МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

О. В. Харченко

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

Методичні рекомендації до практичних робіт
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності G10 “Металургія”
освітньо-професійних програм “Металургія”
і “Металургія чорних металів”

Затверджено
Вченою радою ЗНУ
Протокол № 9 від 24.02.2026 р.

Запоріжжя
2026

УДК 669.18
Х227

Харченко О. В. Теорія і технологія виробництва сталі : методичні рекомендації до практичних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 “Металургія” освітньо-професійних програм “Металургія” і “Металургія чорних металів” : ЗНУ, 2026. 61 с.

Методичні рекомендації призначені для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія», які виконують практичні завдання з дисципліни «Теорія і технологія виробництва сталі». Методичні рекомендації містять теоретичні відомості та завдання до виконання технологічних розрахунків з оптимізації виробництва сталі за допомогою навчально-дослідницької програми «Excalibur».

Рецензент
Д. В. Прутцьков, доктор хімічних наук, професор кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск
Ю. О. Бєлоконь, доктор технічних наук, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 КЛАСИФІКАЦІЯ І МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ 8
1.1 Класифікація сталей 8
1.2 Маркування сталей 10
1.3 Контрольні питання 11
2 ЗАГАЛЬНА ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ 12
2.1 Сутність, мета і задачі плавки сталі 12
2.2 Основні методи і закони фізичної хімії, які застосовують при вивченні сталеплавильних процесів 15
2.3 Термодинаміка взаємодії фаз і загальні закономірності поведінки хімічних елементів в сталеплавильних процесах 19
2.4 Остаточний вміст домішок і загальні принципи забезпечення заданого їх вмісту в готовій сталі 24
2.5 Контрольні питання 26
3 ИНТЕГРОВАНИЙ РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО І ТЕПЛОВОГО БАЛАНСІВ ПЛАВКИ 27
3.1 Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу сталеплавильного процесу 27
3.2 Математичне формулювання прямої задачі 28
3.3 Математичне формулювання зворотної задачі 30
3.4 Диференціальні коефіцієнти засвоєння 30
3.5 Контрольні питання 32
4 ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ 33
4.1 Загальні положення 33
4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи 35
4.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи 36
4.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи 37
4.5 Вимоги безпеки в аварійній ситуації 37
5 ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ 38
5.1 Практична робота №1. Ознайомлення з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur». Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і брухту 38
5.1.1 Теоретичні відомості 38

5.1.2 Порядок виконання роботи 38
5.1.3 Контрольні питання..... 39
5.1.4 Звіт з практичної роботи №1 40
5.2 Практична робота №2. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і металізованих окатишів 41
5.2.1 Теоретичні відомості..... 41
5.2.2 Порядок виконання роботи 41
5.2.3 Контрольні питання..... 42
5.2.4 Звіт з практичної роботи №2 43
5.3 Практична робота №3. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, металізованих окатишів та електроенергії..... 44
5.3.1 Теоретичні відомості..... 44
5.3.2 Порядок виконання роботи 44
5.3.3 Контрольні питання..... 45
5.3.4 Звіт з практичної роботи №3 46
5.4 Практична робота №4. Отримання середньовуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, металізованих окатишів та електроенергії..... 47
5.4.1 Теоретичні відомості..... 47
5.4.2 Порядок виконання роботи 47
5.4.3 Контрольні питання..... 48
5.4.4 Звіт з практичної роботи №4 49
5.5 Практична робота №5. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, залізної руди та електроенергії..... 50
5.5.1 Теоретичні відомості..... 50
5.5.2 Порядок виконання роботи 50
5.5.3 Контрольні питання..... 51
5.5.4 Звіт з практичної роботи №5 52
5.6 Практична робота №6. Отримання середньовуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, залізної руди та електроенергії..... 53
5.6.1 Теоретичні відомості..... 53
5.6.2 Порядок виконання роботи 53
5.6.3 Контрольні питання..... 54
5.6.4 Звіт з практичної роботи №6 55
5.7 Практична робота №7. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням окатишів, залізної руди, коксу і електроенергії 56
5.7.1 Теоретичні відомості..... 56

5.7.2 Порядок виконання роботи 56
5.7.3 Контрольні питання..... 57
5.7.4 Звіт з практичної роботи №7..... 58
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА 59
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА 59

ВСТУП

Дисципліна «Теорія і технологія виробництва сталі» розглядає комплекс питань, що стосуються технологічних, фізико-хімічних та техніко-економічних аспектів виробництва сталі сучасними методами.

В курсі «Теорія і технологія виробництва сталі» викладаються фундаментальні та прикладні знання для проведення різноманітних досліджень та вирішення задач: отримання низько- та середньовуглецевого напівпродукту сталі методами відновлення залізовмісної шихти і рафінування передільного чавуну; вивчення сучасних тенденцій щодо розробки та впровадження нових і вдосконалення існуючих технологічних схем і процесів виробництва сталі.

Курс «Теорія і технологія виробництва сталі» розрахований на здобувачів денної та заочної форми ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія» і «Металургія чорних металів».

Основна **мета дисципліни** – надання студентам уявлень про історію розвитку та сучасний стан виробництва сталі; формування знань теоретичних основ і навичок щодо практичного здійснення сучасних сталеплавильних технологій; підготовка фахівця для виробничої, технологічної і дослідницької діяльності у сфері виробництва сталі.

Основними **завданнями** вивчення **дисципліни** є оволодіння здобувачами знаннями з процесів виробництва сталі сучасними методами, вивчення фізико-хімічних закономірностей і технологічних особливостей процесів виробництва напівпродукту сталі, позапічної обробки і розкислення-легування сталі.

У виданні наведено класифікацію і маркування сталей, загальну фізико-хімічну характеристику сталеплавильних процесів, інтегрований розрахунок матеріального і теплового балансу плавки сталі, комплекс практичних робіт для закріплення теоретичного матеріалу.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

– **знати:** основні процеси металургії сталі; вимоги до сировини; технології сучасних процесів металургії сталі; фізико-хімічні процеси відновлення заліза з залізовмісної шихти і рафінування передільного чавуну; можливості ресурсо- та енергозбереження при застосуванні сучасних технологій.

– **вміти:** розрахувати оптимальний склад шихти для отримання напівпродукту і готової сталі з заданим хімічним складом; виконувати термодинамічний аналіз процесів металургії сталі.

В результаті вивчення навчальної дисципліни «Теорія і технологія виробництва сталі» здобувач повинен набути таких **результатів навчання (компетентностей):**

– Здатність застосовувати системний підхід до вирішення проблем металургії сталі.

– Здатність вирішувати типові інженерні завдання відповідно до спеціалізації.

– Критичне осмислення наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і

методів, необхідних для професійної діяльності в сфері металургії сталі.

– Здатність застосовувати і інтегрувати знання на основі розуміння інших інженерних спеціальностей.

– Здатність застосовувати наукові і інженерні методи, а також комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення типових та комплексних завдань металургії сталі, у тому числі в умовах невизначеності.

– Усвідомлення характеристик специфічних матеріалів, обладнання, процесів та продуктів металургії сталі.

– Здатність управляти комплексними діями або проєктами відповідно до спеціалізації для забезпечення досягнення поставленої мети з урахуванням всіх аспектів вирішуваної проблеми, у тому числі пов'язаних із виробництвом, експлуатацією, технічним обслуговуванням та утилізацією.

– Здатність забезпечувати якість продукції металургії сталі.

– Усвідомлення вимог до діяльності в сфері спеціалізації, зумовлених необхідністю забезпечення сталого розвитку.

– Здатність реалізовувати концепції ощадливого виробництва та загальні принципи зниження виробничих витрат у металургії сталі, а також впроваджувати ресурсозберігаючі технології, які дозволяють акумулювати ресурси, спрямовані на досягнення цілей в усіх напрямках діяльності металургійного підприємства.

Навчальна дисципліна «Теорія і технологія виробництва сталі» продовжує фахову підготовку здобувача і базується на знаннях, отриманих при вивченні таких дисциплін, як: «Хімічна термодинаміка», «Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійного виробництва», «Теорія металургійних процесів», «Конструкція металургійних агрегатів» та ін.

Практичні роботи курсу виконуються із застосуванням багатофункціональної навчально-дослідницької програми «EXCALIBUR», яка забезпечує термодинамічний аналіз сталеплавильних процесів в системах «метал-шлак-газ» з урахуванням матеріального і ентальпійного теплового балансів. Програма виконує розрахунок різних варіантів ведення плавки, позапічної обробки, розкислення і легування сталі.

Практичні заняття є важливою складовою частиною засвоєння навчального матеріалу з дисципліни «Теорія і технологія виробництва сталі».

Видання допоможе здобувачам засвоїти теми, що передбачені силабусом навчальної дисципліни «Теорія і технологія виробництва сталі», насамперед, загальну фізико-хімічну характеристику сталеплавильних процесів.

Курсом передбачені контрольні питання для самоконтролю студентів.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ І МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ

1.1 Класифікація сталей

Існує декілька видів класифікації сталей за різними ознаками.

За способом виробництва сталь може бути мартенівською, конвертерною, електросталлю, а також сталлю, отриманою одним із способів спеціальної електрометалургії:

- ЕШП – електрошлаковий переплав;
- ВДП – вакуумно-дуговий переплав;
- ЕПП – електронно-променевий переплав;
- ПДП – плазмово-дуговий переплав;
- ВІП – вакуумно-індукційний переплав.

Мартенівська і електросталь можуть бути основною або кислою залежно від футерівки агрегату.

За призначенням сталі підрозділяються на наступні основні групи:

- *конструкційна сталь* – сталь, яку застосовують для виготовлення різноманітних металевих конструкцій в будівництві, деталей машин і механізмів;
- *сталь для посудин тиску* – низьковуглецева сталь, що застосовується для виготовлення посудин високого тиску, наприклад, парових котлів та топок. Ця сталь повинна мати високі пластичні і в'язкі властивості в холодному і гарячому станах, добре зварюватися, не повинна мати схильність до старіння;
- *сталь для залізничного транспорту* – рейкова сталь, осьова сталь, сталь для бандажів залізничних коліс. Це середньовуглецева сталь, до якої пред'являються високі вимоги по механічним властивостям, зокрема, по втомній міцності і контактній витривалості, а також високі вимоги щодо однорідності структури металу;
- *підшипникова сталь* є матеріалом для виготовлення кулькових і роликових підшипників. До цієї сталі, що містить близько 1 % вуглецю і 1,5 % хрому, пред'являють високі вимоги щодо вмісту неметалевих включень і контактної витривалості;
- *інструментальна сталь* застосовується для виготовлення різних інструментів, різців, валків прокатних станів, деталей ковальського пресового устаткування. Інструментальна сталь містить зазвичай значну кількість вуглецю (часто більше 1 %), а також, в ряді марок, значну кількість легуючих елементів – хрому, вольфраму, молібдену, ванадію, титану, кобальту, нікелю та інших;
- *ресорно-пружинна сталь* – сталь, яка працює в умовах значних знакозмінних навантажень. Ця сталь повинна мати високу межу пружності та витривалості. Вона містить, як правило, 1-2 % кремнію.

Крім зазначених є ще ряд груп сталей, призначення яких випливає з їх назви: електротехнічні, трансформаторні, гарматні, снарядні, броньові, трубні

та інші.

За якістю сталі поділяються на наступні групи:

- сталь звичайної якості;
- якісна сталь;
- високоякісна сталь;
- особливо високоякісна сталь.

Відмінність між цими групами полягає в допустимого вмісту шкідливих домішок (сірки, фосфору, миш'яку та азоту), а також в особливих вимогах щодо вмісту неметалевих включень.

В сталях звичайної якості вміст сірки і фосфору не повинен перевищувати 0,055-0,060 %; якісних сталях – не більше 0,040-0,045 %; у високоякісних – не більше 0,020-0,030 %. Для особливо високоякісних сталей вміст сірки і фосфору допускається в ще більш низьких межах – до 0,005-0,010 %.

За характером кристалізації сталі у виливницях розрізняють:

- спокійну сталь;
- киплячу сталь;
- напівспокійну сталь.

Поведінка металу у виливниці за інших рівних умов залежить від ступеня його розкисленості: чим повніше розкислена сталь, тим спокійніше кристалізується зливок. Так, наприклад, в результаті рясного газовиділення кипляча сталь при кристалізації в виливниці «кипить» (звідси назва сталі). Спокійна сталь кристалізується без видимих ефектів, спокійно.

За структурою, яка залежить від вмісту вуглецю та легуючих елементів і одержується нормалізацією в стандартних умовах (нагрів зразка діаметром 25 мм до 900°С з витримкою 30 хв. і охолодженням на повітрі), сталі поділяють на п'ять класів:

- перлітний (структура ферит + цементит);
- мартенситний;
- аустенітний;
- феритний;
- карбідний.

За хімічним складом розрізняють сталі:

- вуглецеві сталі (у тому числі низько-, середньо- і високовуглецеві);
- низьколеговані сталі, що містять до 2,5 % легуючих елементів;
- середньолеговані сталі, що містять 2,5-5 % легуючих елементів;
- леговані сталі, що містять більше 5 % легуючих елементів, у тому числі хромисті, марганцевисті, хромонікелеві, вольфрамові, вольфрам-молібденові.

Вуглецеві сталі можуть містити до 0,5-0,6 % марганцю і до 0,37 % кремнію, що додаються в якості розкислювачів.

1.2 Маркування сталей

Вуглецеві сталі звичайної якості мають марки: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3 … Ст7. По мірі зростання цифр збільшується середній вміст вуглецю в сталі від 0,06-0,12 % до 0,50-0,62 %. Букви М, К, Б перед таким маркуванням означають відповідно мартенівську, конвертерну або бесемерівську сталь. В маркуванні сталей цього типу буква Г означає підвищений вміст марганцю.

Вуглецеві якісні сталі мають марки 08, 10, 15, 20, 25 … 80. Ці цифри відповідають середньому вмісту вуглецю в сотих частках відсотка.

Якщо після марочного позначення вуглецевих якісних сталей і сталей звичайної якості (10, 15, Ст3 та ін.) стоять букви «кп», «пс» або «сп», це означає відповідно киплячу, напівспокійну або спокійну сталь.

