

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до випускної магістерської роботи**

**зі спеціальності 136 – Metallургія  
за освітньо-професійною програмою – Metallургія чорних металів**

**Тема роботи: «ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ КОМПЛЕКСНОЇ  
ПЕРЕРОБКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЇ СИРОВИНИ»**

Виконав:  
магістрант групи МЧМ-23-1м \_\_\_\_\_ Денис НАЗРУК

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг  
2024 р.

## РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

### «Дослідження можливості комплексної переробки титаномагнетитової сировини»

Пояснювальна записка: 82 стор., 24 табл., 18 рис., 29 джерел.

**Об'єкт дослідження:** титаномагнетитові руди, концентрати, агломерат і окатиші, чавун і шлак.

**Предмет дослідження:** технологія переробки титаномагнетитових руд.

**Мета роботи:** дослідження технології комплексної переробки титаномагнетитових руд.

**Методи дослідження:** аналітичні та експериментальні дослідження, метод моделювання.

**Результати роботи:** виконано аналіз можливих способів переробки титаномагнетитової сировини, проведено дослідження процесів відновлення металів з титаномагнетитових концентратів, на підставі досліджень зроблено висновок про можливість комплексної переробки титаномагнетитових руд і наведено умови проведення процесу.

ТИТАНОМАГНЕТИТИ, ЗБАГАЧЕННЯ, КОНЦЕНТРАТ,  
ПРОМЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ, МЕТАЛУРГІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ,  
ПЛАВКА.

## Вступ

Актуальність теми дослідження. Забезпечення металургійної промисловості титановою сировиною може здійснюватися за двома напрямками: шляхом підвищення ступеня комплексного використання руд, що містять титан, на діючих гірничодобувних і переробних підприємствах з отриманням різних, у тому числі нетрадиційних, видів титановмісної сировини, а також за рахунок промислового освоєння нових розвіданих родовищ титановмісних руд із застосуванням сучасних ресурсозберігаючих технологій.

Використання сучасних ресурсозберігаючих технологій дає стрімкий ефект, що дозволяє надати промисловості нову якість економічного зростання. Комплексне використання корисних копалин, у тому числі титановмісної сировини, на основі сучасних ресурсозберігаючих технологій тягне за собою скорочення (економію) всіх економічних ресурсів по всьому технологічному ланцюгу, починаючи від видобутку та збагачення руди, включаючи стадію хіміко-металургійної переробки, аж до отримання кінцевої продукції (металевого титану та пігментного двоокису титану). При цьому крім прямого економічного ефекту реалізація ресурсозберігаючих технологій дає великий економічний ефект у суміжних галузях промислового виробництва.

Перспективною сировиною для металургійної промисловості можуть бути титаномagnetитові руди, які можна віднести до комплексної сировини. На території України відомі дуже великі ільменітові родовища з титаномagnetитом – Стремигородське та Федорівське. У зв'язку з цим створення технології комплексної переробки титаномagnetитових руд найближчим часом може стати важливим практичним завданням, економіка та екологічна безпека якої буде визначатися глибиною та широтою вилучення заліза, титану, ванадію та супутніх елементів.

Об'єкт дослідження – титаномagnetитові руди, концентрати, агломерат і окатиші, чавун і шлак.

Предмет дослідження – технологія переробки титаномагнетитових руд.

Метою магістерської роботи є дослідження технології комплексної переробки родовищ титаномагнетитових руд.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішити завдання:

1. Дослідження хімічного та мінерального складу титаномагнетитової сировини.
2. Вивчення можливості ефективного збагачення титаномагнетитових руд.
3. Дослідження технології комплексної переробки титаномагнетитової сировини.

# 1 РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ТИТАНОВОЇ СИРОВИНИ В СВІТІ ТА УКРАЇНІ

## 1.1 Світові запаси титановмісної сировини

Титан – один з найпоширеніших елементів як за своїм змістом у земній корі, так і за кількістю мінералів. Відомо понад 60 мінералів, до складу яких входить титан. Металохімічні властивості та корозійна стійкість їх у агресивних середовищах створюють цінність цього металу.

Застосовують титан у різних галузях промисловості. Особливо затребуваний він в авіакосмічній промисловості та у військово-промисловому комплексі. Розвиток титанової промисловості сприяє підвищенню рівня науково-технічного та економічного розвитку держави, а також зміцненню її могутності та обороноздатності.

У структурі споживання титанових концентратів виділяють два основних напрями: виробництво пігментного діоксиду титану та застосування титану у металургії (рис. 1.1).

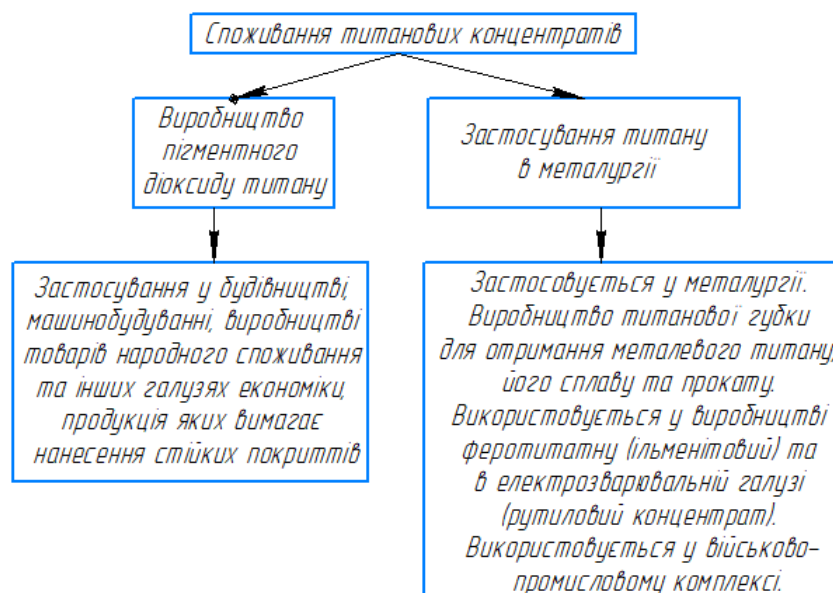


Рис. 1.1 – Сфери використання титанових концентратів

Виробництво пігментного двооксиду титану є найбільш масштабною сферою його застосування. За рівнем споживання цієї речовини на душу населення можна судити про якість життя населення. За даними експертів компанії «DuPont Титанові технології» в 2005 році використання  $TiO_2$  у розвинених країнах за кордоном досягало 2,5-3 кг на душу населення.

Використання титановмісних продуктів в металургії пов'язано, в першу чергу, з виробництвом титанової губки. З неї в подальшому можна отримати металевий титан, виготовити сплави на його основі та прокатну продукцію. Структуру використання титанових продуктів у світі показано на рис. 1.2.

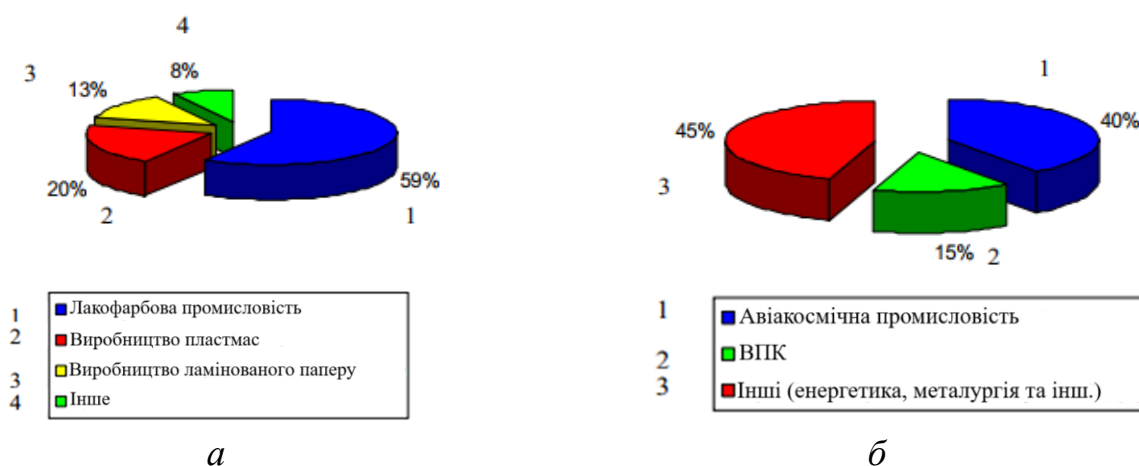


Рис. 1.2 – Структура використання титану за галузями промисловості:  
а) споживання двооксиду титану; б) споживання металевого титану

Сировинна база титанової промисловості світу представлена родовищами, які знаходяться на територіях різних країн. Розподіл запасів двооксиду титану у світі показано на рис. 1.3.

Як видно з рис. 1.3, переважна більшість титановмісних родовищ знаходиться на територіях азіатського регіону. Найбільші запаси титановмісної сировини розташовуються в Китаї, Австралії, ПАР, Індії та інших країнах.

Незважаючи на те, що Китай має запаси руд титану в розмірі 38,85% від загального світового запасу, якість руди, що містить титан, не задовольняє споживчий попит для виробництва  $TiO_2$ . Тим часом Китай є четвертою у світі країною з розвитку титанової промисловості після США, РФ та Японії.

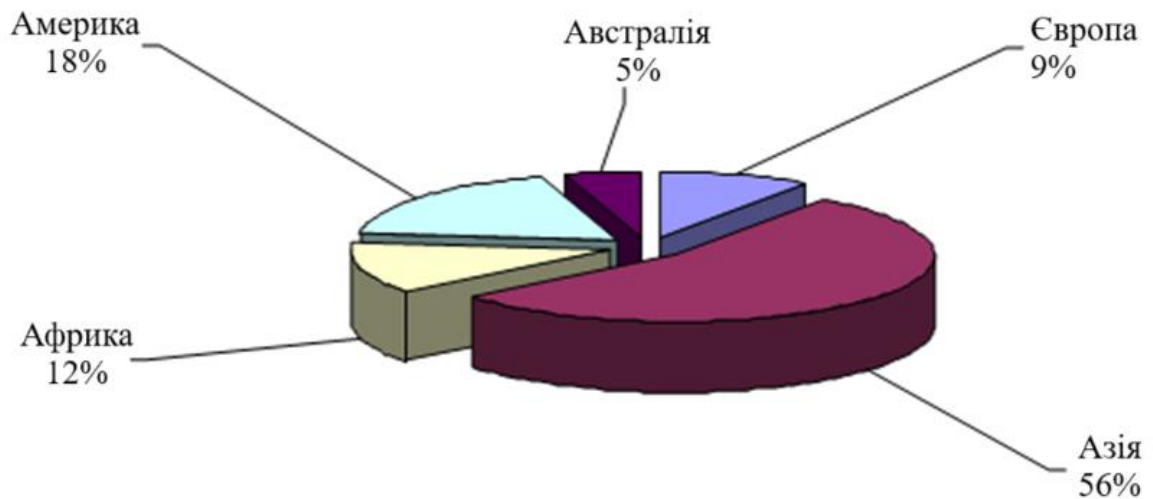


Рисунок 1.3 – Розподіл запасів титановмісної сировини в світі

У структурі виробництва титанових концентратів перше місце в світі займає Австралія – 32 % загального обсягу світового виробництва, потім йдуть ПАР – 21,3 %, Канада – 15,6 % і Норвегія – 10,8 %. Ці країни постачають на світовий ринок до 80 % первинної титанової сировини. Експорт титанових концентратів спрямований головним чином у промислово розвинені країни. Лідерами є: Німеччина, Великобританія, Франція, а також Японія – відповідно 17,6; 7,2; 5,6; та 12,0 % [1].

Споживання титану: США – 29%, Європа – 24%, Китай – 15%, Японія – 12% та інші країни. Попит на титан у США та Європі йде, переважно з боку авіакосмічного сектора, а основні споживачі титану в Японії та Китаї – промисловий сектор.

Ситуація на світовому ринку титанової сировини схильна до постійних коливань. Ринок титану є одним із складних ринків металів у світі. Складності ці зумовлюються численними макро- та мікрофакторами. Насамперед слід відзначити критичне падіння споживання титану в першій половині 90-х років у всьому світі. Зміна військово-політичної ситуації після розпаду СРСР суттєво вплинуло на ринок титану в багатьох країнах. Наприклад, у той час в США

будівництво військових літаків і двигунів з використанням титану зменшилося приблизно на 50 % порівняно з періодом «холодної» війни. Європейським виробникам військової авіаційної техніки не залишилося нічого іншого, як наслідувати приклад США.

Інший найважливіший чинник впливу на споживання титану – загальний економічний спад, як в Україні, так і на Заході.

Загальний спад споживання титану, постійно зростаючі внутрішні ціни на сировину, електроенергію, послуги тощо звели реальне споживання титанових продуктів до низького рівня.

Але вже з середини 90-х років світовий попит на титан і титанові сплави почав стійко зростати. У 1996 році загальний обсяг світового ринку гірничорудної продукції титанової сировини становив 800 млн. дол. США. Далі з 2001 року почалося різке підвищення попиту на сировину, проте збільшення світових поставок у 2004 році було відносно помірним, унаслідок чого на цьому ринку виник дефіцит поставок. Це стосувалося, насамперед, багатих двооксидом титану хлоридних сировинних матеріалів та ільменіту сульфатного сорту.

В умовах зростаючого попиту на титанові мінерали ряд світових продуцентів стали підвищувати випуск цієї сировини. Так, канадська фірма QIT-Fer et Titane Inc., інтегрована до складу компанії Rio Tinto, збільшила річне виробництво концентрованого титанового шлаку на 95 тис. тон.

Найбільший світовий продуцент титанової сировини – американська компанія Iluka Resources Ltd. відкрила нову копальню в шт. Джорджія, звідки транспортується концентрат на сепараторний завод у шт. Флорида, а також додатково розробляє родовища Західної Австралії.

За даними компанії Tronox, з 4,4 млн. т виробленого світом двооксиду титану 23% припадало на найбільшого виробника DuPont (США), 14% – Lyondell (Millenium), 13% – Tronox, по 11% – Hunstman Tioxide та Kronos. Що стосується споживання двооксиду титану, то близько 35% виробленого у світі  $TiO_2$  було спожито підприємствами Європи, 34% – Америки та 31% – країнами



Азіатсько-Тихоокеанського регіону. У цей період відзначався значний попит на сировину, що містить титан.

На території нашої країни також нараховується велика кількість титанових родовищ, розвідані запаси в яких становлять майже половину від загальної кількості всіх запасів титановмісної сировини країн СНД.

Основні запаси титанових руд України зосереджені в Малишевському та Іршинському розсипних родовищах. Саме на цій титановмісній сировині працюють Вільногірський гірничо-збагачувальний і Іршанський гірничо-металургійний комбінати, які переробляють розсипні титано-цирконієві родовища. Крім того, значні запаси титанових мінералів містяться у корі вивітрювання та корінних покладах Стремигородського ільменіт-титан-апатит-магнетитового родовища.

Як зазначають автори робіт [2-5], за «своїми якісними характеристиками родовища титану в країнах СНД, загалом, поступаються зарубіжним аналогам: вміст двооксиду титану в рудах та пісках у 1,5-3,0 рази нижчий, ніж у зарубіжних родовищах». Вміст ільменіту в сировині Малишевського родовища знаходиться на рівні 34,8 кг/м<sup>3</sup>, у родовищах Іршинської групи – 75,7 кг/м<sup>3</sup>, у той час, коли вміст ільменіту в родовищі Чаварра (Індія) становить 122 кг/м<sup>3</sup>.

## 1.2 Сучасний стан і перспективи титанової промисловості України

Титанове виробництво – складне і наукомістке, яке «під силу» лише невеликій кількості держав світу, здатних здійснити повний цикл титанового виробництва – від видобутку рудної сировини до отримання металевого титану та виробництва виробів із нього. До таких держав належить і наша країна. Тому необхідно зробити оцінку місця та ролі України на світовому ринку титанової продукції та перспективних позицій у сфері розвитку високих технологій у кольоровій металургії.

Титанова сировина не рідкість, адже за поширеністю цей кольоровий метал поступається лише алюмінію та магнію, вміст його оксиду в основних

промислових мінералах дуже високий – від 44 до 96%. Відомо понад 80 мінералів, що містять титан, серед яких найпоширенішими є мінерали групи рутила та ільменіту, значні поклади яких відкриті та розробляються в Україні.

До цих пір титан залишається найдорожчим із «великотоннажних» металів, а його використання залишається дуже обмеженим. Причиною такої ситуації є складна та витратна технологія виробництва металевого титану. Навіть незначні домішки роблять його крихким, зводячи нанівець найважливіші споживчі якості. Але гіршим є те, що за високих температур титан легко абсорбує атмосферні гази та домішки, через що численні технологічні процеси, що супроводжують плавку, доводиться вести у вакуумі або в атмосфері інертних газів.

Металургійне виробництво пред'являє жорсткі вимоги до якості сировини та включає велику кількість технологічних переділів: Гірничо-збагачувальні комбінати поставляють концентрат на підприємства, що виготовляють губчастий титан, а він, у свою чергу, надходить на металургійні заводи, що виплавляють металевий титан і виготовляють з нього прокат і штампування.

Виняткова складність і витратність виплавки металу визначає специфіку економіки титанового виробництва: за фінансовими показниками видобувні активи відіграють у титановій промисловості мізерну роль, майже вся додана вартість формується на металургійних підприємствах. Ряд дослідницьких груп на Заході намагається радикально спростити технологію, і тоді конфігурація світового титанового ринку зміниться кардинально, але поки що це є перспективою віддаленого майбутнього [6].

Нинішнє світове виробництво металевого титану трохи перевищує 100 тис. тон на рік. Титановий бізнес – справа інноваційна, наукомістка і технологічно складна, що вимагає жорсткого контролю за виробництвом та надійності в очах покупця. Великих виробників титану можна перерахувати на пальцях однієї руки, споживачів теж небагато, а основну частину металу для планерів закупають кілька провідних світових корпорацій, серед яких лідирують авіабудівні компанії Boeing і Airbus і компанії, що виробляють

авіадвигуни. Біржовий ринок титану відсутній, а покупці віддають перевагу довгостроковим відносинам і контрактам.

Титанова промисловість України переважно представлена виробництвом титанової губки, хоча останнім часом робляться малоперспективні спроби налагодити виробництво титанових сплавів.

Циклічність авіакосмічної галузі, що є головним споживачем цього міцного металу, визначає яскраво виражену періодичність і титанової промисловості.

