


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Приймальною комісією  
Протокол № 3  
\_\_\_\_\_ 2025 р.  
Заступник Голови Приймальної комісії  
  
Юрій КАГАНОВ

**ПОГОДЖЕНО:**

Відповідальний секретар відбіркової  
комісії

  
Вікторія БУЛИЧОВА

Гарант освітньо-наукової програми

  
Віктор СКАЧКОВ

**ПРОГРАМА  
ФАХОВОГО ІСПИТУ  
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ G10 МЕТАЛУРГІЯ**

Освітній і науковий ступінь: доктор філософії  
Спеціальність: G10 Металургія  
Освітньо-наукова програма: Металургія

Запоріжжя – 2025 рік

## **ФОРМА ФАХОВОГО ВСТУПНОГО ВИПРОБУВАННЯ**

Фаховий іспит зі спеціальності проходить в очній або дистанційній формі.

Іспит в очній формі проходить у приміщенні Запорізького національного університету (з дотриманням заходів безпеки в умовах воєнного стану) у два етапи. Письмовий етап – вступники надають відповіді на питання екзаменаційного білету у письмовій формі. Тривалість письмового етапу – до 45 хв. Усний – співбесіда вступника з фаховою атестаційною комісією ЗНУ з питань екзаменаційного білету (до 30 хв).

Іспит у дистанційній формі проходить у два етапи. Підготовчий етап – самостійна підготовка відповідей на питання екзаменаційного білету (до 10 хв.) та основний етап – співбесіда вступника з фаховою атестаційною комісією ЗНУ з питань екзаменаційного білету (до 45 хв.)

Для складання фахового іспиту зі спеціальності у дистанційній формі вступник надає Приймальній комісії ЗНУ один з документів: документ про проживання (перебування) поза межами м. Запоріжжя (витяг з реєстру територіальної громади, довідка ВПО), документ про перебування поза межами України або документ, який підтверджує наявність іншої поважної причини. Рішення про допуск до складання іспиту у дистанційній формі приймається Приймальною комісією.

У разі складання фахового іспиту зі спеціальності у дистанційній формі вступник має забезпечити процедуру ідентифікації особи, яка включає перевірку персональних даних та забезпечення безперервного технічного оснащення для відеозв'язку з фаховою атестаційною комісією ЗНУ у режимі реального часу.

Проведення фахових іспитів зі спеціальності та презентація дослідницької пропозиції як в очному, так і в дистанційному форматах, підлягають обов'язковому відео- та аудіозапису, який не може бути переданий третім особам.

### **КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ**

Для особи, яка претендує на зарахування для здобуття ступеня доктора філософії (за 200 бальною шкалою):

Високий рівень (175-200 балів) вступник отримує, виявивши такі знання та вміння: в повній мірі засвоїв увесь програмний матеріал, показує знання не лише основної, але й додаткової літератури, наводить власні міркування, робить узагальнюючі висновки, використовує знання з суміжних галузевих дисциплін, вдало наводить приклади.

Достатній рівень (150-174 балів) вступник отримує, виявивши такі знання та вміння: має також високий рівень знань і навичок. При цьому відповідь досить повна, логічна, з елементами самостійності, але містить

деякі неточності або пропуски в неосновних питаннях. Можливе слабе знання додаткової літератури, недостатня чіткість у визначенні понять.

Задовільний рівень (124-149 балів) вступник отримує, виявивши такі знання та вміння: в загальній формі розбирається у матеріалі, але відповідь неповна, неглибока, містить неточності, робить помилки при формулюванні понять, відчуває труднощі, застосовуючи знання при наведенні прикладів.

Низький рівень (100-123 балів) вступник отримує, виявивши такі знання та вміння: в загальній формі розбирається у матеріалі, допускає суттєві помилки при висвітленні понять, на додаткові питання відповідає не по суті.

До участі у конкурсі не допускається (0-99 балів), якщо вступник виявив такі знання та вміння: не знає значної частини програмного матеріалу, допускає суттєві помилки при висвітленні понять, на додаткові питання відповідає не по суті.

Голова фахової  
атестаційної комісії

  
(підпис свідую кульковою ручкою)

Віктор Скачков

## 6. ЗМІСТ ПРОГРАМИ

### 1. Теоретичні основи металургії

#### 1.1. Фізико-хімічні основи металургійних процесів

Будова речовини. Основи теорії твердого тіла. Кристалічна структура простих та складних оксидних фаз. Дефектність структури кристалів та її вплив на фізико-хімічні характеристики речовин. Термодинамічна система та термодинамічні параметри Функції стану. Термодинамічна рівновага. Закони термодинаміки. Термодинамічні потенціали (внутрішня енергія, ентальпія, ентропія, ізобарно-ізотермічний та ізохорно-ізотермічний потенціал). Термодинаміка сплавів. Ідеальні та реальні розчини. Термодинамічна активність. Розрахунки рівноваги у розчинах. Фазові переходи. Діаграми фазової рівноваги двокомпонентних систем Діаграми станів Me-O, Me-S. Кінетика металургійних реакцій. Загальна характеристика гетерогенних металургійних реакцій Визначення найважливіших кінетичних характеристик: порядку реакції, енергії активації, передекспоненційного множника. Ознаки лімітуючих стадій.