Вуглецеві інструментальні сталі мають марки У7, У8, У9, У10, У12, У13, в яких цифри після букви У означають вміст вуглецю в десятих частках відсотка. Якщо сталь цього типу вміщує підвищену кількість марганцю, маркування доповнюють буквою Г, наприклад, У8Г.

Позначення марок легованої сталі складається з ряду букв і цифр, що вказують приблизний хімічний склад сталі. При маркуванні таких сталей прийняті наступні позначення елементів:

С – кремній	Ю – алюміній	П – фосфор	Д – мідь	Л – берилій
Г – марганець	В – вольфрам	Т – титан	А – азот	Ц – цирконій
Н – нікель	М – молібден	Ф – ванадій	Е – селен	Ч – РЗМ
Х – хром	К – кобальт	Б – ніобій	Р – бор	

Перші дві цифри перед буквами вказують середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Букви праворуч від перших цифр показують наявність відповідного елементу в сталі. Цифри, які стоять праворуч від букви, означають приблизний вміст даного легуючого елементу в відсотках. Відсутність цифр за буквою означає, що вміст даного елементу складає до 1 %. Наприклад, марка 12Х2Н4А означає високоякісну сталь, що містить в середньому 0,12 % вуглецю, 2 % хрому і 4 % нікелю. Марка 30ХГС означає, що в цієї сталі міститься близько 0,30 % вуглецю і до 1 % хрому, марганцю і кремнію (кожного).

Відсутність цифри ліворуч перед буквами в маркуванні сталі означає, що вміст вуглецю складає близько 1 %. Наприклад, сталь Х12Ф1 містить 1,2-1,45 % вуглецю, близько 12 % хрому і 0,7-0,9 % ванадію.

Деякі леговані сталі виділені в особливі групи; їх позначають буквами, які ставлять на початку марки: Р – швидкорізальні (Р18, Р6М5), Ш – підшипникові (ШХ15), Е – електротехнічні з особливими магнітними властивостями (ЕХ8), А – автоматні сталі з високою оброблюваністю різанням або арматурні сталі, С – будівничі сталі.

В маркуванні швидкорізальних сталей цифри після букву Р позначають вміст вольфраму в відсотках, наприклад, сталь Р6М5 містить близько 6 % вольфраму і 5 % молібдену.

В маркуванні підшипникових сталей цифри після букви Х позначають

вміст хрому в десятих частках відсотка, наприклад, сталь ШХ15 містить не 15 %, а близько 1,5 % хрому.

В маркуванні будівничих і арматурних сталей (за аналогією з європейським стандартом EN 10027-1) цифри після заглавної букви позначають межу текучості в Н/мм^2.

В кінці маркування буква К позначає котельну сталь, наприклад, 30К. Конструкційна вуглецева або низьколегована сталь для виготовлення відливків позначається в кінці буквою Л, наприклад, 20Л, 35ХМЛ. Буквою А в кінці маркування позначається високоякісна сталь (тобто сталь з вмістом сірки і фосфору не більш 0,025 % кожного), а буквою Ш – особо високоякісну сталь, наприклад, 30ХГСА, 45ХЦШ.

1.3 Контрольні питання

1. Класифікація сталей за способом виробництва.
2. Класифікація сталей за якістю і характером кристалізації.
3. Класифікація сталей за структурою і хімічним складом.
4. Класифікація сталей за призначенням.
5. Позначення сталей звичайної якості. Навести приклади.
6. Позначення вуглецевих якісних сталей. Навести приклади.
7. Позначення легуючих елементів в легованих сталях. Навести приклади.
8. Позначення швидкорізальних сталей. Навести приклади.
9. Позначення шарікопідшипникових і електротехнічних сталей. Навести приклади.

2 ЗАГАЛЬНА ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1 Сутність, мета і задачі плавки сталі

Сталеплавильні процеси належать до числа найбільш складних технологічних процесів, що зустрічаються в сучасній промисловості. У загальному випадку технологічний процес – це механічний, фізичний та інші впливи на вихідні матеріали з метою отримання з них матеріалів з іншими властивостями або готових виробів, що мають необхідні властивості, форму і розміри.

Технологія виплавки сталі в такому загальному уявленні зводиться до переробки (переділу) вихідних матеріалів, якими є чавун і брухт, вапно та інші металеві і неметалеві матеріали, в готову рідку сталь, що має заданий хімічний склад (а отже, властивості) і необхідну температуру. Для цього необхідне проведення ряду механічних операцій, безлічі складних фізико-хімічних та фізичних процесів в певній послідовності або в певному поєднанні.

Кінцева мета плавки в будь-якому агрегаті зводиться до отримання рідкої сталі з заданим хімічним складом згідно з маркою і температурою при мінімальних витратах трудових, матеріально-сировинних і паливно-енергетичних ресурсів.

Досягнення необхідної температури металу є першочерговим завданням плавки, оскільки для нормального її проведення і особливо завершення необхідно мати рідкий метал, перегрітий вище температури плавлення на 50-100°С і більше. Температура плавлення чавуну становить близько 1150°С, чистого заліза 1539°С, а сталевого брухту – близько 1510°С. Тому температура металу вже в початковій стадії плавки повинна становити 1300-1400°С, а в кінці 1600-1650°С.

Найбільш складним головним завданням є отримання заданого хімічного складу готової сталі, оскільки для його вирішення необхідно проводити ряд складних фізико-хімічних і фізичних процесів. Більшість з них (вони мають назву окремі процеси або підпроцеси) важко керовані, а деякі взагалі не піддаються управлінню. При плануванні і реалізації плавки необхідно враховувати можливі межі протікання як керованих, так і некерованих окремих процесів.

З метою зниження ресурсоємності плавки необхідно максимальне поєднання різних підпроцесів у часі і в просторі, тобто проведення їх одночасно і в одному і тому ж робочому обсязі. Однак при сучасних вимогах до якості сталі повне поєднання всіх окремих процесів виключено, тому прийнято поділ плавки на частини як за характером перебігу окремих процесів, так і за місцем їх проведення.

За характером фізико-хімічних процесів, пов'язаних з отриманням заданого вмісту домішок у готовій рідкій сталі, плавку прийнято поділяти на дві основні частини, що проводяться послідовно і, як правило, в різних робочих об'ємах:

1. Рафінування металу – видалення надлишкової кількості домішок, насамперед вуглецю, що містяться у вихідному металі;

2. Розкислення-легування металу – введення в метал відсутніх домішок або їх відсутньої кількості для досягнення заданого хімічного складу готової сталі.

Слід зазначити, що один і той же хімічний елемент, введений в метал, часто одночасно є і розкислювачем, і легуючою домішкою, тому вживання одного загального поняття *розкислення-легування* замість двох окремих понять є більш прийнятним.

Такий поділ плавки на частини, проведення їх послідовно і, як правило, в різних робочих об'ємах пов'язано з тим, що процеси рафінування і розкислення несумісні. Рафінування в основному проводиться шляхом окислення домішок (тобто введення в метал кисню), тоді як головна мета розкислення – видалення з металу надлишкового розчиненого кисню.

Рафінування, зазвичай, є найбільш складним елементом технології плавки сталі. В особливо складних випадках його проводять у кілька стадій і, як правило, в різних робочих об'ємах:

1. Попереднє рафінування, яке зазвичай зводиться до видалення з чавуну сірки, але, можливо, також кремнію, фосфору і інших домішок. Воно проводиться до подачі чавуну у сталеплавильний агрегат, зазвичай в чавуновозних ковшах.

2. Основне рафінування, яке проводиться тільки в сталеплавильному агрегаті і зводиться до видалення домішок металу шляхом їх окислення. Таке рафінування називають окислювальним рафінуванням або просто рафінуванням.

3. Додаткове рафінування, яке проводиться зазвичай в сталерозливальному ковші або установці ківш-піч і зводиться в основному до видалення сірки шляхом обробки металу спеціально підготовленим (синтетичним) шлаком або шлакоутворюючими сумішами.

4. Дегазація (видалення водню, кисню та азоту), яка досягається вакуумуванням готового рідкого металу або його продувкою нейтральним газом і проводиться зазвичай в сталерозливальному ковші, установці ківш-піч і різних установках вакуумування сталі.

Додаткове рафінування і дегазація можуть бути поєднані як одне з одним, так і з розкисленням-легуванням.

Попереднє і додаткове рафінування, що проводиться поза сталеплавильного агрегату, часто називають *позаагрегатною*, позапічною або ковшовою обробкою. Їх застосування ускладнює організацію виробництва і підвищує собівартість сталі. Таку обробку використовують зазвичай при переробці чавуну низької якості (зазвичай з високим вмістом сірки) або при виплавки високоякісної сталі, коли основне рафінування, проведене в сталеплавильному агрегаті, не забезпечує низький вміст шкідливих домішок у готовій сталі [1].

При виплавці сталі масового призначення (звичайної якості) прагнуть обмежитися тільки рафінуванням, проведеним в сталеплавильному агрегаті. У

цьому випадку за необхідності рафінування ділять на частини в часі. Наприклад, при виплавці сталі з високофосфористого чавуну процес дефосфорації металу проводять у два прийоми і більше, кожен раз видаляючи (викачуючи) попередній шлак і наводячи новий. Такий режим плавки також знижує техніко-економічні показники виробництва.

При переділі чавунів звичайної якості на рядові марки сталі можливе проведення рафінування в один прийом (під одним шлаком), що забезпечує мінімальні витрати ресурсів на проведення плавки. У цьому випадку рафінування відбувається за наступною схемою:

- в початковій стадії практично одночасно в тій чи іншій мірі (відповідно з величиною хімічної спорідненості до кисню) окислюються і видаляються з металу всі домішки;
- одночасно, по мірі формування шлаку, частково видаляється і сірка, в основному у вигляді сульфідів, які розчиняються в шлаку;
- у кінцевій стадії рафінування останнім з домішок металу окислюється вуглець, а в деяких випадках залізо.

По досягненні необхідної концентрації вуглецю в металі рафінування закінчують. До цього моменту температура металу також повинна знаходитися в заданих межах.

Нагрів металу до заданої температури, як правило, повинен бути поєднаний з окислювальним рафінуванням. При цьому важливо забезпечити синхронність проведення цих двох процесів, тобто створення такого режиму плавки, за якого окислювальне рафінування і нагрівання металу проходять і закінчуються одночасно. Оскільки на кінцевій стадії рафінування металу в основному видаляється тільки вуглець, в цей період плавки головне завдання полягає в синхронізації процесів зневуглецювання і нагрівання металу, тобто в забезпеченні *температурно-вуглецевого режиму плавки*.

Нагрів металу і окислення вуглецю здійснюються по-різному в залежності від типу процесу, що визначається конструкцією агрегату, тому керування плавкою (тобто синхронізація процесів зневуглецювання і нагрівання металу) проводиться по-різному в різних агрегатах.

За принципом нагріву металу сталеплавильні агрегати прийнято ділити на дві основні групи.

1. Агрегати, які працюють без підведення тепла з зовнішніх джерел. В них процес плавки відбувається за рахунок внутрішнього тепла, основними джерелами якого є фізичне тепло рідкого чавуну і тепло хімічних реакцій, пов'язаних з окислювальним рафінуванням металу. Такі процеси прийнято називати *автотермічними процесами* або процесами з замкнутим тепловим балансом. До цієї групи відносяться конвертерні процеси і наближені до них процеси в двохванних сталеплавильних агрегатах.

2. Агрегати, що працюють з підведенням тепла із зовнішніх джерел, якими зазвичай є спалювання газоподібного або рідкого палива, підведення електричної енергії. До таких агрегатів належать мартенівські і електродугові печі, які зазвичай називають *подовими агрегатами*.

Кожен тип агрегату має свої переваги і недоліки, у відповідності з чим

має область переважного застосування і ступінь поширеності.

Розкислення-легування металу є обов'язковим і відповідальним елементом плавки, оскільки представляє операцію остаточного формування хімічного складу (якості) готової сталі. Розкислення-легування супроводжується насамперед розплавленням і розчиненням у рідкому металі введених в нього феросплавів та інших матеріалів, що містять необхідні корисні домішки. Крім того, відбувається хімічна взаємодія елементів-розкислювачів із шкідливими домішками (киснем, сіркою, азотом тощо). При цьому взаємодія з киснем зазвичай грає домінуючу роль.

Таким чином, керування плавкою сталі зводиться до регулювання великого числа фізико-хімічних і фізичних процесів, з яких основне місце посідають реакції окислення різних хімічних елементів. Для успішного регулювання цих процесів, отже, нормального проведення плавки необхідно знати закономірності їх перебігу в складних, як правило, змінних умовах. Змінними умовами (факторами) зазвичай є: температура, склад і кількість металу і шлаку, тиск і склад газової фази, феростатичний тиск, джерело кисню і режим взаємодії фаз.

Таким чином, основна задача теорії сталеплавильних процесів полягає, по-перше, у встановленні закономірностей перебігу реакцій окислення різних хімічних елементів в змінних умовах плавки сталі; по-друге, у використанні цих закономірностей для розробки і здійснення в даних конкретних умовах оптимального режиму, що забезпечує мінімальні витрати всіх видів ресурсів і максимальну продуктивність агрегату (цеху). Крім того, теорія повинна вказувати шляхи створення принципово нових процесів, що мають меншу ресурсоємність та екологічну небезпеку.

2.2 Основні методи і закони фізичної хімії, які застосовують при вивченні сталеплавильних процесів

З погляду фізичної хімії в процесі плавки сталі відбувається взаємодія чотирьох фаз – металевої, шлакової, газової і футерівки, що розрізняються як за агрегатним станом, так і за хімічним складом (рис. 2.1). В результаті цієї взаємодії неминуче протікають різні обмінні процеси, тобто процеси переходу хімічних елементів з однієї фази в іншу. Неминучість протікання цих обмінних процесів пояснюється тим, що в різних фазах можуть бути неоднаковими хімічні (ізобарні) потенціали елементів або сполук, у які вони входять. Різні ізобарні потенціали хімічних елементів у різних фазах можуть бути створені штучно і можуть складатися природно.