Питання щодо участі України на міжнародному ринку титанової продукції та використання на ньому своїх потенційних можливостей залишається відкритим. Справа в тому, що первинний титан у вигляді високоякісної титанової губки є основним конструкційним матеріалом для аерокосмічної промисловості.

Титанова ж губка українського виробництва, в основному, за своїми якісними характеристиками поки що не відповідає вимогам аерокосмічного виробництва. Однак, ринок титанової продукції, крім губчастого титану (який в основному і випускається в Україні), споживає і феротитан, що виробляється сталеливарними заводами, що становить основну конкуренцію титановій губці. Деякі заводи Європи орієнтуються на використання феротитану, пояснюючи це потенційним зростанням дефіциту титанової губки.

Положення постачальника титанової губки для виробництва феротитану чи титанового порошку та втрата ринку високоякісного титану для аерокосмічної техніки не повинно задовольняти Україну. Спробуємо розібратися в питанні: що заважає Україні стати конкурентоспроможною на ринку високоякісної титанової продукції?

Єдиний в Україні виробник металевої титанової губки – Запорізький титаномагнієвий комбінат (ЗТМК) має виробничі потужності на рівні 20 тис. т титанової губки на рік. Однак, незважаючи на колосальний дефіцит губки на світовому ринку, ЗТМК повільно нарощує потужності її виробництва і не дбає про розширення технологічного циклу та сортаменту продукції, що

випускається. Через незавершеність технологічного процесу продукція комбінату не може бути затребувана вітчизняними авіаційними підприємствами, які змушені закуповувати необхідні сплави за кордоном. При цьому ЗТМК за «бросовими цінами» змушений забезпечувати майже півсвіту сировинним напівфабрикатом низької якості.

Доки наша країна торгуватиме дешевою «сировиною» замість дорогої готової продукції?

За різними оцінками, для повного відновлення виробництва титану Україні потрібно інвестувати в галузь 1-2 млрд. доларів з періодом окупності в 5-10 років. Такий обсяг інвестицій необхідний не лише для модернізації виробництва на ЗТМК, але й для розширення рудної бази та модернізації виробництва на кримському ВО «Титан» і ВАТ «Сумхімпром». До таких інвестицій наша держава поки що не готова, а питання акціонування підприємств титанового комплексу «висить у повітрі» вже багато років. Звичайно ж, держава, за будь-яких умов ринкової економіки, не повинна втрачати контроль над стратегічною галуззю народного господарства. Але й не давати їй розвиватися теж безгосподарно та економічно не вигідно, оскільки Україна зазнає економічних втрат, не використовуючи потенційних можливостей свого, багато в чому унікального, титанового комплексу.

Розроблена в Україні програма розвитку підгалузі не враховує відомих розробок та потенційних технологічних нововведень, які будуть у найближчій перспективі використані розвиненими аерокосмічними державами. Програма розвитку галузі має спиратися на науку, бо титанове виробництво належить до сфери високих технологій і потребує значних зусиль науковців та практиків для свого розвитку та підтримки на конкурентоспроможному рівні. Тому необхідно максимально активізувати науковий потенціал України в напрямку підвищення ефективності титанового виробництва для зміцнення конкурентних позицій України в міжнародному економічному просторі.

Цілком очевидно, що «український титан» насамперед зобов'язаний завоювати ринок вітчизняних споживачів, а потім проявляти активність на

світовому ринку, за рахунок підвищення якості та розширення асортименту продукції головного технологічного переділу — листовий та сортовий прокат, штучні виливки та поковки.

Перспективною сировиною для титанової промисловості можуть бути також титаномагнетитові руди, які можна віднести до комплексної сировини. На території України відомі дуже великі ільменітові родовища з титаномагнетитом – Стремигородське, Федорівське та Крапивенське [7].

Корінні руди першого містять 14-15% Fe, 6,5-7,5%  $TiO_2$ , 0,01-0,1%  $V_2O_5$ ; середній вміст  $V_2O_5$  в ільменіті – 0,17%. Титаномагнетит Федорівського родовища містить 46,8-58,8%  $Fe_2O_3$ , 9,4-23,7%  $TiO_2$  та 0,5-2,4%  $V_2O_5$ . В ільменіті з цього родовища вміст  $TiO_2$  – 48,42,  $Fe_{заг}$  – 46 %; крім того, відзначаються підвищений вміст ванадію (0,08-0,73%) та скандію (до 135 г/т).

Родовища титаномагнетитових руд вимагають поглибленого вивчення, геолого-економічної оцінки та залучення до промислового використання, особливо у регіонах із розвиненим металургійним виробництвом. Саме родовища подібних типів можуть стати для України надійними джерелами мінеральної сировини для одержання заліза, ванадію, титану, скандію та інших рідкісних елементів.

### 1.3 Переробка титаномагнетитової сировини методами збагачення

Титаномагнетитова руда є комплексною, що містить такі корисні елементи, як залізо, ванадій і титан. Основні рудні мінерали – магнетит, титаномагнетит, ільменіт, гематит, рутил; другорядні - пірит, халькопірит, піротин. До основних нерудних мінералів відносять плагіоклаз, рогову обманку, піроксен, хлорит, біотит, апатит тощо.

Результати хімічного аналізу (табл. 1.1) показали, що у руді крім корисних містяться і шкідливі елементи - фосфор і сірка.

Таблиця 1.1 – Результати хімічного аналізу

Продукт	Масова частка, %								
	Fe	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
Руда	23,3	10,4	32,0	13,7	6,6	4,4	0,03	0,46	0,43

Дослідження структурно-текстурних особливостей титаномагнетитової руди показало, що руда є тонкокрапленою, зерна магнетиту пронизані точковими і пластинчастими включеннями ільменіту. У більшості випадків магнетит пронизаний нерудними вкрапленнями, розміри яких коливаються від часток мікрона до 0,1 мм.

Використання титаномагнетитової рудні в металургійному переділі представляє проблему, яку дуже важко розв'язати, у зв'язку з тугоплавкістю, обумовленою наявністю діоксиду титану. Це вказує на необхідність збагачення титаномагнетитової руди з отриманням залізованадієвого та ільменітового матеріалу.

У попередніх роботах [8] запропоновані схеми переробки титаномагнетитових руд з отриманням залізованадієвого концентрату. Представлена технологія дозволяє отримати залізованадієвий концентрат з масовою часткою заліза 60,0-62,0% і діоксиду титану 5,8-4,1%, який може бути використаний в шихті для доменного процесу, і ільменітовий промпродукт.

Схема переробки титаномагнетитової руди повинна включати залізованадієвий цикл збагачення з подальшим доведенням чорнового концентрату і ільменітовий цикл (рис. 1.4).

Вибір методу збагачення в ільменітовому циклі визначається відмінними властивостями рудних мінералів. Після магнітної сепарації титаномагнетитової руди утворюється немагнітна фракція крупністю менше 0,1 мм, у якій сконцентровані рудні мінерали, такі як ільменіт та рутил. Дані мінерали є слабомагнітними мінералами, питома магнітна сприйнятливість їх становить  $(15-960) \cdot 10^{-8}$  та  $(0,7-4,8) \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг із щільністю 4500-5000 кг/м<sup>3</sup>, що визначає можливість виділення цінного компонента за допомогою магнітної сепарації та

гравітаційних апаратів. Також одним із можливих методів збагачення ільменітового промпродукту є флотація.

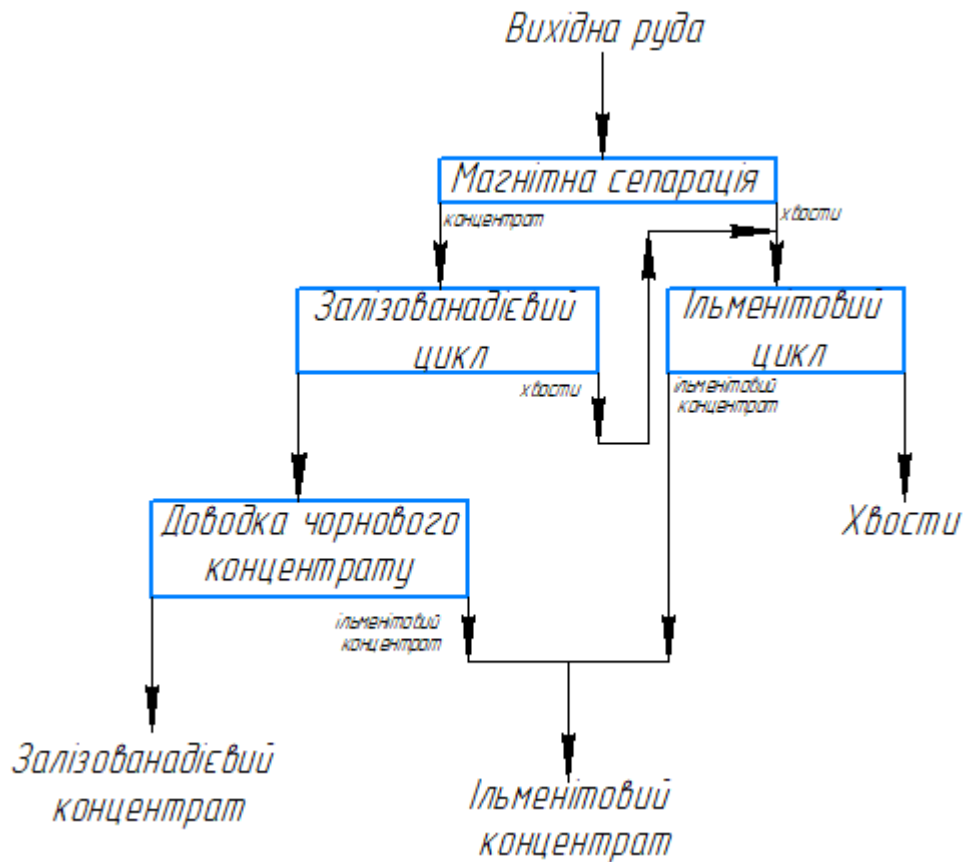


Рисунок 1.4 – Принципова схема збагачення титаномагнетитової руди

Як показав літературний огляд, для збагачення титаномагнетитових руд можливе використання магнітно-гравітаційної технології. Технологія включає подрібнення і мокру магнітну сепарацію з метою отримання залізованадієвого концентрату, гравітаційні процеси і поліградієнтну сепарацію з отриманням ільменітового концентрату. Результати збагачення титаномагнетитової руди за цією технологією наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Показники збагачення за магнітно-гравітаційною технологією

Продукт	Вихід, %	Масова частка, %		Вилучення, %	
		Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>
Ільменітовий концентрат	15,4	24,4	44,3	16,8	57,3
Ільменітовий концентрат крупністю -0,5 мм	7,0	26,2	47,8	8,2	28,1
Ільменітовий концентрат крупністю -0,2 мм	8,4	22,9	41,4	8,6	29,2
Злізованадієвий концентрат	19,2	61,0	10,9	52,3	17,6
Хвости	65,4	10,6	4,6	30,9	25,1
Вихідна руда	100,0	22,4	11,9	100,0	100,0

Наведені дані показують, що технологія має ряд недоліків, основними з яких є: низьке вилучення заліза в залізованадієвий концентрат і висока масова частка діоксиду титану в ньому, а також низьке вилучення діоксиду титану в ільменітовий концентрат.

На основі проведених досліджень сухої та мокрої магнітної сепарації, подрібнення, гравітаційних процесів та флотації титаномагнетитової руди виконано технологічні дослідження з розробки ефективної технологічної схеми збагачення титаномагнетитової руди.

Результати проведених досліджень свідчать про можливість отримання концентрату ільменітового за допомогою флотаційного і магнітно-гравітаційного методів.

Пропонується такий реагентний режим флотації ільменітового промпродукту: олеат натрій 1200 г/т, фтористий натрій 500 г/т, сірчана кислота 800 г/т, ВКП 600 г/т. Результати збагачення титаномагнетитової руди за магнітно-флотаційною схемою наведено у табл. 1.3.



Таблиця 1.3 – Показники збагачення за магнітно-флотаційною технологією

Продукт	Вихід, %	Масова частка, %		Вилучення, %	
		Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>
Ільменітовий концентрат	16,0	13,8	45,2	9,7	60,7
Злізованадієвий концентрат	23,0	63,4	4,5	65,1	8,7
Хвости	61,0	9,2	6,0	25,0	30,6
Вихідна руда	100,0	22,4	11,9	100,0	100,0

У результаті збагачення титаномагнетитових руд за магнітно-флотаційною схемою отримано ільменітовий концентрат з масовим вмістом діоксиду титану 45,2 % при вилученні 60,7 %. Значне підвищення масової частки заліза та зменшення вмісту діоксиду титану в залізованадієвому концентраті пояснюється розкриттям зростків при додатковому подрібнюванні залізо ванадієвого промпродукту до крупності 0,04-0 мм.

Титаномагнетитові руди вважаються багатьма дослідниками перспективною сировиною. Руди цих родовищ залежно від співвідношення рудоутворювальних мінералів діляться на суцільні титаномагнетитові та вкраплені. Суцільні титаномагнетитові руди є переважним типом.

Магнетит є найпоширенішим мінералом у складі як суцільних, так і вкраплених руд. Зміст його становить від 15-20 до 70-90%. Розміри зерен магнетиту коливаються у широких межах від 0,05-0,08 до 1,5-2,0 мм.

Другим за рівнем поширення рудоутворювальним мінералом є ільменіт, вміст якого становить від 10 до 30% від рудної маси.

Титаномагнетитові руди мають у своєму складі залізо, титан і ванадій у кількостях, достатніх для їхнього промислового вилучення. Однак обмежуючим фактором для широкого їх використання у традиційній металургії є наявність в одержуваних концентратах діоксиду титану.

Дослідження структурно-текстурних особливостей руди показало, що зерна магнетиту пронизані точковими та пластинчастими включеннями ільменіту. Це визначає важку міру збагачуваності даних руд.

Дослідженнями збагачуваності титаномагнетитових руд займалися багато організацій. Були виконані лабораторні, напівпромислові та промислові випробовування. За розробленою магнітно-гравітаційною технологією переробки ільменітових руд було отримано ільменітовий концентрат з масовою часткою діоксиду титану до 42,7% при вилученні його 77,6% та магнетитовий концентрат з масовою часткою заліза до 60,3% при вилученні 14,5%.

Реалізація даної технології для отримання магнетитового концентрату була недоцільною через низький його вихід і високої масової частки в ньому діоксиду титану, що сягає 10,5-11,0%. Використання такого концентрату в металургійному переділі із застосуванням традиційних процесів є неможливим.

За розміром вкрапленості рудних мінералів виділяють кілька типів титаномагнетитових руд (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 - Технологічна класифікація титаномагнетитових руд

Руда	Крупність зерен титаномагнетита, мм	Масова частка фракцій титаномагнетита, %	
		дисперсної	дисперсної і тонкої
Крупновкраплена	3	0-5	0-5
Середньовкраплена	1-3	5-10	5-15
Дрібновкраплена	0,2-1	10-17	15-50
Тонковкраплена	0,74-0,2	17-50	50-75
Дисперсовкраплена	0,074-0	50-100	75-100

Подана класифікація не дозволяє рекомендувати технологію переробки титаномагнетитових руд. Найбільш важливе значення для цих руд має форма знаходження діоксиду титану.

Аналіз досліджень та практики переробки титаномагнетитових руд дозволяє розділити родовища титаномагнетитових руд на дві групи.

1. Група родовищ, у яких титаномагнетит представлений структурою зрощення магнетиту та ільменіту. Для переробки руд даного типу можливе застосування різних технологій збагачення з використанням як магнітно-

гравітаційних, так і магнітно-флотаційних технологій з різними реагентними режимами. В результаті збагачення можливе отримання залізованадієвого та ільменітового концентратів.

При тонкій вкрапленості титаномагнетитової руди, коли зерна магнетиту пронизані точковими і пластинчастими включеннями ільменіту і розміри їх становлять від часток мікрона до 0,1 мм, зрідка досягаючи 0,4-0,6 мм, необхідне доведення отриманого залізованадієвого концентрату.

Технологія доведення полягає у створенні оптимальних умов для розкриття зростків та вибіркового поділу мінералів, що забезпечує підвищення масової частки заліза з 55,4-57,9 до 60,0-62,0% при зменшенні масової частки діоксиду титану з 10,5-11,3 до 5,8-4,1% в залізованадієвому концентраті. Ільменітовий концентрат виходить з масовою часткою діоксиду титану 43,2-45,1% при вилученні 47,2-49,7%. Найважливіше значення при цьому має кількість вільного ільменіту в руді.

В результаті збагачення можливе отримання залізованадієвого та ільменітового концентратів. Попередні дослідження дозволили розробити технологію переробки титаномагнетитових руд, принципову схему якої наведено на рисунку.

Деяка частина одержуваного залізованадієвого концентрату з масовою часткою діоксиду титану 5,8-4,1% може бути підшихтована до магнетитових та залізовмісних компонентів шихти для традиційної металургії, а решта його частина повинна перероблятися із застосуванням нових технологічних процесів.

2. Група родовищ, в яких титаномагнетит представлений твердим розчином діоксиду титану в магнетиті, що є складним оксидом і являє собою:

- проміжний член серії твердих розчинів – магнетит ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ) → ульвошпінель ( $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ ) → магнезіальна ульвошпінель ( $\text{TiMg}_2\text{O}_4$ );
- магнетит із включеннями продуктів розпаду твердих розчинів (ільменіту ульвошпінелі) та їх подальшого заміщення (рутил, перовскіт);

- магнетит з високим вмістом (до 37%) ільменітового компоненту ( $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeTiO}_3$ ), який називається титаномаггеміт.

Залізовмісний концентрат з масовою часткою діоксиду титану до 2-2,5%, використовується спільно з магнетитовим концентратом, а титаномагнетитова руда з більш високим вмістом діоксиду титану підшихтовується до магнетитової руди перед її збагаченням. Спроби знизити масову частку діоксиду титану в магнетитових концентратах, одержуваних із зазначених вище руд, не дали позитивних результатів. При масовому вмісті заліза у вихідній руді 34,7%, а діоксиду титану - 11,89% чорновий концентрат містить 49,1% заліза та 15,1% діоксиду титану.

Застосування доводки чорнового концентрату дозволило підвищити масову частку заліза до 55,8%. Одночасно підвищилася і масова частка в ньому діоксиду титану до 17,36%, тобто є прямий взаємозв'язок масової частки в концентратах заліза та діоксиду титану. Це свідчить про тісний зв'язок титану із залізом. Застосування зворотної катіонної та аніонної флотації, прямої аніонної флотації не дало позитивних результатів.

