

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Модернізація доменного виробництва: конструкційні аспекти та екологічна безпека технологічного процесу

Виконав: студент II курсу, групи 8.1361-мчм-
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми металургія чорних металів

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

Бабак А.О.

(ініціали та прізвище)

Керівник канд. техн. наук, доц. Воденнікова О.С.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент канд. техн. наук, доц. Нестеренко Т.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 136 Металургія

(код та назва)

Освітня програма металургія чорних металів

(код та назва)

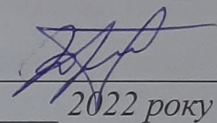
Спеціалізація _____

(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«02» 06 2022 року



З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Бабак Антона Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Модернізація доменного виробництва: конструкційні аспекти та екологічна безпека технологічного процесу

керівник роботи Воденнікова О.С., канд. техн. наук, доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «02» червня 2022 року №597-с

2 Строк подання студентом роботи 08.12.2022р.

3 Вихідні дані до роботи науково-технічна література, ДСТУ, патенти

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналітичний огляд фізико-хімічних процесів виплавки чавуна. Матеріали та методика дослідження. Застосування антрациту як замітника коксу при доменній плавці. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Титульний лист – 1. Реферат – 1. Розділ 1 – 0. Розділ 2 – 1. Розділ 3 – 9. Розділ 4 – 0. Висновки – 1. Додатки – 0.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітичний огляд фізико-хімічних процесів виплавки чавуна	Воденнікова О.С., доц.	03.06.2022 <i>Вод</i>	03.06.2022 <i>Вод</i>
Матеріали та методика дослідження	Воденнікова О.С., доц.	03.06.2022 <i>Вод</i>	03.06.2022 <i>Вод</i>
Застосування антрациту як замітника коксу при доменній плавці	Воденнікова О.С., доц.	03.06.2022 <i>Вод</i>	03.06.2022 <i>Вод</i>
Охорона праці та техногенна безпека	Воденнікова О.С., доц.	03.06.2022 <i>Вод</i>	03.06.2022 <i>Вод</i>

7 Дата видачі завдання 03.06.2022р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація. Реферат. Вступ	01.09.2022-04.09.2022	
2	Розділ 1	05.09.2022-30.09.2022	
3	Розділ 2	01.10.2022-13.10.2022	
4	Розділ 3	14.10.2022-14.11.2022	
5	Розділ 4	15.11.2022-30.11.2022	
6	Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки	01.12.2022-06.12.2022	
7	Презентаційний матеріал	01.12.2022-07.12.2022	

Студент *Баб* **Бабак А.О.**
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) *Вод* **Воденнікова О.С.**
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *Бел* **Белоконь Ю.О.**
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 91 с., 11 табл., 9 рис., 38 джерел посилання.

Тема кваліфікаційної роботи – модернізація доменного виробництва: конструкційні аспекти та екологічна безпека технологічного процесу.

Мета роботи – оцінка впливу використанням антрациту як замітника коксу на технологічні показники виплавки чавуну в умовах доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь».

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:

1. Проаналізувати вплив збільшення витрати антрациту в доменних печах №2–5 ПАТ «Запоріжсталь» на протязі 2000–2012 р.р. на основні техніко-економічні показники доменної плавки.

2. Розглянути можливості ефективної заміни коксу антрацитом в умовах доменної печі №2 ПАТ «Запоріжсталь».

Об'єкт дослідження: процес виплавки чавуну з застосуванням антрациту.

Предмет дослідження: вплив використанням антрациту на технологічні показники доменної плавки

Методи дослідження: загальні (емпіричні, комплексні та теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань.

Наукова новизна одержаних результатів: наданні рекомендацій щодо можливості ефективної заміни коксу антрацитом в умовах українських металургійних підприємств.

Практичне значення одержаних результатів: запропонована технологія використання антрациту як замітника коксу при доменній плавці може бути корисною в умовах доменного виробництва провідних українських металургійних підприємств.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідались і обговорювались на 1 конференції.

Ключові слова: КОКС, АНТРАЦИТ, ДОМЕННЕ ВИРОБНИЦТВО, ЧАВУН, ПИЛОВУГІЛЬНЕ ПАЛИВО

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИПЛАВКИ ЧАВУНА.....	10
1.1 Основні поняття доменного виробництва чавуна.....	10
1.1.1 Загальна схема і суть доменного процесу.....	10
1.1.2 Розподіл температур, видалення вологи і розкладання карбонатів	12
1.1.3 Основні фізико-хімічні процеси при доменній плавці чавуна.....	15
1.2 Інтенсифікація доменного процесу.....	21
1.2.1. Сучасні методи інтенсифікації доменного процесу.....	21
1.2.2 Огляд застосування вдування пиловугільного палива при доменній плавці.....	25
1.3 Висновки	29
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	30
2.1 Матеріали дослідження.....	30
2.2 Методика дослідження.....	34
2.3 Висновки.....	35
3 ЗАСТОСУВАННЯ АНТРАЦИТУ ЯК ЗАМІННИКА КОКСУ ПРИ ДОМЕННІЙ ПЛАВЦІ.....	36
3.1 Розробка та освоєння технології доменної плавки з заміною частини коксу антрацитом.....	36
3.1.1 Теоретичні передумови заміни частини коксу антрацитом.....	36
3.1.2 Ресурси вугілля для приготування пиловугільного палива.....	37
3.1.3 Підготовка антрациту до доменної плавки.....	45
3.1.4 Використання антрациту в доменній печі.....	48
3.2 Вплив використанням антрациту як заміника коксу на технологічні показники виплавки чавуну в умовах доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь».....	56

3.3 Висновки.....	63
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	65
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих чинників виробничого середовища доменного цеху.....	64
4.2 Заходи щодо усунення небезпечних та шкідливих чинників виробничого середовища доменного цеху.....	66
4.3 Технічні рішення по виробничій санітарії.....	66
4.4 Електробезпека.....	68
4.5 Пожежна безпека доменного виробництва.....	70
4.6 Розрахунок установки водяного пожежогасіння.....	72
4.7 Висновки.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
ДОДАТКИ.....	81
ДАДАТОК А НАУКОВІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА.....	81

ВСТУП

Потенціал гірничо-металургійного комплексу України базується на наявності достатньої власної сировинної бази, великої кількості виробничих потужностей та високим рівнем науково-технічного потенціалу. Проте останнім часом ряд негативних економічних, виробничих та політичних факторів призвели до занепаду металургійної промисловості країни [1]. Так у формуванні інноваційного потенціалу металургійної галузі ключова роль належить державі, яка має використовувати системні економічні інструменти державного впливу, що відповідають обраному стратегічному інноваційному курсу [2].

До головних причин, що негативно позначаються на металургійному комплексі України слід віднести [3]:

- відсутність інноваційних впроваджень в цілому та сучасних наукових пошуків в металургійній галузі при нераціональному використанні наявного науково-технічного потенціалу, що стало основою низьких темпів модернізації та інноваційної діяльності;

- зменшення частки іноземних інвестицій, що є наслідком несприятливого політико-економічного клімату в країні;

- використання морально та фізично застарілих основних виробничих фондів;

- недостатню увагу з боку держави до металургійного комплексу як однієї з провідних галузей народного господарства, що потребує не тільки окреслення стратегічних напрямів відновлення, але й належної фінансової підтримки;

- недостатній розвиток вітчизняного ринку металопродукції та зменшення купівельної спроможності українських споживачів, що є наслідком застійних тенденцій у металоспоживчих галузях;

- воєнний конфлікт на сході країни та розірвання усталених зв'язків з російськими споживачами та постачальниками;

– з одного боку зростання цін на сировину та енергоресурси й транспортування, а з другого боку зниження світових цін та скорочення світового попиту на продукцію металургійного виробництва, що привело до зменшення чистих прибутків металургійних підприємств;

– загострення екологічних проблем.

На сьогодні серед основних стратегічних напрямків розвитку підприємств чорної металургії слід виділити [4]:

– створення та впровадження новітніх та удосконалених традиційних технологій;

– технологічне переоснащення агломераційного, доменного, сталеплавильного та прокатного виробництв з оновленням основних фондів, підвищення експлуатаційних показників металургійного обладнання та якості металургійної продукції;

– пріоритетний розвиток прокатного виробництва, виготовлення високоякісного металопрокату, конкурентоспроможного на внутрішньому та світовому ринках;

– удосконалення стаціонарних пилоуловлюючих установок та водоочисних споруд з використанням нових технологічних засобів та матеріалів;

– поліпшення екологічного стану діючих виробництв, впровадження екологічно безпечних технологій в основному та допоміжному виробництвах;

– зниження виходу відходів і питомих викидів шкідливих речовин до повітряного та водного басейнів;

– збільшення обсягів та ефективності переробки відходів виробництва на підставі створення та впровадження економічно доцільних технологій;

– забезпечення стимулювання процесів модернізації та технічного переоснащення металургійних підприємств та інші.

Поступово раціональне енерго-та ресурсозбереження виступають основними векторами розвитку металургійної галузі. Так використання вторинних енергетичних (коковий, доменний, конвертерний та феросплавний

гази, енергія природного газу, тепло гарячого агломерату та інше) та матеріальних (металевий брухт, відвальний шлак, пил газоочищення, травильні розчини, діоксид вуглецю та інше) ресурсів є одним з шляхів зниження енергетичної та матеріалоємності металургійної галузі [5].

