуть опинитися під напругою через пошкодження ізоляції; а також використання заборонених електричних приладів (наприклад, електричні чайники, плити, обігрівачі), що можуть бути причиною виникнення коротких замикань або інших аварійних ситуацій.

Основні заходи для запобігання ураженню електричним струмом включають: захист від дотику до струмоведучих частин електричних установок за допомогою ізоляції, огорож, дистанційного управління та попереджувальних сигналізацій. Інші важливі елементи захисту – це застосування низьких напруг, заземлення та автоматичне відключення, а також постійне навчання працівників безпечним методам роботи.

До організаційних заходів відносяться: інструктажі з безпеки, навчання та перевірка знань працівників щодо електробезпеки, а також постійний контроль за виконанням правил безпеки на робочих місцях. Важливим є також регулярне технічне обслуговування електричного обладнання та своєчасна перевірка його справності.

4.8 Пожежна та техногенна безпека

Будівля лабораторії за вибуховою та пожежною небезпекою відноситься до приміщень категорії Д. Це пов'язано з наявністю горючих матеріалів (книги, документи, меблі) та важкоспалимих речей (різне лабораторне обладнання), які можуть загорітися при взаємодії з вогнем без вибуху. За конструктивними характеристиками будівля є об'єктом з

несучими та огороджувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону, з використанням дерев'яних конструкцій, що захищені штукатуркою або важкоспалимими матеріалами. Тому ступінь вогнестійкості будівлі можна оцінити як третю (III).

Основними причинами виникнення пожежі в лабораторії є: несправності в електропроводці, розетках та вимикачах, що можуть призвести до короткого замикання або пошкодження ізоляції; використання несправних електричних приладів, а також електронагрівальних пристроїв з відкритими нагрівальними елементами; виникнення пожежі через попадання блискавки або зовнішні впливи; а також неакуратне поводження з вогнем або недотримання заходів пожежної безпеки.

Для боротьби з пожежами в лабораторії передбачені вуглекислотні вогнегасники ВВ-5, а також ручні пожежні інструменти (гаки, ломи, сокири, відра, лопати, ножиці для різання металу), що розміщуються на видних та доступних місцях. Інструменти зберігаються на спеціальних стендах та щитах, що забезпечує їх швидкий доступ у разі надзвичайної ситуації.

Для виявлення та швидкого реагування на пожежі в лабораторії встановлено автоматичну пожежну сигналізацію АДС (автоматичний димовий сповіщувач) та автоматичну систему пожежогасіння, що дозволяє оперативно визначити місце виникнення пожежі і зменшити її масштаби до того, як ситуація стане критичною.

Крім того, необхідно приділяти особливу увагу евакуації людей у разі виникнення надзвичайної ситуації. Для цього розроблені чітко сплановані евакуаційні шляхи, які позначені на схемах, що розміщуються в доступних місцях. Це дозволяє всім працівникам лабораторії бути обізнаними з евакуаційними планами і швидко покинути приміщення у випадку пожежі або іншої небезпеки.

ВИСНОВКИ

В ході виконаної роботи було здійснено комплексне дослідження ключових аспектів діяльності ПАТ «Запоріжсталь», зокрема його впливу на розвиток української металургії та економіки країни в цілому. Було розглянуто поточні виклики, з якими комбінат стикається останнім часом, а також вивчено впровадження нових марок сталі, їх характеристики та область застосування. Одним із важливих етапів було вивчення процесу виробництва спокійних марок сталей на установці ДСПА-1 та аналіз технологічних і технічних аспектів цього процесу.

Окремо досліджено термодинамічні моделі, що описують систему «Метал-шлак-газ», що дозволяє більш глибоко зрозуміти хімічні та теплові процеси, що відбуваються в сталеплавильній ванні. Застосовані методи розв’язання векторного рівняння стану системи, а також розглянуті взаємодії між різними фазами, що є основою для розробки ефективних стратегій керування сталеплавильним процесом. Особливу увагу було приділено розрахункам теплового балансу і кінцевої температури реакційної зони, що мають прямий вплив на ефективність виробничих процесів.

Важливою частиною роботи стало удосконалення програмного комплексу «Майстер», спрямоване на оптимізацію виробничих процесів. Покращення функціоналу цієї програми та інших систем автоматизації, таких як «Хімлаборант», дозволили значно підвищити точність контролю за хімічним складом металу та зменшити людський фактор у процесі плавки. Оновлення спектральних приладів також допомогло досягти більш точних результатів при аналізі металів.

Крім того, у роботі розглянуто важливі питання охорони праці та техногенної безпеки на підприємстві. Оцінка ризиків, пов’язаних із високими температурами, шумом, пилом та іншими небезпечними факторами, дозволила розробити комплекс заходів для зниження цих ризиків. Особливу увагу було приділено забезпеченню електробезпеки та пожежної безпеки на виробництві, що є критично важливим для безпеки працівників.

В цілому, результати цієї роботи стали значущим внеском у розвиток технологій та вдосконалення процесів на ПАТ «Запоріжсталь». Завдяки впровадженню термодинамічних моделей, покращенню програмного забезпечення та заходів з охорони праці, підприємство зможе підвищити ефективність виробництва, знизити витрати і поліпшити загальні техніко-економічні показники.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Харченко О. В. Технологічний супровід тестування та налагодження програмного комплексу «Майстер» // Звіт про НДР. Запоріжжя : ЗДІА, 2013. 77 с.