#### 1.2. Теорія пірометалургійних процесів

Будова та властивості рідких металів. Рідкий стан як проміжний між твердим та газоподібним. Близькість властивостей рідких металів при невеликих перегрівках над лінією ліквідус до властивостей металів у твердому стані. Термодинаміка процесів плавлення та кристалізації. Будова рідких шлаків. Теорії будови шлаків. Хімічні та фізичні властивості шлаків. Основність та способи її вираження. Концепція смностей шлаків. Способи розрахунку активності у шлакових системах. Твердофазні процеси. Загальне поняття про твердофазні процеси та їх роль у металургійних технологіях. Точкові дефекти твердих тіл. Дифузія у твердих тілах. Температурна залежність коефіцієнтів дифузії. Дифузія як одна із стадій твердофазних процесів. Твердофазні хімічні реакції, їхня класифікація. Методи розрахунку кінцевого стану. Експериментальні методи вивчення твердофазних процесів. Кінетика процесів у твердих тілах. Утворення та зростання гомогенних зародків. Дифузійно-кінетичний режим зростання фази. Рівняння ізотермічної кінетики. Загальна теорія окисно-відновних реакцій у твердому тілі. Феритоутворення у металургійних процесах. Низькотемпературні перетворення у системі Fe-O. Утворення складних алюмосилікатів, аморфні тверді тіла. Основи процесів відновлення. Структура та властивості оксидів чорних, кольорових та рідкісних металів. Термодинаміка відновлення оксидів. Особливості відновлення монооксидом вуглецю, воднем та твердим вуглецем. Навуглецювання елементів Діаграми стану Me-C. Активність вуглецю у навуглецюванням металі. Процеси

взаємодії в системах метал-шлак. В'язкість рідких металів та сплавів. Дифузійна рухливість компонентів у рідких металах та сплавах. Зовнішній та внутрішній масоперенос. Конвективна дифузія у рідині. Фізичні властивості шлаків. Способи оцінки окисленості та основності шлаків. Електропровідність рідких металів та шлаків. Явища змочування та розтікання на міжфазних межах. Основи кінетики окисних процесів. Окислення вуглецю. Розшарування у рідких сульфідно-окисних системах. Основи процесів випаровування та конденсації. Очищення металів ректифікацією. Кристалізаційні методи очищення металів. Будова солей із проміжним типом зв'язку. Плавкість сольових систем. Основні типи діаграм у бінарних системах. Кріоскопія розплавлених солей. Найпростіші типи діаграм потрійних систем. Потрійна система з подвійним з'єднанням, що інконгруентно плавиться. Термодинамічні властивості розплавлених солей. Парціальні та інтегральні термодинамічні характеристики, зв'язок між ними. Активність та коефіцієнт активності, надлишкові функції. Статичні, динамічні та кінетичні методи визначення тиску пари. Визначення парціальних термодинамічних властивостей за наслідками вимірювань електрорушійних сил. Хімічні кола, їх конструкції. Взаємодія розплавлених солей з металами та газами. Розчинність металів у солях, методи вивчення, природа розчинів. Властивості систем метал-сіль. Вплив розведення металевої або сольової фаз на взаємну розчинність та перебіг обмінних реакцій. Розчинність газів у розплавлених солях, природа цих розчинів.

### 1.3. Теорія гідрометалургійних процесів

Термодинаміка простого розчинення іонних кристалів у питній воді. Властивості води як розчинника, взаємодія іонів із молекулами води. Оцінка термодинамічної ймовірності перебігу процесів вилугування. Методи розрахунку зміни вільної енергії Гіббса та константи рівноваги для реакцій розчинення металів, оксидів, сульфідів, реакцій з утворенням твердої фази. Кінетика та механізм процесів вилугування. Стадії вилугування, зовнішньодифузійна, внутрішньодифузійна та кінетична області протікання процесу. Узагальнююче вираз для швидкості взаємодії у системі тверде-рідина. Закономірності перебігу процесу у зовнішньодифузійній галузі. Основні положення теорії масопередачі. Теорія прикордонного шару рідини, що примикає до твердого тіла. Молекулярна та конвективна дифузія. Ознаки перебігу процесу у зовнішньодифузійній ділянці. Закономірності перебігу процесу у внутрішньодифузійній ділянці. Залежність швидкості вилугування твердої речовини від наявності дефектів у його кристалічній решітці. Особливості механізму та узагальнене рівняння швидкості процесу за участю газоподібного реагенту. Области застосування кристалізації у гідрометалургії. Системи вода-сіль, вода-сіль(1)-сіль(2), трикутна та прямокутна діаграми для зображення трикомпонентних сольових систем. Ступені свободи та типи трикомпонентних систем із загальним іоном. Фазова діаграма розчинності,

способи створення пересичених розчинів, фактори та кількісні характеристики їхньої стійкості. Механізм утворення зародків кристалізації. Гомогенне та гетерогенне зародкутворення Механізм росту кристалів. Кінетика, стадії процесу, рівняння швидкості масової кристалізації. Поняття виділення металів цементациєю. Термодинамічні, кінетичні процеси та механізм цементациї. Побічні процеси під час цементациї.