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИПЛАВКИ ЧАВУНА

1.1 Основні поняття доменного виробництва чавуна

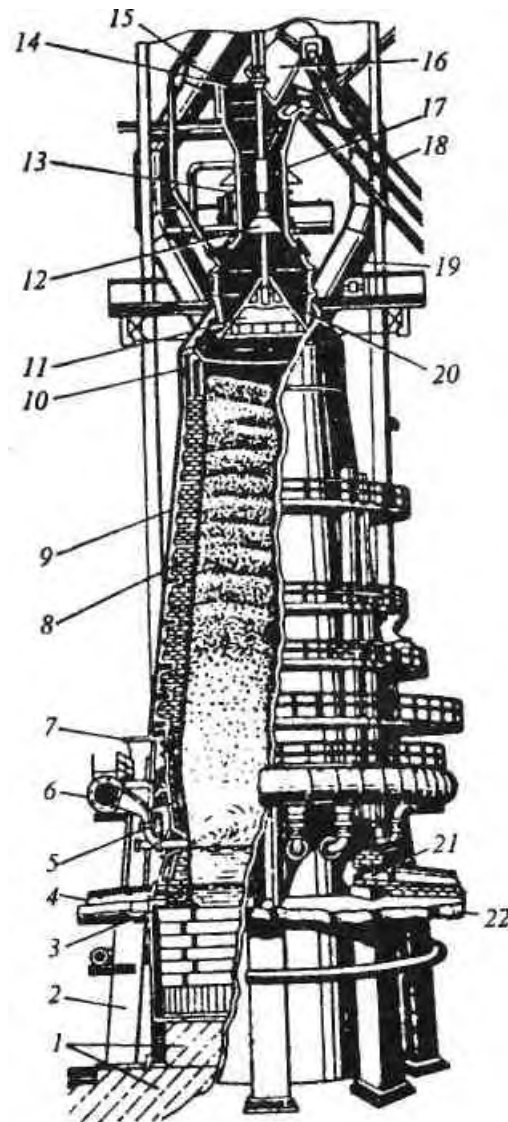
1.1.1 Загальна схема і суть доменного процесу

Доменна піч є потужним і високопродуктивним агрегатом, в якому витрачається величезна кількість шихти і дуття. Сучасна, найбільша по розмірах, доменна піч щодоби витрачає близько 23000 т шихти, 18000 т дуття, 1700 т природного газу і видає 12000 т чавуну, 4000 т шлаку і 27000 т колошникового газу. Таким чином, у великій доменній печі щохвилини виплавляється близько 9 т чавуну. Для забезпечення безперервної подачі і випуску такої великої кількості матеріалів необхідно, щоб конструкції печі були прості і дуже надійні.

Доменна піч – це піч шахтного типу. Згори в піч порціями безперервно завантажують шихтові матеріали – агломерат (окатиші) і кокс, які повільно опускаються вниз; тривалість їх перебування в печі складає 4-6 год. У нижню частину печі (верх горна) через фурми подають дуття - нагріте повітря; у фурмі за рахунок кисню дуття згорає кокс з виділенням тепла, а гарячі продукти згорання рухаються через стовп шихти вгору, нагріваючи її; час перебування газів в печі складає 3–12 с. При опусканні шихти, що нагрівається, в ній з оксидів відновлюється залізо, яке вуглецюється, розплавляється і каплями стікає в горн, формуючи чавун, а оксиди, що не відновилися, в нижній частині печі (низ шахти, розпарення) розплавляються, утворюючи шлак, який також стікає в горн. Накопиченні в горні чавун і шлак, що мають температуру 1450-1500 °С, періодично випускають через чавунні і шлакові льотки.

Загальний вигляд доменної печі показаний на рис. 1.1. Піч спирається на фундамент 1, велика частина якого заглиблена в землю. Зовні піч поміщена в суцільний сталевий кожух 9. Усередині кожуха знаходиться

футерування 8, яка охолоджується холодильниками і які кріпляться до внутрішньої поверхні кожуха. У нижній частині печі (горні) розташовані льотки 3 для випуску чавуну і льотки 21 для випуску шлаку.



1 – фундамент; 2 – колонна; 3 – льотка для випуску чавуну; 4 – чавунні жолоби; 5 – фурмені пристрої; 6 – кільцевий повітропровід; 7 – мараторне кільце кожуха; 8 – футеровка; 9 – сталевий кожух; 10 – колошник; 11 – великий конус; 12 – малий конус; 13 – механізм засипного пристрою, що обертає; 14 – прийомна лійка; 15, 19 – газовідводи; 16 – скип; 17 – воронка; 18 – нахильний міст; 20 – лійка (чаша); 21 – льотка для випуску шлаку; 22 – майданчик

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд доменної печі з двоконусним засипним апаратом

Навколо печі прокладено кільцевий футерований повітропровід 6, в який з повітронагрівачів подається гаряче дуття (повітря); кільцевий повітропровід служить для підведення дуття до розташованих по колу печі фурменним пристроям 5, через які дуття поступає у верхню частину горна. Вище за колошник 10 печі розташовано колошниковий пристрій. Він включає газовідводи 15, 19, які служать для відведення з печі доменного газу; засипний (завантажувальний) апарат і ряд інших механізмів, пов'язаних з завантаженням шихти і відведенням газу. Показані елементи засипного апарату: великий конус 11, що закриває лійку 20; малий конус 12, що закриває лійку 17, і механізм 13, що забезпечує їх обертання; приймальна воронка 14, в яку шихтові матеріали висипають із скіпу 16 шляхом його перекидання, скіп доставляється на колошник по рейках похилого моста 18.

Тяжкість кожуха і футерування верхньої частини печі передається на фундамент через мараторне кільце 7 кожуху і колони 2. Рідкий чавун, що випускається з печі через льотки 3 поступає в жолоби 4, що розташовуються на робочому майданчику 22.

1.1.2 Розподіл температур, видалення вологи і розкладання карбонатів

Розподіл температур в печі. Окрім тепла, що вноситься нагрітим дуттям, основним джерелом тепла для нагріву шихти і газів, розплавлення чавуну і шлаку, забезпечення процесів відновлення і компенсації тепловтрат являється тепло, що виділяється у верхній частині горна при згоранні палива (коксу і що частенько вводяться для заміни частини коксу природного газу, нафтопродуктів і вугільного пилу). Гарячі газоподібні продукти згорання рухаються з горна вгору, віддаючи тепло холодним шихтовим матеріалам, що опускаються вниз, нагріваючи їх, а самі охолоджуються. Тому у міру віддалення від горна до верху температура в печі знижується з 1400–1600 до 200–350 °С на виході з колошника. В той же час, на одному і тому ж

горизонті печі (поперечному перерізі) температура не є постійною і змінюється в досить широких межах. Це пояснюється тим, що гарячі гази, що піднімаються, рухаються по перерізу печі нерівномірно; максимальна кількість газів проходить в ділянках поперечного перерізу з меншим опором шихти і тут спостерігаються найбільші температури.

Він відповідає положенню, коли помірно розвинений потік газів на периферії (у стін) печі і дещо помітніше в осьовій частині. Так посилення периферійного потоку газів викличе збільшення температур у стін печі, а збільшення осьового потоку - просування вверх зони високих температур в осьовій частині печі і навпаки.

Видалення вологи. Шихта, що завантажується в доменну піч, містить гігроскопічну вологу (наприклад, в коксі 0,5–5 %), а іноді вологу гідрату. Гігроскопічна волога легко випаровується на колошнику, і для її видалення не потрібно додаткове тепло, оскільки температура колошникових газів вища за температуру випару вологи.

Волога гідрату з'являється лише при завантаженні в піч залізняка, вона знаходиться в з'єднанні з Fe_2O_3 (у бурому залізняку) або з Al_2O_3 (у каолініті). Ці з'єднання розкладаються при 400-1000 °С із з поглинанням тепла.

Вміст вологи і щільність компонентів шихти наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Вміст вологи і щільність компонентів доменної шихти

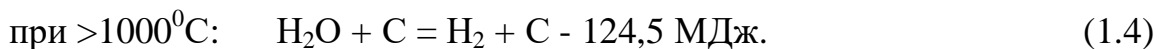
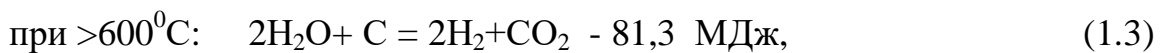
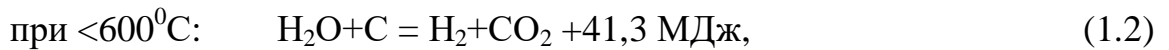
Найменування компонентів шихти	Вміст вологи % (кг/кг)	Щільність, т /м ³	
		Насипна	Штучна
Кокс	2,0-5,0 (0,03)	0,5	0,9
Залізна руда:			
- гематит	2,0-6,0 (0,04)	1,8	4,0
- магнетит	1,0-3,0 (0,02)	1,9	4,2
- бурий залізняк	8,0-21,0 (0,14)	1,7	3,6
Вапняк	1,5-2,5 (0,02)	1,6	2,8
Агломерат	- -	1,75	2,9
Окати	0,5-1,5 (0,01)	2,1	3,6

Кількість вологи, що вноситься у піч з шихтою однієї подачі,

розраховується з формули:

$$\varphi = \sum m_i \cdot \varphi_i. \quad (1.1)$$

Волога, що випарюється з шихти, взаємодіє з вуглецем та його монооксидом по реакціям:



У зв'язку з тим що нині сирі руди майже не використовуються, виділення вологи гідрату помітного впливу на хід плавки не робить.

Розкладання карбонатів. Карбонати в доменну піч вносяться звичайним вапняком у вигляді кальциту – CaCO_3 і магнезиту – MgCO_3 , доломітизованим вапняком – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, шпатовим залізняком (сидеритом) – FeCO_3 і родохрозитом – MnCO_3 .

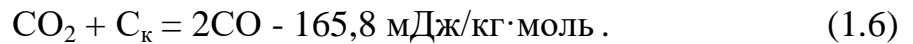
Використання карбонатів в доменній плавці супроводжується їх дисоціацією з поглинанням тепла по загальній реакції:



Тиск дисоціації вищенаведених карбонатів залежить тільки від температури. Формули цієї залежності, щільності і показники дисоціації карбонатів зведені у таблицю 1.2.

При рівності значень тиску дисоціації і тиску газу в печі здійснюється хімічне кипіння при незмінній температурі, яка називається температурою хімічного кипіння.