Для ходу і результатів плавки, тобто для одержання сталі заданого складу (якості), найбільше значення має взаємодія металу зі шлаковою і газовою фазами. Однак у ряді випадків слід враховувати і вплив футерівки на склад металу. Крім того, велике значення має взаємодія шлаку і футерівки.

Обмінні процеси в сталеплавильній ванні супроводжуються різними хімічними перетвореннями (реакціями). Особливо це характерно для взаємодії

металевої фази зі шлаковою. Металева фаза складається з розплаву хімічних елементів, а шлакова – в основному з розплаву оксидів, тому перехід елемента з однієї фази в іншу можливий лише в результаті протікання хімічної реакції, що полягає, насамперед, в утворенні чи дисоціації (відновленні) оксиду.

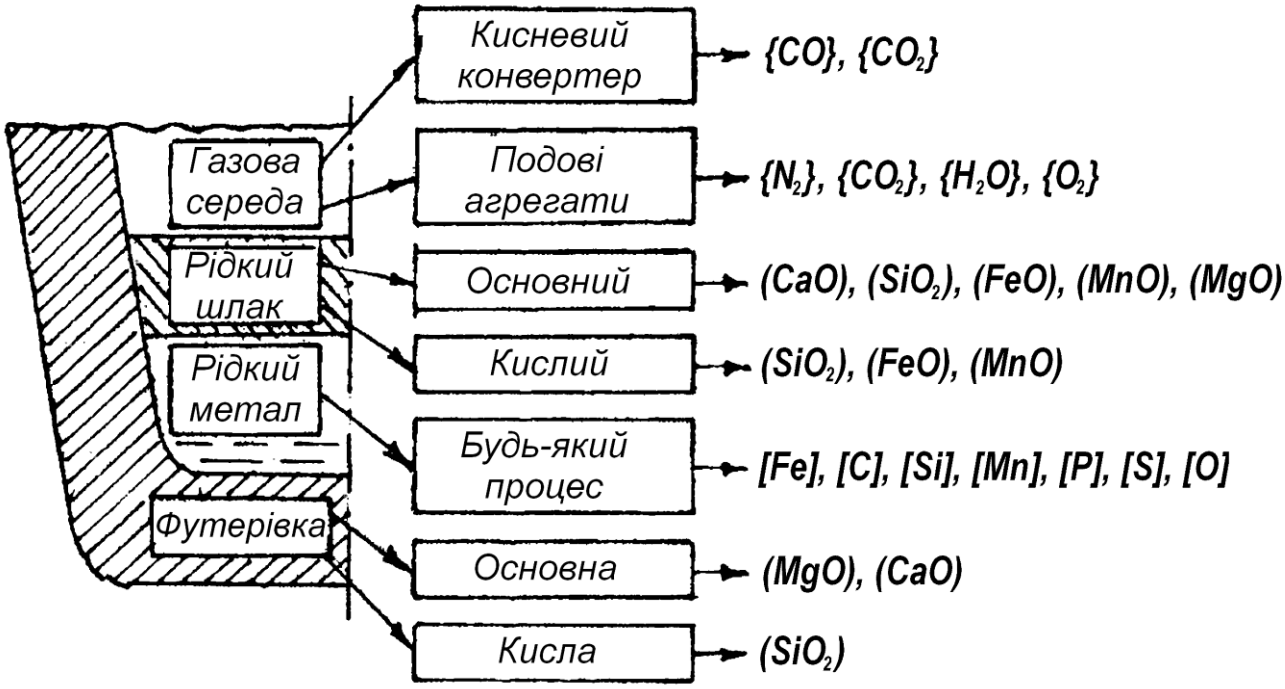


Рисунок 2.1 – *Агрегатний стан і основні компоненти взаємодіючих фаз в сталеплавильних процесах*

Джерело: [2, с. 25]

Оскільки в сталеплавильних процесах реагуючі компоненти і продукти найбільш важливих реакцій зазвичай знаходяться в різних фазах, то ці реакції, як правило, є гетерогенними.

Вивчення будь-якого з окремих процесів, що представляють в основному обмінні хімічні реакції, зазвичай має три стадії, на кожній з яких вирішується одне з наступних типів завдань:

1. Визначення можливого напрямку протікання процесу в даних конкретних умовах. Знання можливого напрямку є якісною характеристикою процесу, яка важлива, але недостатня для проведення плавки в будь-якому агрегаті.

2. Встановлення межі, до якої проходитиме хімічна реакція, і факторів, від яких залежить ця межа. Це є кількісною характеристикою процесу, що дозволяє оцінити можливі наслідки перебігу тієї чи іншої реакції, наприклад, встановити можливу ступінь видалення з металу тієї чи іншої домішки, або забруднення нею металу. Найчастіше такою межею є рівноважний стан системи «метал-шлак-газ». Без такої кількісної характеристики неможливо успішне вирішення головного завдання плавки – забезпечення заданого хімічного складу готової сталі. Для нормального проведення плавки це дуже важливо, але

недостатньо.

3. Визначення можливої швидкості процесу і факторів, що впливають на неї, що важливо для встановлення можливої тривалості процесу, а отже, продуктивності агрегату, яка визначає продуктивність праці, витрати енергетичних і матеріальних ресурсів.

Завдання першого та другого типів можна вирішити, використовуючи методи і закони хімічної термодинаміки, які в даний час є відносно розробленими. Ці завдання можуть бути вирішені з достатнім для практики ступенем точності з використанням термодинамічних характеристик реакцій.

Значно складніше визначення швидкості реакцій. Це пов'язано з тим, що, по-перше, кінетика хімічних реакцій вивчена значно меншою мірою, ніж рівноважна термодинаміка; по-друге, в сталеплавильній ванні масоперенос взаємодіючих частинок дуже незначно залежить від їх фізико-хімічних властивостей, а визначається інтенсивністю перемішування металу і шлаку. Оскільки закономірності зміни швидкостей масопереносу рухомої рідини мають в основному якісну оцінку, то швидкості перебігу хімічних реакцій в сталеплавильній ванні зазвичай визначають експериментально, отримуючи при цьому середні, зазвичай наближені дані.

Враховуючи сказане про значення та можливості термодинамічного методу вивчення сталеплавильних процесів, доцільно опис основних фізико-хімічних явищ починати з їх термодинамічного аналізу. При цьому часто вдається отримувати кількісні залежності, якими можна користуватися для визначення параметрів плавки.

Для сталеплавильних процесів характерно, що між взаємодіючими фазами повної рівноваги не спостерігається. У ряді випадків такої рівноваги і не повинно бути. Наприклад, для окислювального рафінування металу необхідно свідоме порушення рівноваги між металевою, шлаковою і газовою фазами за величиною хімічного потенціалу кисню. Щоб окислювальне рафінування проходило успішно, необхідно постійно підтримувати хімічний потенціал кисню в газовій фазі більше, ніж в шлаковій, а в шлаковій більше, ніж в металевій. Створенням такого стану забезпечується безперервне надходження кисню в метал, який витрачається на окислення домішок металу, а в окремі періоди плавки і на окислення заліза. Також немає рівноваги в системі «футерівка-шлак», причому ця нерівноважна система утворюється мимовільно, без прийняття спеціальних заходів. Зазначену відсутність рівноваги між взаємодіючими фазами іноді розглядають як ознаку неможливості застосування методів термодинаміки для кількісної характеристики сталеплавильних процесів.

Насправді в сталеплавильних процесах за відсутності рівноваги в системі в цілому безліч процесів, що протікають в окремі періоди часу або в окремих частинах розглянутої системи, досягають істинно термодинамічної рівноваги.

До таких процесів, що досягають стану термодинамічної рівноваги, відносяться всі хімічні реакції окислення домішок металу, продукти яких розчиняються в шлаку, тобто залишаються в зоні реакції. До їх числа, насамперед, відносяться реакції окислення марганцю, фосфору, хрому, ванадію

та інших елементів, поведінка яких характеризується розподілом між шлаком і металом [2].

Доказом того, що зазначені реакції досягають стану термодинамічної рівноваги, принаймні, в кінцевій стадії плавки, є факти, які постійно спостерігаються на виробництві: зміщення реакцій як у бік окислення, так і в бік відновлення домішок при зміні зовнішніх умов, наприклад температури і окислення ванни. Якщо реакція окислення домішки не сягала б рівноваги, то при підвищенні температури вона продовжувала б проходити в бік окислення. В дійсності в кінці плавки при приблизній сталості окислення ванни з підвищенням температури всі домішки, оксиди яких розчиняються в шлаку, відновлюються, тобто реакція окислення йде у зворотному напрямку.

Зміщення реакцій в ту або іншу сторону спостерігається і при зміні ступеня окислення ванни.

Оскільки окисленість ванни в основному залежить від вмісту вуглецю в металі, останнє є важливим чинником, що визначає вміст інших домішок в металі, принаймні, в кінці плавки. Тобто від залишкового вмісту вуглецю в металі залежить вміст у ньому інших домішок, які розподіляються між шлаком і металом.

Досягненню рівноваги сприяють і кінетичні умови в сталеплавильній ванні: хімічні реакції протікають за високих температур і переважно в рідких фазах, як правило, при інтенсивному їх перемішуванні, тому їх швидкості досить високі. Отже, методи і закони термодинаміки можна використовувати для якісної та кількісної характеристики більшості хімічних реакцій сталеплавильних процесів.

Для термодинамічної характеристики сталеплавильних процесів найбільш часто використовуються наступні закони фізичної хімії:

- закон діючих мас (ЗДМ);
- зміщення рівноваги (принцип Ле-Шательє-Брауна);
- розподілу речовини між двома не змішуваними рідинами (закон Нернста-Шилова);

фазових рівноваг (правило фаз Гіббса).

Для кількісної характеристики рівноважних станів використовуються такі термодинамічні величини:

- зміна енергії Гіббса (ізобарно-ізотермічного потенціалу) ΔG;
- зміна ентальпії ΔH;
- зміна ентропії ΔS;
- теплоємність при постійному тиску C_p.

В кінетичній характеристиці сталеплавильних процесів найбільше значення мають закони масо- і теплопереносу (передачі) як у межах однієї фази, так і між фазами. Крім того, використовуються закони збереження матерії і енергії, за допомогою яких складають рівняння матеріального і теплового балансу, які дозволяють отримати кількісну характеристику як окремих фізико-хімічних процесів, так і плавки в цілому.

При термодинамічному аналізі, перш за все при визначенні рівноважних

залишкових домішок в металі, слід приймати, що реакції окислення проходять за рахунок кисню, розчиненого в металі, або кисню FeO шлаку, тобто вважати, що рівняння цих реакцій мають вигляд:

m [E] + n [O] = (E_mO_n);
m [E] + n (FeO) = (E_mO_n) + n [Fe];
m [E] +n [O] = {E_mO_n};
m [E] + n (FeO) = {E_mO_m} + n [Fe],

де E – елемент-домішка, m і n – стехіометричні коефіцієнти.

У написаних рівняннях квадратні дужки означають елемент, розчинений у рідкому металі, круглі дужки – елемент або сполука в рідкому шлаку, фігурні дужки – газоподібний компонент. Наведені написання рівнянь реакцій обов'язкові при будь-якому варіанті подачі кисню у ванну – у вигляді газу або твердого окислювача.

Написання рівнянь реакцій з урахуванням джерела (виду) кисню є обов'язковим при визначенні їх теплових ефектів. У цьому випадку реакцію окислення газоподібним киснем слід записати у вигляді:

m [E] + $n/2$ {O_2} = (E_mO_n)
або m [E] + $n/2$ {O_2} = {E_mO_n,},

а реакцію окислення твердим окислювачем $Fe_2O_{3(т)}$ – у вигляді:

m [E] + $n/3$ $Fe_2O_{3(т)}$ = (E_mO_n) + $2/3n$ [Fe]
або m [E] + $n/3$ $Fe_2O_{3(т)}$ = {E_mO_n} + $2/3n$ [Fe].

2.3 Термодинаміка взаємодії фаз і загальні закономірності поведінки хімічних елементів в сталеплавильних процесах

Взаємодія металевої і шлакової фаз в виробництві сталі має найбільше значення. Обмінні процеси, що проходять при їх взаємодії, можливі, якщо мають місце наступні хімічні реакції:

m [E] + n [O] $\leftrightarrow$ (E_mO_n);
m [E] + n (FeO) $\leftrightarrow$ (E_mO_n) + n [Fe].

З фізичної хімії відомо, що найбільш загальною (універсальною) термодинамічною характеристикою будь-якої реакції (процесу) є зміна енергії Гіббса (ізобарно-ізотермічного потенціалу) ΔG. Для першої з наведених вище реакцій зміну енергії Гіббса можна представити в наступному вигляді [3]:

$$\Delta G = RT\left(\ln\frac{a_{(E_mO_n)}}{[E]^m[O]^n} - \ln K_E\right), \qquad (2.1)$$

де $a_{(E_mO_n)}$ – активність оксиду в шлаку в конкретний момент плавки; [E] і [O] – концентрація в металі елемента, що окислюється і кисню; K_E – константа

рівноваги реакції, що є функцією температури.

Із хімічної термодинаміки відомо, що процес або реакція при $\Delta G < 0$ може йти праворуч; при $\Delta G > 0$ може йти в зворотному напрямку і при $\Delta G = 0$ знаходиться в стані термодинамічної рівноваги.

Припустимо, що в ванні (металі і шлаку) даний елемент не міститься, тобто $[E] \to 0$ і $a_{(E_mO_n)} \to 0$. В метал такої ванни додаємо цей елемент в деяких (нескінченно малих) кількостях таким чином, щоб $[E] \geq 0$, зберігаючи при цьому $a_{(E_mO_n)} \to 0$. Оскільки при плавці сталі вміст кисню в металі складає кінцеву величину, як по ходу плавки, так і після розкислення, то в цих випадках, згідно залежності (2.1) $\Delta G \to -\infty$. Це означає, що в сталеплавильних процесах за таких співвідношень концентрацій і активностей, цілком можливих в момент введення нового елементу в металеву ванну, складаються сприятливі термодинамічні умови для неминучого окислення будь-якого елементу.