#### 1.4. Теорія електрометалургійних процесів

Електрорушійні сили та електродні потенціали. Виникнення стрибка потенціалів та подвійного електричного шару на межі метал-електроліт. Електрокапілярні явища. Гальванічні елементи. Термодинаміка електричного елемента. Класифікація електродів. Електроди порівняння. Електродні потенціали, низка напруг металів. Кінетика електродних процесів. Поляризація електродів, основні види поляризації. Електроліз. Катодні та анодні процеси, основні закони електролізу. Характеристики електролізу, сумісний розряд іонів. Особливості електрохімії розплавлених середовищ Розчинність у розплавлених солях металів та газів. Термодинаміка гальванічних елементів у розплавлених солях. Електроди порівняння, потенціал електрода та ряд напруг у розплавлених солях. Кінетика електродних процесів у розплавах. Катодний вихід по струму та втрати металу. Механізм втрати металу. Вихід струмом при спільному розряді іонів на катоді. Анодний ефект, сутність та механізм виникнення. Особливості процесів на електродах у розплавлених солях. Основи високотемпературної електрометалургії кольорових металів.

## 2. Технологія виробництва чорних металів

### 2.1. Виробництво первинного металу

Підготовка сировини до плавки. Класифікація залізородних матеріалів. Родовища руд чорних металів. Флюси. Паливо. Техногенна сировина. Схема підготовки залізородних матеріалів до плавки. Відмінності у підготовці бідних і багатих руд. Дроблення та подрібнення. Збагачення руд. Показники збагачення. Граничний ступінь збагачення. Енерговитрати на дроблення, гуркотіння та збагачення. Викиди у навколишнє середовище при дробленні, гуркотінні та збагаченні. Огрудкування залізородних матеріалів. Агломерація залізняку. Фізико-хімічні засади агломерації. Видалення води та конденсація вологи. Розкладання карбонатів та гідратів. Твердофазні хімічні реакції. Плавання шихти та кристалізація розплаву. Формування агломерату. Отримання залізородних концентратів. Фізико-хімічні процеси при формуванні сирих концентратів та їх зміцненні. Поведінка попутних елементів. Технологія виробництва концентратів. Структура агрегатів для огрудкування залізородних матеріалів. Коксування вугілля та формування коксу. Якість коксу. Викиди у навколишнє середовище під час виробництва коксу. Виробництво чавуну в доменних печах Доменна піч.

Основні процеси. Нагрів та розкладання шихти. Процеси відновлення у доменних печах. Кінетика відновлення в доменних печах та вплив різних факторів на швидкість відновлення. Показники розвитку процесу відновлення у доменних печах. Навуглецювання заліза та формування чавуну. Якість чавуну. Шлакоутворення у доменних печах. Властивості шлаку. Горіння палива біля фурм доменної печі. Верхня та нижня шаблі теплообміну. Теплові баланси плавки. Рух газу та матеріалів у доменній печі. Формування газу та його рух у шарі. Конструкція доменних печей Профіль печі. Футерування та кожух. Система охолодження. Чавунна та шлакова льотки. Повітряні фурми. Засипний апарат. Устаткування доменних цехів. Подання матеріалів до доменної печі. Пристрої для збирання чавуну та шлаку. Розливна машина. Очищення доменного газу. Управління доменного плавкою. Експлуатація доменної печі. Позадоменне отримання первинного металу. Твердофазні процеси виробництва первинного металу Сировина та паливо. Фізико-хімічні особливості процесу. Ступінь металізації. Якість металізованої сировини. Агрегати для отримання твердофазного первинного металу. Енерговитрати та викиди у навколишнє середовище. Економіка виробництва. Рідкофазні процеси. Фізико-хімічні особливості рідкофазних процесів. Сировина та паливо. Якість продукції. Агрегати для рідкофазного відновлення.

## 2.2. Металургія сталі

Очищення від домішок. Кристалізація та розливання сталі. Окислення домішок сталеплавильної ванни. Термодинаміка окиснення вуглецю. Концентрація вуглецю та кисню у сталевій ванні в процесі плавки. Кінетика окиснення вуглецю. Процеси окиснення кремнію, марганцю та хрому. Кінетика спільного окиснення. Фізико-хімічні основи окиснення фосфору та видалення сірки. Розкислення сталі Термодинаміка розкислення сталі. Розкислювальна здатність окремих розкислювачів. Аналіз ізотерм розкислення. Залежність активності кисню від концентрації розкислювача. Розкислення комплексними розкислювачами. Видалення неметалевих включень із металу. Роль щільності та розміру включень, роль міжфазного натягу на кордоні з металом, вплив теплової конвекції та руху металу під дією газів, що виділяються. Залишкові (екзогенні та ендогенні) включення, що не видаляються з металу включення (кристалізаційні та післякристалізаційні), їх природа, вплив на властивості металу, способи зменшення вмісту кристалізаційних та післякристалізаційних включень. Дифузійне (екстракційне) розкислення. Розкислення вуглецем. Властивості основних розкислювачів. Гази в сталі та методи боротьби з ними Водень у сталі, його вплив на властивості сталі, вади, що викликаються при-сутністю водню в сталі та його виділенням із розчину в окрему фазу. Розчинність водню в залізі та сталі, вплив температури, алотропічних перетворень та хімічного складу на розчинність водню. Поведінка водню у процесі виплавки сталі (у мартенівських печах, кисневих конвертерах, дугових печах). Азот у сталі, вплив азоту на