Диоксид вуглецю CO_2 , що є продуктом розкладу вапняку, при температурі $>1000^\circ\text{C}$ вступає в реакцію з вуглецем коксу:



Таблиця 1.2 – Показники дисоціації карбонатів

Формула карбонату	Рівняння залежності P_{CO_2} від температури (К)	Штучна щільність т/м^3	Ентальпія дисоціації, мДж/моль	Температура хімічного кипіння, К
CaCO_3	$\lg P_{\text{CO}_2} = 9,84 - 9300/T$	2,6-2,8	177,2	1183
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	$\lg P_{\text{CO}_2} = 8,26 - 6405/T$	2,8-2,95	299,0	1053
MgCO_3	$\lg P_{\text{CO}_2} = 9,59 - 5710/T$	2,9-3,2	109,3	880
FeCO_3	$\lg P_{\text{CO}_2} = 10,06 - 5430/T$	3,7-3,9	104,6	700
MnCO_3	$\lg P_{\text{CO}_2} = 4,15 - 3480/T$	3,1-3,7	98,3	760

З метою економії коксу пропонується використовувати вапняк розміром $\leq 50\text{мм}$.

Використання в шихті подрібненого вапняку до розмірів 20–50 мм сприяє економії коксу за рахунок збільшення ступеню розкладу до опускання його в зону з температурою $>1000^\circ\text{C}$ [6–8].

Застосування офлюсованого агломерату (тобто отриманого з добавкою вапняку в шихту агломерації) і повне виведення вапняку з доменної шихти дозволяє економити кокс. При агломерації процес розкладання вапняку забезпечується спалюванням низькосортного палива (коксіку, антрацитового штибу), а не дорогого дефіцитного металургійного коксу.

1.1.3 Основні фізико-хімічні процеси при доменній плавці чавуна

Доменна піч працює за принципом протитечії. Шихтові матеріали – агломерат, кокс та інші – завантажують згори за допомогою засипного (завантажувального) апарату. Назустріч матеріалам, що опускаються, від низу

до верху рухається потік гарячих газів, що утворюються при згоранні палива (коксу), а також природного газу.

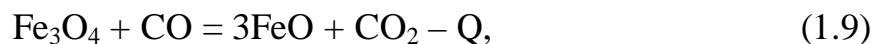
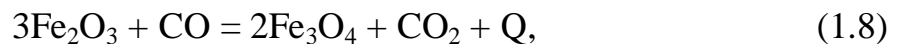
У доменній печі протікають наступні основні процеси.

Відновлення заліза. Цей процес походить послідовно від вищих оксидів до нижчих і далі до чистого металу: Fe_2O_3 - Fe_3O_4 - FeO - Fe .

Головними відновниками заліза в доменній печі є оксид вуглецю (I) і твердий вуглець коксу. Оксид вуглецю (I) утворюється при взаємодії вуглекислого газу з розжареним коксом:



Відновлення оксидом вуглецю називається непрямим відновленням і відбувається за реакцією:



Відновлення Fe_2O_3 починається при порівняно низьких температурах ($400\text{--}500^\circ\text{C}$) у верхній частині шахти печі. У міру опускання рудних матеріалів підвищуються температура і вміст CO в доменних газах; при цьому створюються умови для остаточного відновлення заліза. Ці процеси закінчуються в нижній частині шахти печі при температурах близько $900\text{--}950^\circ\text{C}$.

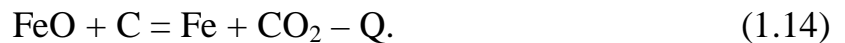
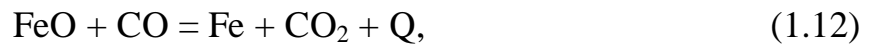
Значення непрямого відновлення дуже велике. Залежно від умов роботи печі оксидом вуглецю CO відновлюється $60\text{--}80\%$ усього заліза. Інша частина заліза відновлюється твердим вуглецем.

Відновлення твердим вуглецем називається прямим відновленням. Воно

відбувається при температурах вище 950–1000⁰C (зона розпарення печі) по реакції:

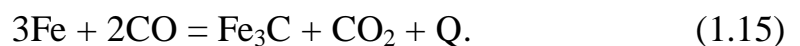


Слід зазначити, що ця реакція відбиває лише кінцевий результат процесу прямого відновлення, який протікає в дві стадії:



Таким чином, при прямому відновленні витрачається тільки вуглець коксу, хоча реагентом, що взаємодіє з FeO, є оксид вуглецю CO. Безпосереднє відновлення оксидів заліза при контакті з вуглецем коксу практично не відбувається.

Вже в шахті доменної печі при температурах вище 400-500⁰C разом з відновленням заліза відбувається і його навуглецювання за рахунок оксиду вуглецю CO за реакцією:



Карбід заліза Fe₃C добре розчиняється в твердому залізі і поступово утворюється сплав заліза з вуглецем. Зі збільшенням вмісту вуглецю температура плавлення сплаву значно знижується і досягає мінімального значення 1147⁰C при 4,3 %. У зонах печі з високими температурами - зазвичай в нижній частині шахти – починається плавлення сплаву. Рідкий сплав - чавун, стікаючи вниз, омиває шматки розжареного коксу і додатково інтенсивно

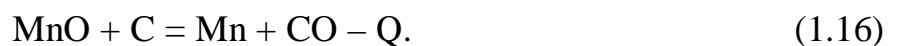
вуглецюється. У ній також розчиняються відновлений марганець, кремній, сірка і інші домішки. Кінцевий склад чавуну встановлюється в горні. При цьому велике значення мають склад, властивості і кількість шлаку.

Відновлення інших елементів. У доменну піч з шихтовими матеріалами потрапляють марганець, кремній, сірка і інші елементи у вигляді різних хімічних сполук. Ці елементи частково або повністю відновлюються і входять до складу чавуну, покращуючи або погіршуючи його властивості.

Постійними корисними домішками чавуну є марганець і кремній, шкідливими – сірка і фосфор.

Марганець – постійна домішка залізняку. При виплавці чавунів з підвищеним вмістом марганцю в доменну піч завантажуються марганцева руда.

Вищі оксиди марганцю відновлюються до оксиду марганцю MnO окислом вуглецю, аналогічно оксидам заліза: $MnO_2 - Mn_2O_3 - Mn_3O_4 - MnO$. Закис марганцю відновлюється твердим вуглецем за реакцією:



Ця реакція протікає при температурах вище $1100\text{ }^{\circ}C$ із з поглинанням тепла. Тому для відновлення марганцю вимагається збільшити витрату коксу і температуру дуття. Наприклад, при виплавці дзеркального чавуну з 10–25 % Mn витрата коксу збільшується в 2–2,5 рази. Значна частина MnO знаходиться у вигляді силікатів, з яких може бути виділена вапном.

Таким чином, додатковою умовою для збільшення міри відновлення марганцю є достатня кількість вапна CaO в шлаку, тобто його підвищена основність.

Кремній знаходиться в порожній породі руди і в золі коксу у вигляді вільного кремнезему SiO_2 або у вигляді силікатів ($SiO_2 \cdot 2CaO$ та інші).

Відновлення кремнію походить з кремнезему SiO_2 за реакцією:



Мабуть, кремній відновлюється з SiO_2 і карбідом заліза Fe_3C .

Ця реакція протікає з поглинанням тепла при температурах не нижче 1450°C . Тому для виплавки чавуну з підвищеним вмістом кремнію необхідно значно збільшувати витрату коксу і застосовувати високотемпературне дуття, збагачене киснем. Для збільшення кількості вільного кремнезему в шлаку необхідно зменшувати в ньому вміст вапна CaO , тобто знижувати його основність.

Інші корисні домішки - нікель, ванадій, титан і так далі – потрапляють в доменну піч у вигляді домішок залізняку. При доменній плавці нікель відновлюється і переходить в чавун повністю, хром - на 85–95 %, ванадій – на 70–80 %.

Фосфор – це шкідлива домішка залізняку знаходиться в них головним чином у вигляді $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{CaO}$. Відновлення фосфору відбувається окислом вуглецю CO , воднем, а також твердим вуглецем. Увесь фосфор, внесений шихтою, відновлюється і переходить в чавун практично повністю.

Сірка особливо шкідлива домішка в чавуні (а також в сталі). Основна кількість сірки вноситься коксом, частина – залізняком. У доменній печі 10–20 % сірки віддаляється у вигляді з'єднань. Інша частина сірки переходить в чавун і в шлак у вигляді сульфідів FeS , CaS та інші. Сульфід заліза FeS добре розчиняється в чавуні.

В умовах доменної плавки основним способом десульфурації, тобто видалення сірки з металу, являється утворення сульфїду кальцію CaS за реакцією:



Сульфід кальцію CaS не розчинний в чавуні і знаходиться в шлаку. Найінтенсивніше ця реакція протікає при проходженні крапель чавуну через шар шлаку.

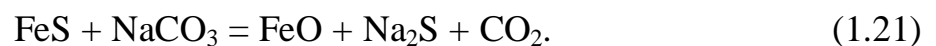
З цієї реакції виходить, що однією з основних умов видалення сірки з металу є достатня кількість вапна CaO в шлаку. Видаленню сірки сприяє висока температура в горні; з нагрівом зменшується в'язкість шлаку, що покращує дифузію сульфідів і сприяє відновленню FeO.

Частина сірки віддаляється за допомогою MgO (що завжди міститься в шлаку), а також марганцю за реакцією:



Сульфід магнію MgS не розчинний в металі, а сульфід марганцю MnS розчиняється трохи. Широке поширення отримало позапічне видалення сірки з чавуну. При витримці його в ковшах-чавуновозах і в міксері частина сірки може переходити з металу в шлак у вигляді сульфиду марганцю MnS, оскільки розчинність цього з'єднання в металі при пониженні температури зменшується. Такий спосіб дає добрі результати при вмісті в чавуні більше 2% Mn.

Одним з випробуваних в промислових масштабах способів позапічного видалення сірки є обробка чавуну у випускному жолобі або в чавуновозі содою NaCO₃ (1 % від маси чавуну). Сірка віддаляється за реакцією:



Сірчистий натрій Na₂S, що утворюється при цьому, переходить в шлак. Нині проводять дослідження роботи по дослідженню інших недефіцитних і дешевих реагентів. Шлакоутворення починається приблизно в розпаренні печі.