Розглянемо можливість відновлення оксиду, розчиненого в шлаку. В ванну, яка не містить даний елемент, введемо його у вигляді оксиду, тобто створимо умови $[E] \to 0$ і $a_{(E_mO_n)} \geq 0$. Тоді, відповідно до залежності (2.1), $\Delta G \to +\infty$, тобто реакція йде в бік відновлення елемента і його переходу в метал.

Користуючись залежністю (2.1), можна показати, що окислення елементу, який вводиться в метал, і відновлення його оксиду, який вводять в шлак, в той або іншій мірі будуть відбуватись і тоді, коли даний елемент в ванні вже є в наявності, але реакція його окислення або відновлення до моменту введення нової порції елементу або оксиду знаходилась в стані рівноваги.

Ступінь окислення або відновлення елементу за інших рівних умов залежить від властивостей, які в рівнянні (2.1) характеризуються величиною K_E. Для елементів, що мають високу хімічну спорідненість до кисню в стандартних умовах, значення K_E велике і реакція досягає рівноваги тільки за великій активності (концентрації) оксиду в шлаку. Для елементів з малим хімічною спорідненістю до кисню K_E є малою величиною і рівновага настає при незначному вмісті оксиду в шлаку. Це можна показати на прикладі можливої поведінки марганцю і нікелю. За температури ванни 1600 °С і вмісту в металі 0,01 % кисню і по 0,5 % марганцю і нікелю, рівноважний вміст їх оксидів в шлаку складе ~15 % MnO і $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ % NiO.

Оскільки рівновага реакції окислення марганцю встановлюється за такого відносно високого вмісту MnO в шлаку, практично завжди відбувається значне окислення марганцю, що міститься в металі, по ходу плавки, а відновлення оксидів марганцю, введених в шлак, отримує обмежений розвиток. Оскільки рівновага реакції окислення нікелю встановлюється за дуже низького вмісту NiO в шлаку, окислення нікелю в сталеплавильній ванні незначно і їм завжди нехтують, хоча деяке окислення його неминуче; навпаки, відновлення NiO, введеного в шлак, проходить практично повністю, тому в сталеплавильну ванну замість металевого нікелю можна вводити його оксид.

Таким чином, основну закономірність у розподілі елементів між шлаковою і металевою фазами можна сформулювати наступним чином:

В умовах сталеплавильної ванни всі елементи, оксиди яких розчиняються в шлаку, в тій чи іншій мірі окислюються, а їх оксиди відновлюються; елементи розрізняються тим, що одні з них окислюються чи відновлюються більшою мірою, інші – меншою.

Термодинамічним аналізом також можна показати, що перехід хімічних елементів з однієї фази в іншу неминучий і при контакті будь-яких інших фаз. Відмінність може полягати лише в тому, що цей перехід елемента в одних випадках буде супроводжуватися хімічними перетвореннями (перехід елемента з футерівки в метал), в інших випадках хімічного перетворення не буде відбуватися (перехід з футерівки в шлак).

Виходячи з наведеного вище загального термодинамічного аналізу, можна сформулювати наступну ***загальну закономірність у поведінці елементів:***

В умовах сталеплавильної ванни жоден хімічний елемент не може перебувати в одній якій-небудь фазі, кожен елемент розподіляється між усіма фазами.

В результаті дії цих закономірностей при вирішенні основного завдання плавки (отримання заданого вмісту домішок в готовій сталі) мають місце такі факти:

- При рафінуванні металу не може бути повністю вилучена з нього ні одна домішка.
- Готова сталь в тій чи іншій кількості містить всі домішки, що входять до складу не тільки металевих шихтових матеріалів, але й до складу шлакової, газової фаз і футерівки.

Відтак, в сталі навіть самого простого складу містяться в якості домішок десятки різних елементів. Проте більшість елементів міститься в таких незначних кількостях, що навіть не піддається точному визначенню сучасними методами аналізу і не чинить помітного впливу на властивості сталі. Вміст таких елементів в сталі не контролюється. До неконтрольованих елементів, що обов'язково містяться в металі, відносяться кальцій і магній, оскільки в основних процесах їх оксиди в значних кількостях містяться в шлаку і футеровці. Вміст кальцію і магнію в металі, зважаючи на високу міцність їх оксидів, завжди мізерно малий, але спектрально вловимий. Існують винятки для деяких сталей, що містять ці лужноземельні метали в якості модифікуючих і легуючих добавок у кількості до 0,005 %.

Ступінь відновлення (переходу в метал) або окислення (переходу в шлакову або газову фазу) елементів насамперед визначається міцністю їх оксидів, тобто хімічною спорідненістю елементів до кисню.

При оцінці можливого ступеня окислення або відновлення елементів в якості основної термодинамічної характеристики хімічних реакцій нерідко приймають зміну стандартного ізобарно-ізотермічного потенціалу $\Delta G°$, яка визначається за рівнянням [3]:

$$\Delta G° = -RT \ln K_E = -A + BT, \qquad (2.2)$$

де T – температура; A і B – табульовані сталі коефіцієнти, що визначаються

експериментально (наведено в довідковій літературі).

Формула (2.2) є окремим випадком рівняння (2.1), коли фактичні концентрації реагуючих елементів в металі і активність оксиду, що утворюється, відповідають стандартним умовам – дорівнюють одиниці.

В реальних сталеплавильних процесах ці умови ніколи не виконуються. По-перше, завжди $a_{(E_mO_n)} < 1$ оскільки оксид не знаходиться в чистому вигляді, а розчиняється в шлаку, де може вступати в хімічну взаємодію з іншими компонентами шлаку. По-друге, при плавці сталі вміст кисню в металі ніколи не досягає величини, що відповідає насиченості. Так, за температури 1600 °С насиченість заліза киснем досягається при концентрації 0,23 %, а фактичний вміст кисню в металі при його окислювальному рафінуванні звичайно складає 0,01-0,05 % і рідко доходить до 0,10-0,15 %.

Тому при оцінці можливої поведінки хімічних елементів у сталеплавильних процесах використання $\Delta G°$ в якості параметра, що характеризує спорідненість до кисню, обмежена рівноважним станом і використанням чистих компонентів.

Хімічні елементи прийнято розташовувати в ряд за зменшенням їх спорідненості до кисню:

Ca, Mg, Zr, Al, Ti, Si, V, Nb, B, Mn, Cr, P, **Fe**, W, Mo, Co, Ni, Cu, As.

Згідно цього ряду, всі елементи, які зустрічаються в сталеплавильних процесах і оксиди яких розчиняються в шлаку, можна формально розділити на дві групи:

1) елементи, що мають більшу спорідненість до кисню, ніж залізо (від Ca до P), тому легко окислюються;

2) елементи, спорідненість яких до кисню менше, ніж у заліза, тому вони окислюються незначно.

Такий поділ носить досить умовний характер, оскільки в реальних процесах стандартні умови не дотримуються. Так, фосфор у цьому ряді є найближчим сусідом заліза, отже, його поведінка під час плавки має бути близькою до поведінки заліза. Проте така поведінка фосфору спостерігається тільки в доменному процесі через те, що в доменному шлаку, що має низьку основність, оксид P_2O_5 не може вступати у взаємодію з іншими компонентами. У сталеплавильних процесах шлаки мають високу основність – сприятливі умови для утворення досить міцних хімічних зв'язків P_2O_5 з CaO, що різко знижує активність P_2O_5. Завдяки цьому під час окислювального рафінування фосфор окислюється в більшій мірі, ніж Cr і Mn. Аналогічне зміщення у розглянутому ряду відбувається і для інших елементів.

Тому хімічні елементи доцільно ділити на три групи по їх поведінці в реальних сталеплавильних процесах, що добре відомо з практики.

До першої групи відносяться домішки, які мають хімічну спорідненість до кисню істотно більш високу, ніж залізо, тому окислюються практично повністю (більш ніж на 95 %). З оксидів вони відновлюються в мізерно малій мірі і знаходяться в основному в шлаковій або газовій фазі. До них належать кальцій, магній, алюміній, цирконій і рідкісноземельні метали (РЗМ) – в основному і

кислому процесах; кремній, титан, вольфрам – в основному процесі. Коефіцієнт розподілу цих елементів між шлаком і металом дуже великий, оскільки рівновага встановлюється за дуже малого їх вмісту у металі.

До другої групи відносяться домішки, які мають хімічну спорідненість до кисню, меншу або близьку до хімічної спорідненості заліза, практично не окислюються або окислюються незначно (не більш ніж на 5 %). З оксидів вони відновлюються майже повністю і знаходяться в основному в металевій фазі: мідь, нікель, кобальт, олово, молібден, миш'як – у кислому і основному процесах; фосфор і сірка – у кислому процесі. Коефіцієнт розподілу цих елементів дуже малий, оскільки для досягнення рівноваги необхідна дуже мала концентрація (активність) їх в шлаку.

До третьої групи відносяться домішки, які мають помірно більшу хімічну спорідненість до кисню, ніж залізо, окислюються чи відновлюються частково і по ходу плавки одночасно знаходяться і в металевій, і в шлаковій фазах: марганець, хром, ванадій, ніобій – у кислому і основному процесах; фосфор – в основному процесі; кремній, титан, вольфрам – у кислому процесі.

Цей поділ елементів на групи носить умовний характер. Однак на його основі легко пояснити сформовані загальні принципи забезпечення заданого вмісту в готовій сталі елементів тієї чи іншої групи.

Взаємодія металевої та газової фаз характеризується відсутністю рівноваги у відкритих сталеплавильних агрегатах, тому термодинамічний аналіз обмінних процесів між цими фазами дозволяє встановити лише можливий їх напрямок.

Для зменшення вмісту в металі газів і домішок, які утворюють газоподібний оксид, необхідно збільшення тиску виділення газу (оксиду) в металі і зниження його парціального тиску в газовій фазі. Можливості підвищення тиску виділення в металі за даного вмісту домішки завжди обмежені. Тому процеси дегазації металу і видалення домішок, які утворюють газоподібні оксиди, зазвичай стимулюють зменшенням парціального тиску газів у газовій фазі, застосовуючи для цього вакуумування і продування рідкого металу нейтральними газами.

Взаємодія шлаку і футерівки також характеризується відсутністю рівноваги. У цій системі обмінні процеси протікають протягом всієї плавки внаслідок збереження різниці хімічних потенціалів (активностей) основних компонентів, що розподіляються між цими фазами.

Основним компонентом футерівки, що забезпечує її вогнетривкість, зазвичай є MgO. Він міститься в футеровці в кількості до 50 % і вище, а в нормальному шлаку його не більше 10 %. Вміст оксидів заліза в шлаку зазвичай становить 10-20 % і може бути значно вище, а у вихідних вогнетривах футерівки всього кілька відсотків. Результатом протікання обмінних процесів між шлаком і футерівкою є головним чином часткове руйнування футерівки і перехід її компонентів в шлак. Це небажане явище, оскільки витрати часу і матеріалів на ремонт або зміну футерівки агрегату завжди збільшують простої агрегату і вимагають значних фінансових витрат. Крім того, значний перехід компонентів футерівки, наприклад MgO, в шлак погіршує його фізико-хімічні

властивості, зокрема, збільшує в'язкість.

Перехід футерівки в шлак тим інтенсивніше, чим більше різниця хімічних потенціалів компонентів шлаку і футерівки. Звичайно футерівка має певний хімічний склад, може бути кислою чи основною (см. рис. 2.), тому в процесі плавки сталі необхідно забезпечити утворення шлаку такого складу, за якого руйнування футерівки було б мінімальним. Наприклад, в агрегатах, що мають кислу футерівку, не можна наводити основний шлак, і навпаки. Крім того, для кислого і особливо основного процесу по ходу плавки склад шлаку повинен бути змінений внаслідок зміни температури ванни. Тільки при дотриманні цих правил можна забезпечити оптимальний шлаковий режим, який сприятиме найповнішому рафінуванню металу при мінімальному руйнуванні футерівки.

Взаємодія металу і футерівки практичне значення має лише в кислих процесах. В основних процесах вплив футерівки на вміст домішок в металі дуже незначний, оскільки футерівка складається з високоміцних оксидів MgO і CaO.

2.4 Остаточний вміст домішок і загальні принципи забезпечення заданого їх вмісту в готовій сталі

Заданий вміст у готовій сталі будь-якої домішки може бути забезпечений лише при правильному врахуванні можливої її поведінки в процесі рафінування, розкислення-легування і дегазації.

Вміст домішок, що не окислюються в готової сталі не залежить від режиму рафінування і регулюється складом вихідних матеріалів плавки. Якщо елемент, що не окислюється, є небажаною домішкою в сталі даної марки, то заданий вміст такого елемента забезпечується обмеженням вмісту його у вихідній шихті.

У випадках, коли така домішка є легуючим елементом і її кількість в готової сталі повинна бути вище, ніж в шихті, заданий вміст домішки забезпечується введенням її в ванну на будь-якій стадії плавки.

Вміст домішок, які повністю окислюються, в готової сталі також не залежить від режиму рафінування і забезпечується введенням їх в метал тільки після закінчення рафінування, як правило, в ківш, щоб уникнути втрат введених домішок внаслідок можливого їх значного окислення. Кількість таких домішок в шихті практично не впливає на склад готової сталі, тому він може бути обмежений лише в тому випадку, якщо оксид домішки, що утворюється, погіршує шлаковий режим і впливає на стійкість футерівки агрегату. Наприклад, при високому вмісті кремнію у чавуні по ходу плавки сталі утворюється підвищена кількість шлаку з високим вмістом SiO_2, що ускладнює ведення плавки і прискорює знос основної футерівки. Тому вміст кремнію в чавуні зазвичай суворо регламентується.

Вміст домішок, які частково окислюються, в металі після закінчення рафінування залежить як від початкового вмісту їх в шихті, так і від шлакового режиму. Якщо такі домішки необхідно видалити, збільшують кількість шлаку і підвищують його здатність поглинати конкретну домішку.