службові властивості низьковуглецевих сталей, старіння сталі та азоту, азот як легуючий елемент та замітник дорогих компонентів сталей. Температурні умови формування та дисоціації нітридів. Кінетика масообміну азоту між газовою фазою та металом, гальмує ланка процесу в різних умовах взаємодії рідких металів та газів. Кристалізація та розливання сталі Гомогенне та гетерогенне зародження кристалів. Механізм зростання кристалів. Вплив тепловідведення. Дендритне зростання. Коефіцієнт розподілу домішки між твердою та рідкою фазами. Концентраційне переохолодження. Кристалізація в інтервалі температур. Поведінка металевго струменя при розливанні. Особливості гідродинаміки металу у виливницях у процесі кристалізації. Фізичні методи на процес затвердіння стали. Пороки злитків металу, що «кипить», методи обмеження їх розвитку. Внутрішні та зовнішні дефекти зливка спокійної сталі, управління розподілом сегрегатів, газів, неметалевих включень, шляхи підвищення щільності зливка. Злиток «напівспокійної» сталі. Особливості формування злитків, відлитої на МНЛЗ. Пороки литих заготовок, їх причини та заходи, що вживаються для обмеження розвитку окремих видів вад. Особливості виробництва сталі у різних сталеплавильних агрегатах. Киснево-конвертерний процес Закінчення газового струменя із сопла. Механізм та основні закономірності взаємодії газового струменя з рідкою металевго ванною. Кінетика розчинення твердих металів у рідких розплавах. Термодинаміка та кінетика окиснення елементів металевго ванни при киснево-конвертерних процесах. Окислення вуглецю. Окислення шлакоутворювальних компонентів ванни. Поведінка сірки при киснево-конвертерному процесі. Особливості конвертерного процесу з продуванням киснем через дно. Комбінована продування. Проблеми переробки скрапу у конвертерах. Перспективи киснево-конвертерного процесу. Аргонокиснева продування. Отримання нержавіючих сталей у конвертерах. Марки сталі, що виплавляється в кисневих конвертерах. Якість киснево-конвертерної сталі порівняно з мартенівською та електросталлю. Теорія та технологія подових процесів виробництва сталі. Теплова робота плавильного простору сучасних печей, що використовують кисень для спалювання палива та продування ванни. Особливості теплообміну в печах, що працюють під час продування металу киснем. Шихтування плавок у мартенівських і двованних великовантажних печах. Теплопередача у ванні в процесі завалки шихти, прогрівання та плавлення скрапу. Шлакоутворення у великовантажних мартенівських печах, що працюють із застосуванням рідкого чавуну. Рафінуюча та захисна роль шлаку під час плавлення. Окислення вуглецю в агрегатах подового типу. Природа та кінетика окислення вуглецю при скрап-процесі. Сірка в шихті подових сталеплавильних агрегатів. Десульфуріяція чавунів. Поведінка сірки у процесі плавки. Порівняння техніко-економічних показників роботи мартенівських печей. Якість сталі, що виплавляється в мартенівських та двованних печах. Автоматизація управління мартенівськими печами та двованними агрегатами. Застосування порошкоподібних матеріалів.

Енерговитрати та викиди в навколишнє середовище при подових процесах виробництва сталі. Електросталеплавильне виробництво. Виплавка сталі в електродугових печах з кислим футеруванням. Фізико-хімічні основи вакуумної плавки: розкислювальна здатність вуглецю, по-ведінка неметалічних включень, дегазація, взаємодія металу з футеруванням, розкислення, випаровування. Відкрита та вакуумна індукційна плавка (ІП та ВІП). Технологія плавки. Вакуумний дуговий перепплав (ВДП). Вплив електричного режиму на рафінування. Будова рідкої ванни та динаміка її зміни. Структура металу при ВДП та шляхи управління її формуванням. Основні дефекти злитків ВДП та шляхи їх попередження. Електрошлаковий перепплав (ЕШП). Склад шлаків при ЕШП. Механізм рафінування металу від неметалевих включень. Плазмова плавка та плазмово-дуговий перепплав (ПДП). Особливості горіння плазмової дуги. Взаємодія металу із газами за умов плазмової дуги. Легування металу азотом. Плавка сталі у плазмовій печі з керамічним тиглем. Електронно-променевий перепплав (ЕЛП). Температурний режим. Особливості формування зливка при ЕЛП. Техніка безпеки під час роботи в електросталеплавильних цехах. Теорія та практика позапічної обробки сталі. Нерівномірність складу та температури металу в ковші. Способи гомогенізації металу: продування аргонем та електромагнітне перемішування. Дегазація та видалення включень при гомогенізації. Кавітаційне продування. Десульфуріація сталі в ковші: обробка синтетичними шлаками та продування порошками. Сульфідна ємність шлаків. Механізм процесів десульфуріації під час продування порошкоподібними матеріалами. Управління процесами десульфуріації. Варіанти безокислювальної дефосфорації сталі. Розкислення та дегазація сталі у вакуумі. Способи вакуумування та їх порівняльна ефективність. Вплив вакуумування на якість сталі. Проблема безперервних процесів виробництва сталі. Технологічні переваги безперервних процесів у порівнянні з періодичними. Найбільш випробувані та перспективні варіанти безперервного сталеплавильного процесу. Комбінування безперервного сталеплавильного процесу з безперервною прокаткою. Перспективи безперервних сталеплавильних процесів.