Первинний шлак утворюється в результаті сплаву CaO, SiO₂, Al₂O₃ і інших оксидів, що знаходяться у складі флюсу і порожньої породи руди. При певних співвідношеннях по масі ці тугоплавкі оксиди можуть утворювати

легкоплавкі суміші – сплави з $T_{пл} = 1150-1200^{\circ}\text{C}$. Стікаючи вниз і накопичуючись в горні, шлак істотно змінює свій склад. В результаті взаємодії з розплавленим чавуном і залишками незгорілого коксу в шлаку відновлюються оксиди заліза і марганцю, в ньому розчиняються FeS, MnS, зола коксу і так далі. Хімічний склад шлаку визначає склад чавуну і тому при виплавці передільних, ливарних і інших чавунів завжди підбирають шлак відповідного складу. Типовий склад шлаку: 40–50 % CaO; 38–40 % SiO₂; 7–10 % Al₂O₃.

1.2 Інтенсифікація доменного процесу

1.2.1 Сучасні методи інтенсифікації доменного процесу

Під інтенсифікацією доменного процесу розуміють збільшення швидкості його протікання. Мірою інтенсивності ходу доменної печі є кількість чавуну, що отримується в одиницю часу з розрахунку на одиницю корисного об'єму доменної печі. В умовах виробництва прийнято користуватися зворотною величиною – корисним об'ємом печі, що витрачається в течії доби на виплавку 1 т чавуну. Цей показник називається коефіцієнтом використання корисного об'єму доменної печі і визначається як частка від ділення корисного об'єму печі $V_{кор}$ (м³) на добову продуктивність печі T (т) чавуну/доб. Чим менше цей показник, по абсолютному значенню, тим інтенсивніше протікає процес, інтенсивніше хід доменної печі.

Збільшити інтенсивність ходу доменної печі можна двома шляхами:

1. Створення умов, при яких в горн доменної печі в одиницю часу можна подати більшу кількість дуття, що витрачається на згорання вуглецю пального.
2. Створення умов, що забезпечують зниження витрати коксу на одиницю чавуну, що виплавляється, якщо кількість дуття, що поступає в горн в одиницю часу, не знижується або знижується в меншій мірі, чим витрата коксу.

При збільшенні кількості дуття, що подається в горн в одиницю часу, відповідно збільшується кількість вуглецю, що згорає в одиницю часу, а отже, збільшується і продуктивність печі. При зменшенні відносної витрати пального і незмінній кількості дуття продуктивність печі також зростає внаслідок збільшення рудного навантаження на кокс. Найбільш висока міра інтенсифікації процесу досягається, коли одночасно зі збільшенням кількості дуття є можливість зменшити і відносну витрату пального.

Збільшення інтенсивності ходу доменної печі шляхом збільшення витрати дуття в одиницю часу припускає поліпшення газодинаміки процесу. Це може бути досягнуто підвищенням міцності агломерату, відсіванням дрібних фракцій і поліпшенням однорідності гранулометричного складу шихтових матеріалів, підвищенням тиску газів в робочому просторі печі, зниженням відносного виходу шлаку і поліпшенням його фізичних властивостей.

Збільшення інтенсивності ходу доменної печі шляхом зниження відносної витрати коксу припускає зменшення теплових витрат на процес і застосування заміників коксу в ролі теплоносія і відновника.

Основними методами інтенсифікації доменного процесу є:

1. Вдосконалення способів підготовки і поліпшення якості сирих матеріалів.
2. Високотемпературний нагрів дуття.
3. Зволоження дуття.
4. Збагачення дуття киснем.
5. Вдування в горн добавок.
6. Комбінування дуття.
7. Підвищення тиску газів в робочому просторі доменної печі.

Найбільш важливою за своїм значенням являється підготовка сировини до плавки.

Нагрів дуття. Уперше нагріте дуття в доменному виробництві застосували в 1829 р. Незважаючи на порівняно невисокий нагрів дуття (150 °С), показники роботи печі значно покращали: відносна витрата

пального зменшилася на 30 %, продуктивність печі зросла, з'явилася можливість збільшити кількість дуття. При цьому витрата горючого на нагрів дуття була набагато нижче отриманої економії. Згодом застосування більше нагрітого дуття (350–400 °С) на коксових доменних печах дозволило зменшити відносну витрату коксу на 25–35 %. Нині дуття нагрівають до 1100–1200 °С і вище.

За всю історію існування доменного виробництва жоден захід не дав такого зниження витрати пального, як застосування нагрітого дуття.

Зволоження дуття. Природна вологість повітря коливається в значних межах як в течії доби, так і по часах року. Коливання вологості дуття викликають зміни в тепловому і температурному режимі горна і в ході відновлення, що нерідко призводить до розладів ходу печі, погіршуючи техніко-економічні показники.

Усунути коливання природної вологості можна двома способами: осушенням дуття і зволоженням дуття в таких межах, щоб вологість його була дещо вищий за природну, але постійною в часі.

При збагаченні дуття киснем змінюються наступні показники:

1. Зменшується витрата дуття на одиницю спалюваного у фурм вуглецю.
2. Зменшується кількість горнового газу на одиницю спалюваного у фурм вуглецю.
3. Підвищується концентрація оксиду вуглецю в горновому газі.
4. Значно зростає температура в зоні горіння.

При збагаченні дуття киснем знижується перепад тиску газів між горном і колошником внаслідок зменшення виходу горнового газу на одиницю спалюваного вуглецю і швидкості руху газів в стовпі шихтових матеріалів.

Вдування в горн природного газу і інших добавок до дуття.

При вдуванні природного газу у кількості 70–90 м³ на 1 т чавуну витрата коксу зменшується на 10–14 %. Економія коксу при вдуванні

природного газу досягається за рахунок:

1. Збільшення непрямого і зменшення прямого відновлення.

2. Заміни частини вуглецю коксу вуглецю природного газу.

3. Зменшення приходу сірки в піч, основності і виходу шлаку внаслідок зменшення витрати коксу, що викликається першими двома чинниками.

Комбіноване дуття. Комбінованим прийнято називати дуття, що включає добавки як у вигляді окисників (кисень, пара), так і відновників (природний газ, коксовий газ, мазут пиловугільне паливо та ін.). Найбільше поширення отримало поєднання збагачення дуття киснем з вдуванням природного газу.

Основний позитивний ефект при вдуванні природного газу полягає в значному скороченні витрати коксу, а при збагаченні дуття киснем – у збільшенні продуктивності печі. Але досягнення можливого ефекту при вдуванні природного газу обмежується його негативними сторонами – збільшенням кількості горнового газу з пониженням температури в горні, а досягнення можливого ефекту збагаченого киснем дуття обмежується, навпаки, надмірним підвищенням температури в горні.

Підвищення тиску газу. Ідея роботи доменної печі на підвищеному тиску газів була висунена з метою поліпшення відновної здатності газів. Проте позитивна дія підвищеного тиску проявляється не в поліпшенні відновної здатності газів, а в поліпшенні газодинамічного режиму доменної печі, при якому можливе значне підвищення продуктивності і зниження витрати коксу. Підвищення тиску газу усередині доменної печі досягається шляхом пережиму струменя газу за допомогою спеціального дросельного пристрою, встановленого в газопроводі очищеного від пилу газу. Позитивна дія підвищеного тиску газу полягає в тому, що зі збільшенням тиску зменшується об'єм газу і його швидкість, внаслідок чого зменшуються підйомна сила газу і перепад тиску газу між горном і колошником. Це дозволяє збільшувати масову кількість дуття, не перевищуючи його критичного об'єму.

1.2.2 Огляд застосування вдуванням пиловугільного палива при доменній плавці

Перші українські дослідження по вдуванню пиловугільного палива в доменну піч були проведені в 1948 році на доменній печі об'ємом 427 м³ заводу ім. Дзержинського в Дніпродзержинську під керівництвом професора В. І. Логінова [9]. Підготовлений вугільний пил підвозився до печі в цистернах, звідки перекачувався в циклон, що вміщував 13–14 тонн пилу. Пил подавався в піч через форсунки, встановлені в чотирьох з дев'яти фурм. При одночасній роботі трьох форсунок максимальна подача ПВП досягала 7 т/год. Оскільки цистерна спорожнялася впродовж 30-60 хв., то безперервна подача пилу в піч тривала не більше за одну годину. В результаті дослідів встановлена можливість та цілесобразність вдування ПВП в доменну піч, досягнута швидкість вдування в горн печі до 20 т/год. Показано, що вдування вугільного пилу в кількості 5-6% загальної витрати коксу дозволяє зменшити останній приблизно на таку ж величину. При вдуванні вугільного пилу з вмістом золи 16–18% і 1,7–3% сірки, якість чавуну не погіршилась.

У 1966 році на ВАТ «Запоріжсталь» була побудована розроблена за технологічним завданням ІЧМ і проекту Укргіпромеца перша в Україні установка для вдування пиловугільного палива в горн доменної печі № 3 об'ємом 1300 м³ (ініціатором і керівником цих розробок був академік З.І. Некрасов) [10]. Вугільний пил подавався від системи пилоприготування одного з котлів ТЕЦ. Пиловугільне паливо фракції менше 0,088 мм подається двокамерним пневмонасосом по двох пилопроводам в циклони осаджувальних пристроїв, де ПВП відділяється від транспортуючого повітря, і далі до розподільних пристроїв у доменної печі, звідки спрямовується до шістнадцяти фурмам доменної печі. При випробуваннях було виявлено нерівномірний розподіл ПВП по колу доменної печі, що зажадало удосконалення системи розподілу палива по фурмам [11].

У 1967 р. в англійському журналі [9] опублікована стаття про

застосування ПВП як майбутнього джерела енергії для виробництва чавуну, де вказано, що першими встановили можливість використання вугілля в доменній плавці вчені СРСР. На початок 1966 р. з вдуванням ПВП у світі працювали 8 ДП – одна в СРСР, 4 в США, 2 у Франції і одна в Англії.