На практиці регулювання параметрів шлакового режиму має обмеження. Наприклад, наведення великої кількості високоосновного шлаку, що має підвищену сірко- і фосфоропоглинальну здатність, може зажадати великих витрат часу і призвести до різкого зниження продуктивності агрегату. У зв'язку з цим вміст домішок, які частково окислюються, у вихідній шихті часто також обмежують, особливо якщо вони є шкідливими (наприклад, сірка і фосфор).

Вміст корисних домішок в металі, які частково окислюються, до кінця рафінування зазвичай менше заданого в готовій сталі. Заданий вміст їх, як правило, забезпечується введенням в метал (агрегат або в ківш) відсутньої їх кількості після окислювального рафінування. При цьому повинно бути забезпечено якомога менше окислення введеної домішки, повне її розчинення і рівномірний розподіл в металі.

Поведінка елементів, які частково окислюються, добре вивчена, тому можливий вміст їх у металі може бути визначений розрахунком.

Для елементів, що розподіляються між металом і шлаком, найважливішою кількісною характеристикою є *коефіцієнт розподілу*, під яким прийнято розуміти відношення фактичного (такого, що спостерігається на практиці) вмісту елемента в шлаку (E) до вмісту його в металі [E], які не обов'язково є рівноважними: $L_E = (E)/[E]$. Якщо ж концентрації (активності) домішки в шлаку і металі відповідають рівноважному стану, то це відношення називають *константою розподілу*.

Коефіцієнт розподілу насамперед залежить від індивідуальних властивостей елемента, зокрема від його хімічної спорідненості до кисню. Елементи, що володіють дуже високою хімічною спорідненістю до кисню (Mg, Ca, РЗМ, Al, Si та ін.), під час рафінування в металі містяться в дуже малій кількості, тобто можна прийняти, що $[E] \to 0$, тому можна вважати, що для них $L_E \to \infty$ (повне окислення). Для елементів, що володіють дуже низькою хімічною спорідненістю до кисню (Cи, Ni, Co, Mo та ін.), можна прийняти $(E) \to 0$, тому $L_E \to 0$, тобто окислення відсутнє. Лише для елементів, що мають помірну хімічну спорідненість до кисню (Mn, Cr, V, Nb і ін.), коефіцієнти розподілу мають кінцеві значення – окислення часткове, яке представляє практичний інтерес.

У виробничій практиці необхідно брати до уваги зміну коефіцієнта розподілу елементів між шлаком і металом в межах від 1 до 1000. При $L_E < 1$ втрата корисної або видалення шкідливої домішки дуже малі (не більше 5-10 %), оскільки кількість шлаку зазвичай становить ~10 % від маси металу. При $L_E > 1000$ і такої ж кількості шлаку ступінь окислення домішок досягає 90-95 % і вище, що в більшості випадків можна вважати практично повним видаленням.

Коефіцієнт розподілу між шлаком і металом для будь-якого елемента залежить від температури і ступеня окислення ванни (вмісту кисню в металі і оксидів заліза в шлаку), у багатьох випадках також від складу (основності) шлаку.

Залежність коефіцієнта розподілу від окислення ванни є особливістю сталеплавильних процесів і пояснюється тим, що перехід з металу в шлак всіх елементів, крім сірки, можливий тільки в результаті їх окислення. Однак

окисленість ванни є слабо регульованим фактором, оскільки визначається в основному вмістом вуглецю в металі, який, в свою чергу, залежить від періоду плавки і марки сталі.

У виробничій практиці для зміни значення коефіцієнта розподілу частіше змінюють склад (основність) шлаку, оскільки зміна температури ванни теж обмежена. Крім того, можливі коливання температури в меншій мірі змінюють значення коефіцієнта розподілу, ніж зміна складу шлаку.

Вміст вуглецю в готовій сталі зазвичай вище рівноважного з киснем, тому у відкритих агрегатах його необхідні значення забезпечуються зміною витрати кисню, введеного в ванну під час окислювального рафінування. Оскільки в цей час вуглець безперервно окислюється, його вміст у вихідній шихті (чавун + брухт) повинен бути значно більшим, ніж у готовій сталі. Це перевищення може бути різним в залежності від типу процесу. Якщо заданий вміст вуглецю в готової сталі менше рівноважного, що досягається у відкритих агрегатах (~0,02 %), то необхідне зниження парціального тиску в газовій фазі за допомогою вакуумування або продування нейтральним газом.

Вміст кисню в металі також не є рівноважним і залежить головним чином від вмісту вуглецю. Кількість кисню в сталі до кінця рафінування, зазвичай, значно більше необхідної, тому проводять обов'язкове розкислення сталі.

Таким чином, забезпечення заданого вмісту домішок у готовій сталі є дуже складним завданням, для успішного вирішення якого необхідно не тільки правильне проведення різних фізико-хімічних процесів під час плавки, але і регламентування вмісту домішок у вихідних шихтових матеріалах.

2.5 Контрольні питання

1. На які частини умовно поділяється плавка сталі?
2. Основні стадії рафінування сталі.
3. Агрегатний стан і основні компоненти взаємодіючих фаз в сталеплавильних процесах.
4. Класифікація сталеплавильних агрегатів за принципом нагріву металу.
5. Закони збереження, фізичної хімії та ін., що застосовуються при описанні сталеплавильних процесів. Основні термодинамічні величини.
6. Основні закономірності поведінки елементів при їх розподілі між металом і шлаком.
7. Основні закономірності взаємодії шлаку і металу з футерівкою агрегату.
8. Основні закономірності взаємодії металевої і газової фаз.
9. Класифікація хімічних елементів за їх поведінкою в реальних сталеплавильних процесах.
10. Основні реакції окислення домішок металу, що протікають при окислювальному рафінуванні.

3 ИНТЕГРОВАНИЙ РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО І ТЕПЛОВОГО БАЛАНСІВ ПЛАВКИ

3.1 Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу сталеплавильного процесу

Визначення 1. *Пряма задача термодинамічного аналізу сталеплавильного процесу* або підпроцесу полягає у визначенні кінцевих температури, мас і хімічного складу фаз системи «метал-шлак-газ» при заданих тиску, масах і температурах вихідних шихтових матеріалів, кількостях енергоносіїв і величині теплових втрат [1].

Визначення 2. *Зворотна задача термодинамічного аналізу сталеплавильного процесу* або підпроцесу полягає у визначенні необхідних мас вихідних шихтових матеріалів для гарантованого отримання заданих температури, маси і хімічного складу кінцевого металу з урахуванням можливих обмежень по масах матеріалів, хімічному складу і масі шлакової і газової фаз.

Пряма задача об'єктивно має єдине рішення, тоді як зворотна задача може мати нескінченну безліч рішень або зовсім не мати жодного рішення. Якщо зворотна задача має які-небудь рішення, то накладення умови мінімальної вартості набору шихтових матеріалів дозволяє отримати єдине оптимальне рішення цієї зворотної задачі.

Якщо рішення прямої задачі може бути самодостатнім, то при рішенні зворотної задачі необхідно щонайменше один раз звертатися до рішення прямої задачі. На практиці рішення однієї зворотної задачі з оптимізацією вимагає багатократного рішення прямої задачі.

Якщо сталеплавильний процес або підпроцес формально представити у вигляді системи, на вході якої заданий вектор незалежних керівників змінних **X** (такі як: шихтові матеріали, енергоносії, тиск і температура), а на виході – вектор залежних змінних **Y**, таких як метал, шлак і газ певного складу і маси, то *пряму задачу* термодинамічного аналізу такої системи можна визначити як функцію **Y(X).** Відповідно, *зворотна задача* визначається функцією **X(Y).**

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

Електроенергію, що вноситься, зручно вважати матеріалом з нульовою масою, але із стандартною ентальпією, яка дорівнює кількості джоулів тепла, що вносяться в систему, на 1 кВтг. Для точніших розрахунків можна також врахувати, що, якщо електроенергія поступає через графітові електроди, то в систему вноситься деяка кількість вуглецю, тобто матеріал «електроенергія» містить вуглець і власне енергію. Аналогічно можна поступити і з іншими

енергоносіями.

У кожен момент часу, або після завершення якої-небудь операції введення матеріалів і енергії, система вважається закритою по матеріальному балансу, але відкритою для енергії, що поступає, і теплових втрат. При безперервному введенні матеріалів і енергії загальний час розбивається на короткі періоди, впродовж яких відбувається проплавлення матеріалів, що поступили. При цьому розглядається послідовність початкових і кінцевих станів системи. На кожному етапі такої послідовності вирішуються пряма і зворотна задачі в тандемі.

Рішення прямої і зворотної задачі термодинамічного аналізу будь-якого сталеплавильного процесу реалізоване у багатофункціональній навчально-дослідницькій програмі «Excalibur» [4].

3.2 Математичне формулювання прямої задачі

В загальному вигляді пряма задача формулюється у вигляді рівняння стану системи «метал-шлак-газ» відносно рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \overline{\mathbf{m}}_{[]}, \overline{\mathbf{m}}_{0}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}, p, T, Q) = \mathbf{0}, \tag{3.1}$$

де $\mathbf{m}$ – вектор мас елементів в системі; $\overline{\mathbf{m}}_{[]}, \overline{\mathbf{m}}_{0}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}$ – шукані вектори рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі; p, T – тиск і температура в системі; Q – теплова енергія, що надійшла в систему у вигляді електроенергії та інших енергоносіїв, за вирахуванням теплови втрат.

Рівняння стану (3.1) є рівнянням матеріального і теплового балансу сталеплавильного процесу, записаного в загальному вигляді.

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

Умовою термодинамічної рівноваги в системі «метал-шлак-газ» являється рівність хімічних потенціалів компонентів (хімічних елементів) в металі, шлаку і газовій фазі. Крім того, має бути забезпечена електронейтральність шлакової фази. Ці умови формулюються у вигляді системи $2k+1$ рівнянь [1]:

$$\begin{cases} \Delta\mu_{[i)} = RT\ln(K_{[i)}a_{[i]}/a_{(i)}) = 0,\ i = 1..k; \\ \Delta\mu_{[i\}} = RT\ln(K_{[i\}}a_{[i]}/a_{\{i\}}) = 0,\ i = 1..k; \\ \sum_{i=1}^{k} x_{(i)}\nu_i = 0, \end{cases} \tag{3.2}$$

де $\Delta\mu_{[i)}$, $\Delta\mu_{[i\}}$ – різниці хімічних потенціалів компонентів (хімічних елементів) відповідно між металом і шлаком і між металом і газом; R – універсальна газова стала; T – температура в системі; $K_{[i)}$, $K_{[i\}}$ – константи рівноваги «метал-шлак» і

«метал-газ»; $a_{[i]}$, $a_{(i)}$ $a_{\{i\}}$ – активності компонентів в металі, шлаку і газі; $x_{(i)}$ – мольні частки елементів в шлаку; ν_i – валентності елементів в шлаку; k – число компонентів в системі.

Дана система $2k+1$ нелінійних рівнянь допускає еквівалентне перетворення к системі трьох нелінійних рівнянь, яка доповнюється рівнянням енергетичного і теплового балансу. Таким чином, формальне рівняння стану (3.1) перетворюється в даному випадку на систему чотирьох нелінійних рівнянь відносно невідомих Y, Z, μ_e і T:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)\left[1+\exp(B_i - Z)\right]} = 0; \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)\left[1+\exp(B_i - Z)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp(Y)\left[1+\exp(-Z)\right]} = 0; \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp(A_i - Y - \mu_e \nu_i)\right]\exp(Z - B_i)} - \dfrac{N}{1+\exp(Z)\left[1+\exp(-Y)\right]} = 0; \\ F_4 = H(T) - H_0 - Q_E + Q_L = 0, \end{cases} \quad (3.3)$$

де $A_i = \ln(K_{[i)}\gamma_{[i]} / \gamma_{(i)})$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-шлак»; $B_i = \ln(K_{[i\}}\gamma_{[i]} / \gamma_{\{i\}})$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-газ»; n_i – числа молей i-го елементу в системі; $Y = \ln(N_m / N_s)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності шлаку; $Z = \ln(N_m / N_g)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності газу; N_m, N_s, N_g, N – числа молей в металі, шлаку, газі і системі; $\gamma_{[i]}$, $\gamma_{(i)}$, $\gamma_{\{i\}}$ – коефіцієнти активності компонентів в металі, шлаку і газовой фазі; H_0, $H(T)$ – ентальпія системи в початковому і кінцевому станах; Q_E – теплова енергія енергоносіїв; Q_L – теплові втрати.

Останнє рівняння теплового балансу $F_4 = 0$ в системі рівнянь (3.3) засновано на термохімічному законі Кирхгофу, згідно якому змінення ентальпії системи $\Delta H = H(T) - H_0$ при постійному тиску дорівнює кількості поглиненої системою теплової енергії $Q = Q_E - Q_L$.

Результатом рішення нелінійної системи (3.3) є температура системи T і набір величин μ_e, Y, Z, за якими визначаються рівноважні вмісти (числа молей) елементів в шлаку, газі і металі за формулами:

$$\begin{aligned} n_{(i)} &= \frac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)\left[1+\exp(B_i - Z)\right]}; \\ n_{\{i\}} &= \frac{n_i}{1+\left[1+\exp(A_i - Y - \mu_e \nu_i)\right]\exp(Z - B_i)}; \\ n_{[i]} &= n_i - n_{(i)} - n_{\{i\}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Коефіцієнти активності елементів в металі і шлаку, які входять в рівняння (3.3) і (3.4), розраховуються за формулами [5, 6]. Коефіцієнти активності елементів в газі і відповідні константи рівноваги розраховуються на основі

законів Дальтона і Сівертса по рівновазі в подсистемі «метал-газ». Константи рівноваги «метал-шлак» за кожним компонентом визначаються за експериментальними даними про розчинність кисню в рідкому залізі залежно від концентрації даного компоненту.