### 2.3. Виробництво феросплавів

Сучасний стан та перспективи розвитку феросплавної промисловості; класифікація процесів одержання феросплавів. Карботермічні процеси. Фізико-хімічні засади відновлення оксидів вуглецю. Відновлення кремнію. Роль монооксиду кремнію та карбіду кремнію. Відновлення марганцю з оксидів та силікатів. Роль карбідів марганцю. Відновлення хрому та інших елементів із оксидів хромової руди. Металотермічні процеси, фізико-хімічні засади металотермії. Методика розрахунку шихти та складання теплового балансу металотермічного процесу. Вакуумно-термічні процеси, фізико-хімічні засади. Вакуумна плавка та обробка рідких феросплавів під вакуумом. Азотовані феросплави. Фізико-хімічні основи взаємодії азоту з провідними елементами

феросплавів у твердому та рідкому стані.

### 3. Металургійні печі

#### 3.1. Устаткування печей

Пристрої спалювання газоподібного палива. Пальники без попереднього змішування, з покращеним змішуванням та з попереднім змішуванням. Радіаційні труби. Пристрої для спалювання рідкого палива, форсунки низького та високого тиску. Газомазутні пальники. Пристрої для утилізації тепла газів, що відходять. Регенеративні теплообмінники. Пристрій, теплова робота та розрахунок регенера-тивних теплообмінників. Випарне охолодження доменних, мартенівських та нагрівальних печей. Охолодження конвертерних газів.

#### 3.2. Захист повітряного та водного басейнів від шкідливих викидів

Теоретичні основи та загальна характеристика газоочисних пристроїв. Сухе ме-ханічне очищення газів; очищення газів фільтруванням; мокре очищення газів; електричне очищення газів. Очищення газів доменного та сталеплавильного виробництва. Очищення газів печей кольорової металургії.

#### 3.3. Вогнетривкі матеріали

Вимоги до вогнетривких матеріалів, що застосовуються у печах чорної та кольоро-вої металургії. Фізичні та робочі властивості вогнетривких матеріалів, що використовую-ються у металургійних печах.

#### 3.4. Печі чорної металургії

Паливні печі. Шахтні печі. Гідродинаміка та теплообмін у щільному рухомому шарі. Поля швидкостей у шахтних печах при різних способах введення дуття: фурменному, щілинному та центральному. Полум'яні нагрівальні печі. Теплова робота нагрівальних печей. Особливості теплообміну у робочому просторі полум'яних печей. Схеми руху металу та продуктів згорання. Тепловий та температурний режими роботи печей. Способи опалення та транспортування металу. Нагрівальні колодязі. Тепловий та температурний режими. Нагрів холодного та гарячого посада. Нагрів злитків з рідкою серцевиною; використання дуття, збагаченого киснем. Шлаковидалення та стійкість подини. Токальні печі. Конструкції та режими роботи протитечійних печей. Вплив глісажних труб на теплову роботу печі. Рейтери. Особливості теплообміну та математичний опис нагріву металу. Прямо протиточні штовхальні печі. Печі з крокуючим подом (балками). Конструкції, режими роботи, особливості нагріву металу, математичний опис нагріву металу. Печі із кільцевим подом. Конструкції, тепловий та температурний режими, особли-вості теплообміну та нагрівання металу. Печі для швидкісного нагрівання металу. Фізичні основи швидкісного нагрівання металу, імпульсне нагрівання. Секційні печі та печі конвективного

(ударного) нагріву. Полум'яні термічні печі

Печі для темного термічного оброблення гарячекатаного прокату; садочні печі; печі з ланцюговим конвеєром та роликівим подом. Особливості теплообміну та нагріву металу. Печі з теплогенерацією за рахунок хімічної енергії рідкого чавуну

### 3.5. Печі кольорової металургії

Паливні печі. Шахтні печі для плавки окислених нікелевих руд. Шахтні печі для свинцевого плавлення. Конструкція та особливості теплової роботи. Відбивні печі для плавки на штейні. Трубчасті обертові печі. Конструкції, тепловий та температурний режим. Нагрівальні печі. Конструкції, тепловий та температурний режим. Печі з повною чи частковою теплогенерацією за рахунок хімічної енергії сировинних матеріалів. Загальна характеристика процесів, що протікають при випалюванні сульфідів у киплячому шарі. Газодинамічний режим печей. Температурний та тепловий режими випалу сульфідних матеріалів. Час перебування матеріалу в киплячому шарі. Печі для випалення сульфідних матеріалів у киплячому шарі. Печі для випалу цинкових, мідних та молібденових концентратів. Конвертери заводів кольорової металургії. Конструкції, тепловий та температурний режим роботи. Печі для автогенної плавки мідних концентратів на штейн та чорнову мідь. Плавка у рідкій ванні.

## 4. Технологія виробництва кольорових та рідкісних металів

### 4.1. Технологія виробництва важких кольорових металів

Загальні принципи вилучення міді, нікелю, свинцю, цинку із руд та концентратів. Кінетика та механізм окислення сульфідів у твердому та рідкому стані. Дисоціація вищих сульфідів при нагріванні у нейтральній атмосфері. Основні стадії формування металургійних розплавів (шлаку, штейну, шпейзи). Продуктивність пірометалургійних агрегатів. Розподіл цінних компонентів між продуктами плавки. Способи вилучення сірки при пірометалургійній переробці сульфідної сировини. Поведінка рідкісних та розсіяних елементів в основних пірометалургічних процесах. Розподіл миш'яку за продуктами плавки. Коефіцієнт комплексності використання сировини у металургії міді, нікелю, свинцю, цинку.