У 1978 році З.І. Некрасовим із співробітниками ІЧМ опубліковані результати досліджень і вдосконалення технології доменної плавки при використанні ПВП, природного газу і збагаченого киснем дуття [9, 12]. Показано, що при вдуванні ПВП до 70 кг на тонну чавуну коефіцієнт заміни коксу склав 0,88 кг/кг Трирічна промислова експлуатація установки ІЧМ для вдування ПВП підтвердила надійність в роботі і забезпечення подачі вугільного пилу в горн доменної печі в межах від 40 до 200 т/добу.

У 1980 р. завершено будівництво на Донецькому метзаводі промислової установки для вдування ПВП в доменні печі № 1 і № 2 Донецького металургійного заводу. Застосування цих установок дозволило в 2002–2010 р.р. забезпечити виплавку чавуну з вдуванням ПВП 120 кг/т чавуну, зменшити витрату коксу з 550 до 420 кг/т, і витрату природного газу на 80%. Це досягнуто шляхом поліпшення якості коксу і використання концентрату вугілля марки «П» для вдування в горн ПВП. Застосування коксу поліпшеної якості дозволило на ДП-2 Донецького металургійного заводу збільшити витрату ПВП до 165–170 кг/т чавуну без вдування природного газу при застосуванні ПВП з 70 % вугілля марки «П» і 30 % вугілля марки «Г». Слід зауважити, що досвід вдування ПВП накопичений на доменних печах Донецького металургійного заводу малого об'єму близько 1000 м³, оснащених конусними завантажувальними пристроями, з обмеженими можливостями управління розподілом шихти і газів по радіусу печей. Мабуть з цієї причини в роботах С. Л. Ярошевського та ін. [13, 14] питання управління розподілом шихти і газів по перерізу печі не розглядаються. В той же час в зарубіжних країнах освоєння технології плавки із застосуванням ПВП ведеться на печах більшого об'єму, оснащених безконусними завантажувальними пристроями, що істотно збільшує можливості управління процесом.

У роботі [15] виконаний аналіз досвіду застосування ПВП на Донецькому металургійному заводі і металургійних заводах Європи, Китаю і України в 1980–2009 рр. показано, що хоча перший патент на доменну плавку із застосуванням ПВП був виданий ще в 1831 р., перші дослідження, досліди і реалізація технології почалися тільки в шестидесятих роках минулого століття. Представлені технологічні вимоги до якості шихтових матеріалів і вугілля для вдування пилу в ДП, показано, що для ефективного використання ПВП потрібне застосування високоякісного коксу, збільшення температури дуття і збагачення його киснем. Недоліком представлених в роботах [16, 17] матеріалів розробок і рекомендацій являється їх жорстка прив'язка до умов роботи доменних печей малого об'єму, оснащених конусними ЗУ, що утрудняє їх використання і поширення на інших заводах України.

У 2010 р. на Алчевському металургійному комбінаті введені в експлуатацію установки для вдування ПВП на доменних печах № 1 об'ємом 3000 м³, оснащених лотковим БЗУ і № 5 об'ємом 1719 м³ з конусним ЗУ, продовжується будівництво нової доменної печі об'ємом 4440 м³, яка буде оснащена безконусним ЗУ з лотковим розподільником і установкою для вдування ПВП. Оцінка першого досвіду освоєння технології плавки з вдуванням ПВП на ДП №1 і №5 АМК показала, що ДП №5 меншого об'єму з конусним ЗУ працює стабільніше при витраті ПВП 137 кг на тонну і більшій витраті коксу високої якості 421,9 кг/т чавуну, а ДП-1 більшого об'єму, оснащена БЗУ, працює з витратою ПВП 160 кг/т і витратою коксу гіршої якості 396,7 кг/т, але з недостатньо стабільним виконанням плану по виробництву чавуну на рівні 95,2 %. Це підтверджує необхідність аналізу і вдосконалення технології плавки при вдуванні ПВП на ДП-1 і ДП-5. Тут слід реалізувати нові досконаліші прийоми контролю і управління розподілу шихти, газів і тепла по перерізу і висоті доменної печі.

Для успішного освоєння технології доменної плавки із застосуванням пиловугільного палива на металургійних заводах України, окрім вдосконалення шихтових умов і вибору вугілля для пиловдування, необхідно

розробляти прийоми управління тепловим станом доменної плавки в горні і по усій висоті печі, засоби контролю і способи управління розподілом шихти і газів в доменних печах різного об'єму, оснащених сучасними завантажувальними пристроями [18].

Найважливішим перспективним напрямом розвитку і вдосконалення доменного виробництва є розроблене і реалізоване вченими ІЧМ на доменних печах України і Росії будівництво доменних печей великого об'єму (ДП-9 ВАТ «Криворіжсталь» (на сьогодні «АрселорМіттал Кривий Ріг»), ДП-5 ПАТ «Северосталь» та ДП-6 Групи Новоліпецький металургійний комбінат) і оснащення їх сучасними безконусними завантажувальними пристроями [19]. Найактивніше і оперативний цей напрям розвитку і підвищення економічної ефективності доменного виробництва було реалізовано в Японії [20], де з 1965 до 1991 року середній об'єм доменних печей збільшений з 1000 м³ до 3000 м³, а максимальний об'єм з 2000 м³ до 5700 м³. При цьому практично усі нові доменні печі оснащувалися безконусними завантажувальними пристроями, установками для вдування ПВП і сучасними засобами контролю процесу плавки. В результаті радикальної зміни об'єму доменних печей і зменшення їх кількості з 70 до 40, питома виплавка чавуну на одного працюючого в доменному виробництві Японії збільшилася з 500 т/людину у рік до 1600 т/людину. Цей напрям активно реалізується в Німеччині і інших країнах, його реалізацію необхідно активізувати на Україні. Слід звернути увагу на ту обставину, що радикальне зменшення кількості доменних печей істотно впливає на кількість установок для вдування ПВП і на чисельність персоналу в доменних цехах. З цих міркувань прийнятий в Японії і Європі стратегічний підхід до модернізації і удосконалення устаткування доменних цехів з метою зменшення енергетичних і трудових витрат, утилізації газів, що відходять, тепла і шлаків, на нашу думку, найбільш ефективний і доцільний [20–23].

За останні сорок років кількість наявних доменних печей (тридцять дев'ять печей) в Україні практично залишається незмінною, а в експлуатації в 2009 році знаходилися тридцять три доменних печі із загальним корисним

об'ємом 55908 м³, з яких шість доменних печей оснащено БЗУ, а чотири печі знаходилися на капітальному ремонті. Одним з найважливіших завдань металургів України являється збільшення внутрішнього споживання металопродукції [24], для чого необхідно отримувати високоякісну вітчизняну кінцеву продукцію.

Разом з дослідженнями і вдосконаленням технології доменної плавки з використанням ПВП ведуться розробки та дослідження по застосуванню альтернативних енергозберігаючих технологій з використанням інших енергоносіїв [25].

1.3 Висновки

1. Проаналізовано сучасні методи інтенсифікації доменного процесу та розглянуто аспекти технології доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

Вихідними матеріалами в доменному виробництві є (рис. 2.1):

- залізна руда;
- марганцева руда;
- флюси;
- кам'яновугільний кокс;
- агломерат;
- окотиші.

У якості заміника кокса пропонується використовувати антрацит (рис. 2.2) стандартної якості SG: волога – мах 45 %; фосфор 0,02 %; сірка – мах 1 %; зола – мах 20 %; летучі речовини – мах 10 %; вуглець, пов'язаний – min 73 %.



Рисунок 2.2 – Антрацит



а



б



в



г



д



е

а – залізна руда; б – марганцева руда; в – флюс (вапняк);

г – кам'яновугільний кокс; д – агломерат; е – окотиші

Рисунок 2.1 – Вихідні матеріали доменного виробництва [26]

В умовах доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь» розглядається технологія виплавки чавуна на печях №2-5 корисним об'ємом 1513 м^3 кожна (рис. 2.3). Структура виробництва приведена на рис. 2.4. За допомогою доменного виробництва щорічно виплавляється близько 3,8 млн. т чавуну/рік. Відмінною особливістю чавуну виробництва ПАТ «Запоріжсталь» є низький вміст у ньому сірки та фосфору.





Рисунок 2.3 – Доменна піч №2 в умовах ПАТ «Запоріжсталь»



Рисунок 2.4 – Структура виробництва в умовах ПАТ «Запоріжсталь» [27]

2.2 Методика дослідження

У роботі застосовувалися загальні (емпіричні, комплексні та теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань. Так при узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з доменного виробництва використовувався комплексний підхід.

Дослідження хімічного складу компонентів шихти для виплавки чавуна та рідкого чавуну проводили за допомогою хімічного аналізу. Визначення гранулометричного складу компонентів шихти проводили методом розсіювання згідно з ДСТУ ISO 4701:2019 [28]. Визначення вмісту загального заліза проводили згідно з ДСТУ 8811.1:2018 [29]. Вологість компонентів шихти визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-250:2011 [30]. Міцність чавуну визначали механічним методом згідно з ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [31].

У дослідженнях розглядався вплив витрати антрациту на наступні

показники: зміну рудного навантаження на кокс; температуру дуття; витрату природного газу; вміст кремнію в чавуні; масу рудної подачі.

При обробці експериментальних даних впливу витрати антрациту на вище зазначені показники проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

2.3 Висновки

1. Запропоновано методику дослідження можливості збільшення витрати антрациту як замітника коксу з 25 до 55 кг/т.