Слід зазначити, що масова частка діоксиду титану в немагнітних продуктах переміщення знижується до 7,21-7,41%, а в продуктах флотації - до 7,75-10,3%, що не дозволяє отримувати ільменітовий концентрат. Таким чином, використання механічних процесів переробки руд даного типу без зміни її фазового складу не дозволяє отримати кондиційні залізованадієвий та ільменітовий концентрати, тому що діоксид титану тісно пов'язаний із залізом і при підвищенні масової частки його в концентратах збільшується і масова частка діоксиду титану. Отримані концентрати потребують спеціальної металургійної переробки.

Розробка ефективних технологій переробки титаномагнетитових руд може забезпечити отримання високоякісних концентратів. Тому розробка технології комплексної переробки титаномагнетитових руд набуває нині особливої актуальності. Вирішення даної задачі дозволить широко

використовувати титаномагнетитові руди та забезпечити залізорудною сировиною металургійні підприємства.

Роль титаномагнетитових руд для одержання заліза та ванадію зростає, по-перше, у зв'язку з виснаженням запасів магнетитових руд для відкритого способу видобутку; по-друге, завдяки своїм позитивним гірничо-геологічним і мінерально-технологічним особливостям – широкому поширенню, великим запасам, порівняно простій геологічній будові; можливостям кар'єрного відпрацювання, простій технології збагачення, що дозволяє отримувати залізорудні концентрати з низьким вмістом шкідливих домішок – сірки та фосфору, високій комплексності руд, використанню відходів тощо.

Використання титаномагнетитових руд як залізовмісної сировини можна вважати вирішеним промисловістю завданням. Важливою умовою їх використання є обов'язкове збагачення руд з метою отримання високозалізного ( $Fe_{заг}$  - 55-65%) титаномагнетитового концентрату та зниження вмісту в ньому діоксиду титану, оскільки для нормального ходу доменної плавки вміст  $TiO_2$  у вихідній сировині не повинен перевищувати 4%.

Найкращими прикладами освоєння та промислового використання титаномагнетитових руд за кордоном є родовища Бушвельдського масиву (ПАР), Лак-Тіо (Канада), Паньчжихуань (КНР) та ін.

## 2 АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ СПОСОБІВ ПЕРЕРОБКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЇ СИРОВИНИ

### 2.1 Можливості пірометалургійної переробки титаномagnetитової сировини

Титаномagnetити є комплексною сировиною з високим вмістом цінних компонентів: заліза (35–65 %), титану (2–14 %) та ванадію (0,5–1,5 %). На сьогоднішній день переробка титаномagnetитових концентратів здійснюється двома способами: доменним (Китай, РФ) та із застосуванням електроплавки (Південно-Африканська Республіка).

Доменний спосіб застосовується тільки для низькотитанових титаномagnetитів. У разі використання титаномagnetитових концентратів із вмістом діоксиду титану більше 4 % застосовується спосіб електроплавки з попереднім відновленням. Обидві технології спрямовані на вилучення двох компонентів (заліза та ванадію), тоді як титан не вилучається. У зв'язку з цим розробка комплексної технології переробки титаномagnetитового концентрату з отриманням заліза в гранульованому виді, пентаоксиду ванадію та титану є актуальним завданням.

Як основне джерело сировини для металургії дедалі більше почнуть використовуватися бідні комплексні руди, що здатні задовольнити потреби виробництва лише за умови застосування ефективних технологій їхньої переробки. Україна має великі запаси титаномagnetитових руд — нетрадиційної сировини, комплексне використання якої дозволить отримати не лише залізо, а й титан, а також ванадій.

Титаномagnetит – мінерал складного складу, що являє собою розчин шпінелі ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) та ульвошпінелі ( $2FeO \cdot TiO_2$ ) в magnetитовій матриці. У результаті розпаду твердого розчину утворюються ільменіт і шпінель, розташовані в magnetитовій матриці [9].

У сучасній технології титаномagnetити переробляються

гідрометалургійним і пірометалургійним способами.

За першим способом багатий ванадієм (більше 1 %  $V_2O_5$ ) титаномагнетитовий концентрат піддають окислювальному випалу з лужними добавками для переведення ванадію у водорозчинні сполуки, потім вилуговують водою і з ванадатного розчину осаджують ванадій у вигляді ванадатів амонію. При цьому досягається його високе вилучення (більше 86%), але виділення заліза і титану не передбачається, і вони у складі залишку прямують у відвали.

Пірометалургійний спосіб включає відновлювальну плавку титаномагнетитового концентрату в доменних або руднотермічних печах з отриманням ванадієвого чавуну та низькотитанового відвального шлаку [10, 11]. Ванадієвий чавун продувають киснем в конверторах або спеціальних ковшах, що коливаються, в результаті чого ванадій окислюється і переходить у шлакову фазу. З ванадієвого шлаку його витягують різними гідрометалургійними способами (лужним, вапняним). Передільний чавун відправляють на виробництво сталі. Наскрізне вилучення ванадію виходить досить низьким – у межах 45-65%. Пірометалургійні способи переробки титаномагнетитів, що застосовуються в багатьох країнах, не забезпечують комплексної переробки сировини – титанбезповоротно втрачається у відходах.

В Інституті металургії та матеріалознавства ім. А.А. Байкова проводилися дослідження з переробки титаномагнетитів і запропоновано схему їхньої переробки з прямим отриманням заліза. Згідно із запропонованою схемою, обкомкований концентрат піддають металізації газоподібним або твердим відновниками, потім роздільною електроплавкою отримують низьколеговане залізо і титанованадієвий шлак. Далі шлак переробляють гідрометалургійним способом із селективним вилученням ванадію. Для вилучення титану залишок піддається автоклавному вилуговуванню сірчаною або соляною кислотами з виділенням штучного рутила або анатазу, що містить близько 90%  $TiO_2$ –якісної сировини для виробництва пігментного діоксиду титану [12]. Даний спосіб є досить дорогим, оскільки включає операцію електроплавки. У зв'язку з

цим необхідно створення нового ефективного способу комплексної переробки титаномагнетитів з вилученням заліза, ванадію і титану.

Дослідження проводили на попередньо збагаченому титаномагнетитовому концентраті, хімічний склад якого представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Склад титаномагнетитового концентрату

Fe <sub>общ.</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(K, Na) <sub>2</sub> O
59,27	84,67	7,69	1,46	3,15	0,19	1,25	0,74	0,11	0,07	0,44	0,05	0,10

Відновлювальний випал проводили у вертикальній трубчастій печі Таммана при температурі 1475-1550 °С в атмосфері аргону. Як твердий відновник використовувався кокс із зольністю 11,7 %. Склад золи, %: 45,8 SiO<sub>2</sub>, 25,3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7,9 CaO, 7,3 FeO, 3,7 MgO, 2,3 (K, Na)<sub>2</sub>O, 2,0 TiO<sub>2</sub> та ін.

Титаномагнетитовий концентрат, флюсову добавку CaCO<sub>3</sub> (0,75%) і кокс (0-22%), подрібнені до крупності - 0,1 мм, змішували в заданих пропорціях і пресували брикети діаметром 15 мм під тиском 700-900 МПа. Брикети масою близько 6 г поміщали в графітовий тигель з графітовою кришкою й отвором для термопар. На дно тигля насипалася підкладка з коксу крупністю 1-2 мм для запобігання контакту між зразком і матеріалом тигля.

У результаті було встановлено, що при додаванні 16 % коксу та відновленні при 1550 °С отримано шлак наступного складу, %: 6,2 FeO, 43,9 TiO<sub>2</sub>, 20,6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2,3 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 13,2 SiO<sub>2</sub>, 7,5 MgO, 4,3 CaO, 0,6 MnO, 0,4 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,9 (K, Na)<sub>2</sub>O та ін. У цих умовах відбувається практично повне відновлення заліза та коагуляція металу, що підтверджується високим ступенем вилучення заліза в металеву гранулу 98,9% [13]. Відносно високий вміст пентаоксиду ванадію і діоксиду титану, а також перебування останнього у складі аносівіту, що легко розкривається в сірчаній кислоті, дозволяють говорити про можливість його подальшої переробки з вилученням ванадію і титану гідрометалургійним способом.



## 2.2 Залучення в безвідходну пірометалургійну переробку високотитаністих титаномагнетитів

Високотитанові титаномагнетити є перспективною сировиною для отримання заліза, ванадію та діоксиду титану. Однак включення комплексної сировини до традиційних технологічних схем не відповідає вимогам комплексного використання корисних копалин. Неможливість його використання обумовлена застарілими уявленнями про механізм відновлення заліза, які розроблялися стосовно його вилучення з багатих руд. Безвідходна переробка комплексних руд може бути реалізована за технологіями, що ґрунтуються на нових уявленнях про механізм відновлення металів. Метою даної роботи є дослідження можливості переробки титаномагнетитових руд та одержуваних з цих руд концентратів з отриманням первородного заліза та оксидного концентрату титану та ванадію без додавання флюсуючих і шлакоутворюючих матеріалів.

Як матеріал для проведення експериментів використовували ільменітовий концентрат складу (мас. %):

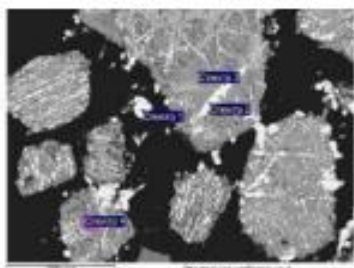
Компонент	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Вміст	45,0-47,0	14,0...18,0	33,0...36,0	0,600	<01,00	<0,030	<0,300
Середнє	46,20	16,45	34,20	0,420	0,890	0,05	0,240

Експерименти проводили в 2 етапи. Перший етап – твердофазне відновлення заліза в кристалічній решітці комплексного оксиду. У робочий простір печі опору встановлювали графітовий тигель із шихтою. У тигель поміщали ільменітовий концентрат у вигляді частинок розміром <0,4 мм і відновник з надлишком, в якості якого використовували енергетичне вугілля, зверху насипали вугілля для запобігання надходження в реакційну зону атмосферного кисню. Піч нагрівали до температури 1300 °С і витримували протягом 120 хвилин. Після витримки піч відключали, зразки охолоджували разом із піччю до кімнатної температури. Отриманий матеріал піддавали магнітній сепарації для видалення залишкового вугілля та золи.

На другому етапі здійснювали розділення продуктів відновлення плавленням. У робочий простір печі опору встановлювали корундовий тигель із шихтою. Як шихту використовували ільменітовий концентрат після відновного випалу та магнітної сепарації. Піч нагрівали до температури 1550°C і протягом години температуру підвищували до 1650°C. У процесі нагрівання від 1550 до 1650 °C відбирали проби шлаку на морожуванням на попередньо підігрітий сталевий прут. Далі піч вимикали, метал охолоджували разом із піччю до кімнатної температури. Після цього тигель витягали з печі та діставали метал.

Отримані зразки продукту відновлення, металу та шлаку заливали епоксидною смолою, шліфували та досліджували на оптичному та електронному мікроскопах. Хімічний склад фаз визначали мікрорентгеноспектральним методом на мікроскопі.

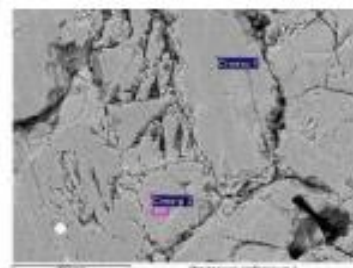
Як свідчать результати досліджень, після відновного випалу на поверхні та всередині шматків ільменіту можна спостерігати виділення металевої фази (рис. 2.1, а). У той же самий час ані на поверхні зразків ані, тим паче, всередині них немає золи і залишків вугілля. Таким чином, при твердофазному відновленні не відбувається забруднення продуктів відновлення вуглецем металу або оксидами золи – шлаку. В результаті розділення відновленого матеріалу утворився злиток чистого первородного заліза без домішки титану (рис. 2.1, б) та шлак, в якому спостерігаються невелика кількість металевих включень (рис.2.1, в).



а



б



в

Рис. 2.1 – Продукти відновного випалу (а) та розділової плавки – метал (б) і шлак (в)

У шлаку спостерігаються 3 фази: фаза, збагачена оксидами титану, ільменіт нової генерації у вигляді дендритів і силікатна фаза, що заповнює міждендритний простір. Але в шлаку виявляється алюміній, поява якого зумовлена розчиненням у шлаку глинозему корундового тигля (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Склад фаз, ат. %

Спектр	O	Al	Si	Ti	V	Mn	Fe	Фаза
Концентра після відновленого випалювання при 1300°C та витримці 120 хвилин (рис. а)								
Спектр 1	-	-	-	1,5	-	-	98,5	метал
Спектр 2	-	-	-	2,2	-	-	97,8	метал
Спектр 3	66,4	-	-	29,3	0,4	0,5	3,2	загальний концентрат оксидів титана та ванадію
Спектр 4	65,2	-	0,1	29,5	0,2	1,0	4,0	загальний концентрат оксидів титана та ванадію
Метал після розділювальної плавки (рис. б)								
Спектр 1	-	-	-	-	-	-	100	
Шлак після розділювальної плавки (рис. в)								
Спектр 1	64,4	8,1	-	25,7	0,3		1,66	загальний концентрат оксидів титана та ванадію
Спектр 2	64,5	8,5	8,3	5,9	-		10,33	ільменіт нової генерації та силікатна фаза

Обговорення результатів досліджень. В ільменіті залізо знаходиться в одній оксидній кристалічній решітці з елементами, що важко відновлюються, – титаном і ванадієм. У відновлювальних умовах при відносно низькій температурі (нижче температури плавлення заліза й оксидної фази) відбувається твердофазне відновлення заліза. Відновлення титану та ванадію потребує більш високих температур, тому ці елементи залишаються в оксидній фазі. Як було показано в роботі [14], відновлення полягає не у видаленні кисню, а відбувається шляхом передачі по оксидній фазі електронів відновника (вугілля) катіонам заліза, що відновлюються. Внаслідок цього відновлення заліза проходить у всьому обсязі вихідного шматка руди. Відсутність підведення відновника до місця виділення металу всередині оксидної фази виключає потрапляння вуглецю в метал, а золи вугілля – в об'єм оксиду. Тим

самим твердофазне селективне відновлення заліза в об'ємі оксиду дозволяє отримувати чисте перворodne залізо та не знижує концентрацію  $TiO_2$  в оксидній фазі.

Нагрів продуктів відновлювального випалу вище за температуру плавлення заліза без відновника супроводжується плавленням і коагуляцією металевих частинок, осіданням металу на дно тигля. При цьому тугоплавкий і в'язкий гетерогенний шлак з високим вмістом оксидів титану легко наморожується на сталевий прут, залишаючи в тиглі тільки чисте перворodne залізо.

Таким чином, у результаті низькотемпературного відновного випалу відбувається селективне відновлення заліза, яке можна осадити у відносно тугоплавкому оксидному залишку. Використовуючи прийоми низькотемпературного відновлення та пірометалургійного розділення можна залучити до безвідходної переробки високотитаністі титаномагнетити, отримуючи чисте залізо та нерозбавлений загальний концентрат оксидів титану та ванадію.

### 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛІВ З ТИТАНОМАГНЕТИТОВИХ КОНЦЕНТРАТІВ

#### 3.1 Термодинамічне моделювання процесів відновлення

Метою цього розділу роботи є термодинамічне дослідження впливу температури на параметри процесів, що протікають у системі «метал – шлак – газ», при отриманні чавунних гранул із суміші титаномagnetитового концентрату та вугілля.

Аналіз виконано за допомогою програми розрахунку термодинамічних систем Terra. Як розрахункова була обрана трифазна система, що складається з двох конденсованих і однієї газової фаз. Конденсовані фази є двома нерозчинними один в одному розчинами, перший з яких є переважно металевим, другий – оксидним.

Для розрахунку прийнято наступний склад контактуючих фаз.

Розчин S1 (шлак):  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{MnSiO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{FeSiO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MgSiO}_3$ ,  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ .

Розчин S2 (метал):  $\text{FeSi}$ , S, P, C, Si, SiS, SiC, Al, Fe, FeS,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , Mn, MnS, V, VC, Ti, TiC.

Газова фаза:  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , Ar, SO,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , CO,  $\text{CO}_2$ .

Вихідна система складалася зі 100 кг залізорудного концентрату та 108,15 кг вугілля. Витрату вугілля визначено в результаті розрахунку матеріального балансу відновлювальної плавки концентрату з використанням як відновника бурого вугілля.

Хімічний склад концентрату та золи вугілля наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад концентрату та золи вугілля

Матеріал	Склад, %										
	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
Залізовмісний матеріал	25,96	61,0	3,2	2,4	1,04	2,6	2,65	0,62	0,20	0,33	-
Зола вугілля	-	12,6	47,0	22,7	5,3	3,0	0,9	-	0,3	4,6	5,6

Буре вугілля містить 25% золи, 41,6% летких речовин, 1,2% сірки та 32,2% нелетючого вуглецю. Високий вміст сірки у відновнику може призвести до отримання чавуну із вмістом сірки вище за необхідну межу.

Фазовий склад руди:  $\text{FeTiO}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Дослідження виконувалися в інтервалі температур 500-1600 °С.

Вплив температури на склад металевої фази наведено на рис. 3.1 і 3.2.