3.3 Математичне формулювання зворотної задачі

Революційний шаг в решенні зворотних задач було зроблено в 1939 році Л. В. Канторовичем [7], який запропонував симплекс-метод лінійного програмування для широкого класу задач, в яких вектор вихідних параметрів **Y** лінійно залежить від вектору незалежних змінних **X**:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{K} + \mathbf{L}\mathbf{X}, \tag{3.5}$$

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

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

Задача зводиться до складання системи нерівностей відносно шуканого вектору мас шихтових матеріалів **X**:

$$\mathbf{F}^{\mathrm{н}} \le \mathbf{P} + (1/M_{ж})\mathbf{U}\mathbf{B}\mathbf{X} \le \mathbf{F}^{\mathrm{в}}, \tag{3.6}$$

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

У подальшому ця система нерівностей вирішується симплекс-методом. Недоліком цього підходу є використання сталих коефіцієнтів засвоєння.

3.4 Диференціальні коефіцієнти засвоєння

Коефіцієнти засвоєння здавна застосовуються в металургійному виробництві при визначенні кількості шихтових матеріалів, необхідних для одержання необхідного складу напівпродукту або готового металу. Величини, якими користуються, засновані на середньостатистичних даних, характерних для даного періоду плавки, складу вихідного металу, одержуваної марки сталі та прийнятого набору шихтових матеріалів. Будь-яке відхилення вказаних параметрів в ту або іншу сторону з великою ймовірністю призводить до виникнення нештатних ситуацій і, як наслідок, до виробничого браку.

Причина цього полягає в тому, що в дійсності коефіцієнти засвоєння не є константами, а залежать від температури, складу металевої, шлакової і газової фаз, а також від складу шихтових матеріалів. Більш того, засвоєння одних елементів може зменшуватися або збільшуватися при додаванні інших хімічних

елементів. Тобто існують перехресні ефекти, вплив яких відомий лише на емпіричному рівні для окремих випадків.

Термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ», яка враховує хімічні взаємодії елементів, в загальному випадку є нелінійною і тому непридатною для рішення зворотної задачі засобами лінійного програмування. Проте лінеаризація термодинамічної моделі дозволяє подолати вказані труднощі.

Існує принципова можливість точного розрахунку коефіцієнтів засвоєння, в тому числі перехресних, якщо є в наявності адекватна термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ». Якщо задані маси елементів, то така модель «повинна» розподіляти їх між металом, шлаком і газом. Із системи рівнянь (3.3) методом *неявного диференціювання з*находяться величини

$$U_{ij} = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_j}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\overline{m}_{[i]}}, \qquad (3.7)$$

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

Матриці ДКЗ безпосередньо використовуються для рішення задачі оптимізації кількості шихтових матеріалів з гарантованим попаданням в заданий склад напівпродукту або готового металу [8, 9]. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум сумарної вартості вибраних шихтових матеріалів. Під шихтовими матеріалами (ШМ) мається на увазі широкий клас власне шихтових матеріалів, включаючи феросплави, шлакоутворюючі матеріали, розкислювачі, лігатури, вуглецеві матеріали, а також синтетичні шлаки та флюси, кисень, інертні гази та всі види енергоносіїв, в тому числі природний газ і електроенергія.

При оптимізації параметрів плавки або розкислення-легування з використанням ДКЗ враховуються також різноманітні технологічні та організаційні обмеження, такі як:

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

3.5 Контрольні питання

1. Визначення прямої і зворотної задач термодинамічного аналізу сталеплавильного процесу.
2. Математичне формулювання прямої задачі.
3. Математичне формулювання зворотної задачі.
4. Диференціальні коефіцієнти засвоєння.
5. Навести приклад найпростішої матриці ДКЗ з позначенням якісного впливу кисню, кремнію, марганцю і вуглецю один на одного.

4 ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

4.1 Загальні положення

4.1.1. Дія інструкції поширюється на всі підрозділи установи чи підприємства, де виконують роботи з персональним комп'ютером (ПК).

4.1.2. Інструкція розроблена відповідно до Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 29.01.1998 № 9, Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 № 15, Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 26.03.2010 № 65, Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98 [10], затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7, Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом Міністерства надзвичайних ситуацій України від 25.01.2012 № 67 (НПАОП 0.00-7.11-12).

4.1.3. За цією інструкцією студента, який використовує персональний комп'ютер (далі – користувач), інструктують перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 6 місяців (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносять до Журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці (у журналі має бути підпис особи, яка інструктує, та користувача).

4.1.4. Користувач зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров`я, а також про безпеку і здоров'я довколишніх при виконанні будь-яких робіт, а також під час перебування на території підприємства.

4.1.5. До роботи на персональному комп'ютері допускають осіб, які пройшли інструктажі з питань охорони праці та пожежної безпеки.

4.1.6. Користувач зобов'язаний:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;
- не допускати за своє робоче місце сторонніх осіб;
- не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці та пожежної безпеки;
- знати правила надання домедичної допомоги;
- знати розташування та вміти користуватись первинними засобами пожежогасіння;
- вміти працювати з ПК.

4.1.7. Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на користувача:

- підвищений рівень статичної електрики;

- нерівномірність розподілу яскравості в полі зору;
- підвищена яскравість світлового зображення;
- ураження електричним струмом;
- напруга зору та уваги;
- тривалі статичні навантаження.

4.1.8. У приміщеннях із ПК має бути природне і штучне освітлення.

4.1.9. При розміщенні робочих місць необхідно унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням.

4.1.10. При природному освітленні слід передбачити наявність сонцезахисних засобів (плівка, жалюзі, штори тощо).

4.1.11. Світлові відблиски із клавіатури, екрана та інших частин ПК у напрямку очей користувача неприпустимі.

4.1.12. Основним обладнанням робочого місця є ПК або ноутбук, монітор, клавіатура, маніпулятор, робочий стіл, стілець (крісло).

4.1.13. При розміщенні елементів робочого місця слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість огляду простору поза межами робочого місця;
- можливість робити записи, розміщувати на робочому столі документацію та матеріали, які використовує користувач.

4.1.14. Розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та переміщенню для експлуатування ПК.

4.1.15. Монітор встановлюють так, щоб відстань від поверхні екрана до очей користувача була 600-700 мм залежно від розміру екрана.

4.1.16. Клавіатуру розміщують на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача. Положення клавіатури та кут її нахилу залежить від побажання користувача (як правило, в межах 5-15°). Не допускати хитання клавіатури.

4.1.17. Конструкція робочого столу має бути такою, щоб оптимально розмістити на робочій поверхні обладнання, що використовують, з урахуванням кількості, розмірів, конструктивних особливостей і характеру його роботи.

4.1.18. Крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози. Тип робочого крісла обирають залежно від характеру та тривалості роботи.

4.1.19. Раціональна поза користувача:

- ступні розташовані на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна зорієнтовані у горизонтальній площині;
- верхні ділянки рук вертикальні;
- кут ліктьового суглоба у межах 70-90°;
- зап’ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20°;
- нахил голови у межах 15-20°, а часті її повороти виключені.

4.1.20. Для забезпечення оптимальної робочої пози користувача необхідно:

- засоби праці, з якими користувач має тривалий або найбільш частий зоровий контакт, розмістити у центрі зони зорового спостереження та моніторного поля;
- забезпечити відстань близько 500 мм між найважливішими засобами праці, з якими користувач працює найчастіше.

4.1.21. ПК встановлювати на рівній твердій поверхні (столі). Не дозволено встановлювати ПК та оргтехніку на хитких підставках чи на похилій поверхні.

4.1.22. ПК не встановлювати впритул до стіни, перегородки тощо. Не допускати загородження вентиляційних отворів ПК сторонніми предметами.

4.1.23. Розетка біля ПК має бути в доступному місці, щоб в аварійних випадках можна було своєчасно його відімкнути. Не рекомендовано використовувати подовжувачі.

4.1.26. Під час переміщення ПК, периферійних пристроїв витягти вилку живлення з розетки.

4.1.27. Не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення. Заборонено ставити важкі речі на шнур живлення, тягнути чи надмірно перегинати його, скручувати та перев’язувати шнур живлення вузлом.

4.1.28. ПК під’єднувати до електромережі лише за допомогою справних штепсельних з’єднань та електророзеток заводського виробництва.

4.1.29. Штепсельні з’єднання та електророзетки мають бути зі спеціальними контактами для під’єднання нульового захисного провідника. Їхня конструкція має забезпечувати з’єднання нульового захисного провідника раніше, ніж з’єднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз’єднань при вимкненні має бути зворотнім.

4.1.30. Заборонено під’єднувати електрообладнання до звичайної двошнурової електромережі.

4.1.31. За невиконання цієї інструкції користувачі несуть відповідальність згідно з чинним законодавством.

4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

4.2.1. Оглянути робоче місце і навести на ньому лад; впевнитись, що на ньому немає сторонніх предмети, все обладнання і блоки ПК з’єднані з системним блоком з’єднувальними шнурами.

4.2.2. Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі. Монітор не має стояти на краю стола. Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран — під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз; при цьому екран має бути трохи нахиленим — нижній край ближче до користувача.

4.2.3. Перевірити загальний стан апаратури, справність електропроводки, з’єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана.

4.2.4. Вставити вилку в розетку і впевнитися, що вона міцно тримається.

Заборонено вставляти і виймати вилку мокрими руками.

4.2.5. Відрегулювати та зафіксувати висоту крісла та зручний для користувача нахил спинки.

4.2.6. За потреби приєднати до комп'ютера необхідну апаратуру (принтер, сканер тощо). Усі кабелі, що з'єднують системний блок із іншими пристроями, вмикати та вимикати лише при вимкненому комп'ютері.

4.2.7. Відрегулювати яскравість свічення, контрастність монітора.

4.2.8. Про всі виявлені несправності інформувати керівника робіт і не братися до роботи, доки їх не буде усунено.

4.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

4.3.1. Під час роботи на ПК:

- стійко встановити клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання, водночас передбачити можливість її поворотів та переміщень;
- якщо в конструкції клавіатури не передбачено простору для упору долонь, клавіатуру розміщують на відстані не менше 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моніторного поля;
- під час роботи на клавіатурі сидіти рівно, не напружуватися;
- щоб зменшити несприятливе навантаження на користувача при роботі з комп'ютерною мишею (вимушена поза, необхідність постійно контролювати якість дій), забезпечити велику вільну поверхню столу для переміщення комп'ютерної миші та зручного упору ліктьового суглоба;
- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати пил із поверхонь апаратури спеціальними серветками.

2.3.2. При роботі з ПК заборонено:

- самостійно розбирати та ремонтувати системний блок (корпус ноутбука), монітор, клавіатуру, комп'ютерну мишу тощо;
- встромляти сторонні предмети до вентиляційних отворів ПК, ноутбука або монітора;
- ставити на системний блок ПК та периферійні пристрої металеві предмети, ємкості з водою (вази, горщики для квітів, склянки), оскільки через потрапляння води у середину апарата може виникнути пожежа або ураження електрострумом.

4.3.3. Тривалість безперервної роботи за ПК не має перевищувати 2 год. Після цього необхідно зробити 15-хвилинну перерву.

4.3.4. Якщо виник зоровий дискомфорт або інші неприємні відчуття, необхідно зробити коротку перерву.

4.3.5. Для зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно під час декількох перерв виконувати комплекс вправ.

4.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.4.1. Зберегти інформацію.

4.4.2. Вимкнути ПК, монітор чи ноутбук.

4.4.3. Вимкнути стабілізатор (або джерело безперебійного живлення), якщо комп'ютер під'єднаний до мережі через нього.

4.4.4. Прибрати робоче місце.

4.5 Вимоги безпеки в аварійній ситуації

4.5.1. Аварійні та небезпечні ситуації під час виконання роботи на ПК можуть виникнути у разі: короткого замикання, перевантаження блоку живлення системного блоку, перегрівання, пожежі, поломки крісла тощо.

4.5.2. У разі виникнення аварії або ситуації, що може привести до аварії, нещасного випадку, негайно від'єднати ПК від електромережі, повідомити інцидент керівникові.

4.5.3. Не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.

4.5.4. Якщо стався нещасний випадок, зберегти обстановку в робочій зоні та устаткування у такому стані, в якому вони були на момент події (якщо це не загрожує життю і здоров'ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків). Поінформувати про подію керівника робіт (іншу відповідальну особу підприємства) та в подальшому керуватися його вказівками. Вжити заходів, щоб запобігти подібним випадкам у подальшому.

4.5.5. У разі виникнення пожежі (ознак горіння), повідомити керівнику та, за потреби, викликати оперативно-рятувальну службу за телефоном 101 або 112 (назвати адресу та місце виникнення пожежі, наявність людей, повідомити своє прізвище) та вжити можливих заходів для евакуювання людей, гасіння (локалізації) пожежі наявними засобами пожежогасіння. Пам'ятати, що гасіння електротехнічних пристроїв, які перебувають під напругою, виконувати лише після їх попереднього від'єднання від електромережі. Гасити за допомогою вуглекислотних або порошкових вогнегасників, а в окремих випадках — сухим піском.

4.5.6. За потреби надати потерпілому домедичну допомогу згідно з інструкцією, що діє на підприємстві. У разі подальшого погіршення самопочуття потерпілого, не припиняючи надання домедичної допомоги, викликати за телефоном 103 швидку медичну допомогу.

4.5.7. Виконувати вказівки керівника робіт для ліквідування небезпеки.

5 ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

5.1 Практична робота №1. Ознайомлення з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur». Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і брухту

5.1.1 Теоретичні відомості

Чавун і брухт є традиційними матеріалами для виробництва сталі в кисневому конвертері. Стальний брухт може бути двох категорій, залежно від наявності легуючих елементів: А – вуглецевий і Б – легований. Для отримання залізовуглецевого напівпродукту використовують брухт категорії А. Чавун використовують переважно у рідкому стані, з додаванням невеликої кількості брухту чавуну. Для утворення основного шлаку, здатного видалити фосфор та сірку з металу, додають вапно (або вапняк) і плавиковий шпат. Основність шлаку при цьому має бути не менше 2,5 од.

Для нормального ведення плавки необхідно мати рідкий метал, перегрітий вище температури плавлення на 50...100°С і більше. Температура плавлення чавуну становить близько 1150 °С, а сталевого брухту – близько 1510 °С. Тому температура металу вже на початковій стадії плавки має становити 1300...1400 °С, а наприкінці – 1600...1650 °С [11]. Основними джерелами тепла в конвертері є фізичне тепло рідкого чавуну і тепло хімічних реакцій, пов'язаних з окисленням домішок в металі під час продувки киснем.