### 4.2. Переробка мідних руд та концентратів

Різновиди відбивної плавки. Її питома вага у виробництві міді. Доцільність попереднього випалу концентратів перед плавкою. Переваги та недоліки переробки конвертерних шлаків у відбивній печі. Характеристика штейнів, шлаків, газів. Тепловий ККД. Можливі способи утилізації тепла. Переробка штейнів на чорнову мідь. Поведінка його складових у I та II періоди конвертування. Тепловий та температурний режими процесу. Використання

повітря, збагаченого киснем. Показники процесу. Автогенні процеси у металургії міді. Їх переваги та недоліки. Вплив магнетиту на втрати міді зі шлаком у цих процесах. Розподіл сірки та металів-супутників за продуктами плавки. Вогневе та електролітичне рафінування міді. Теоретичні основи. Переробка анодних шламів. Практика процесів. Гідрометалургія міді. Підготовка сировини до гідрометалургійної переробки. Хімізм основних реакцій вилугування. Практика купчастого, бактеріального та автоклавного вилугування.

#### 4.3. Переробка нікелевих руд та концентратів

Способи підготовки окислених нікелевих руд до плавки у шахтних печах. Їх переваги та недоліки. Реакції, що протікають по висоті шахти печі та у внутрішньому горні. Характеристика штейнів та шлаків шахтної плавки. Конвертування нікелевих штейнів. Поведінка кобальту. Сучасні методи переробки конвертерних шлаків з метою вилучення їх кобальту. Їх переваги та недоліки. Переробка файнштейну до вогневого нікелю. Схема виробництва металургійного кобальту. Підготовка окислених нікелевих руд до плавки в електropечах на феронікелі. Теорія та практика плавки. Рафінування чорного феронікелю. Техніко-економічні показники. Перспективи розвитку процесу. Гідрометалургійні та комбіновані способи комплексної переробки окислених та нікелевих руд (сегрегаційні, автоклавні, аміачно-карбонатні та ін.). Підготовка сульфідних руд та концентратів до плавки в електричних печах. Теорія та практика електроплавки. Техніко-економічні показники. Особливості конвертування мідно-нікелевих штейнів. Поділ файнштейну. Способи переробки мідного та нікелевого концентратів, отриманих при флотації файнштейну. Відмінності технологічної схеми виробництва кобальту при переробці сульфідної та окисленої сировини. Карбонільний процес одержання нікелю. Гідрометалургійні та комбіновані способи комплексної переробки сульфідних руд та концентратів. Методи одержання нікелю та кобальту з розчинів; електроліз, водневе відновлення. Поведінка селену, телуру та дорогоцінних металів за основними переділами технологічних схем. Основні засади переробки анодних шламів електролізу нікелю. Переробка арсенідних руд, проблема виведення миш'яку.

#### 4.4. Переробка свинцевих концентратів

Агломеруючий випал свинцевих концентратів. Теорія та практика. Відновлювальна плавка свинцевого агломерату. Хімізм процесу. Поведінка свинцю та металів-супутників при плавці. Техніко-економічні показники плавки. Рафінування чорного свинцю та переробка напівпродуктів. Теорія та практика. Автогенні та гідрометалургійні способи переробки свинцевих концентратів. Їх переваги та недоліки, перспективи застосування цінних металів-супутників у виробництві свинцю. Схеми попутного вилучення сірки та металів-супутників при переробці свинцевих концентратів.

#### 4.5. Переробка цинкових концентратів

Порівняння ефективності піро- та гідрометалургійних методів отримання цинку. Випал цинкових концентратів. Пірометалургійні методи одержання цинку із недогарка. Електротермія цинку. Особливості виплавки цинку у шахтних печах. Рафінування чорного цинку. Гідрометалургія цинку. Вилуговування цинкових недогарків та очищення розчинів від домішок. Теоретичні засади цих процесів. Електроосадження цинку. Переробка напівпродуктів цинкового виробництва. Комплексне використання цин-ковмісної сировини.

#### 4.6. Технологія виробництва золота, срібла та металів платинової групи

Сучасний стан та основні етапи розвитку виробництва золота, срібла та металів платинової групи. Вилучення шляхетних металів амальгамацією. Термодинаміка, механізм та кінетика взаємодії золота, срібла та металів платинової групи з ртуттю. Теоретичні основи та технологія процесу ціанування. Термодинаміка та кінетика процесу розчинення в ціаністих розчинах золота, срібла, телуридів золота, сірчистих та оксидних мінералів срібла. Термодинаміка та кінетика процесу осадження золота та срібла з ціаністих розчинів цинком та алюмінієм. Теоретичні основи процесу сорбції золота та срібла з ціаністих розчинів активованим вугіллям, іонно-обмінними смолами (аніонітами) та рідинною екстракцією органічними розчинниками. Спеціальні процеси переробки руд та концентратів складного складу. Афінаж золота, срібла та металів платинової групи. Теоретичні основи та технологія електролітичного афінажу золота та срібла. Хімія та технологія процесів афінажу платинового концентрату та методи отримання платини високої чистоти.