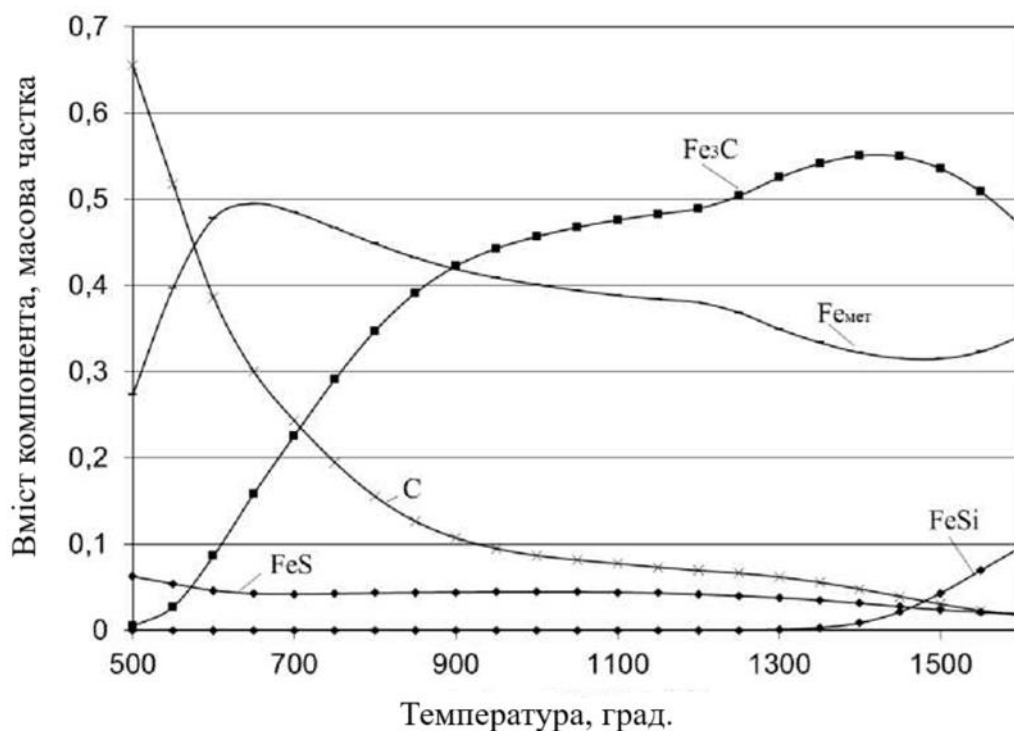


Рисунок 3.1 – Вплив температури на вміст заліза металевого ( $\text{Fe}_{\text{мет}}$ ), карбіду заліза ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), сульфїду заліза ( $\text{FeS}$ ), силїциду заліза ( $\text{FeSi}$ ) та вуглецю (графїту) ( $\text{C}$ ) у металї

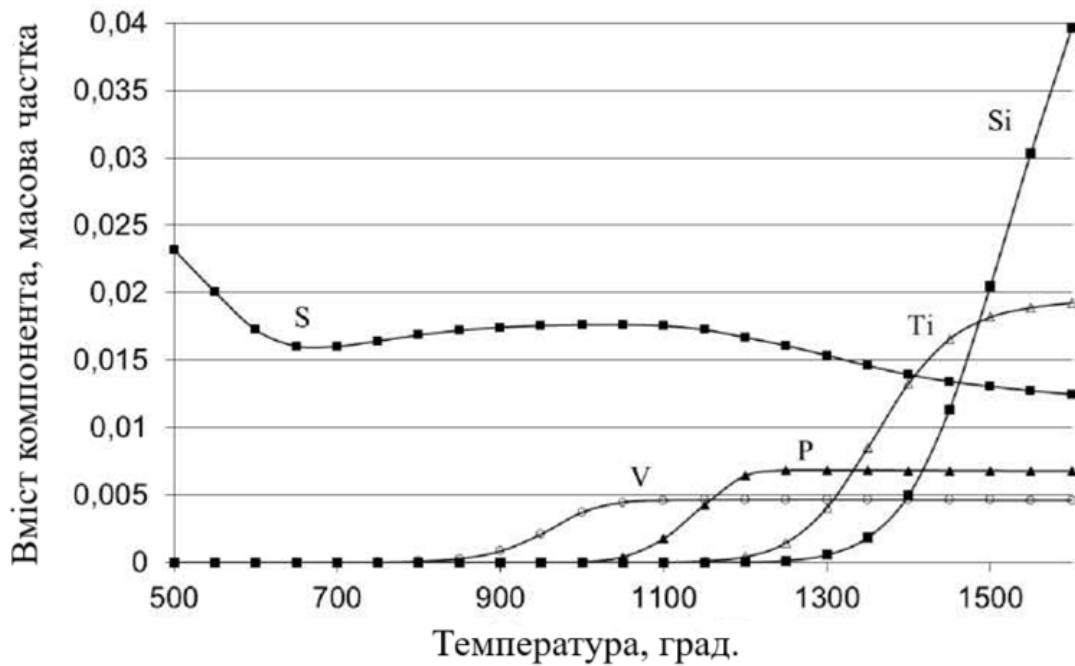


Рисунок 3.2 – Вплив температури на вміст сірки (S), ванадію (V), фосфору (P), титану (Ti) та силіцію (Si) в металі

Встановлено, що при температурі 500-800 °С металева фаза складається із заліза, марганцю, сірки та вуглецю. При збільшенні температури (вище 800 °С) з шихти в метал відновлюються ванадій, фосфор, титан і кремній. Вміст ванадію досягає максимуму при температурі 1100 °С, фосфору – 1250°С, а вміст титану та кремнію в металі поступово збільшується з підвищенням температури.

Хімічний склад металу в діапазоні температур 1300-1400 °С приведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад металу

Температура, °С	Вміст компонентів, %							
	Fe	S	P	C	Si	Mn	V	Ti
1300	86	1,50	0,68	3,70	0,05	0,25	0,46	0,40
1350	86	1,40	0,68	3,70	0,18	0,25	0,46	0,80
1400	86	1,30	0,68	3,70	0,49	0,25	0,46	1,30

Отримана металева фаза – ванадієвий чавун із високим вмістом сірки та фосфору. Вміст сірки в металі при температурі 1350 °С перебуває на рівні 1,3-1,5%, а фосфору – 0,68%. З підвищенням температури вміст сірки в металі зменшується.

Вплив температури на склад шлакової фази наведено на рис. 3.3.

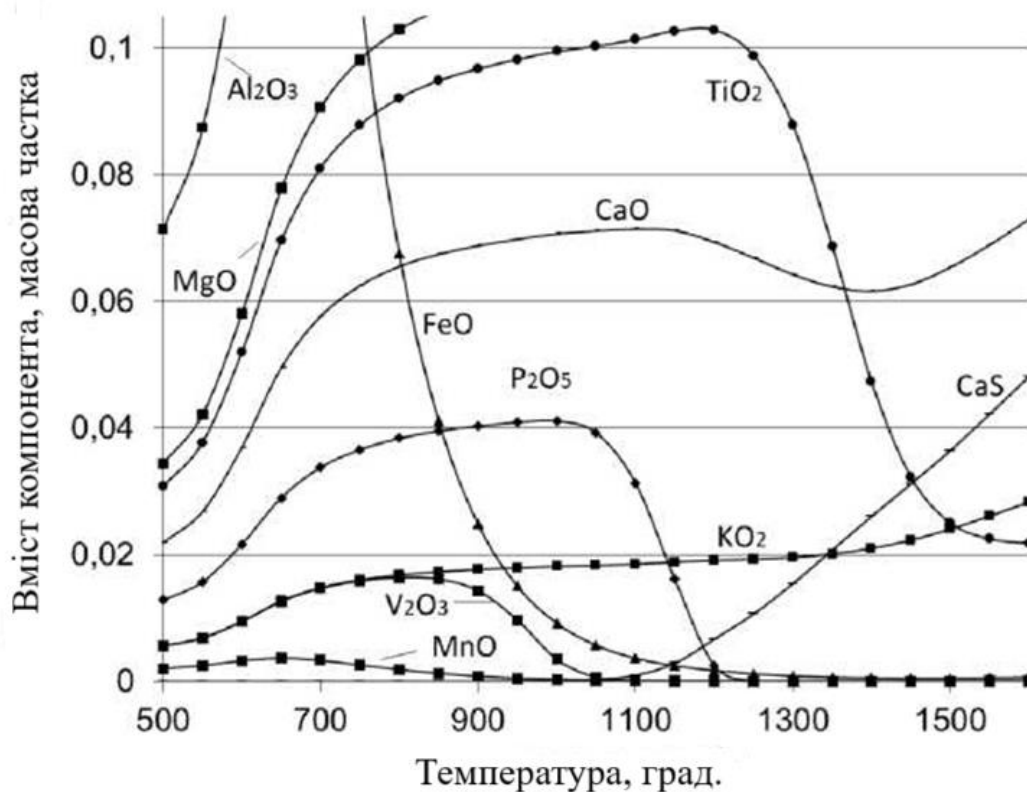


Рисунок 3.3 – Вплив температури на склад шлаку (без урахування утворення асоціатів)

Встановлено, що з підвищенням температури склад шлаку постійно змінюється. В інтервалі температури 500-1100 °С вміст FeO зменшується з 65 до 0%, що приводить до збільшення відносної частки інших оксидів (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO та ін.). Частка P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> досягає максимуму за температури 1000 °С, TiO<sub>2</sub>– 1250°С, SiO<sub>2</sub>– 1350°С. Частки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>та MgO збільшуються при підвищенні температури в дослідженому інтервалі.

У діапазоні температур 500-1000 °С основність шлаку становить 0,17, в інтервалі 1000-1350 °С основність шлаку зменшується до 0,14, а потім з



підвищенням температури до 1600 °С основність шлаку збільшується до 0,25.

Хімічний склад шлаку для температури 1350-1400 °С, визначений у результаті термодинамічного аналізу, наведено в таблиці. 3.3.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад шлаку

Температура, °С	Вміст, %										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	CaS	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	KO <sub>2</sub>
1300	44,47	24,81	0,08	<0,01	<0,01	8,79	11,98	6,42	1,54	<0,01	1,95
1350	44,94	25,52	0,06	<0,01	<0,01	6,87	12,32	6,23	2,07	<0,01	2,01
1400	44,85	26,65	0,05	<0,01	<0,01	4,72	12,86	6,16	2,6	<0,01	2,1

При перерахунку цієї багатокомпонентної системи на чотирикомпонентну CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> склад шлаку приблизно дорівнюватиме: 50% SiO<sub>2</sub>, 13% MgO, 7% CaO і 30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Температура плавлення такого шлаку близько 1400 °С [15]. Основність шлаку при температурі 1350 °С – 0,15.

Вплив температури на склад газової фази представлено на рис. 3.4.

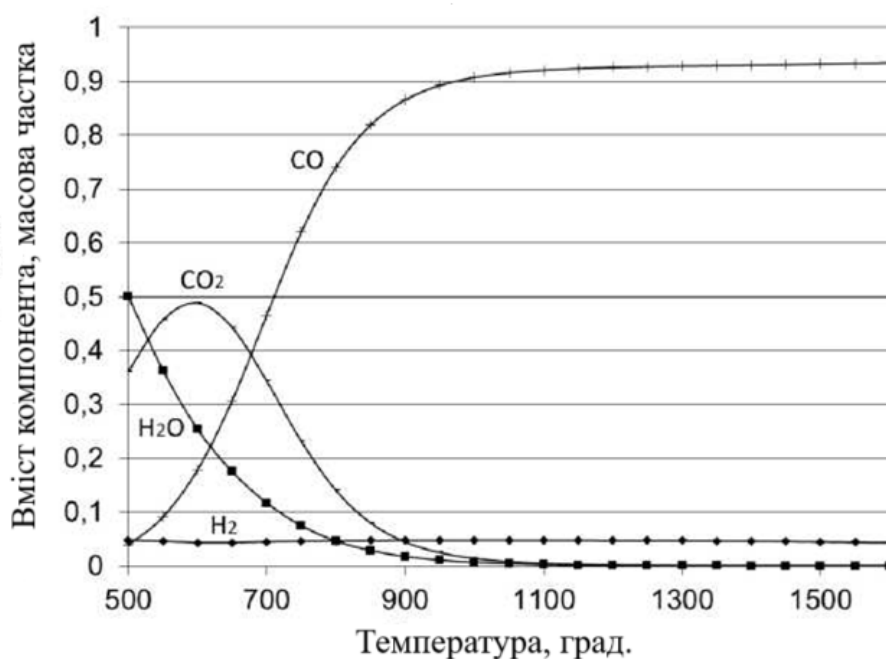


Рисунок 3.4 – Вплив температури на склад газової фази

Вміст окису вуглецю (CO) в складі газової фази в інтервалі температур 500-1600 °С збільшується від 5 до 94 %. Вміст парів води зменшується з 50 % при 500 °С до 0 % при 1000 °С. Вміст вуглекислоти є максимальним при температурі десь близько 570 °С, а при температурі 1000 °С і більше вуглекислоти в газовій фазі немає.

Результати розрахунку коефіцієнта вилучення елементів із шихти у метал представлені на рис. 3.5. Вони свідчать, що з підвищенням температури коефіцієнти вилучення заліза, марганцю, ванадію, фосфору, титану та кремнію збільшуються, а сірки – зменшується. В інтервалі температури 1350-1400 °С коефіцієнт вилучення заліза, марганцю, ванадію, фосфору становить 1, титану – 0,4-0,6, кремнію – 0,02-0,07 та сірки – 0,75-0,79.

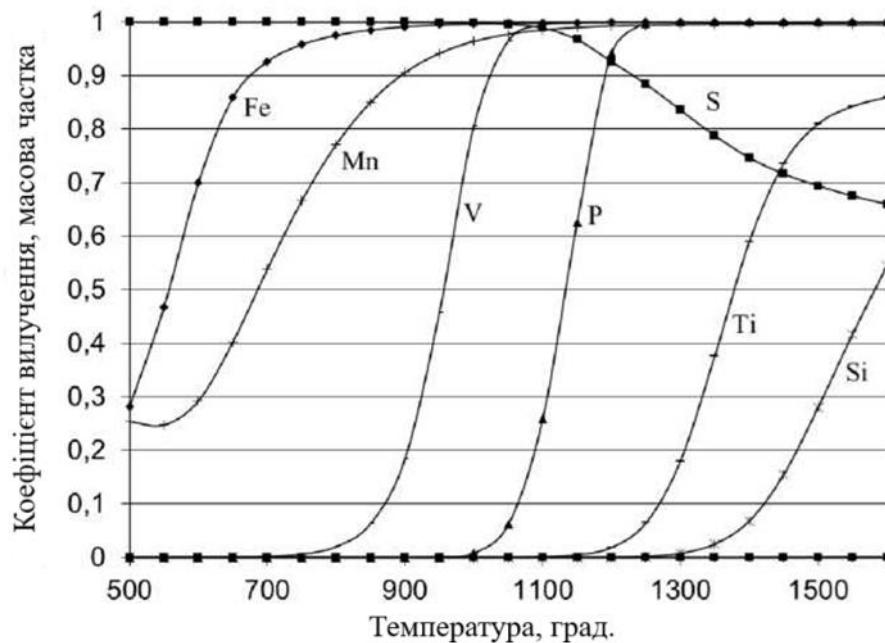


Рисунок 3.5 – Коефіцієнти вилучення елементів із шихти в метал

Таким чином, виконаний термодинамічний аналіз процесів у системі «метал – шлак – газ» при карботермічному відновленні компонентів титаномagnetитової сировини, дозволив вивчити послідовність і ступінь відновлення елементів із руди залежно від зміни температури процесу. Результати розрахунків можуть бути використані для коригування технологій пірометалургійної переробки титановмісної сировини та для вивчення кінетики подібних процесів.

### 3.2 Дослідження кінетики хімічних перетворень при відновленні заліза з титаномагнетитів

Переробка титаномагнетитової сировини має певні складності, тому і донині ведуться активні дослідження різних технологій, у тому числі двостадійної схеми з етапами карботермічного відновлення елементів у твердій фазі та подальшої плавки з утворенням рідкого сплаву заліза та титанового шлаку [16]. Проте до нашого часу у зв'язку з незавершеністю вирішення низки питань ця технологія немає практичного втілення [17].

У роботі представлено результати експериментальних досліджень щодо з'ясування механізму відновлення заліза.

Мікроскопічні дослідження показали, що відновлення заліза з титаномагнетиту відбувається не змагнетиту, а з проміжної фази – вюстити. При температурі 800-900 °С магнетит перетворюється на вюстит:  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}_{1-x}$ , а вміст заліза в оксиді підвищується з 72,3 до 76,6 %, при 1000 °С починається відновлення металевого заліза. Ця інформація не суперечить теоретичній області існування вюстити.

Повне відновлення заліза з титаномагнетиту відбувається при 1100 °С, результатом є утворення чистого заліза та титанату натрію, в який переходять усі елементи – Ti, Mg, Al, Mn і V (рис. 3.6).

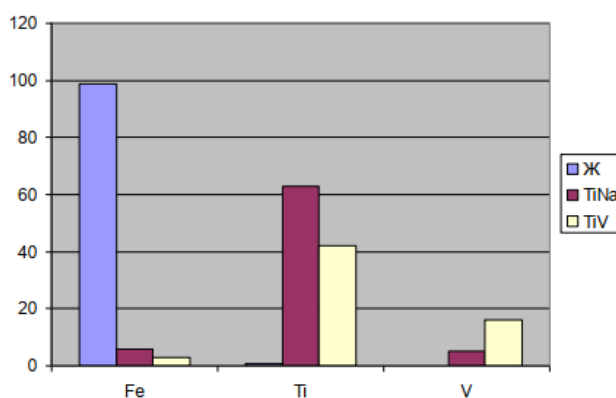


Рисунок 3.6 – Вміст елементів у продуктах карботермічного відновлення заліза з титаномагнетиту при 1100°C

Для технологічного процесу важливі умови, за яких необхідно вести процес. За нашими даними, температура 1100 °С і час 0,5 год. є необхідними та достатніми умовами для повного відновлення титаномагнетиту. За цих умов кристалізується найбільш чисте залізо та титанат натрію з максимальним вмістом ванадію та титану. Хімічний склад заліза варіює від 97,5 % при 1000 °С до 98,7 % при 1100 °С. При температурі процесу 1200 °С залізо починає концентрувати вуглець. Те саме відбувається зі збільшенням тривалості процесу більше 1 год.

Хімічний склад титанату натрію змінюється залежно від температури, коли в реакцію вступають різні мінеральні фази. Наприклад, при 1000 °С вміст титану і ванадію в титанаті натрію є близьким до складу ульвошпінелі, при 1100 °С його склад найбільш збагачений титаном і ванадієм, а при 1200 °С спостерігається зниження вмісту титану і ванадію, але зростає вміст алюмінію та магнію (рис. 3.7). При 1100 °С утворюється фаза з найбільшою концентрацією титану та ванадію: вміст  $TiO_2$  43–68 %,  $V_2O_5$  0,69–21,5 %.