3 ЗАСТОСУВАННЯ АНТРАЦИТУ ЯК ЗАМІННИКА КОКСУ ПРИ ДОМЕННІЙ ПЛАВЦІ

3.1 Розробка та освоєння технології доменної плавки з заміною частини коксу антрацитом

3.1.1 Теоретичні передумови заміни частини коксу антрацитом

Позитивні результати заміни коксу кусковим вугіллям досягалися за різних умов плавки [14], проте протягом достатньо коротких періодів. В той же час відомо, що ускладнення технології пов'язані з накопиченням негативних явищ в ході тривалого функціонування процесів (руйнування шматків з міграцією продуктів руйнування в міжкускових порожнечах, шлаку та ін.).

Подолання цих ускладнень вимагає безперервного відстеження параметрів ходу плавки і підстроювання їх до умов, що змінюються [15]. Такий підхід не був поки реалізований. Крім того, при виборі параметрів завантаження і складу завантаженої шихти зазвичай враховують поведінку матеріалів в шахті, хоча основний вплив продукти руйнування коксу і вугілля надають в області коксової насадки.

З метою вивчення цього питання раніше вивчений комплекс високотемпературних властивостей коксу і вугілля в насадці [16] і показана можливість за всіх умов і різної якості вугілля ефективно управляти процесом фільтрації розплавів через насадку шляхом підбору матеріалів різної відносності, окисленості і основності із завантаженням їх в задані зони печі. Це дозволяє уникнути небажаних наслідків накопичення дрібних фракцій вугілля в коксовій насадці.

Вказаний системний підхід до розробки технології заміни частини коксу вугіллям був покладений в основу довготривалої програми реалізації даної технології на ВАТ «Криворіжсталь» (на сьогодні «АрселорМіттал

Кривий Ріг»), НМетАУ і ІЧМ НАН України.

Програма включала комплекс питань спеціальної підготовки вугілля, способи завантаження його в доменну піч і поєднання із залізородними матеріалами, що володіють потрібними для вирішення поставленого завдання властивостями, безперервне відстеження ходу процесів плавки, складу і температури чавуну і шлаку з виявленням тренда процесів і підбором параметрів для досягнення цільових значень показників доменної плавки.

При використанні антрациту прийнятий спосіб його завантаження спільно із залізородною частиною шихти, що виключає «засмічення» коксових шарів при руйнуванні вугілля і сприяє взаємодії вугільної дрібниці, що утворюється, з киснем шихти. При цьому, проте, зменшується товщина коксових шарів, що може ускладнити газодинамічну характеристику зони розм'якшення – плавлення за рахунок скорочення площі «кокових вікон або віддушів».

В ході спостережень встановлено, що для конкретних технологічних і сировинних умов існує мінімальна величина подачі, що забезпечує нормальну фільтрацію газів через «кокові вікна». Зменшення її ускладнює хід процесів і приводить до нестійкості газодинамічного і теплового режимів плавки. Через це при значному скороченні питомої витрати коксу з будь-якої причини потрібне відповідне збільшення розміру подачі, яке збереже необхідну площу «кокових вікон».

При заміні коксу антрацитом необхідну величину подачі визначали за формулою:

$$MP > MP_6 - K_6 / (K_6 - U \cdot K_3) \quad (3.1)$$

де MP , MP_6 – маса кокової подачі відповідно в режимах із заміною коксу вугіллям і в базовому, т;

K_6 – питома витрата коксу в базовому режимі, кг/т чавуну;

U – кількість поданого вугілля на заміну коксу, кг/т чавуну;

K_3 – коефіцієнт заміни коксу вугіллям, кг/кг.

Масу коксової подачі в базовому режимі МП₆ визначали експериментально на кожній доменній печі і уточнювали у міру зміни технології. При початковій масі коксової подачі, наприклад 10 т, збільшення витрати вугілля до 50 і 100 кг/т чавуну вимагає збільшення маси подачі щонайменше до 11 і 13 т відповідно. Для збільшення розміру подач на доменних печах цеху № 1 ВАТ «Криворіжсталь» при існуючих об'ємах скипів застосували спосіб завантаження з набором трьох-шести скипів на малий конус. При цьому скипи коксу і залізорудних матеріалів кожної подачі набирали роздільно, наприклад, ААА↓ ККК↓, АААА↓, КККК↓, ААААА↓, ККККК↓ так далі. Це привело до збільшення маси коксу в кожній подачі і відповідно площі «кокових вікон» в зоні пластичного стану.

Вугілля слід завантажувати в скип із залізорудними матеріалами забезпечуючи їх змішування в співвідношенні більше 6 т залізорудних матеріалів на 1 т вугілля. Це сприяє витрачання основної маси вугільної дрібниці на процеси прямого відновлення залізорудних матеріалів при недопущенні приходу її в горн, що знижує вірогідність захарачення горну.

Технологія подачі збагаченого антрациту в доменну піч включає: на доменній печі в звичайному режимі завантажують сировину по циклічній системі 4КААК↓, ААКК↓, на рівень засипу 1,75 м, маса рудної частини в середньому 37,4 т, при рудному навантаженні 3,46 т/т (маса коксу в подачу 10,8 т). На наступному етапі переводять піч на завантаження роздільними подачами залізорудних матеріалів і коксу за системою АААА↓, КККК↓ на рівень засипу 1,5м.

За формулою (3.1) визначали мінімально допустиму подачу коксу при заміні його вугіллям, наприклад, 40, 80 і 120 кг/т чавуну, що складе відповідно 11,5; 12,3; 13,2 т. Маса антрациту в подачу при його витраті 20, 40, 60 і 80 кг/т чавуну рівна 0,85; 1,7; 2,5 і 3,4 т при ваговому співвідношенні з агломератом 28,5–114. При збільшенні подачі вугілля до 5, 7 і 14 т теоретично питому витрату вугілля можна довести до 115, 160 і 320 кг/т чавуну, при цьому вагове співвідношення суміші агломерату з вугіллям в кожній подачі складе 6,9

– 19,4, але для цього треба відпрацювати технологію змішування вугілля із залізорудними матеріалами і розподілу його по радіусу колошника печі. При коливаннях рудної частини 84–97 т в подачу це співвідношення рівне або більше 6 т залізорудних матеріалів на 1 т вугілля. Вказані маси в 5, 7 і 14 т вугілля в суміші з агломератом при чотирьохскипової системі завантаження вміщаються в скип, що має корисний об'єм 17 м^3 і вантажопідйомність 35 т.

Основними видами кускового палива в доменній плавці протягом всієї історії були деревне вугілля, антрацит і кокс.

Окрім функції енергоносія (теплоносія і відновника) кускове паливо виконує функцію твердої насадки в зоні розм'якшення і плавлення залізовмісних матеріалів. Вказана функція, на відміну від першої, не може замінюватися іншими видами палива, а її роль зростає у міру скорочення загальної витрати палива.

Крім властивостей, традиційно використовуваних при аналізі кускових палив (хімічний склад, реакційні властивості, кусковатість, міцність в умовах доменної плавки), при розгляді характеру функціонування в насадці важливе значення має насипна щільність. Роль цього параметра визначається тим, що від нього залежить характер акумуляції тепла в об'ємі горна і відповідно теплова реакція системи коливання приходу тепла з газом і споживання його продуктами плавки: чим більше насипна щільність (маса одиниці об'єму) насадки, тим більше вона акумулює тепло і більше гасить коливання приходу і витрати тепла в горні. В результаті цього нагрів продуктів плавки стійкіший.

Вивчення динамічних характеристик доменних печей показало [7], що високочастотні коливання з періодом менше 1–2 годин при невеликій амплітуді (1–2 % від загального приходу тепла) практично повністю гасяться в насадці, а коливання нижчої частоти частково пропускаються і приводять до коливань температури і складу продуктів плавки.

Гасіння коливань в насадці дозволяє при однаковій витраті палива і відповідно при постійній висоті насадки отримувати вищий нагрів продуктів плавки.

У разі збільшення коливань для отримання такого ж нагріву потрібно збільшити висоту насадки і відповідно витрату палива для запобігання попаданням в критичну область похолодання. При цьому надлишок тепла витрачається більшою мірою на відновлення кремнію, оскільки зв'язок між вмістом кремнію і температурою продуктів плавки близький до експоненціального [17]: при вмісті кремнію в чавуні до 0,8 % його збільшення складає 0,05–0,10 % на кожних 10 °С додаткової температури чавуну, а при вищому абсолютному вмісті кремнію збільшення складає 0,15–0,25 % на кожних 10 °С додаткової температури чавуну.

Таким чином, роль насадки як акумулятора тепла вельми істотна і залежить від властивостей матеріалу насадки. Для трьох даних видів палива вказані властивості різні. Маса 1 м³ деревного вугілля складає 0,15–0,20 кг, коксу – 0,40–0,55 кг, антрациту – 0,8–0,9 кг [10]. Через це і інерційні властивості насадки різні: у коксу вони в 2,5–3 рази більше, ніж у деревного вугілля і в 2 рази менше, ніж у антрациту.

Вплив цих властивостей на стійкість нагріву горна, позначений М.О. Павловим як зосередження "жару в горні», який в коксовій і антрацитній плавці більше, ніж в деревеновугільній. Відповідно більше і температура продуктів плавки [18].

А.Н. Рамм на основі відомого досвіду приймає для розрахунків температуру чавуну деревеновугільної плавки на 5–10 % меншою, ніж у разі коксівної [20]. Недавній досвід роботи доменних печей Бразилії на деревному вугіллі показав, що температура чавуну нижча, ніж при коксовій плавці, на 50 °С.

Викладені передумови дозволяють вважати, що результати роботи доменних печей ВАТ «Криворіжсталь» при збільшенні нагріву продуктів плавки та заміні частини коксу антрацитом не є випадковими, а цілком обґрунтованими.

3.1.2 Ресурси вугілля для приготування пиловугільного палива

У 2004 р. у світі для виробництва пиловугільного палива (ПВП) для доменних печей використано близько 50 млн. т вугілля, як правило, наступних марок: Г, А, П.

Теоретичні розрахунки і світовий досвід показують, що для виробництва ПВП найефективніше використовувати вугілля з низьким вмістом золи і сірки. Як правило, рівень цих показників має бути нижче за вміст золи і сірки у використовуваному на підприємстві коксі.