Тривалість продувки киснем, а отже й всієї плавки обумовлюється досягненням необхідного вмісту вуглецю в рідкому металі. Для низьковуглецевого напівпродукту це становить 0,02...0,12 % (мас.) вуглецю.

В процесі плавки металу відбувається взаємодія чотирьох фаз – металевої, шлакової, газової і футерівки, тому розрахунки матеріального балансу звичайно дуже громіздкі. Можливості навчально-дослідницької програми «Excalibur» дозволяють виконати розрахунок матеріального балансу і оптимізувати процес отримання рідкого металу з урахуванням мінливих умов постачання сировини або у разі необхідності корегування технологічних показників. При цьому виконуються вимоги до якості (складу) металу і враховується вартість витрачених матеріалів.

5.1.2 Порядок виконання роботи

Ознайомитись з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur» згідно з матеріалами, завантаженими на сторінку дисципліни у СЕЗН Moodle.

Варіанти завдань відповідають номеру у списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і брухту за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масовий вміст вуглецю у напівпродукті 0,024..0,12%;
- дозволені: брухт А (≤100 т), брухт чавуну (5 т), чавун переробний рідкий при 1350°С (≤350 т), плавиковий шпат (0,7 т), вапно (≥15 т), кисень (23 т);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 350 + номер варіанта, т;
- температура навколишнього середовища $t_{нав}$ = 25 – номер варіанта, °С.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + без обмеження мінімальної та максимальної кінцевої температури;
б) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1620 + номер варіанта, °С; максимальна кінцева температура напівпродукту 1650 + номер варіанта, °С;
в) + відсутність шпату;
г) + основність шлаку не менше 2,5;
д) + дозволити вапняк;
е) + відсутність брухту чавуну;
ж) + обмежити використання брухту А в шихті до 15% та оптимізувати витрату кисню;

2. Для кожного з пунктів завдання 1 зафіксувати та занести до звіту такі дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси т, загальна маса т;
б) кінцева температура, °С;
в) загальні маси металу, шлаку та газу, т;
г) основність шлаку;
д) склад металу у масових %;
е) склад шлаку у масових % оксидів;
ж) молекулярний склад газу, атм;
з) загальна вартість легування в умовних одиницях.

3. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC.fwp** , вибрати завдання «Чавун і брухт» та перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.

5.1.3 Контрольні питання

1. Причини виплавки в кисневому конвертері напівпродукту, а не готової сталі.
2. Як впливає на показники плавки відсутність плавикового шпату?
3. Як впливає на показники плавки додаткове додавання вапняку?
4. Як впливає на показники плавки відсутність брухту чавуну?
5. Як впливає на показники плавки обмеження використання брухту?

5.1.4 Звіт з практичної роботи №1

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Брухт А							
Брухт чав.						ні	ні
Чавун пер.							
Шпат			ні	ні	ні	ні	ні
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні	ні			
Кисень							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
M мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
M шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
M газу, т							
Vгазу, тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

5.2 Практична робота №2. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і металізованих окатишів

5.2.1 Теоретичні відомості

Чавун і брухт є традиційними матеріалами для виробництва сталі, але у деяких випадках брухт може бути замінений на металізовані окатиші. Це обумовлено скороченням утворення оборотного брухту з розширенням використання безперервного розливання сталі, а також з низькою якістю покупного брухту.

Металізовані окатиші представляють собою продукт відновлення залізорудних окатишів в спеціальних агрегатах при температурах, нижчих за температури плавлення сплавів залізо-вуглець. Ступінь металізації може бути від 85 % до 96 %. Для використання в сталеплавильному виробництві використовують окатиші, металізовані не менш ніж на 90 % [11].

Перевагою металізованої сировини є низький вміст фосфору і сірки (менше 0,015 % кожного) і майже повна відсутність домішок кольорових металів. Головним недоліком є досить висока вартість. Особливістю металізованих окатишів порівняно з брухтом є також досить високий вміст вуглецю (1,7...1,8 %).

Частка металізованих окатишів, як і стального брухту, в шихті кисневих конвертерів обмежена через переохолодження рідкого чавуну. Для підвищення кількості окатишів і, відповідно, зниження витрат чавуну використовують такі способи, як збільшення температури чавуну, допалювання CO у відхідних газах до CO_2 в робочому просторі печі, попередній підігрів брухту тощо.

5.2.2 Порядок виконання роботи

Варіанти завдань відповідають номеру у списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і металізованих окатишів за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масовий вміст вуглецю у напівпродукті 0,01 ..0,03%;
- дозволені: брухт чавуну (5 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤350 т), плавиковий шпат (0,7 т), вапно (≥15 т), металізовані окатиші (40..100 т) кисень (≥14 т) ;
- маса одержуваного напівпродукту не менше 295 + номер варіанта, т;
- температура навколишнього середовища $t_{окр}$ = 30 - номер варіанта, °С.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1620 + номер варіанта, °С; максимальна кінцева температура напівпродукту 1650 + номер варіанта, °С;
б) + відсутність шпату;
в) + основність шлаку не менше 2;
г) + дозволити вапняк;
д) + відсутність брухту чавуну;
е) + обмежити використання окатишів у шихті до 10%;
ж) + підвищити верхню межу кінцевої температури напівпродукту на 5 °С.

3. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати та занести до звіту такі дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси т, загальна маса т;
б) кінцева температура, °С;
в) загальні маси металу, шлаку та газу, т;
г) основність шлаку;
д) склад металу у масових %;
е) склад шлаку у масових % оксидів;
ж) молекулярний склад газу атм;
з) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC.fwp** , вибрати завдання «Чавун і окатиші» і перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.

5.2.3 Контрольні питання

1. Характеристика металізованих окатишів як замінника брухту у виробництві сталі.
2. Як впливає використання окатишів на склад готового металу?
3. Як впливає використання окатишів на склад шлаку?
4. Як впливає на показники плавки обмеження використання металізованих окатишів в шихті?

5.2.4 Звіт з практичної роботи №2

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Брухт чав.					ні	ні	ні
Чавун пер.							
Шпат		ні	ні	ні	ні	ні	ні
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні				
Окатиші							
Кисень							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
М мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
М шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
М газу, т							
Vгазу, тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

5.3 Практична робота №3. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, металізованих окатишів та електроенергії

5.3.1 Теоретичні відомості

Традиційна технологія електроплавки передбачає роботу електропечей на 100 % брухту. Але за необхідністю частину брухту замінюють на альтернативні залізовмісні матеріали, зокрема металізовані окатиші і рідкий чавун.

Використання металізованих окатишів дозволяє суттєво знизити вміст кольорових металів, а також сірки і фосфору в готовій сталі. Окатиші звичайно подають в робочий простір печі безперервно через порожнисті електроди. Для забезпечення їхнього ефективного плавлення в печі додатково встановлюють паливно-кисневі пальники. Недоліком використання окатишів є досить висока вартість, а також те, що на їхнє розплавлення потрібна додаткова енергія. Тому металізовані окатиші більш доцільно використовувати для виплавляння відповідальних марок сталі.

Додавання рідкого чавуну в шихту суттєво впливає на тепловий баланс плавки. Чавун вносить фізичне тепло (температура перед заливанням у піч становить 1150...1350 °С), реакції окислення кремнію і марганцю, а також вуглецю дають додаткову хімічну енергію. В результаті знижуються витрати електроенергії і скорочується тривалість плавки. Недоліком є підвищений вміст сірки та фосфору в чавуні, що потребує додаткових витрат на їхнє видалення, а також більш висока вартість чавуну порівняно з брухтом, що веде до збільшення собівартості готової сталі. Проте в умовах дефіциту брухту і достатньої кількості рідкого чавуну такий технологічний варіант може бути економічно доцільним. Оптимальна кількість рідкого чавуну в шихті становить близько 30 % [11].

Також в шихті дугових електропечей може використовуватися чушковий чавун або брухт чавуну, які мають значний енергетичний потенціал через високий вміст вуглецю і кремнію. Порівняно з брухтом, в чавуні менше домішок кольорових металів, але більше сірки і фосфору. Частка чавуну в шихті електропечей обмежується необхідністю збільшення тривалості плавки для видалення вуглецю, а також зростанням витрат шлакоутворювачів.

5.3.2 Порядок виконання роботи

Варіанти завдань відповідають номеру у списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масове вміст вуглецю у напівпродукті 0,015..0,05 %;

- дозволені: брухт чавуну (10 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤350 т), плавиковий шпат (0,7 т), вапно (≥15 т), металізовані окатиші (40..100 т), кисень (≤15 т)), електроенергія (до 50 МВтг);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 295 + номер варіанта, т ;
- температура навколишнього середовища $t_{окр}$ = 30 - номер варіанта, °С.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1620 + номер варіанта, °С; максимальна кінцева температура напівпродукту 1650 + номер варіанта, °С;
б) + відсутність шпату;
в) + основність шлаку не менше 2;
г) + дозволити вапняк;
д) + відсутність брухту чавуну;
е) + забезпечити використання окатишів у шихті у кількості не менше 15%;
ж) + підвищити задані межі кінцевої температури напівпродукту на 5 °С.

3. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати та занести до звіту такі дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т ;
б) кінцева температура, °С;
в) загальні маси металу, шлаку та газу, т;
г) основність шлаку;
д) склад металу масових %;
е) склад шлаку масових % оксидів;
ж) молекулярний склад газу в атм;
з) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC.fwp** , вибрати завдання «Чавун, окатиші та Е/е н/вуг» і перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.

5.3.3 Контрольні питання

1. Замінники брухту в шихті дугової сталеплавильної печі.
2. Як впливають обмеження, що вводяться, на вартість витрачених матеріалів?
3. Як впливає на показники плавки збільшення частки окатишів?
4. Як впливає на показники плавки додавання вапняку?
5. Як впливає на показники плавки необхідність підвищення температури напівпродукту?

5.3.4 Звіт з практичної роботи №3

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Брухт чав.					ні	ні	ні
Чавун пер.							
Шпат		ні	ні	ні	ні	ні	ні
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні				
Окатиші							
Кисень							
Е/е МВтг							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
М мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
М шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
М газу, т							
Vгазу, тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

5.4 Практична робота №4. Отримання середньовуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, металізованих окатишів та електроенергії

5.4.1 Теоретичні відомості

Під час виплавки сталі в дугових електропечах велику роль грає процес окислення вуглецю, розчиненого в металі, який йде переважно з утворенням газоподібного CO. «Кипіння» сталі сприяє перемішуванню металу і шлаку і прискоренню всіх фізико-хімічних процесів. В результаті активно йде зневуглецювання, дефосфорація і дегазація сталі.

Для інтенсифікації окислювальних процесів в метал додають залізну руду, окалину, агломерат або здійснюють продувку киснем. При цьому продувка киснем (чистотою близько 99,5 %, під тиском 1...1,2 МПа) дає найбільшу швидкість окислення вуглецю, що призводить до зростання продуктивності печі і зниження витрат електроенергії.

На кінець продувки вміст вуглецю в металі має бути дещо менше нижньої межі для заданої марки сталі, враховуючи додаткове привнесення вуглецю в метал феросплавами, а також електродами. Щоб уникнути переокислення металу, вміст вуглецю на кінець окислення для середньовуглецевого напівпродукту має бути не менш ніж 0,1 %. Для низьковуглецевого напівпродукту, що йде на отримання сталей, в яких вуглець є небажаною домішкою, стандартами встановлюється тільки верхня межа вмісту вуглецю.

Інтенсифікація окислення газоподібним киснем дозволяє швидко збільшити температуру металу до необхідної. Але під час продувки є можливість перегріву металу, що негативно впливає на стан футеровки та умови видалення фосфору. Щоб уникнути перегріву, в рідкий метал за необхідністю додають залізну руду.

5.4.2 Порядок виконання роботи

Варіанти завдань відповідають номеру у списку групи.

1. За допомогою програми «Excalibur» оптимізувати отримання середньовуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, металізованих окатишів та електроенергії за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масове вміст вуглецю у напівпродукті 0,10..1,0%;
- дозволені: брухт чавуну (10 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤350 т), плавиковий шпат (0,7 т), вапно (≥15 т), металізовані окатиші (40..100 т) кисень (≤5 т) , електроенергія (до 60 МВтг);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 295 + номер варіанта, т ;
- температура навколишнього середовища $t_{окр}$ = 30 - номер варіанта, °С.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1600 + номер варіанта °С;
б) + обмежити використання кисню до 2 т;
в) + забезпечити використання окатишів у шихті у кількості не менше 13%;
г) + основність шлаку не менше 2;
д) + дозволити вапняк;
е) + відсутність брухту чавуну;
ж) + підвищити нижню межу кінцевої температури напівпродукту на 5 °С.

3. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати та занести до звіту такі дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;
б) кінцева температура, °С;
в) загальні маси металу, шлаку та газу, т;
г) основність шлаку;
д) склад металу масових %;
е) склад шлаку масових % оксидів;
ж) молекулярний склад газу в атм;
з) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC.fwp** , вибрати завдання «Чавун, окатиші та Е/е с/вуг» і перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.

5.4.3 Контрольні питання

1. Роль реакції окислення вуглецю в сталеплавильному процесі.
2. Чим обумовлений кінцевий вміст вуглецю в низько- та середньовуглецевому напівпродукті?
3. Як впливає на показники плавки обмеження використання кисню?
4. Як впливає на показники плавки збільшення частки металізованих окатишів?
5. Як впливає на показники плавки відсутність брухту чавуну?

5.4.4 Звіт з практичної роботи №4

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Брухт чав.						ні	ні
Чавун пер.							
Шпат							
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні	ні			
Окатиші							
Кисень							
Е/е МВтг							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
М мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
М шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
М газу, т							
Vгазу, тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

5.5 Практична робота №5. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, залізної руди та електроенергії

5.5.1 Теоретичні відомості

Використання залізної руди для інтенсифікації окислювальних процесів в дуговій електропечі має свої особливості. Руда є сильним охолоджувачем, містить невелику кількість шкідливих домішок, має майже однорідний хімічний склад, але вносить менше заліза ніж брухт або металізовані окатиші. Останнє призводить до збільшення витрати чавуну.