2. Siemens. *Siemens Industrial Copilot Expanded, Adopted by Thyssenkrupp*. [Електронний ресурс]. https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-industrial-copilot-expanded-adopted-thyssenkrupp

3. ABB. *System 800XA - Control Systems*. [Електронний ресурс] https://new.abb.com/control-systems/system-800xa

4. Дементій, Л.В., Юсіна А.Л. Охорона праці в автоматизованному виробництві. Краматорськ: Донбаська державна машинобідувельна академія, 2007. 300 с. [Електронний підручник] http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/hiop/metod/20_otofam.pdf

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

6. Офіційний сайт «Метинвест» [Електронний ресурс] https://zaporizhstal.com/pidpriyemstvo/#razvitie

7. Конспект лекцій з дисципліни «Структура та розвиток металургійного виробництва» / Авт. Складальник А.М. Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. 200 с.

8. Виплавка сталі в мартенівських печах. Технологічна інструкція: ТІ 226-СТ.М-01-13. Запоріжжя: ПАТ «Запоріжсталь», 2013. 85 с.

9. Кудрін В.А. Металургія стали: [навч. для вузів, 2-ге видання, перероб. та дод.]. Металургія, 1989. 560 с.

10. Харченко О. В. Удосконалення інтегрованої системи контролю сталеплавильного виробництва ПК «Майстер» // Звіт про НДР. Запоріжжя : ЗДІА, 2019. 104 с.

11. 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.

12. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Експериментальні основи термодинамічної моделі колективізованих електронів. *Металургія: наукові праці ДонНТУ*. Донецьк : ДонНТУ, 2003. Вип. 66. С. 17-24.

13. Харченко О. 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.

14. Інформаційно-облікова система супроводу металу дільниці сталь-прокат. / Н.А. Коваленко, Є.Л. Туровський, В.С. Ляшенко, О.І. Єгорова // Сталь. 1990. № 2. С. 95-96.

15. ДСТУ EN 10025-2:2007 Вироби гарячекатані з конструкційної сталі

16. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахування ентальпійного теплового балансу. *Метал та лиття України*. 2005. №6. С. 13-17.

17. Харченко О. В. Теплоємність та інші термодинамічні функції змішування багатокомпонентної конденсованої фази. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. Вип. 2 (27), 2012. С. 20-28.

18. Lupis C. H. P. Chemical Thermodynamics of Materials [Text] / C.H.P. Lupis. Prentice Hall, 1993. 602 p. ISBN-13 978-0444007797.

19. Теоретичні основи металургії" / В.С. Биков, Г.А. Тяпкін. – Київ : Вища школа, 1990. – 320 с.

20. Kharchenko O. V., Lichkonenko N. V. Thermodynamic mixing functions of a multicomponent liquid metal and slag. *Scientific Journal "Metallurgy"*. 2021. Iss. 2. P. 14-22.

21. Харченко О. В. Теплоємність та інші термодинамічні функції змішування конденсованої багатокомпонентної фази. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2012. Вип. 2 (27). С. 20-28.

22. Харченко О. В., Синяков Р. В. Термодинамічна модель багатокомпонентної рідкої шлакової фази. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2016. Вип. 2 (36). С.16-22.

23. Харченко О. В., Синяков Р. В. Програма «EXCALIBUR» можливості та перспективи використання у металургійному виробництві. *Зб. наукових праць ДонНТУ. Серія: Металургія*. 2005. Вип. 102. С. 82-91.

24. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Можливості та перспективи використання програми «Excalibur» у навчальному процесі. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2013. Вип. 1 (29). С. 169-175.

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

26. Бігєєв А. М., Бігєєв В. А. Металургія сталі. Теорія і технологія плавки сталі. МГТУ, 2000. 544с.

27. Fontana M. G., Chipman J. Equilibrium in the reaction of Hydrogen with Ferrous Oxide in liquid Iron at 1600 degrees Cent. *Trans. Amer. Soc. Metals*. 1936. Vol. 24. P. 313-333.

28. Термодинамічні властивості індивідуальних речовин. Довідкове видання у 4-х томах за ред. В.П. Глушко [Текст] / Л.В. Гурвіч, І.В. Вейц, В.А. Медведєв та ін. 3-є вид., перероб. і розширен. Наука, 1978. 3663 с.

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

30. 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 процесса. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 1. С. 28- 34.

31. 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*. 2022. Том 30. № 4. С. 30-35.

32. Kharchenko O., Smirnov O., Volkova O. Thermodynamic analysis of physical and chemical processes in the high-temperature reaction zone of a liquid steelmaking bath. *Proc. The 6th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2023), 12-16 June 2023 - Congress Centre Düsseldorf, Germany*, (ID sp220).

33. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Дослідження термодинамічних функцій металевого розплаву методом молекулярної динаміки. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2012. Вип. 3 (28). С. 5-9.

34. Дерюгін А. А. Основи охорони праці у металургії.. Білоруський національний технічний університет (БНТУ), 2021. Наукова бібліотека БНТУ. 460 с.

35. Кожемякін Г.Б., Рижков В.Г., Бєлоконь К.В. Охорона праці та техногенна безпека: методичні вказівки до виконання розділу магістерських робіт для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 48 с.