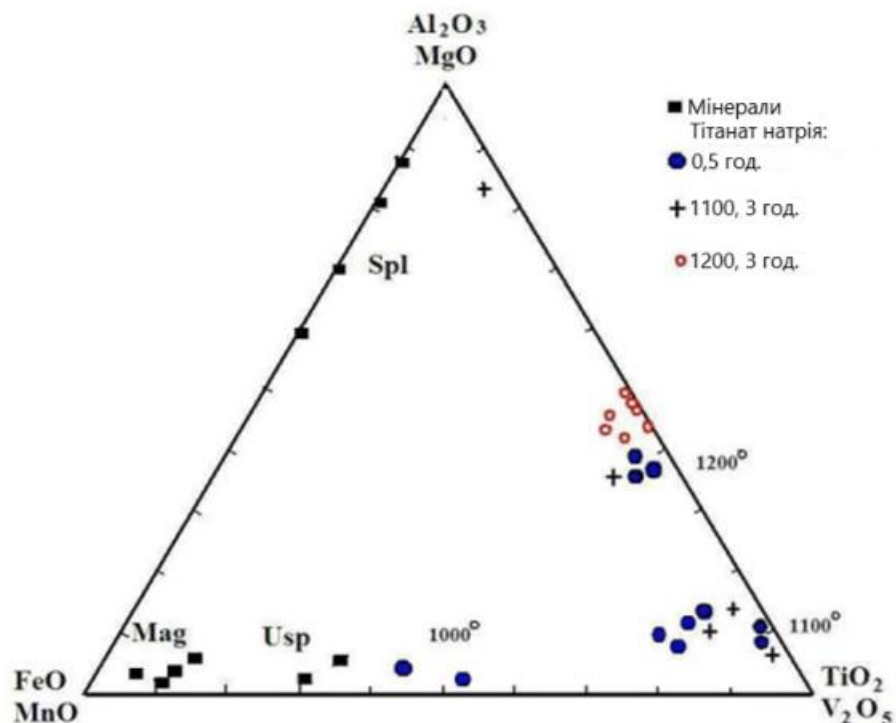


Рисунок 3.7 – Зміна хімічного складу титанату натрію при різних температурах і тривалості витримок. Склади вихідних фаз титаномагнетиту: шпінель (Spl), магнетит (Mag) та ульвошпінель (Usp)

Дослідження показали, що при температурі до 1100 °С кристалізація фаз відбувалася в твердому стані. При протіканні реакцій кристалічна структура титаномагнетиту повністю руйнувалася, за рахунок чотирьох первинних мінеральних фаз (магнетиту, ульвошпінелі, ільменіту та шпінелі) утворювалися дві основні нові кристалічні фази – залізо та титанат натрію. Нові фази виділялися на місці реакції у вигляді кристалів, тобто росли шляхом плівкових реакцій.

Складний багатофазний процес кристалізації неможливий без високої проникної здатності С, О та Na. У зв'язку з цим можна припустити, що механізм взаємодії фаз титаномагнетиту з реагентами в розглянутих дослідках відповідає категорії газ – тверде. У цих реакціях рух реагентів здійснюється дифузійним шляхом, переміщенням іонів та електронів по решітці мінералу. Структури кристалізації дозволяють вважати, що реагенти С, О та Na надходили до місця реакції одночасно, де б воно не розташовувалося, а в точці реакції утворювалися і відокремлювалися одночасно залізо та титанат натрію (рис. 3.8).

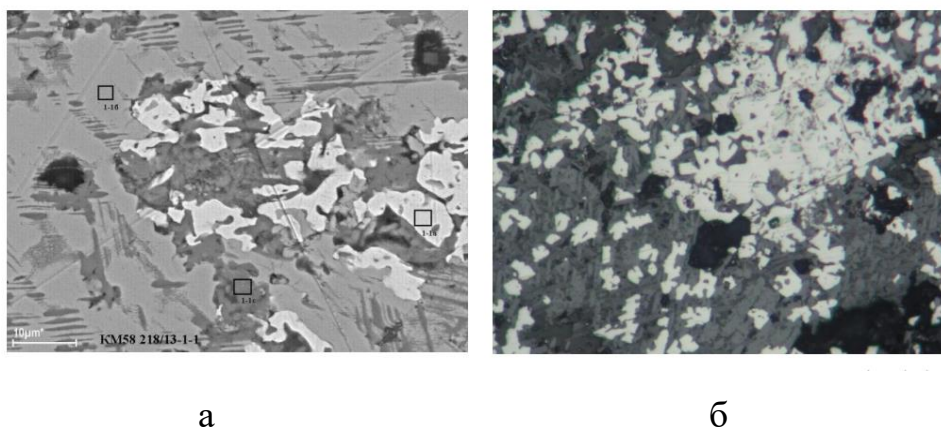


Рисунок 3.8 – Кристали заліза (біле) в титанаті натрію (сіре) при температурі:  
а – 1000 °С, б – 1100 °С

Форми виділення заліза свідчать, що кристали заліза зростаються між собою всередині однієї частинки і легко переходять з однієї частинки титаномагнетиту до іншої (рис. 3.9), внаслідок цього відбувалася цементация

(злипання) частинок порошку. Таким чином, очевидно, що кристалізаційне середовище було у всьому об'ємі шихти однаковим, а дифузія елементів відбувалася як усередині частинок титаномагнетиту по кристалічній решітці, так і між ними в міжпоровому просторі.

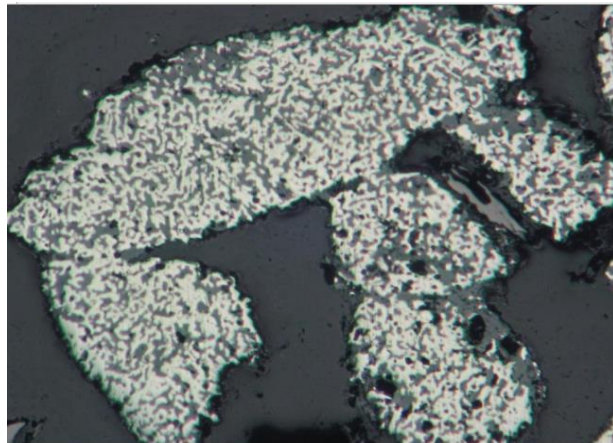


Рисунок 3.9 – Цементация частинок відновленого титаномагнетиту: в контакті видно злиття частинок заліза з різних частинок титаномагнетиту за рахунок зростання метакристалів заліза. Фото у відбитому світлі, біле – залізо, сіре – титанат натрію, чорне – епоксидний клей

Таким чином, при проведенні досліджень було встановлено оптимальну температуру відновлення заліза (1100 °С), тривалість проведення процесу (0,5 год.), з'ясовано утворення мінеральних фаз, що концентрують титан і ванадій, вивчено умови та послідовність їх кристалізації.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВИХ РУД

### 4.1 Дослідження можливості металургійної переробки титаномagnetитових руд з підвищеним вмістом діоксиду титану

З метою оцінки можливості металургійної переробки титаномagnetитових руд були проведені експериментальні дослідження на сировині з різним вмістом  $TiO_2$  [19-21]. Результати хімічного аналізу титановмісної сировини, використаної для проведення досліджень, приведено в табл. 4.1, також досліджено магнітні властивості проб шляхом вимірювання намагніченості (табл. 4.2).

Таблиця 4.1 – Хімічний склад руд і концентратів для досліджень

Проба		Fe <sub>заг</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Руда	Проба 1	16,70	–	12,34	15,20	38,8	13,7	5,52	0,17	1,28	0,130
	Проба 2	15,89	0,12	10,19	–	38,08	11,75	5,22	0,21	1,58	0,179
	Проба 3	16,78	0,16	8,65	–	39,03	11,28	8,64	0,18	1,38	0,200
Концентрат	Проба 4	61,40	0,12	27,00	1,52	4,25	3,11	2,31	0,23	2,52	0,580
	Проба 5	63,83	0,09	29,34	0,97	2,89	2,40	2,58	0,25	3,41	0,670
	Проба 6	65,27	0,12	29,20	0,62	1,72	1,16	2,22	0,19	2,13	0,780

Таблиця 4.2 – Магнітні характеристики зразків концентрату

№ проби	Залишкова намагніченість $m_0$ , $cm^3 \times Gc/g$	Намагніченість насичення $m_s$ , $cm^3 \times Gc/g$	Коерцитивна сила $H_c$ , E
Проба 4	6,38	66,89	99,00
Проба 5	6,52	66,22	93,00
Проба 6	5,12	70,45	82,00

Можна зробити висновок про відповідність хімічних складів по ванадію та титану представлених проб концентратів, а також про наявність деякої відмінності в магнітних властивостях низькотитанистого та високотитанистого концентратів.

На рис. 4.1, а-г, наведена мікроструктура шматків руди проб № 2 і 3, де видно великі зерна титаномагнетиту, дрібніші (світлі) – ільменіт, дрібніші (білі) – металеве залізо.

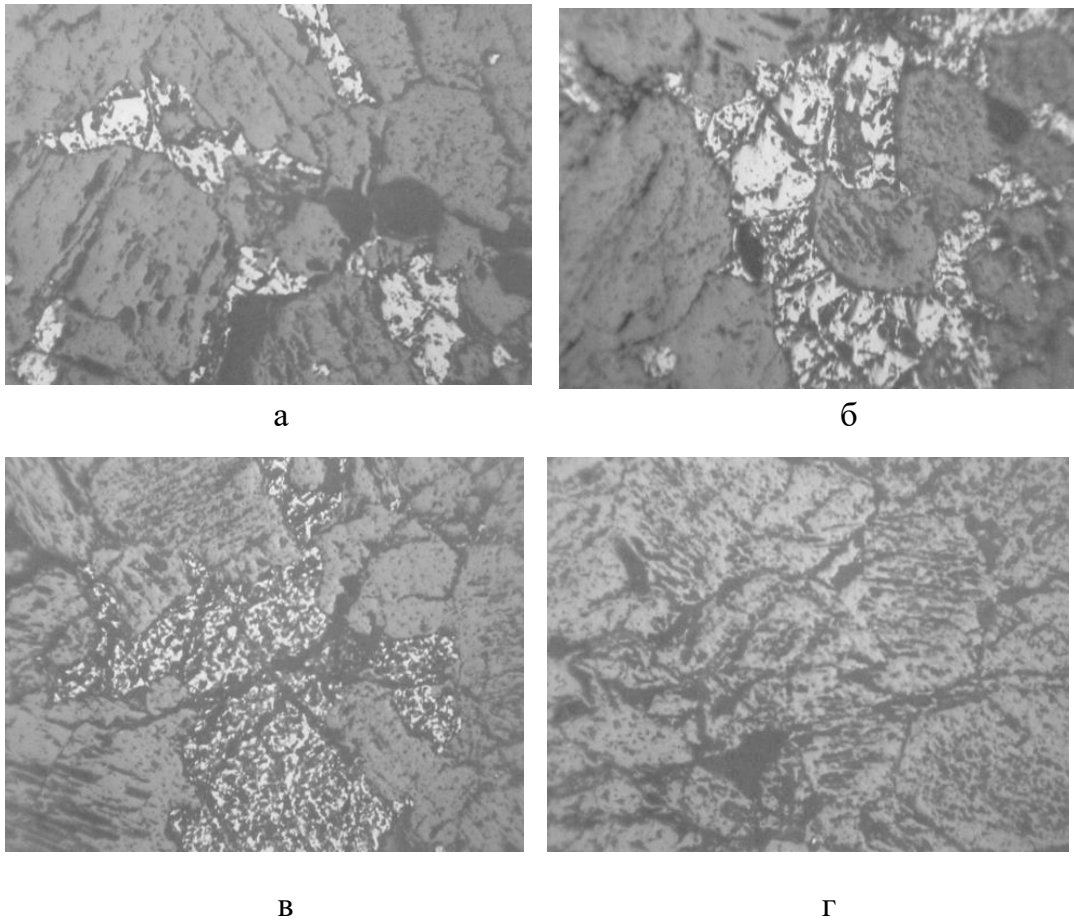


Рисунок 4.1 – Мікроструктура титаномагнетитової руди: проба № 3 (а-б) при  $\text{TiO}_2$  1,40%; проба № 2 (в-г) при  $\text{TiO}_2$  1,58%, збільшення  $\times 50$

З титановмісних концентратів у лабораторних умовах виготовили залізородні окатиші (табл. 4.3).



Таблиця 4.3 – Характеристики лабораторних окатишів

Параметр	BT	Г1-80	Г1-60	Г1-40	Г1-20	HT	TM
Частка проби № 5 (BT),%	100	80	60	40	20	0	0
Частка проби № 6 (HT), %	0	20	40	60	80	100	0
Частка проби № 4 (TM), %	0	0	0	0	0	0	100
Fe <sub>заг</sub> , %	60,35	62,48	63,28	63,67	63,78	65,00	59,50
CaO, %	0,87	1,33	1,27	1,25	1,14	0,83	1,35
SiO <sub>2</sub> , %	2,49	2,59	2,53	2,18	2,18	2,63	4,60
TiO <sub>2</sub> , %	3,44	2,87	2,84	2,52	2,40	2,13	2,58
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	0,665	0,62	0,69	0,74	0,76	0,76	0,497
Відновлюваність, %	59,07	62,88	64,28	65,86	68,77	67,32	70,25
Індекс LTD <sub>+6,3</sub> , %	90,35	97,10	94,61	97,61	97,86	89,92	87,56
Температура початку розм'якшення, °C	1210	1200	1210	1230	1230	1180	1220
Температура кінця розм'якшення, °C	1300	1310	1290	1300	1315	1310	1300

Результати досліджень у табл. 4.3 свідчать, загалом, про досить високі металургійні характеристики окатишів. Визначені в ході проведення досліджень металургійні характеристики залізородних окатишів є достатніми для роботи доменної печі та розробки заходів щодо впровадження їх у виробництво.

Методом моделювання з використанням балансової логіко-статистичної моделі досліджена можливість переробки цих окатишів за схемою «доменна піч – конвертер». При цьому при доменній плавці низькотитанового концентрату показники принципово не відрізняються від існуючих у даний час на металургійному підприємстві. При доменній плавці високотитанистого

концентрату очікуються техніко-економічні показники, що наближаються до показників доменної плавки залізорудного концентрату поточного виробництва підприємства. Зокрема, вміст  $TiO_2$  в доменному шлаку очікується лише на рівні 15 % замість 10 % нині (табл. 4.4). Така технологія доменної плавки в даний час не освоєна, тому вимагатиме додаткових зусиль щодо її впровадження.

Таблиця 4.4 – Розрахункові техніко-економічні показники в умовах доменної печі № 5 (базовий варіант – поточне виробництво)

Показники	Од.вимір.	Базовий варіант	Високотитаністий 100 %
Корисний об'єм печі	м <sup>3</sup>	2200	2200
Продуктивність	т/доб.	7264	7210
Загальна витрата руди	кг/т чавуну	1724,1	1693,6
Загальна витрата палива	кг/т чавуну	320,8	322,5
Вихід шлаку	кг/т чавуну	358,0	315,0
Склад шлаку:			
CaO	%	32,55	28,91
MgO	%	12,97	13,49
SiO <sub>2</sub>	%	26,68	23,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	15,15	17,05
TiO <sub>2</sub>	%	10,53	14,82
MnO	%	0,36	0,16
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,28	0,33
CaO/SiO <sub>2</sub>	част.од.	1,22	1,22

У той же час проведені лабораторні дослідження показали, що переробка високотитанового концентрату за схемою «металізація – електроплавка»

приведе до отримання шлаку з вмістом  $TiO_2$ , недостатнім для його переробки на пігментний діоксид титану або титанову губку (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Розрахунок показників плавки металізованих окатишів у руднотермічній печі

Показники	Од. вимір.	Варіант1
Потужність печі	МВА	33,00
Продуктивність по металу	т/доб.	563,7
Витрата залізорудних компонентів	кг/т металу	1284,8
Окатиші (металізація 95%)	кг/т металу	1284,8
Витрата флюсу	кг/т металу	0,00
Витрата палива	кг/т металу	24,90
Витрата електродів	кг/т металу	20,80
Вихід шлаку	кг/т металу	231
Склад шлаку:		
$SiO_2$	%	21,20
$CaO$	%	9,64
$MgO$	%	14,26
$Al_2O_3$	%	22,41
$TiO_2$	%	22,88
$V_2O_5$	%	0,90
$MnO$	%	0,04
$CaO/SiO_2$	частка од.	0,45

Досліджувалось у лабораторних умовах також одержання колективного концентрату шляхом змішування низькотитанистого та високотитанистого концентратів. Було з'ясовано, що при цьому вміст Fe у колективному концентраті буде вищим порівняно з концентратом поточного виробництва, а енерговитрати – нижчими.

#### 4.2 Досліди з переведення доменних печей на плавку титановмісних продуктів з підвищеним вмістом діоксиду титану

У лабораторних умовах були отримані окатиші із співвідношенням концентратів ВТ і ТМ від 0/100 до 100/0 % з кроком 20 %. Їхній хімічний склад приведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6– Хімічний склад обпалених окатишів

Частка ТМ,%	Частка ВТ,%	Проба окатишів	Вміст компонентів,%								
			Fe <sub>заг</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
100	0	1	59,5	1,30	1,35	4,60	0,497	2,58	2,98	0,221	2,26
80	20	2	60,04	2,98	1,12	4,20	0,536	2,75	2,85	0,224	2,34
60	40	3	60,97	3,80	1,08	3,89	0,570	2,91	2,71	0,234	2,45
40	60	4	60,60	3,11	0,943	3,40	0,607	3,11	2,57	0,231	2,55
20	80	5	60,85	2,86	0,838	2,80	0,637	3,27	2,38	0,260	2,63
0	100	6	60,35	3,17	0,873	2,49	0,665	3,44	2,24	0,260	2,70

Було встановлено, що збільшення вмісту діоксиду титану в окатишах у міру збільшення кількості концентрату з підвищеним вмістом TiO<sub>2</sub>, що додавався до них, не викликає погіршення в якості підготовки залізородної сировини до доменної плавки. У той же час підвищується міцність на стискання сирих і сухих окатишів, міцність на стискання обпалених при 1200-1300 °С окатишів. Збільшується гаряча міцність, збільшується температура початку розм'якшення і знижується температурний інтервал розм'якшення окатишів, що позитивно позначиться на основних техніко-економічних показниках доменної плавки – витраті коксу та продуктивності (табл. 4.7). Це підтверджено розрахунком доменної плавки за балансовою логіко-статистичною моделлю доменного процесу.

Таблиця 4.7 – Металургійні характеристики лабораторних окатишів

Проба окатишів	Відновлюваність, %	Індекс LTD <sub>+6,3</sub> , %	Температура початку розм'якшення окатишів, °C	Температура кінця розм'якшення окатишів, °C
1	70,26	87,56	1200	1310
2	77,19	85,76	1200	1320
3	72,76	90,72	1210	1300
4	62,74	87,08	1220	1310
5	62,49	86,49	1230	1320
6	59,08	90,35	1220	1300

Було встановлено, що варіант суміші концентратів в окатишах у співвідношенні 60 % поточного і 40 % високотитанистого не спричинить серйозних змін у технології доменної плавки (табл. 4.8).