Руду додають невеликими порціями, що забезпечує тривале рівномірне кипіння металу без переохолодження і без надмірного підвищення температури і виплесків металу і шлаку з печі. Кількість руди визначають швидкістю окислення вуглецю, яка має бути в межах 0,4...0,6 %/год на початку окислення і 0,2...0,3 %/год наприкінці. При цьому куски руди мають бути оптимального розміру, бо мілкі куски розчиняються в шлаку, а крупні спричиняють бурне спінювання металу в шлаку.

Такий режим подачі руди сприяє ефективному перебігу процесу видалення фосфору. Для контролю за ходом окислювальних процесів регулярно через кожні 5-10 хв відбирають проби металу і визначають вміст фосфору і вуглецю. У разі вмісту фосфору менше 0,02 % окислення рудою можна припинити. Правильно організований температурний режим, високий вміст FeO в шлаку (15...20 %) дозволяє знизити вміст фосфору в напівпродукті до 0,010...0,012 % і нижче [11].

Відновлення надлишкових оксидів заліза руди і шлаку і збільшення виходу годного металу забезпечується введенням в піч коксу і організацією його ефективного окислення.

5.5.2 Порядок виконання роботи

Варіанти завдань відповідають номеру у списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, залізної руди та електроенергії за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масовий вміст вуглецю у напівпродукті 0,015..0,05 %;
- дозволені: брухт чавуну (10 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤350 т), плавиковий шпат (1 т), вапно (≥15 т), залізна руда (40..100 т), кокс (≤1 т), кисень (≤15 т), електроенергія (до 50 МВтг);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 295 + номер варіанта, т ;
- температура навколишнього середовища $t_{нав}$ = 30 - номер варіанта, °С.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1620 + номер варіанта, °С, максимальна кінцева температура напівпродукту 1650 + номер варіанта, °С;
б) + відсутність шпату;
в) + основність шлаку щонайменше 1,5;
г) + дозволити вапняк;
д) + відсутність брухту чавуну;
е) + забезпечити використання залізної руди в шихті в кількості не менше 15%;
ж) + знизити верхню межу кінцевої температури напівпродукту на 5 °С.

3. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати та занести до звіту такі дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т ;
б) кінцева температура, °С ;
в) загальні маси металу, шлаку та газу, т ;
г) основність шлаку;
д) склад металу масових %;
е) склад шлаку масових % оксидів ;
ж) молекулярний склад газу в атм ;
з) загальна вартість легування в умовних одиницях.

3. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC.fwp** , вибрати завдання «Чавун, Fe руда та E/e н/вуг» і перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.

5.5.3 Контрольні питання

1. Особливості використання залізної руди замість брухту у дуговій печі.
2. Як впливає на показники плавки підвищення основності шлаку?
3. Як впливає на показники плавки підвищення витрати залізної руди?
4. Як впливає на показники плавки зниження температури напівпродукту?

5.5.4 Звіт з практичної роботи №5

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Брухт чав.					ні	ні	ні
Чавун пер.							
Шпат		ні	ні	ні	ні	ні	ні
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні				
Fe руда							
Кокс							
Кисень							
Е/е МВтг							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
M мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
M шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
M газу, т							
Vгазу, тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

5.6 Практична робота №6. Отримання середньовуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, залізної руди та електроенергії

5.6.1 Теоретичні відомості

Для підвищення продуктивності роботи дугових електросталеплавильних печей необхідно визначення оптимальної частки рідкого чавуну, яка залежить від продуктивності устаткування для вдування кисню. Згідно одним даним є оптимальна кількість чавуну – близько 30 %, але є дані про використання 50 % чавуну в шихті і навіть 80 % [11]. На даний момент не існує критерію, який дозволяє заздалегідь без експериментів на реальній печі оцінити оптимальну кількість рідкого чавуну в шихті або оптимальні параметри роботи печі для відомої частки рідкого чавуну. За таких умов найбільш ефективнім рішенням є математичне моделювання. В даній роботі програма «Excalibur» дозволяє оцінити взаємозв'язок показників плавки, співвідношення в шихті чавуну і залізної руди, а також витрат кисню для отримання середньовуглецевого напівпродукту.

До відомостей, викладених в роботі №5, про роботу дугових печей на чавуні і залізній руді слід додати, що недоліком використання рідкого чавуну в шихті дугової печі є збільшення кількості шлаку й відхідних газів. Максимальна продуктивність печі досягається при мінімальній тривалості плавки, яка відповідає оптимальній частці рідкого чавуну. Слід також пам'ятати про досить високу вартість чавуну.

5.6.2 Порядок виконання роботи

Варіанти завдань відповідають номеру у списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання середньовуглецевого напівпродукту з використанням чавуну, залізної руди та електроенергії за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масове вміст вуглецю у напівпродукті 0,10..1,0%;
- дозволені: брухт чавуну (10 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤350 т), плавиковий шпат (1 т), вапно (≥15 т), залізна руда (40..100 т), кисень (≤ 5 т), електроенергія (≤70 МВтг);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 295 + номер варіанта, т ;
- температура навколишнього середовища $t_{нав}$ = 30 - номер варіанта, °С.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1600 + номер варіанта °С;
б) + відсутність шпату;
в) + основність шлаку не менше 2;
г) + дозволити вапняк;
д) + відсутність брухту чавуну;
е) + забезпечити використання залізної руди в шихті в кількості не менше 13%;
ж) + обмежити кількість шлаку, що утворюється, масою 50 т і газу масою 26 т.

3. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати та занести до звіту такі дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т ;
б) кінцева температура, °С;
в) загальні маси металу, шлаку та газу, т ;
г) основність шлаку;
д) склад металу масових %;
е) склад шлаку масових % оксидів ;
ж) молекулярний склад газу в атм ;
з) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC. fwp** , вибрати завдання «Чавун, Fe руда та E/e с/вуг» і перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.

5.6.3 Контрольні питання

1. Як впливає на показники плавки збільшення основності шлаку?
2. Як впливають технологічні обмеження, що вводяться, на вартість плавки?
3. Як впливає на показники плавки збільшення в шихті частки залізної руди?
4. Як впливає на показники плавки обмеження кількості шлаку?

5.6.4 Звіт з практичної роботи №6

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Брухт чав.					ні	ні	ні
Чавун пер.							
Шпат		ні	ні	ні	ні	ні	ні
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні				
Fe руда							
Кисень							
Е/е МВтг							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
М мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
М шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
М газу, т							
Vгазу, тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

5.7 Практична робота №7. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням окатишів, залізної руди, коксу і електроенергії

5.7.1 Теоретичні відомості

Приходна частина теплового балансу сучасних дугових печей включає тепло електричної дуги (~63-65 %), паливно-кисневих пальників (~5-7 %) і хімічних реакцій окислення (~30 %) і практично не відрізняється від класичної технології [11]. При роботі печей на металізованих окатишах, для яких характерний низький вміст домішок, прихід хімічної енергії забезпечується додаванням вуглецю і газоподібного кисню. Найбільш поширеними джерелами вуглецю, що використовуються для виробництва сталі масового сортаменту, є коксик і антрацит. Обидва матеріали недорогі, але привносять в сталь небажані водень, азот і сірку. Тому для виплавки високоякісної сталі використовують електрографіт (брухт).

Вуглецеві матеріали вводять в завалку або вдувають в розплав, в шлак або в робочий простір печі. Ефективність використання вуглецевих матеріалів характеризується кількістю тепла, що передається матеріалам і розплаву в печі з розрахунку на 1 кг вуглецю і визначається мірою допалювання, тобто окисленням вуглецю до CO_2. В дугових печах, як і в інших сталеплавильних агрегатах, вуглець окисляється переважно до CO, а не до CO_2. При цьому виділяється в 3,56 разів менше тепла. Тому для успішного використання вуглецевих матеріалів необхідне допалювання CO відхідних газів в робочому просторі печі до CO_2. Цей процес здійснюють подачею кисню за допомогою кисневих фурм або паливно-кисневих пальників.

5.7.2 Порядок виконання роботи

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низькоовуглецевого напівпродукту з використанням окатишів, залізної руди, коксу і електроенергії за наступних умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масовий вміст вуглецю в напівпродукті 0,015...0,05 %;
- дозволені: окатиші залізорудні (120...150 т), залізна руда, плавиковий шпат (1 т), вапно (≥ 15 т), кокс екстра (25...30 т), електроенергія (≤ 150 МВтг);
- температура навколишнього середовища $t_{навк}$ = 30 – номер варіанта, °C.

2. Розрахунок вести за наступними пунктами (кожна наступна умова додається до попередньої, не відміняючи її):

а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1600 + номер варіанта, °C;

б) + відсутність шпату;
в) + основність шлаку не менше 1,5 од.;
г) + дозволити вапняк;
д) + забезпечити використання залізної руди в шихті в кількості не менше 5 %;
е) + збільшити мінімальну кінцеву температуру на 5 °С;
ж) +збільшити мінімальну витрату коксу екстра на 1 т.

3. Для кожного з пунктів (а-ж) зафіксувати і занести у звіт такі результати:

а) набір використаних матеріалів і їхні маси, т; загальна маса, т;
б) кінцева температура, °С;
в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
г) основність шлаку;
д) склад металу, мас. %;
е) склад шлаку, мас. % оксидів;
ж) молекулярний склад газу, атм;
з) загальна вартість матеріалів, у.о.

4. Для виконання роботи завантажити проєкт **TiTBC. fwp** , вибрати завдання «Окатиші, кокс та Е/е н/вуг» і перевірити Опції:

Модель металу – Модифікована КЕ;
Модель шлаку – Модифікована КЕ + Nu / Eps;
Розрахунок кінцевої температури – точний;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – Ні;
Елементний склад шлаку – вимк.;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так.

5.7.3 Контрольні питання

1. Внесок вуглецю в тепловий баланс дугової печі.
2. Роль залізної руди в процесі отримання рідкого напівпродукту в дуговій печі.
3. Вуглецеві матеріали для використання в дуговій печі.
4. Як впливає на показники плавки збільшення використання залізної руди?
5. Як впливає на показники плавки збільшення витрати коксу?

5.7.4 Звіт з практичної роботи №7

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріал	**Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Окатиші							
Fe руда							
Кокс екстра							
Шпат		ні	ні	ні	ні	ні	ні
Вапно							
Вапняк	ні	ні	ні				
Е/е МВт·год							
Загальна маса, т							
Вартість, у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
[Al]							
Маса мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(S)							
(P_2O_5)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
Маса шл., т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO_2}							
Маса газу, т							
Vгазу,тис.$м^3$							
Т-ра, °С							

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» у системах керування плавкою, розкисленням, легуванням та позапічною обробкою сталі : монографія. Київ : Наукова думка, 2023. 228 с. ISBN 978-966-00-1910-2.
2. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Теорія сталеплавильного виробництва : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 136 "Металургія" ден. та заоч. форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 159 с.
3. Elliott J. F., Gleiser M., and Ramakrishna V. Thermochemistry for Steelmaking. Vol. I and II, Reading, Mass. *et al*. : Addison-Wesley, 1963.
4. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп'ютерна програма «Excalibur». Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022 р.
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. Харченко О. В., Синяков Р. В. Термодинамічна модель багатокомпонентної рідкої шлакової фази. *Металургія : зб. наук. пр. ЗДІА*, 2016. Вип. 2(36). С. 16-22.
7. Канторович Л. В. Математичні методи організації та планування виробництва. Київ : КДУ, 1969. 67 с.
8. 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(215). С. 131-137.
9. Харченко О. В. Оптимізація позапічної обробки та легування стали на основі вирішення зворотного завдання термодинамічного аналізу. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. № 8(228). С. 115-120.
10. ДСанПіН 5.5.6.009-98. Влаштування і обладнання кабінетів комп'ютерної техніки в навчальних закладах та режим праці на персональних комп'ютерах. Державні санітарні правила та норми. Київ, 1998.
11. Меджибожський М. Я., Харлашин П. С. Основи термодинаміки і кінетики сталеплавильних процесів. Київ : Вища школа, 1993. 327 с.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Дніпропетровськ : РВА"Дніпро-ВАЛ", 2006. 456 с.

2. Технології підвищення якості сталі : підручник. Дніпро : Системні технології, 2009. 196 с.
3. Віхлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродський С. С. Ковшове доведення сталі. Дніпропетровськ : Системні технології, 2000. 190 с.
4. Позапічні способи поліпшення якості сталі / Н. М. Чуйко та ін. Київ : Техніка, 1978. 128 с.
5. Kharchenko O. V. Thermodynamic modeling of «metal-slag-gas» system in control systems for melting, deoxidation, alloying and out-of-furnace steel processing : monograph. Kyiv : Naukova Dumka, 2023. 240 p.
6. Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Можливості та перспективи використання програми "Excalibur" у навчальному процесі. *Металургія : зб. наук. пр. ЗДІА*. Вип 1(29). 2013. С. 169-175.

Інформаційні джерела:

1. Теорія і технологія виробництва сталі. *Платформа дистанційного навчання Moodle ЗНУ*. URL: https://moodle.znu.edu.ua/course/view.php?id=8757 (дата звернення: 01.01.2026).
2. Метал України та світу – новини та аналітика металургійного комплексу; досьє (колекція матеріалів преси) на підприємствах України. URL: https://ukrmet.dp.ua (дата звернення: 01.01.2026).
3. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: https://library.znu.edu.ua/ (дата звернення: 01.01.2026).
4. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: http://www.nbuv.gov.ua/ (дата звернення: 01.01.2026).

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Харченко Олександр Вікторович

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

Методичні рекомендації до практичних робіт
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності G10 “Металургія”
освітньо-професійних програм “Металургія”
і “Металургія чорних металів”

Рецензент *Д. В. Прутцьков*
Відповідальний за випуск *Ю. О. Бєлоконь*