#### 4.7. Технологія виробництва легких кольорових сплавів

Отримання магнію. Властивості та застосування магнію. Характеристика вихідних матеріалів. Теорія та технологія отримання безводного хлористого магнію та біофіту. Зневоднення карналіту: отримання штучного карналіту, зневоднення в СКН, що обертаються, і печах. Застосування печей киплячого шару та хлораторів. Склад та фізико-хімічні властивості електролітів. Особливості кінетики електродних процесів. Гідродинаміка електрода та катодний вихід по струму. Вплив домішок та добавок в електроліт на катодний процес. Освіта шламу. Техніка електролітичного одержання магнію. Конструкція електролізерів. Порівняльна їхня характеристика. Отримання алюмінію. Властивості алюмінію та сплавів на його основі, масштаби виробництва та сфери застосування. Основні алюмінієві руди. Переробка бокситів гідроклімічним способом. Основна реакція Байера. Будова алюмінатних розчинів. Рівновага в системі  $Al_2O_3-Na_2O-H_2O$ . Принципова технологічна схема методу Байера. Технологічні параметри основних переділів та характеристика обладнання. Отримання глинозему способом спікання із бокситів. Основні хімічні реакції при

спіканні та вилуговуванні спеків. Принципова технологічна схема методу спікання. Комплексна переробка нефелінів. Характеристика нефелінів та нефеліноспенитових руд. Основні реакції при спіканні нефеліну з вапняком та вилуговуванні. Принципова технологічна схема методу спікання. Основна апаратура. Характеристика алунітових руд. Основні реакції при переробці алунітових руд відновлювальним випалом із гілкою спікання. Принципова технологічна схема цього. Виробництво фтористих солей та електродів. Виробництво криоліту кислотним способом: основні реакції, технологічна схема та апаратура. Виробництво електродів: вихідні матеріали, пресування, випалення «зелених» електродів, графітування. Теорія електролізу криолітоглиноземних розплавів. Властивості та будова електро-літів та термодинаміка основних реакцій на електродах. Основні діаграми стану. Механізм катодного процесу, поведінка натрію в катодному розряді, катодний вихід струму. Анодний процес. Потенціаловизначальні реакції, склад анодних газів, зв'язок з катодним виходом по струму. Технологія електролітичного одержання алюмінію. Опис конструкції електролізерів та порівняння їх технічних даних. Технологія самопального анода алюмінієвого електролізера. Характеристика основних зон в аноді; вимоги до пеків і коксів; основні процеси, які у різних зонах анода; баланс вуглецю. Енергетичні баланси елетролізерів, зв'язок між щільністю струму та питомими втратами тепла. Планування цехів електролізу та електролізних корпусів. Газовідсмоктувач та вентиляція, регенерація фторсолей. Електролітичне рафінування алюмінію. Властивості та застосування алюмінію високої чистоти. Теорія та технологія тришарового методу, шляхи її вдосконалення. Металургія вторинного алюмінію. Технологія підготовки брухту та відходів до плавки. Плавка алюмінію та його сплавів в електричних та полум'яних відбивних печах.

#### 4.8. Технологія виробництва рідкісних та радіоактивних металів

Тугоплавкі рідкісні метали. Вольфрам та молібден. Фізико-хімічні основи пірометалургійних та гідрометалургійних способів розкладання рудних концентратів, їх критичне зіставлення, нові напрямки технології. Використання іонообмінних та екстракційних процесів у гідрометалургії вольфраму та молібдену. Схеми комплексної переробки вольфрам-молібденових концентратів. Способи відокремлення молібдену від вольфраму. Попутне вилучення ренію під час переробки молібденових концентратів. Технологія переробки вторинної вольфрамкової та молібденової сировини. Термодинаміка, кінетика та механізм відновлення триоксидів вольфраму та молібдену воднем, практика процесу. Основи виробництва компактних вольфраму та молібдену методом порошкової металургії та плавкою (дуговий, електронно-променевий). Варіанти процесів отримання вольфраму та молібдену відновленням галогенідів. Тантал та ніобій. Огляд та зіставлення способів розкладання рудних концентратів різного типу (танталіт-колумбіт, лопарит, пірохлор). Фізико-хімічні засади процесів. Зіставлення хлорної та сульфатної технології комплексної переробки лопариту.

Основи способів поділу танталу та ніобію. Огляд та зіставлення способів виробництва танталу та ніобію. Фізико-хімічні основи металотермічного, карботермічного та електролітичного способів. Отримання танталу та ніобію відновленням хлоридів. Фізико-хімічні основи різних способів виробництва компактних танталу та ніобію. Титан, цирконій та гафній. Основи сучасної технології виробництва тетрахлористого титану. Огляд та зіставлення способів одержання штучного рутиту з концентрацій ільменіту. Фізико-хімічні основи способів розтину цирконієвих концентратів. Обґрунтування вибору способу розтину залежно від кінцевих продуктів. Способи поділу цирконію та гафнію. Комплексне використання титанової та цирконієвої сировини. Фізико-хімічні властивості та практика магнійтермічного способу виробництва титану та цирконію з цих хлоридів. Варіанти натрійтермічного відновлення тетрахлористого титану. Зіставлення магнійтермічного та натрійтермічного процесів. Електролітичний спосіб одержання цирконію. Електролітичне рафінування титану. Основи йодидного способу рафінування титану та цирконію. Виробництво компактних титану та цирконію методом плавки. Порошкова металургія титану та цирконію. Розсіяні рідкісні метали Загальна характеристика розсіяних рідкісних металів, джерел їх одержання. Технологія попутного вилучення галію у виробництві глинозему, індію при переробці сульфідної сировини кольорових металів, германію при переробці мідної сировини та вугілля, ренію у виробництві міді та молібдену. Рідкоземельні та радіоактивні метали. Основи процесів отримання рідкісноземельних металів високої чистоти. Варіанти технологічних схем переробки моноцитових концентратів з отриманням сполук рідкісно-земельних металів та торію. Технологія переробки інших видів рідкісноземельної сировини (бастензит, ітропаризит, лопарит). Основи способів поділу рідкісноземельних металів та торію. Основи та апаратура процесів вилуговування урану з рудної сировини для їх здійснення. Іонообмінні та екстракційні способи вилучення та концентрування урану в розчинах, виділення чистих сполук. Основи технології виробництва урану металотермічними методами Плавка урану. Вимоги до чистоти урану, що використовується в атомній техніці. Легкі рідкісні метали. Берилій. Фізико-хімічні основи технології переробки берилієвих концентратів за сульфатною та фторидною схемами. Способи одержання чистого оксиду берилію та гало-генідів берилію. Металотермічні та електротермічні способи одержання берилію, дистиляційні та електролітичні процеси його рафінування. Виробництво компактного берилію. Літій. Основи технології виробництва сполук літію з літєвих концентратів (споду-мена, лепідоліту). Фізико-хімічні основи процесів одержання літію електролізом, вакуум-термічним способом. Способи рафінування літію.