Таблиця 4.8– Розрахунки доменної плавки на базі ДП № 5 металургійного підприємства

Показники	База 2017	Поточний 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5	Варіант 6
Корисний об'єм печі, м <sup>3</sup>	2200						
Продуктивність печі, т/добу	6 981	7 207	7 232	7 370	7 264	7 288	7 320
Загальна витрата руди, кг/т чавуну	1 691	1 714	1 706	1 692	1 697	1 692	1 699
Окатиші №1, кг/т чавуну	0,00	850,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Окатиші №2, кг/т чавуну	0,00	0,00	846,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Окатиші №3, кг/т чавуну	0,00	0,00	0,00	840,01	0,00	0,00	0,00
Окатиші №4, кг/т чавуну	0,00	0,00	0,00	0,00	842,30	0,00	0,00

Окатиші №5, кг/т чавуну	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	840,03	0,00
Окатиші №6, кг/т чавуну	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	843,44
Витрата коксу, кг/т чавуну	337,4	331,2	327,31	326,29	333,90	332,90	332,74
Склад шлаку, %:							
(CaO)	32,45	31,82	31,61	31,77	31,53	31,26	30,99
(MgO)	12,86	13,84	13,75	13,42	13,29	13,13	12,98
(SiO <sub>2</sub> )	26,31	27,28	26,70	26,15	25,40	24,55	24,04
(TiO <sub>2</sub> )	10,93	10,55	11,06	11,39	12,05	12,73	13,34
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14,90	14,01	14,37	14,73	15,18	15,72	16,02
(MnO)	0,37	0,38	0,381	0,37	0,38	0,40	0,41
(V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30
Основність CaO/SiO <sub>2</sub>	1,23	1,16	1,18	1,21	1,24	1,27	1,29
Вихід шлаку, кг/т чавуну	352,2	370,6	363,2	351,2	354,6	346,8	351,0

Таким чином, лабораторними дослідженнями підтверджено можливість переробки низькотитанистого та високотитанистого концентратів за схемою «доменна піч – конвертер».

#### 4.3 Спосіб переробки титаномагнетитових руд складного складу

##### 4.3.1 Огляд технологій комплексної переробки залізотитанистих руд

Обсяг виробництва чавуну та сталі в світі до недавніх часів безперервно збільшувався. У зв'язку з цим збільшувалась і кількість залізних руд, що добуваються. Нині вже відчувається дефіцит якісної залізної руди як у нашій країні, такі за кордоном. У той же час відомі, розвідані та майже не використовуються величезні за запасами родовища титаномагнетитових руд.

До титаномагнетитових руд у загальному випадку відносять не лише чисто титаномагнетитові, а й титаномагнетит-ільменітові, ільменіт-магнетитові, ільменіт-гематитові. Для таких руд характерна наявність у їхньому складі оксидів заліза, оксидів титану і, часто, сполук ванадію.

Застосовувані технології комплексної переробки залізотитанистих руд визначаються їхніми хімічним і мінералогічним складами. Вирішальне значення має вміст у них  $\text{TiO}_2$ . За вмістом  $\text{TiO}_2$  і відношенням  $\text{Fe}/\text{TiO}_2$  залізотитаністі руди та отримані з них концентрати ділять на низькотитаністі ( $\text{Fe}/\text{TiO}_2 > 8$ ), залізованадієві ( $\text{Fe}/\text{TiO}_2 = 2-8$ ) і високотитаністі ( $\text{Fe}/\text{TiO}_2 < 2$ ) [10].

Переробка титаномагнетитових руд у доменних печах утруднена і часто є неможливою через високий вміст у них оксидів титану, що призводить до високого вмісту оксидів титану в доменному шлаку і різкого збільшення в'язкості таких шлаків [22].

Низькотемпературне розділення сполук заліза та титану титаномагнетитових руд є неефективним через тісне зрощення магнетиту та ільменіту. Тому дослідники пропонують різні способи пірометалургійного поділу корисних компонентів титаномагнетитових руд (Fe, Ti, V) [23-25]. У більшості випадків пропонують переробляти титаномагнетитові руди та продукти їхнього збагачення двостадійним або багатостадійним процесом. Спочатку виробляють рудні окатиші, потім здійснюють твердофазне відновлення заліза при температурі не вище  $1400^\circ\text{C}$ . Металізовані окатиші після цього пропонується проплавляти в дугових електропечах і розділяти продукти після проведення процесу на металеву фазу (чавун, що містить ванадій) і титанистий шлак з низьким вмістом оксидів заліза. Для реалізації подібних технологічних схем потрібно мати хоча б два металургійні агрегати: піч для твердофазного відновлення заліза та дугову електропіч. Загальними недоліками таких способів переробки титаномагнетитів є багатостадійність процесу, необхідність використання щонайменше двох металургійних агрегатів, а також низька продуктивність процесу.

Крім того, відомий спосіб переробки титаномагнетиту, що включає формування однорідної шихти, до складу якої входять титаномагнетит, вуглецевмісний відновник і сполучна добавка. Цю підготовану шихту гранулюють і піддають термічному відновленню з отриманням частково відновленого продукту, що складається з металургійної фракції, яка містить

основну частину заліза, та шлакової фракції, що містить титан і залишкову частину заліза. Наступними технологічними операціями є електроплавка з довідновленням шлакової фракції та поділом розплаву на металевий і шлаковий компоненти, очищення металевого компонента від домішок з одержанням сталі, подрібнення шлакового компонента та його збагачення з отриманням титанового продукту.

У цьому способі термічне відновлення завершують при температурі, що забезпечує перехід шлакової фракції у в'язкопластичний стан. Частково відновлений продукт подрібнюють з відділенням металеві фракції від шлакової, при цьому електроплавці піддають тільки шлакову фракцію з отриманням металевого компонента, що містить залишкову частину заліза, і шлакового компонента. Отриману металеву фракцію об'єднують з отриманим на попередній стадії металевим компонентом з утворенням металеві суміші, яку піддають очищенню від домішок.

Термічне відновлення завершують при температурі 1330-1400 °С. Частково відновлений продукт подрібнюють до розміру частинок шлакової фракції (менше 0,2-0,25 мм), при цьому від шлакової фракції відокремлюють металеву фракцію з розміром частинок не менше 0,2-0,25 мм.

Описаний спосіб переробки титаномагнетиту має такі недоліки:

- необхідно двічі розмелювати (подрібнювати) матеріали: вихідну шихту та шихту відновлену;
- необхідно гранулювати розмелену вихідну шихту;
- основний цикл процесу переробки титаномагнетитів здійснюють у двох металургійних агрегатах двостадійним процесом: спочатку твердофазне відновлення заліза при зниженій температурі, потім високотемпературний поділ відновленого металу та титанистого шлаку;
- твердофазне відновлення заліза проводять при температурі, коли шихта переходить у в'язкопластичний стан, але такий матеріал важко розмелювати;
- поділ металеві та шлакової фаз після розмелювання відновленої шихти – важка та малоефективна операція;



- пропонується сумарний процес переробки титаномагнетиту є малопродуктивним і не може забезпечити переробку великої кількості руди;
- великі матеріальні й енергетичні витрати на переробку титаномагнетиту.

Тому з метою усунення перелічених недоліків необхідно винайти високопродуктивний ефективний процес переробки титаномагнетитових руд з високими техніко-економічними показниками.

#### 4.3.2 Теоретичні передумови процесу переробки титаномагнетитових руд складного складу

Як можливий варіант вирішення проблеми переробки титаномагнетитових руд складного складу запропоновано спосіб, який включає такі технологічні операції: завантаження в гарнісажну плавильну камеру легкоплавких відходів чорних металів, їх розплавлення і нагрівання розплаву, завантаження шихти, що містить титаномагнетитову руду і флюс, і вуглецевого відновника, проплавлення шихти на поверхні та в усьому об'ємі рідкого шлакорудного розплаву, відновлення заліза і ванадію вуглецевим відновником, роздільне зливання чавуну і шлаку з плавильної камери.

При цьому перед завантаженням в плавильну камеру шихту попередньо підігрівають газами, що відходять з плавильної камери та мають температуру 1850-1900°C. Підігрів шихти здійснюють у підігрівачі, що герметично з'єднаний з плавильною камерою. Монооксид вуглецю (CO) відхідних газів допалюють у підігрівачі, вдуваючи в нього нагріте в системі вторинного охолодження плавильної камери повітря з температурою 250-290°C.

Шихту завантажують у плавильну камеру зі швидкістю 0,5-1,5 тонни на годину на 1 МВт теплової потужності паливно-кисневих пальників, що опалюють плавильну камеру. Вуглецевий відновник завантажують у кількості 20-21% вуглецю від маси оксидів заліза шихти шматками на поверхню розплаву та в кількості 4-5% вуглецю від маси оксидів заліза шихти вдувають у вигляді порошку інжекторами в розплав.

Після наплавлення повної ванни завантаження шихти в плавильну камеру припиняють на 8-12 хв., роблять витримку розплаву, продовжуючи вводити вуглецевий відновник у розплав інжекторами. Закінчивши витримку, зливають з плавильної камери 50-70% титанистого шлаку та 60-75% чавуну, що накопичився, після цього відновлюють завантаження шихти.

Шлак, злитий з плавильної камери, гранулюють і використовують у вигляді гранул для виробництва феротитану алюмінотермічним способом. Другий варіант – шлак, злитий з плавильної камери, використовують у рідкому вигляді для виробництва феротитану алюмінотермічним способом. Ще один варіант – шлак, злитий з плавильної камери, використовують у рідкому вигляді для отримання феросиліцію та високотитанистого шлаку. Або злитий з плавильної камери шлак використовують у рідкому вигляді для отримання феросилікованадію та високотитанистого шлаку.

Підігрів шихти перед завантаженням в плавильну камеру відхідними газами з температурою 1850-1900°C в підігрівачі, герметично з'єднаному з плавильною камерою, дозволяє збільшити продуктивність плавильної камери, знизити витрату теплоносія, зменшити експлуатаційні витрати та знизити собівартість продуктів переробки титаномагнетитової руди. Крім того, такий прийом дозволяє ефективно знизити температуру відхідних газів до 850-900 °C і простіше організувати утилізацію тепла відпрацьованих газів. Температура відхідних газів на рівні 1850 °C характерна для переробки менш тугоплавких титаномагнетитових руд з меншим вмістом оксидів титану. Температура відхідних газів близько 1900 °C характерна для випадку переробки титаномагнетитових руд з високим вмістом оксидів титану при більш високій температурі в робочому просторі плавильної камери.

Допалювання монооксиду вуглецю (CO) відхідних газів у підігрівачі шляхом вдування в нього нагрітого в системі вторинного охолодження плавильної камери повітря з температурою 250-290°C дозволяє утилізувати хімічне тепло газів, що відходять, корисно використовувати тепло повітря із системи вторинного охолодження плавильної камери, підвищити сумарний

тепловий ККД процесу переробки титаномагнетитової руди, знизити витрати теплоносіїв і зменшити експлуатаційні витрати. Температура повітря 250°C відноситься до плавильної камери невеликих розмірів, температура повітря 300 °C характерна для роботи плавильної камери великих розмірів.

Завантаження шихти зі швидкістю в межах 0,5-1,5 тонни в годину на 1 МВт теплової потужності паливнокисневих пальників, що опалюють плавильну камеру, забезпечує високу продуктивність плавильної камери й оптимальну витрату теплоносія. Швидкість завантаження шихти 0,5 т/год. на 1 МВт теплової потужності пальників є зручною при роботі на рудах з високим вмістом оксидів заліза та використанні плавильної камери з великою глибиною ванни і малою величиною питомої поверхні розплаву в камері (відношення площі поверхні розплаву до маси розплаву, що знаходиться в плавильній камері). Швидкість завантаження шихти 1,5 т/год. на 1 МВт теплової потужності пальників зручна при переробці руд з пониженим вмістом оксидів заліза в плавильній камері з малою глибиною ванни та великою величиною питомої поверхні розплаву в камері, оскільки величина питомої поверхні розплаву визначає швидкість і повноту відновлення оксидів заліза.

Завантаження вуглецевого відновника в кількості 20-21% вуглецю від маси оксидів заліза шихти шматками на поверхню розплаву та вдування порошку відновника в кількості 4-5% вуглецю від маси оксидів заліза шихти інжекторами в розплав забезпечують високу швидкість і достатню повноту відновлення заліза. Більша кількість відновника, що вводиться, необхідна при переробці руд з високим вмістом заліза, тому що при цьому відновлюється більше заліза, а для науглецювання відновленого заліза до складу чавуну потрібна додаткова кількість вуглецю. Вдування частини вуглецевого відновника у вигляді порошку в розплав дозволяє повніше відновити оксиди заліза в нижній частині шлакорудного розплаву та раціонально використовувати дріб'язок вуглецевого відновника.

Припинення завантаження шихти після наплавлення повної ванни металу та витримка розплаву 8-12 хв. при продовженні подачі відновника в розплав

інжекторами дозволяють довідновити оксиди заліза та ванадію шихти, дають можливість осадити крапельки відновленого металу в металеву ванну і підготувати відновлений шлаковий розплав до випуску (зливання) з плавильної камери. Витримка 8 хв. рекомендується для плавильної камери з малою глибиною металевої ванни та малою висотою шлакового розплаву. Витримка 12 хв. рекомендується для плавильної камери з великою висотою шлакового розплаву.

Зливання з плавильної камери після закінчення витримки 50-70% відновленого шлаку та 60-75% металу, що накопичився, є необхідною умовою для продовження процесу переробки титаномагнетитів з великою швидкістю, оскільки кількість шлаку та металу, що залишилася в плавильній камері, забезпечує швидке плавлення завантаженої шихти в рідкій ванні розплаву.

Використання титанистого шлаку, злитого з плавильної камери, після грануляції для виробництва феротитану алюмінієвим способом дозволяє покращити техніко-економічні показники процесу переробки титаномагнетитової руди за рахунок виробництва додаткової продукції. Використання титанистого шлаку, злитого з плавильної камери, в рідкому вигляді для виробництва феротитану алюмінієвим способом дозволяє поліпшити показники процесу переробки титаномагнетитової руди за рахунок виключення операції розливання шлаку та показники виробництва феротитану за рахунок зменшення витрати алюмінію.

Використання шлаку, злитого з плавильної камери, для отримання феросиліцію та високотитанистого шлаку дозволяє покращити техніко-економічні показники процесу переробки титаномагнетитової руди та організувати повністю безвідходний процес переробки руди.

Використання шлаку, злитого з плавильної камери, в рідкому вигляді для отримання феросиліцію та високотитанистого шлаку дозволяє ще більше підвищити техніко-економічні показники процесу переробки титаномагнетитової руди.

Зменшення до 20-21% вуглецю від маси оксидів заліза шихти кількості

вуглецевого відновника, що вводиться в плавильну камеру, приводить до того, що сполуки ванадію не переходять у метал, а залишаються в шлаку.

У такому випадку злитий з плавильної камери титанистий шлак, що містить сполуки ванадію, може бути використаний для виробництва феросилікованадію та високотитанистого шлаку, що також дозволяє поліпшити техніко-економічні показники процесу переробки титаномагнетитової руди та організувати повністю безвідходний процес переробки руди.

#### 4.3.3 Практична реалізація способу переробки титаномагнетитових руд

Агрегат, у якому пропонується здійснювати переробку титаномагнетитових руд, показано на рис. 4.2.

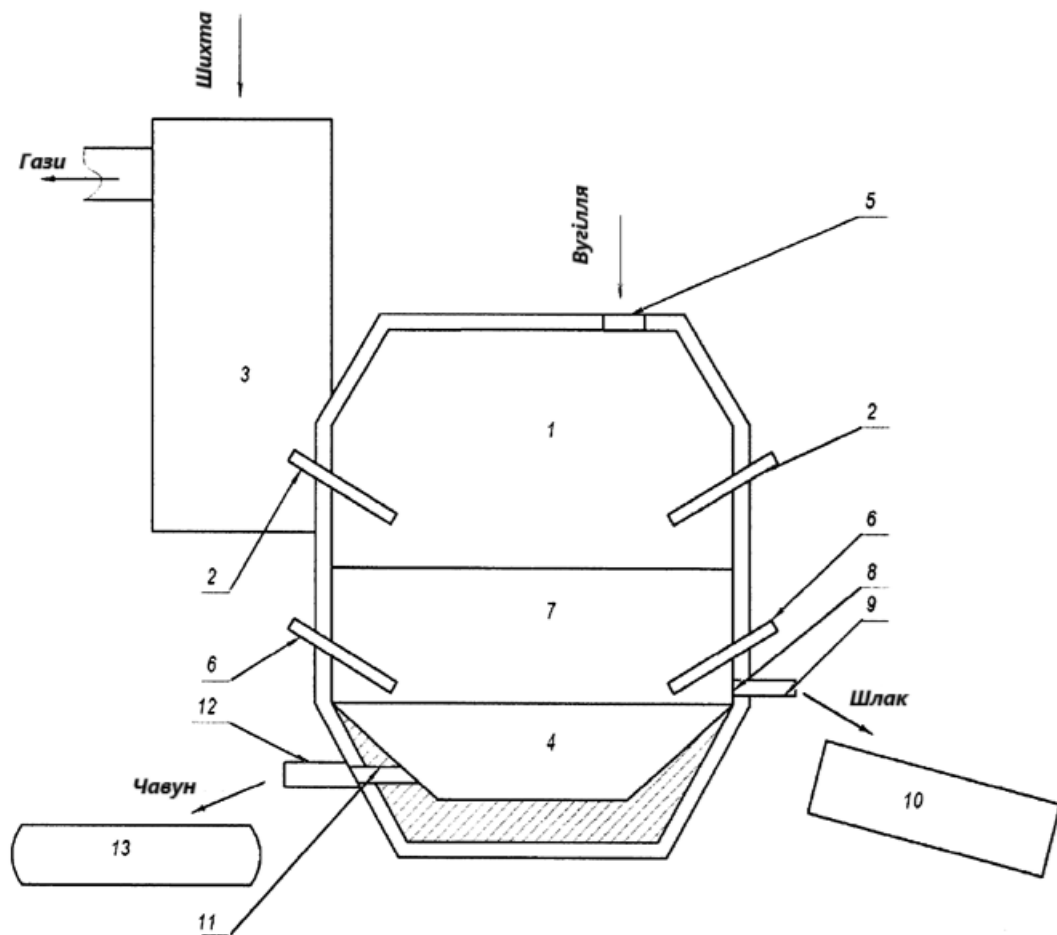


Рисунок 4.2 – Пристрій для переробки титаномагнетитової сировини

Переробка титаномагнетитової руди здійснюється наступним чином. Плавильну камеру 1 розігрівають теплом працюючих паливокисневих пальників 2. Одночасно через підігрівач шихти 3 у плавильну камеру завантажують легкоплавкі відходи чорних металів, розплавляють їх і заповнюють рідким металом металеву ванну 4. Після цього починають завантажувати шихту із заданою швидкістю через підігрівач 3 в плавильну камеру 1. Шихту складають з титаномагнетитової руди (або концентрату збагачення руди) та флюсу (вапно, вапняк). Одночасно в плавильну камеру 1 завантажують вуглецевий відновник шматками через отвір 5 і порошком інжекторами 6.