Вміст летких в ПВП може змінюватися в широких межах і визначається, передусім, кон'юнктурою цін і ефективністю застосування вугілля в конкретних технологічних умовах.

Для приготування ПВП доцільно використовувати вугілля і їх концентрати, які непридатні (малоприсадатні) для виробництва коксу.

На підставі вітчизняного і зарубіжного досвіду для приготування ПВП рекомендуються вугілля і їх концентрати з такими характеристиками: вміст золи і сірки – відповідно до 10–12% і 1,5–2,0%; вологість – до 10–12%; крупність – до 50–80 мм.

Відповідно до вищезгаданих вимог і існуючого стандарту ДСТУ 3472-96 в умовах України для приготування ПВП можуть бути використані вугілля і їх концентрати наступних марок: Т, А, Г і в меншій мірі – Д, ДГ. Найбільш відповідним є вугілля і їх концентрати марок П, А і Г (остання при дотриманні додаткових заходів в процесі підготовки і використання ПВП).

Пиловугільне паливо, що вдувається в доменні печі, зазвичай характеризується відсотковим вмістом якоїсь певної фракції або середнім розміром часток.

Розмір часток вугільного пилу істотним чином впливає на час її згорання у фурменій зоні доменної печі.

Найбільш поширеною методикою розрахунку часу горіння вугільних часток є метод ВТІ [17]. Він базується на емпіричних формулах, отриманих для

умов горіння поодиноких часток, і полягає у визначенні протікання окремих стадій процесу горіння (їх чотири – прогрівання часток до займання летких, вигорання летких, прогрівання коксового залишку до займання і вигорання коксового залишку), значення яких потім підсумовуються.

Нижче приведені узагальнені формули для розрахунку часу протікання цих стадій :

$$t_1 = k_1 \times 5,3 \times 10^{14} \times T_A^{-4} \times d^{0,8} , \quad (3.2)$$

$$t_2 = k_2 \times 0,5 \times 10^6 \times d^2 , \quad (3.3)$$

$$t_3 = k_3 \times 5,36 \times 10^7 \times T_G^{-1,2} \times d^{1,5} , \quad (3.4)$$

$$t_4 = k_4 \times 2,21 \times 10^8 \times (100 - A_C) / 100 \times r_K \times d^{1,5} / T_A^{0,9} / O_2 . \quad (3.5)$$

де t_1, t_2, t_3, t_4 – час прогрівання часток до займання летких, вигорання летких, прогрівання і вигорання коксового залишку відповідно, с;

k_1, k_2, k_3, k_4 – дослідні коефіцієнти, залежні від марки вугілля;

T_T – температура довкілля, К;

d – середній початковий розмір частки, м;

A_C – зольність коксового залишку, м³/м³;

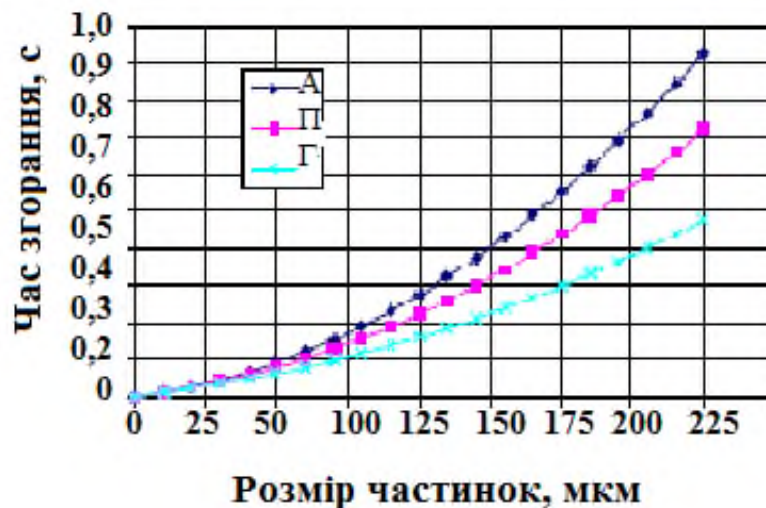
O_2 – об'ємна концентрація кисню, долі;

ρ_k – уявна щільність коксового залишку, кг/м³.

На рис. 3.1 приведені результати розрахунку за наведеною вище методикою для трьох марок вугілля: антрацит (А), газовий (Г) і пісний (П). Аналіз рис. 3.1 дає уявлення про вплив розміру частки вугілля і технічного аналізу вугілля на тривалість часу згорання: зі збільшенням розміру часток час згорання зростає по експоненті, при збільшенні вмісту

вуглецю у вугільній частці збільшується її час згорання (час згорання зростає при переході від марки вугілля «Г» до «П» і «А»).

В цілому запаси вугілля в Україні, в т.ч. придатного для приготування ПВП, оцінюються в 3,6–4,8 млрд. т (в т.ч. по Донбасу запаси вугілля марки П оцінюються в 0,46 млрд. т), що вказує на реальну можливість розширення здобичі необхідних марок вугілля.



А – антрацит; П – пісне вугілля; Г – газове вугілля

Рисунок 3.1 – Залежність часу згорання вугілля від розміру вугільних часток

Можна вважати, що на початковому етапі широкого застосування ПВП в доменному виробництві України реальними матеріалами для приготування ПВП будуть концентрати (збагачене вугілля) марок А, АСШ, АС, АТ, Т, ТС, Г, а також Д і ДГ. Вказане вугілля (концентрати) може використовуватися для приготування ПВП як в якості єдиного шихтового компонента, так і ввиді суміші з 2-х або 3-х вугіль, що також має технологічні переваги і широко використовується у світовій практиці.

Таким чином, очевидно, що пиловугільні комплекси підприємств України мають бути універсальними, тобто здатними працювати на різних марках концентратів (вугілля), виходячи з кон'юнктури, що склалася на

даний момент, і економічної доцільності.

Наприклад, в 2004 р. в цілому по Україні були зроблені вугільні концентрати (продукти збагачення вугілля) в наступній кількості: марок АК, АТ, АМ, АС (з вмістом золи від 4,2 до 10,7% і сірки до 1,8% – усі енергетичні) – 3,02 млн. т; марки Г (з вмістом золи 7,8% і сірки 1,8% – усе для виробництва коксу) – 3,8 млн. т; марки П (відповідного для виготовлення ПВП) - практично не робили. Основними постачальниками концентратів марок антрациту є вугільні підприємства Луганської області України.

Основними постачальниками концентратів марки Г є вугільні підприємства Донецької області України. Аналіз показує, що поступове збільшення об'єму застосування ПВП в доменному виробництві України у результаті зумовить зміну балансу вироблюваних вугільних концентратів, складу шихт для коксування і, що особливо важливо, зменшує обсяг виробництва коксу і забезпечить можливість поліпшення його якості.

Відомо, що витрати вугілля на виробництво 1 т коксу і 1 т ПВП рівні, відповідно, 1,3 і 1,1 т/т, а коефіцієнт заміни коксу ПВП – 0,8–0,9. При впровадженні ПВП-технології на об'єм виплавки чавуну близько 24 млн. т/рік (приблизно 80% від досягнутого рівня виплавки чавуну в Україні) і питомій витраті ПВП 150 кг/т чавуну знадобиться 3,6 млн. т в рік ПВП; в цьому випадку буде зменшена витрата коксу на виплавку чавуну сумарно на 3,06 млн. т/рік.

Таким чином, з коксохімічного виробництва для приготування ПВП вільно може бути передано, як мінімум, 891 тис. т/рік вугільного концентрату марки Г, що від загального об'єму необхідно концентрату для отримання ПВП складає 22,5%. Крім того, технологічно ефективні марки вугілля для отримання коксу (Ж і К) можуть "витіснити" з вугільних шихт менш цінні марки вугілля загальною масою до $1133,7 + 914,9 = 2048,6$ тис. т/рік, придатних для отримання ПВП. Отже, масштабна організація виробництва ПВП може бути здійснена приблизно на 75% на наявних концентратах в коксохімічному виробництві України, тобто без значних капітальних вкладень в підготовку цих

концентратів. В той же час, впровадження ПВП-технології в повному об'ємі (на 24 млн. т чавуну/рік) зажадає організації додаткового виробництва вугілля (концентратів) марок А і П в об'ємі близько 1,0 млн. т/рік (а отже і відповідних капітальних вкладень).

Розрахунок показує, що резерв вугілля марок, що з'являється, Ж і К в об'ємі 2048,6 тис. т/рік і зменшення потреби коксу на 3,06 млн. т/рік дозволить збільшити долю цього вугілля від $28,5+23,0 = 51,5\%$ до 60,3%, тобто на 8,8%. Це забезпечить істотне поліпшення якості коксу. На зарубіжних підприємствах значне застосування газового вугілля для приготування ПВП, мабуть, покращувало склад шихт для коксування і, відповідно, якості коксу.

В умовах підприємств України комплекси для приготування ПВП мають бути універсальними, тобто здатними працювати на різних марках вугілля (концентратів), в т.ч. на початковому етапі освоєння цієї технології вони повинні забезпечувати роботу при значних витратах газового вугілля (у кількості не менше 25 % від загальної їх витрати). Масштабна організація виробництва ПВП може бути здійснена приблизно на 75% на наявних концентратах в коксохімічному виробництві, тобто без значних капітальних вкладень в підготовку цих концентратів.

Впровадження ПВП-технології в повному об'ємі зажадає організації додаткового виробництва вугілля (концентратів) марок А і П в об'ємі близько 1,0 млн. т/рік. Освоєння ПВП-технології в повному об'ємі на підприємствах України дозволить помітно поліпшити склад вугільних шихт для коксування за рахунок збільшення в них доли вугілля марок Ж і К від 51,5 % до 60,3 %, і, як наслідок, поліпшити якість доменного коксу.