## 7. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Основна

1. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Київ: Вища школа, 1988. 351с.
2. Величко О.Г., Стоянов О.М., Бойченко Б.М., Нізяев К.Г. Технології підвищення якості сталі. Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2016. 196с.
3. Синегін Є.В., Нізяев К.Г., Стоянов О.М., Герасименко В.Г., Журавльова С.В., Молчанов Л.С. Технології обробки сталі у передкристалізаційний період при безперервному розливанні. Дніпро: Середняк Т.К., 2021. 99 с.
4. Чуванов О.П., Мамешин В.С., Гриценко А.С. та ін. Технологія розливки сталі. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. 186 с.
5. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія Дніпропетровськ: Дніпро-ВАЛ, 2004. 454 с.
6. Tupkary R.H., Tupkary V.R. Modern Steel Making Handbook Mercury Learning & Information, 2017. 660 p.
7. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А. [и др.] Процессы непрерывной розливки. Донецк: ДОННТУ, 2009. 536 с.
8. Харлашин П. С. Основи термодинаміки і кінетики сучасних сталеплавильних процесів : підручник для ВУЗів. Маріуполь, 2012 340 с.
9. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. СП «Интернет Инжиниринг». 1999. 764с.
10. Металургія кольорових металів : Навчальний посібник для вищих навчальних закладів / Рабинович О.В., Садовник Ю.В., Ігнат'єв В.С., Трегубенко Г.М., Бубликов Ю.О. НМетАУ. Дн-ск: Видавництво, 2009. 154 с.
11. Уткин Н.И. Производство цветных металлов. СП Интернет Инжиниринг, 2000. 442 с.
12. Металлургия цветных металлов / Г.А.Колобов, В.Н.Бредихин, Н.А.Маняк, А.И.Шевелев. ДонНТУ. Д., Издательский дом «Кальмиус», 2007. 462 с.
13. Червоний І.Ф., Маняк М.О., Рабинович О.В., Колобов Г.О. Металургія кольорових металів. Навчальний посібник. Запорі-жжя: Видавництво ЗДІА, 2009. 137 с.
14. Металургія кольорових металів, ч. 1. Сировинні ресурси і виробництво. Підручник / Під ред. Червоного І.Ф. Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2008. 334 с.
15. Охотський В.Б. Теорія металургійних процесів / В.Б.Охотський, О.Л.Костьолов, В.К.Симонов та інш. Київ : ІЗМН, 1997. 512 с.
16. Симонов В.К., Гришин А.М., Иващенко В.П. Расчеты по теории процессов восстановления: Учеб. пособие. Днепропетровск: НМетАУ, 2006. 48 с.

#### **Додаткова**

1. Рябічева Л.О. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля. 2013. 356 с.
2. Горицкий В.М. Диагностика металлов. Металлургия, 2004. 408 с.
3. Могилащенко В.Г., Пономаренко О.І., Дробязко В.М., Кочешков А.С.,

Ямшинський М.М.. Теоретичні основи ливарного виробництва. Харків : НТУ «ХП», 2011. 288 с.

4. Ливарне виробництво : навчальний посібник для ВНЗ / С.В. Беспалов та ін. Запоріжжя, 2015. 120 с.

5. Макаревич О.П., Федоров Г.Є., Платонов Є.О. Виробництво виливків із спеціальних сталей. Київ: Видавництво НТУУ «КПІ», 2005. 712 с.

6. Сплави на основі заліза : підручник для студентів вищих навчальних закладів : у 2 томах / В.І. Мазур, І.З. Куцова, О.А. Носко, М.А. Ковзель; за загальною редакцією В.І. Мазура; науковий редактор С.О. Фірстов; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Київ : Політехніка, 2015. 272 с.

7. Позапічне рафінування чавуну і сталі: навчальний посібник / О.М. Смірнов, О.М. Зборщик. Донецьк : Вид-во "Ноулідж", Донецьке відділення, 2012. 179 с.: іл.

8. Леговані сталі: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / О.В. Більченко, О.І. Дудка, В.Г. Хижняк, С.М. Чернега; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Київ: Кондор, 2009. 96 с.