Шихта проплавляється в рідкій ванні шлакорудного розплаву 7. Одночасно йде процес відновлення оксидів заліза та науглецювання крапель металу. Після заповнення всієї металевої ванни 4 чавуном, завантаження шихти в плавильну камеру 1 припиняють на 8-12 хв., продовжуючи вводити вуглецевий відновник у шлаковий розплав 7 інжекторами 6.

Закінчивши витримку, з плавильної камери 1 зливають 60-75% накопиченого металу через металеву лютку 11 по жолобу 12 і розливають або на розливному конвеєрі 13, або в рідкому вигляді передають в конвертер (на рисунку не показаний) на переділ чавуну в сталь і отримання ванадієвого шлаку. Одночасно з плавильної камери 1 зливають 50-70% отриманого титанистого шлаку з низьким вмістом оксидів заліза через шлакову лютку 8 по жолобу 9 або в гранулятор 10, або в шлаковий ківш з метою подальшого використання в рідкому вигляді для отримання феротитану або феросилиція та високотитанистого шлаку. Після закінчення зливання чавуну та титанистого шлаку відновлюють подачу шихти та вуглецевого відновника в повному обсязі в плавильну камеру 1 і цикл переробки титаномагнетитової руди повторюють.

Наведемо приклад, що підтверджує можливість застосування запропонованого способу.

У 2 т дуговій печі з трансформатором потужністю 1,5 МВА і футерівкою з високоглиноземистих вогнетривів були проведені 3 плавки з метою переробки

збагаченої титаномагнетитової руди. Перед завантаженням у піч шихту підігрівали газами, що відходили з плавильної камери та мали температуру 1850°C, у підігрівачі. Монооксид вуглецю відхідних газів допалювали в робочому просторі дугової печі. На кожній плавці розплавляли спочатку 500 кг чавунного брухту та нагрівали розплав до 1500°C. Потім на розплав завантажували шихту, що складалася зі збагаченої титаномагнетитової руди і вапна зі швидкістю 0,7 т в годину на 1 МВА потужності пічного трансформатора.

Одночасно з шихтою в піч вводили вуглецевий відновник (вугілля) в кількості 21% вуглецю від маси оксидів заліза шихти і в кількості 5% вуглецю від маси оксидів заліза шихти вдували у вигляді порошку інжекторами в розплав. Після проплавлення всієї шихти витримували розплав під струмом протягом 10 хвилин, продовжуючи вводити вуглецевий відновник у розплав інжекторами. В цей час шихта в піч не завантажувалася. Потім отриманий чавун і титанистий шлак зливали з печі окремо: спочатку скачували 70% титанистого шлаку в плоску чавунну виливницю, потім скачували 75% чавуну, що накопичився, в розливний ківш. Після цього відновлювали завантаження шихти.

Підчас проведення експериментів зважували шихтові матеріали та продукти плавки, а також визначали хімічний склад цих матеріалів. Результати дослідних плавок наведено в табл. 4.9 і 4.10.

Таблиця 4.9 – Результати експериментів з переробки збагаченої титаномагнетитової руди в дуговій печі

№ плавки	Витрачено матеріалів, кг				Отримано, кг		
	Чавун	Руда	Вугілля	Вапно	Чавун		Шлак
					з руди	всього	
1	500	1500	331	50	825	1325	760
2	500	1500	338	50	820	1320	750
3	500	1400	325	50	780	1270	670

Таблиця 4.10 – Хімічний склад матеріалів плавки

№ плавки	Вміст, %								
	Руда			Чавун			Шлак		
	$\Sigma\text{FeO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{V}_2\text{O}_5$	C	V	Si	$\text{TiO}_2$	$\Sigma\text{FeO}$	$\text{SiO}_2$
1	70,8	16,2	0,87	3,8	0,48	0,35	42,5	5,4	21,2
2	70,8	16,2	0,87	3,7	0,47	0,38	44,1	5,7	20,7
3	70,8	16,2	0,87	4,1	0,49	0,36	43,4	5,2	20,4

Примітка: вміст сполук титану та ванадію в руді та шлаку умовно перераховано на вміст  $\text{TiO}_2$  та  $\text{V}_2\text{O}_5$ .

Отримані результати свідчать про можливість впровадження у виробництво та промислової реалізації запропонованої технології переробки титаномагнетитових руд.

Одержання феротитану алюмінотермічним методом з ільменітових руд, близьких за складом до складу одержуваного в досліджах титанистого шлаку, застосовується на практиці та описаний в літературному джерелі [26].

Одержання феросиліцію та високотитанистого шлаку з титаномагнетитових концентратів, близьких за складом до складу титанистого шлаку, одержуваного заявленим способом, випробувано з наведенням результатів у роботі [22].

Одержання феросилікованадію з ванадієвих шлаків – продуктів переробки титаномагнетитів, успішно випробуване в напівпромислових і промислових експериментах [27].

Таким чином, у результаті проведення експериментальних досліджень і виконання розрахункових операцій запропонована технологія переробки титаномагнетитових руд, технічним результатом якої є:

- збільшення продуктивності процесу та зниження матеріальних і енергетичних витрат на здійснення процесу шляхом переробки титаномагнетитів безперервним одностадійним процесом в одному



металургійному агрегаті;

- зниження витрат за рахунок виключення малопродуктивних операцій розмелювання та гранулювання шихти;

- проплавлення шихтових матеріалів безперервно на поверхні та в обсязі рідкого шлакорудного розплаву в плавильній камері, що опалюється паливокисневими пальниками;

- здійснення рідкофазного відновлення заліза шихтових матеріалів у плавильній камері.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Різноманітність нетрадиційних видів титановмісної сировини багато в чому може бути поєднано загальними властивостями. Вони мають підходящі кількісні та якісні параметри для того, щоб при забезпеченні певних умов стати основою для формування надійної мінерально-сировинної бази титаноспоживаючих галузей промисловості України.

Однією з цих умов є промислове освоєння ефективних ресурсозберігаючих технологій їхньої комплексної переробки. Застосування таких технологій є вирішальним фактором для реалізації нової стратегії формування мінерально-сировинної бази та переходу від ресурсоспоживаючого до ресурсозберігаючого типу відтворення мінерально-сировинної бази. Реалізація цієї стратегії дозволить перевести нові види титановмісної сировини з розряду малоефективних або неефективних в розряд вискоєфективних, тим самим розширивши мінерально-сировинну базу.

У нашій країні та за кордоном накопичений багаторічний досвід у сфері комплексного використання різних видів титановмісної сировини та виконано багато науково-дослідницьких робіт з розробки та реалізації ефективних ресурсозберігаючих технологій, застосування яких на металургійних підприємствах може забезпечити отримання значних економічних ефектів.

Запропоновану технологічну схему комплексної переробки титаномагнетитових руд, основою якої є принцип ресурсозбереження, представлено на рис. 5.1.

Ця технологія характеризується наступним:

- 1) на її основі в переробку можуть залучатися нові, раніше не використовувані види титановмісної сировини;
- 2) кінцева продукція, що буде випускатися за цією технологією, відрізнятиметься значно більш високою якістю в порівнянні з якістю аналогічної продукції, що виробляється за традиційною технологією;

- 3) застосування цієї технології дозволить розширити спектр вилучених корисних компонентів;
- 4) у технологічній схемі відсутні ресурсозатратні переділи і в цілому вона носить ресурсозберігаючий характер;
- 5) застосування цієї технології дозволить створити новий штучний високоякісний вид титанової сировини – титановий шлак.

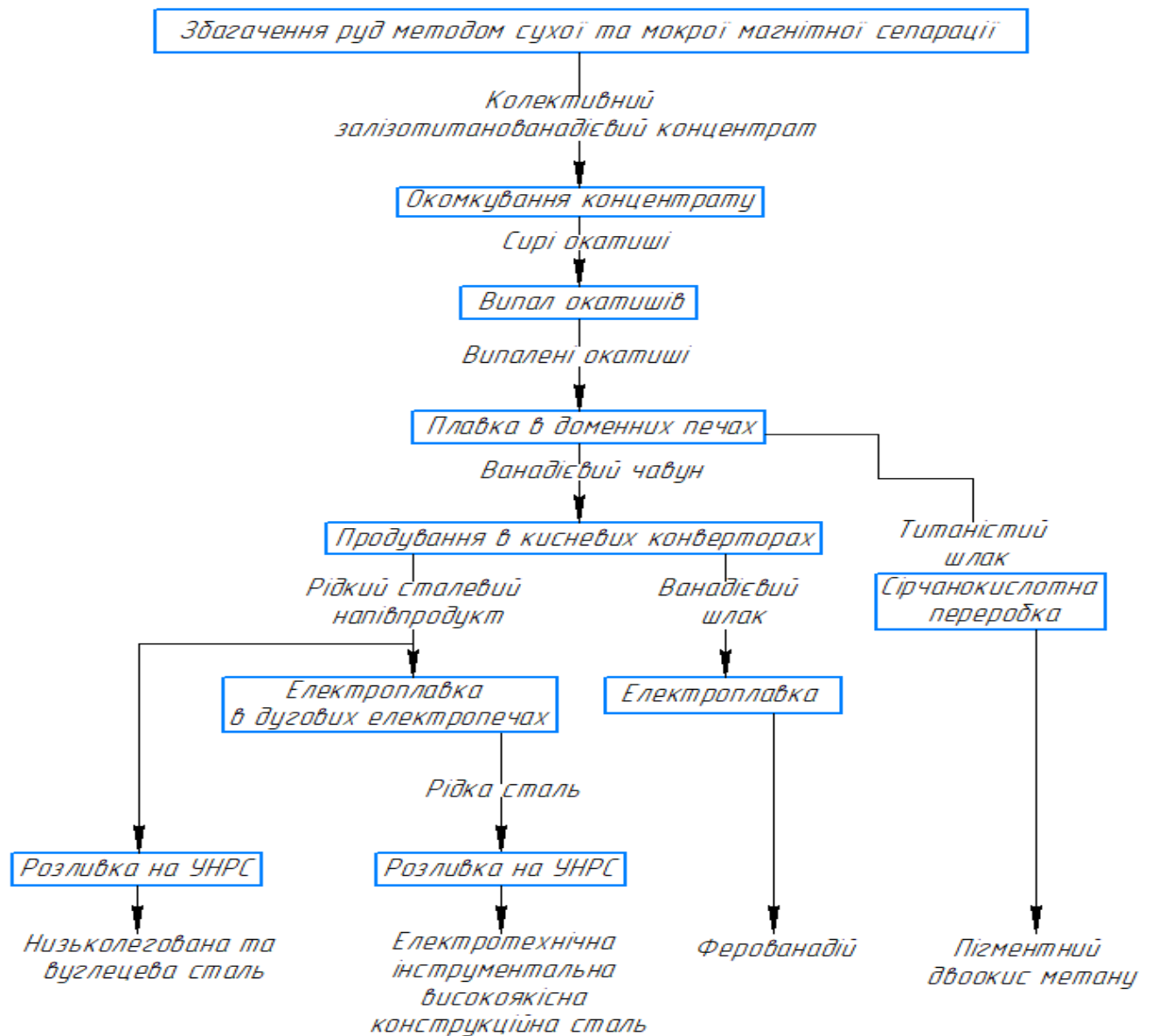


Рисунок 5.1 – Технологічна схема комплексної переробки титаномагнетитових руд

Якісна оцінка всіх відкритих і розвіданих родовищ титановмісної сировини, розташованих у доступних для освоєння районах з точки зору величини запасів, гірничо-технічних умов розробки, мінералогічного та хімічного складу, ступеня розробленості технології їх комплексного використання, дозволяє зробити висновок, що одним із рішень щодо проблеми забезпечення металургійних підприємств стабільною та високоякісною титановмісною сировиною в необхідній кількості може бути освоєння титаномагнетитових руд України.

В основу критерію оптимальності має бути закладено принцип максимізації сумарної корисності, який виражається або шляхом максимізації інтегрального народногосподарського економічного ефекту, або шляхом максимальної економії сукупних інтегральних витрат (за умови виробництва фіксованого обсягу кінцевої продукції).

У даних розрахунках застосовано принцип максимальної економії сукупних витрат, пов'язаних з виробництвом фіксованого обсягу випуску діоксиду титану при комплексному використанні різних видів титановмісної сировини.

Співвідношення моделі являють собою баланси виробництва та розподілу продукції, обмеження щодо наявності виробничих ресурсів і умови задоволення заданої потреби в діоксиді титану, що дорівнює величині ємності внутрішнього ринку та можливого експорту.

Невизначеність перспективних прогнозів виробництва та споживання діоксиду титану в країні та можливого експорту зумовила необхідність варіації сумарного обмеження на випуск титанової продукції з титановмісної сировини. Завдання вирішувалося при трьох значеннях величини сукупного попиту на внутрішньому та зовнішньому ринках – мінімальному, середньому та максимальному. Це дозволило перевірити стійкість одержуваних результатів при зміні зовнішніх умов виробничої діяльності гірничо-промислового комплексу.

Результати оптимізаційних розрахунків (табл. 5.1) свідчать про ефективність виробництва діоксиду титану при комплексному використанні титаномагнетитової сировини.

Таблиця 5.1 – Оптимальна оцінка титановмісних концентратів, грн./т

Показники	Виробництво, тис. т TiO <sub>2</sub>		
	450	600	700
Оцінка концентратів*:			
титаномагнетитового (проба 5)	–	208/1552	180/1343
титаномагнетитового (проба 6)	194/1564	228/2323	263/2121

\*У чисельнику – оцінка на 1 т концентрату; в знаменнику – на 1 т вилученого діоксиду титану

На основі результатів розв'язання оптимізаційного завдання обчислено показники народногосподарської економічної ефективності (табл. 5.2), що відображають ефективність створення гірничо-промислового комплексу з погляду загальнодержавних інтересів.

Таблиця 5.2 – Показники економічної ефективності створення гірничо-промислового комплексу

Показники	Виробництво, тис. т TiO <sub>2</sub>		
	450	600	700
1. Інтегральний економічний ефект у розрахунку:			
- на 1 т діоксиду титану, тис. грн.	5953	4578	3684
- на річний обсяг виробництва діоксиду титану, млн. грн.	2679	2747	2579
2. Капітальні витрати (з урахуванням капзатрат на розвиток виробничої та соціальної інфраструктури та природоохоронні об'єкти), млн. грн.	7359	9888	11695
3. Термін окупності капітальних вкладень, роки	2,7	3,6	4,3

Отримані результати свідчать про економічну ефективність виробництва діоксиду титану при комплексному використанні титановмісних руд, у тому числі з корінних титаномагнетитових руд.

Отримані показники економічної ефективності комплексного використання титановмісної сировини можуть бути основою переходу до наступної, інвестиційної стадії вирішення проблеми – розробки та реалізації інвестиційного проекту створення гірничо-промислового титанового комплексу.

## 6 ЕКОЛОГО-САНІТАРНА ОЦІНКА РІШЕНЬ

Титан – один із найважливіших матеріалів сучасного машинобудування.

Комплекс фізико-механічних властивостей і хімічна стійкість титану до корозії дозволяють застосовувати його в авіації, суднобудуванні, хімічній промисловості, цивільному будівництві та ін.

Сьогодні є можливість не тільки створювати різні титанові матеріали, а й одержувати спечені заготовки з мінімальними припусками на механічну обробку або обробку тиском. Усе це можливо завдяки порошковій металургії. При виготовленні напівфабрикатів і готових виробів із порошків титану та його сплавів основними факторами покращення техніко-економічних показників виробництва деталей є зменшення трудомісткості виготовлення деталей і різке скорочення відходів титану.

Однією з найважливіших особливостей порошкової технології є створення матеріалів з дисперсних частинок. Дисперсні системи, як правило, термодинамічно високонерівноважні, що дозволяє створювати матеріали з властивостями, що регулюються. Пояснюється це тим, що стан нерівноважних систем характеризується великою кількістю параметрів, необхідних для їхнього описання. Варіюючи ці параметри, можна отримувати ширший спектр структур і властивостей, тобто нові класи матеріалів.

Однак при отриманні та використанні дисперсних титанових порошків виникають екологічні ризики, які необхідно додатково враховувати. До них відносяться пожежо- і вибухонебезпечність, здатність накопичуватися при потраплянні в організм людини та ін.

У суміжних галузях науки і техніки існує оцінка ризику для забезпечення безпеки промислового виробництва, але комплексна методологія оцінки екологічних ризиків виробництва виробів з титану, а отже, ефективних технологічних прийомів, що дозволяють мінімізувати цей ризик, відсутня і може призводити до аварійних ситуацій на виробництвах, що завдають екологічних та економічних збитків.

Зниження екологічної небезпеки, пожежо- та вибухонебезпечності дисперсних порошків титану, яке можна досягти застосуванням нового класу обладнання, створенням спеціальних технологій та нових матеріалів, використовуючи дифузійну активність механоактивованого титанового порошку, є актуальною проблемою.

У сучасному титановому виробництві основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є: відкрите полум'я та теплове випромінювання; розплавлений метал; пожежо- та вибухонебезпечні порошки та гази; пил та гази в робочій зоні; підвищена температура поверхонь обладнання; підвищена температура повітря у робочій зоні; виробничий шум та вібрація; напруга в електричних ланцюгах; електростатична електрика; рухомі механізми та рухомі елементи обладнання.

Проаналізувавши особливості забруднень навколишнього середовища під час переробки титаномагнетитової сировини, з'ясовано, що забруднення навколишнього середовища охоплює в технологічному циклі всі причинно-наслідкові зв'язки виникнення та наслідків будь-якого виду ризику забруднення, тому що існує ризик не тільки у разі прямого впливу на людину, припустимо вибуху, але й забруднень навколишнього середовища внаслідок цього вибуху. Тому будь-яка організація повинна встановлювати та підтримувати в робочому стані та контролювати всі процедури, де можливе виникнення шкідливих впливів на навколишнє середовище, а також запобігати та мінімізувати екологічні ризики, які можуть бути пов'язані з різними технологічними операціями. Відмінність виробничих процесів визначає особливості щодо проблем екологізації виробництв, застосовуваної та створюваної техніки та технології.

Показано, що обґрунтування впливів за допомогою норм, нормативів і концепція техніки безпеки, що існувала в промисловій сфері та спиралася на принцип реагувати і виправляти, сьогодні повністю себе зжили. Роботи, що проводяться у світі з питань забезпечення безпеки промислових виробництв, показують, що навіть використання найефективніших заходів виробничої



безпеки та сучасних методів контролю та управління технологічними процесами не забезпечує абсолютну надійність виробництва. За нинішнього рівня розвитку виробництва існує певна ймовірність виникнення аварій. Мінімізація ризику вимагає зіставлення цілого ряду показників, урахування найрізноманітніших факторів небезпеки, проведення системного аналізу технологічного, екологічного та соціального аспектів оцінки можливості виникнення факторів забруднення довкілля. У зв'язку з цим має бути створена система технологічних рішень та екологічного управління технологіями, що дозволяє прогнозувати штатні та позаштатні аварійні ситуації.

Тому необхідно запропонувати комплекс методичних підходів, які забезпечують екологічне управління та запобігають виникненню впливів на навколишнє середовище потенційних екологічних аспектів, у тому числі в титановій промисловості. Існуючі в даний час методики дозволяють запобігти виникненню впливів на навколишнє середовище, але немає єдиного обґрунтованого підходу до вибору ефективного способу екологічного управління, що дозволяє вирішити проблему екологічної безпеки.

Розвиток міжнародного співробітництва та глобалізація економіки вимагають, щоб при створенні системи екологічного управління для досягнення переваг у конкуренції кожне підприємство у своїй діяльності керувалося міжнародними стандартами.

Стандарт розроблено так, щоб його можна було застосувати до всіх типів підприємств. Модель такого підходу представлена на рис. 5.1.

Мінімізація ризику на виробництві, у тому числі в технологічних процесах переробки титановмісних матеріалів, вимагає зіставлення цілого ряду показників, урахування найрізноманітніших факторів небезпеки, проведення системного аналізу технологічного, економічного та соціального аспектів оцінки можливості виникнення аварій. Аналіз технологічних процесів одержання готової продукції показав, що для забезпечення екологічної безпеки процесу виробництва титанових матеріалів та виробів з титану в металургії необхідно ідентифікувати існуючі та потенційні екологічні аспекти, оцінити

пов'язані з ними ризики та при необхідності розробити коригувальні заходи. Для цього запропоновано комбінацію методів та інструментів, що дозволяють виявити та провести комплексну оцінку причин, що призводять до впливу технологічних процесів на навколишнє середовище, а також розробити природоохоронні заходи та провести аналіз ступеня зниження ризику після їх впровадження.

Ідентифікація екологічних аспектів проводилася за допомогою методу функціонального моделювання технологічних процесів за стандартом IDEF0. Ідентифікувалися як прямі (пов'язані зі штатною діяльністю) екологічні аспекти, так і непрямі (потенційні), що виникають у результаті позаштатних ситуацій.

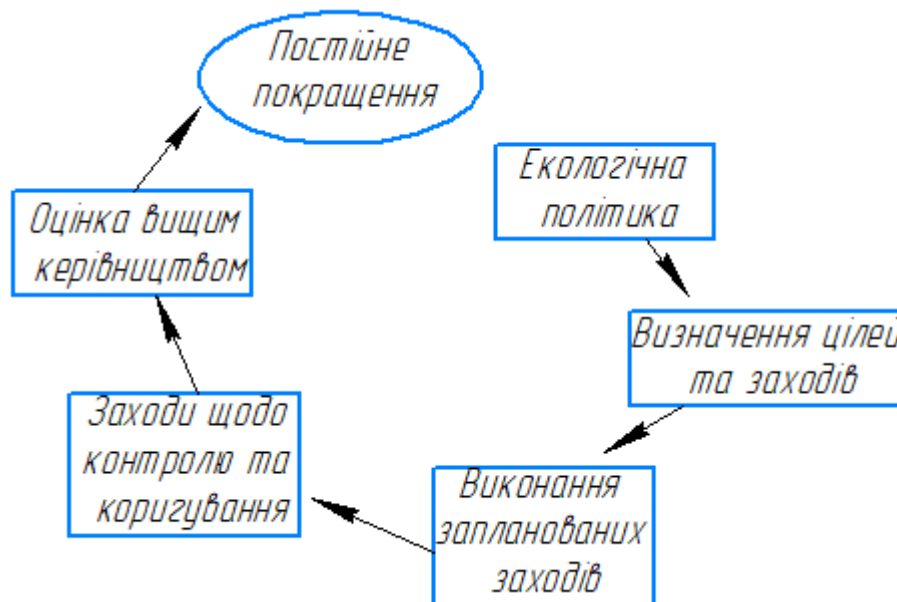


Рисунок 5.1 – Модель системи управління навколишнім середовищем згідно зі стандартом ISO 14001

Після побудови моделей процесів складався перелік екологічних аспектів та потенційних екологічних аспектів, що виникають внаслідок аварії. Важливим екологічним аспектом є той аспект, який чинить або може здійснити значний вплив на довкілля.

У рамках ідентифікації екологічних аспектів розроблена функціональна модель процесу комплексної переробки титаномагнетитової сировини, що

дозволила виявити існуючі та потенційні аспекти (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Екологічні аспекти

Функціональний блок		Вплив
Номер	Найменування	
<b>Екологічні аспекти</b>		
A11	Подрібнення	Шум, вібрація, пил
A12	Розсів	Пил
A14	Сушка	Забруднені пари води, пил
A15	Змішування	Пил
A21	Завантаження	Пил
A32	Термообробка	Теплове випромінювання, канцерогенні вуглеводні
<b>Потенційні екологічні аспекти</b>		
A11	Подрібнення	Неконтрольований викид речовин, що утворюють пил, в результаті аварійної ситуації (вибух або займання)
A12	Розсів	
A14	Сушка	
A15	Змішування	
A21	Завантаження	
A32	Термообробка	

Оскільки впливи на довкілля при штатному режимі діяльності з виробництва виробів з титану в металургійній промисловості є незначними порівняно з можливим впливом при виникненні аварійних ситуацій, у роботі розглянуто лише потенційні екологічні аспекти. Ранжування потенційних екологічних аспектів за ступенем важливості проводилося методом ABC за критеріями, що визначають пожежо- та вибухонебезпечність: пиловиділення, нагрівання металу, іскроутворення (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Аналіз важливих потенційних екологічних аспектів

Аспекти	Критерії			
	Концентрація пилю	Іскроутворення	Нагрів	ABC
A11 Подрібнення	A	A	B	210
A12 Розсів	A	A	B	210
A14 Сушка	B	C	B	021
A15 Змішування	A	A	B	210
A21 Завантаження	C	C	C	003
A32 Термообробка	C	C	B	012

У результаті ранжування як дуже важливі визначено такі аспекти:

A11 Подрібнення;

A12 Розсів;

A15 Змішування.

Таким чином, при виконанні санітарно-екологічної оцінки технології запропоновано методичні принципи та техніка екологічного менеджменту, що дозволяють вибрати та застосувати на практиці методи та інструменти, які з урахуванням специфікації виробництва забезпечують аналіз та оцінку впливу підприємства на довкілля своїх використовуваних технологічних процесів. У результаті підприємство отримає уявлення про вплив на довкілля використовуваних технологічних процесів та продукції і зможе прийняти об'єктивні управлінські рішення, спрямовані на постійне покращення охорони навколишнього середовища.

Крім того, виявлено причини, що призводять до виникнення аварійних ситуацій. До них належать фактори, що викликають збільшення пожежо- та вибухонебезпечності титановмісних матеріалів. Основними факторами є несправність обладнання, порушення герметичності робочої камери, недосконалість подрібнювального обладнання, використання дисперсного порошку та неоднорідність розподілу легуючих елементів. Розроблено

природоохоронні та коригувальні заходи, що забезпечують безпеку під час виробництва матеріалів на основі титану.

Титан і його сплави мають такі характерні особливості: при температурах, близьких до температури плавлення, і в рідкому стані горять на повітрі; активно взаємодіють з азотом, воднем, вуглекислою та майже з усіма оксидами металів та металоїдів; розкладають воду з виділенням водню, який у певних умовах може утворити з киснем повітря вибухонебезпечну суміш.

Пил титану та його сплавів є вибухонебезпечним, нижня межа вибуховості цього пилу близько  $45 \text{ г/м}^3$ . Температура займистості титанового пилу  $400\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тирса і тонка стружка титану і його сплавів є пожежонебезпечними, вони займаються при температурі  $700\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$ , а тирса і стружки, забруднені маслами, здатні до самозаймання. Хлористі сполуки титану є токсичними речовинами.

При холодній картковій прокатці тонких листів внаслідок нагартівки можливе тендітне сколювання кінців карток.

Враховуючи зазначені особливості титану та його сплавів, необхідно особливо стежити за тим, щоб:

а) виключалося потрапляння в піч води та атмосферного повітря в процесі плавлення та охолодження злитків;

б) температура нагрівання та обробки титану та його сплавів не перевищувала технологічних та протипожежних норм;

в) у жодному разі не допускалося застосування відкритого вогню, іскор та тіл, нагрітих до високих температур, у місцях виділення або скупчення титанового пилу;

г) передбачалося обов'язкове застосування захисних пристроїв при пластичній деформації титану та його сплавів на технологічних операціях, коли можливе сколювання металу у процесі його обробки.

## ВИСНОВКИ

Підвищений вміст  $TiO_2$  у шихті доменних печей, що працюють на титаномагнетитових рудах, ускладнює технологію виплавки ванадієвого чавуну. У роботі проведено дослідження з переробки титаномагнетитових руд з різним вмістом діоксиду титану.

У результаті досліджень отримано такі результати.

1. Лабораторними дослідженнями та методами математичного моделювання показано можливість переробки низькотитанистого (зміст  $TiO_2$  2,13 %) та високотитанистого (зміст  $TiO_2$  3,41 %) концентратів за схемою «доменна піч – конвертер». При доменній плавці високотитанистого концентрату вміст  $TiO_2$  в доменному шлаку очікується на рівні 14,82 %.

2. Лабораторні досліди та розрахункові дослідження показали, що переробка високотитанистого концентрату (зміст  $TiO_2$  3,41 %) за схемою «металізація – електроплавка» призведе до отримання шлаку з вмістом  $TiO_2$ , недостатнім для його переробки на пігментний діоксид титану або титанову губку (22,88%).

3. Запропоновано одержання колективного концентрату шляхом змішування низькотитанистого та високотитанистого концентратів (зміст  $TiO_2$  у колективному концентраті 2,765 %). При цьому вміст  $Fe_{заг}$  у колективному концентраті буде вищим порівняно з концентратом поточного виробництва (64,55 проти 61,4%), а енерговитрати – нижчими.

4. Запропоновано схему поетапного переведення доменних печей на плавку титаномагнетитових руд. У лабораторних умовах отримані та досліджені окатиші із різним співвідношенням низькотитаністих і високотитаністих концентратів. Встановлено, що збільшення вмісту діоксиду титану в окатишах у міру збільшення кількості концентрату, що вводиться в них, з підвищеним вмістом  $TiO_2$  не викликає погіршення в якості підготовки залізорудної сировини до доменної плавки. Збільшується міцність на стискання сирих і сухих окатишів, а також міцність на стискання обпалених окатишів.

Збільшується гаряча міцність і температура початку розм'якшення, а температурний інтервал розм'якшення окатишів знижується, що позитивно позначиться на основних техніко-економічних показниках доменної плавки – витраті коксу та продуктивності.

5. Встановлено, що варіант суміші концентратів в окатишах у співвідношенні 60% низькотитаністого та 40% високотитаністого не спричинить серйозних змін у технології доменної плавки (прогнозований вміст діоксиду титану в шлаку складе 11,39%).

6. Показано, що володіючи сприятливими кількісними та якісними параметрами, нетрадиційні види титановмісної сировини можуть значно підвищити ресурсний потенціал та забезпечити формування надійної мінерально-сировинної бази титаноспоживаючих галузей промисловості.

7. Показано, що розробка та застосування економічно ефективних ресурсозберігаючих технологій при комплексному використанні нових нетрадиційних видів титановмісної сировини є одним із вирішальних факторів реалізації стратегії відтворення мінерально-сировинної бази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Применение сплавов металлов в технологиях переработки минерального сырья /Авдюков В.И. и др. // VI конгресс обогатителей стран СНГ. – М., 2007. – т 1. – С. 169-170.
2. Губин Г.В. Современное состояние мирового и внутреннего рынка титана /Г.В. Губин, Т.А. Олейник, Ф.Г. Татаринов // Разработка рудных месторождений: труды КГТУ. – 2006. – Вып. 90. – С. 100-105.
3. Состояние и перспективы мирового рынка титановых минералов и пигментов// БИКИ. – 2008. – № 5. – С. 12-15.
4. Бюллетень иностранной коммерческой информации// ВНИКИ.–2009.– № 4. – С.16.
5. Быховский Л.З. Освоение сырьевой базы титана – актуальная задача горной промышленности/ Л.З. Быховский, Л.П. Тигунов, Л.Б. Зубков// Минеральные ресурсы России. – 2001. – № 4. – С. 17-22.
6. Тэлин В.В. Анализ тенденций развития технологий, производства и потребления титана / В.В. Тэлин, В.И. Иващенко, И.Ф. Червоный и др. // Титан. – 2005. – № 2. – С. 70-73.
7. Зима С.Н. Рудные минералы Федоровского и Крапивницкого месторождений Украинского щита // Геол.-минерал. вісник Криворізького нац. ун-ту. – 2015, № 2 (34). – С. 4-18.
8. Пат. 035212 РФ, МПК7 ВОЗС 1/00. Способ обогащения титаномагнетитовых руд/ Чижевский В.Б., Рашников В.Ф., Тахаутдинов Р.С. и др. (РФ).
9. Резниченко В.А., Аверин В.В., Олюнина Т.В. Титанаты: научные основы, технология, производство. М.: Наука, 2010. – 267 с.
10. Резниченко В.А. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология. М.: Наука, 1986. – 292 с.
11. Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.В., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. М.: Металлургия, 1997. – 432 с.



12. Садыхов Г.Б. Разработка научных основ и технологии комплексного использования титаномагнетитов с высоким содержанием диоксида титана: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ИМЕТ РАН, 2001. – 264 с.

13. Гончаров К.В., Агамирова А.С., Садыхов Г.Б., Олюнина Т.В. О возможности получения шлаков от переработки титаномагнетитового концентрата, пригодных для дальнейшего извлечения титана и ванадия // Цветные металлы, 2021. – № 12. – С. 36-40.

14. Рошин В.Е., Рошин А.В. Селективное восстановление металлов в решетке комплексных оксидов // Металлы. – 2013. – №2. – С. 12-20.

15. Role of a silicate phase in the reduction of iron and chromium and their oxidation with carbide formation during the manufacture of carbonferrochrome / V.E. Roshchin, A.V. Roshchin, K.T. Akhmetov, S.P. Salikhov // Russian Metallurgy (Metally). – 2016. – Vol. 2016, no. 11. – P. 1092-1099.

16. Исследование закономерностей фазовых превращений при низкотемпературном восстановлении и хибинского титаномагнетитового концентрата / А. М. Пупышев и др. // Изв. вузов. Цветная металлургия, 2012. – № 5. – С. 21-26.

17. Шенк Й., Люнген Х.Б. Потенциал эффективного применения процессов прямого восстановления и восстановительной плавки в Европе // Черные металлы, 2017. – № 2. – С. 18-22.

18. Пат. 2385962 РФ, МПК С 22 В 34/12, 34/22, 1/02, 5/10 (2006.01). Способ переработки железотитанового концентрата / Гришин Н.Н., Касиков А.Г., Ракитина Е.Ю., Нерадовский Ю.Н.; Ин-т химии и технологии редких элементов и минер. сырья Кол. науч. центра РАН. № 2008134927/02; заявл. 26.08.2008; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10.

19. Витькина Г.Ю. Изучение металлургических свойств титаномагнетитового сырья / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, Ю.А. Чесноков // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2015. – № 12 (1392). – С. 26-30.

20. Дмитриев А.Н. Подготовка к доменной плавке титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана / А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2017. – № 12 (1416). – С. 27-30.

21. Дмитриев А.Н. Оценка показателей доменной плавки титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана /А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Петухов, С.А. Петрова, Ю.А. Чесноков //Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2019. – Т. 75. – № 2. – С. 154-166.

22. Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.В., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. М.: Металлургия, 1997. – 432 с.

23. Патент RU 2206630. Способ переработки титаномагнетитовой ванадийсодержащей руды на титанистый чугуны, ванадиевый шлак и титансодержащий сплав / Коршунов Е.А., Смирнов Л.А., Буркин С.П., Дерябин Ю.А., Логинов Ю.Н., Миронов Г.В. Патентообладатель: ОАО «Уральский институт металлов».

24.Патент RU 2361940. Способ переработки ильменитовых концентратов / Трегубенко В.В., Довлядов И.В., Конотопчик К.У., Бобков Л.Н., Корзун В.К. Патентообладатель: ОАО ХК «Технохим-холдинг».

25. Патент RU 2318899. Способ переработки титаномагнетита / Серба В.И., Фрейдин Б.М., Калинин В.Т., Майоров Л.А., Коротков В.Г., Колесникова И.Г., Кузьмич Ю.В., Ворончук СИ. Патентообладатель: Институт химии и технологи редких элементов и минерального сырья РАН.

26. ПоволоцкийД.Я., РоцинВ.Е., МальковН.В.. Электрoметаллургия стали и ферросплавов. М. Металлургия, 1995. – 592 с.

27. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М. Металлургия. 1985. 244 с.

28. Федосеев С.В. Экономическая эффективность комплексного использования титаносодержащего сырья на основе ресурсосберегающих

технологий: Тезисы докладов // Полезные ископаемые России и их освоение. СПб., 1997.

29. Темченко А.Г., Темченко О.А., Максимов С.В. Экономика підприємств гірничо-металургійного комплексу. – Кривий Ріг: Видав. центр КТУ, 2008. – 400 с.