3.1.3 Підготовка антрациту до доменної плавки

Комплекс питань спеціальної підготовки вугілля визначений в патенті [12]. Автори винаходу, ґрунтуючись на тому, що вміст летючих і волога в антрациті в середньому однакова, а шматки антрациту розриваються на

частини при нагріванні не тільки за рахунок збільшення тиску летючих в порожнинах шматків, але і в результаті нагріву вологи в мікро- і макротріщинах, запропонували спосіб видалення вологи з шматків антрациту і закупорки тріщин для запобігання повторному накопиченню вологи при транспортуванні і завантаженні антрациту в доменні печі. З видаленням вологи шматки антрациту при нагріванні руйнуються в 2–2,5 разу менше, ніж початковий сирий антрацит, а обробка шматків вугілля полімером підвищує на 25–30 % механічну міцність шматків. Автори, відштовхуючись від способу виробництва твердого палива – термоантрациту, який включає обезводнення кускового вугілля (антрациту) методом повільного наг до 1150–1400 °С без доступу повітря, відзначають, що нагрітий антрацит втрачає вологу і покращує свої термічні і механічні властивості. Таке паливо по своїх технологічних властивостях не поступається навіть коксу. Проте недоліком термоантрациту, вважають автори цього способу, є його дорожнеча порівняно з сирым антрацитом, яка викликана великими витратами енергії на обезводнення антрациту при повільному нагріванні.

Промислові запаси антрацитів в Донбасі (13,8 млрд. т) вже перевершують запаси вугілля, що коксується (9,8 млрд. т) [22].

Спосіб збагачення вугілля (антрациту) включає його обезводнення за рахунок обробки шматків вугілля магнітним (електромагнітним) полем і зашиті зовнішній поверхні шматків від повторного проникнення в них атмосферною або іншої вологи.

Обробка кускового вугілля магнітним полем, замість дуже тривалого нагрівання, обумовлює значно менші витрати енергії на обезводнення вугілля, завдяки чому ціна такого палива істотно знижується, що робить його економічно зручним для використання замість металургійного коксу і в інших областях. Захист зовнішньої поверхні шматків вугілля від повторного проникнення у нього атмосферною або іншої вологи, забезпечує збереження властивостей здобутого палива під час його транспортування до споживача, яке теж істотно знижує втрати виробництва.

Реалізується спосіб збагачення вугілля (антрациту) таким чином. На вантажній ділянці збагачувальної фабрики над конвеєрною стрічкою, яка завантажує вугілля у вагони, розташовують електромагнітний випромінювач і розпилювач водного розчину синтетичного полімеру. Відстань випромінювача і розпилювача до поверхні конвеєрної стрічки вибирають з умови рівномірного розпилювання розчину і опромінювання всього пласта вугілля, яке рухається разом із стрічкою. При русі стрічки з шматками вугілля вони перетинають магнітне поле випромінювача і волога (вода), що знаходиться в тріщинах, змінює ряд своїх властивостей, у тому числі і властивість змочувати тверді поверхні. При цьому зменшуються сили зв'язку молекул води з поверхнями тріщин, пружні сили яких видавлюють воду з простору (об'єму) тріщин і закривають їх (у фізиці руйнування це звучить: «..тріщина закрилася»). Деяка кількість молекул води може залишитися в середині вже закритої тріщини, по істотного впливу на властивості вугілля вони не роблять. Треба відзначити, що якщо тріщина не закрилася, тобто пружні сили не спрацювали, то ми маємо справу вже не з тріщинами, а з таким шматком вугілля, який ще не розпався, але вже і не суцільний, а складається з двох або декількох фрагментів того ж шматка.

Захист від повторного проникнення вологи в мікро- або макротріщини вугілля, досягається покриттям зовнішньої поверхні шматків вугілля полімерною плівкою, яку наносять розпилювачем водного розчину полімерів або методом занурення вугілля в такий розчин. У обох випадках розчин опромінюють магнітним полем. Плівка при цьому утворюється через деякий час після того, як значна кількість розчину полімерів стече з поверхні шматка, а та частина, яка завдяки високій адгезії полімерів до вугільної поверхні, затримається на ній, через деякий час затвердіває, головним чином, біля входу в тріщину, блокуючи її.

На більшій, щодо гладкої (без руйнівних дефектів) частини поверхні антрациту полімерної плівки не утворюється. полімерні частинки стікають разом з водою. Проте, на такій поверхні може з'явитися тільки вільна зовнішня

вода, яка небезпеки при нагріванні не представляє, оскільки при нагріванні випаровується, не руйнуючи шматки вугілля.

Спеціальні дослідження на ЦЗФ «Комендантська» показали, що полімерна плівка не тільки захищає шматки вугілля від проникнення в них вологи, але підвищує і їх механічну міцність, яка теж сприяє поліпшенню технологічних властивостей цього палива для доменного виробництва. Якщо врахувати, що антрацити Донецького басейну включають сірки на 0,4–0,6 % і золи на 5–6 % менше ніж кращий металургійний кокс, а орієнтовна ціна, підготовленого за запропонованою технологією палива, приблизно на 20–25 % нижче, ніж ціна коксу, то видно очевидні переваги такого палива для часткової заміни коксу антрацитом, який може не тільки покривати недолік металургійного коксу, але має економічні і екологічні переваги навіть за відсутності дефіциту коксу.

Для завантаження в доменні печі ВАТ «Криворіжсталь» використовувався збагачений антрацит ГЗФ «Вахрушева» сорт АКО-25-100 розміром 25–100 мм і ЦЗФ «Комендантська» сортів АТ (крупністю 25–50 мм) і АК (крупністю 25–100 мм), який проходить попередню підготовку за технологією НВЦ «Екосфера» (м. Луганськ).

3.1.4 Використання антрациту в доменній печі

Патент на вдування ПВП у фурми доменних печей виданий Гескампу в 1926 р. В перше ця ідея використана на заводі ім. Дзержинського в 1950 р., а в сімдесяті роки минулого століття ПВП почали застосовувати на Карагандинському, Західносибірському металургійних заводах, ПАТ «Запоріжсталь», а також Донецькому металургійному заводі [21]. Надалі на перших трьох металургійних заводах відмовилися від використання ПВП у зв'язку з недостатньою якістю установок підготовки і подачі ПВП до доменних печей, а також низькими цінами на природний газ і простотою устаткування по його використанню.

До теперішнього часу в Україні ПВП використовують тільки на Донецькому металургійному заводі, а на ПАТ «Запоріжсталь» в 2011 р. завершилося будівництво нової установки по вдуванню ПВП для чотирьох доменних печей.

Використання ПВП в доменних печах при порівняно високих капітальних витратах на системи його підготовки і подачі до печей, а також його розподіли по фурмам, порівняно швидко окупається за рахунок:

- менших цін на вугілля;
- економії капітальних витрат від виведення із ладу застарілих коксових печей і зменшення викидів в атмосферу при зниженні обсягів коксохімічного виробництва;
- зменшення долі низькоякісного вугілля для виробництва коксу, що дозволить поліпшити його якість;
- зниження поточних витрат при вищому коефіцієнті заміни коксу вугіллям в порівнянні з природним газом.

Нині приблизно третина доменних печей всього світу використовує пиловугільне паливо, при цьому максимальні витрати ПВП коливаються від 150 до 230 кг/т чавуну. При витратах ПВП до 150 кг/т чавуну спостерігається максимальний коефіцієнт заміни коксу – 0,9 кг/кг ПВП; при витратах до 230 кг/кг ПВП – його величина зменшується до 0,8; а при витратах більше 230 кг/т значення коефіцієнта заміни коксу знижується до 0,7 кг/кг ПВП.

Більші витрати ПВП спостерігаються на печах, що мають кращу якість шихти і можливість управління її розподілом, в першу чергу, по радіусу колошника. При максимальних витратах економія коксу досягає 150–180 кг/т чавуну (близько 32 % об'єму коксу). На цю ж величину (від 4,3 до 20,5%) збільшується рудне навантаження і опір руху газу l , який розраховують по формулі:

$$l = \frac{\sqrt[1,7]{(P_D^2 - P_K^2)}}{V_{ф.г.}}, \quad (3.6)$$

де P_d , P_k – тиск дуття і колошникового газу, кПа, відповідно;

$V_{ф.р.}$ – об'єм фурменого газу, $\text{нм}^3/\text{хв}$.

Збільшення витрати ПВП більше 200 кг/т чавуну відмічено різким підвищенням (на 15 %) вмісту вуглецю в пилі і шламів.

Більші витрати ПВП зі збереженням рівного ходу досягнуті на печах з вищими показниками «гарячої» міцності коксу (CSR), відповідні нашим ДСТУ холодній міцності M_{25} .

Сприятливим умовам для збільшення витрати ПВП явився розподіл матеріалів з «центральною» ходом печі [22], яке здійснювали завантаженням більшого коксу в центр колошника, а менш великого - в периферійну і проміжну зони радіусу пошарово із залізородною частиною.

Встановлено також, що після зупинок печей, працюючих з підвищеною витратою ПВП, виникає дефіцит теплоти в горні. Цей недолік рекомендується усувати або додатковим збільшенням витрати коксу, або тимчасовим збільшенням витрати ПВП, що ефективніше. Крім того, технологічними інструкціями рекомендується припинити подачу ПВП після того, як витрата дуття зменшується нижче заздалегідь встановленого під час зупинки. Наступна подача ПВП поновлюється після того, як шихта починає опускатися, що сприяє оновленню коксу в заплечиках і мертвій зоні [13].

При вдуванні ПВП відновлення рівного ходу досягається з великими труднощами, чим при вдуванні природного газу. Це пов'язано з його великими витратами і підвищеними коефіцієнтами заміни коксу, що супроводжується «похолоданням» печі при розладах ходу і припиненні подачі ПВП.

Крім того, доменна піч дуже чутлива до порушення графіку випусків чавуну. При зниженій газопроникності із-за підвищеного рудного навантаження кокс знаходиться в печі триваліший час і подрібнюється більшою мірою до приходу в горн, довше знаходиться в зоні циркуляції перед фурмами, утворюючи «пташине гніздо» з дрібнішого коксу і ущільнюючи стовп коксу в центрі печі, що утрудняє дренаж газу і продуктів плавки.

Збільшення витрати ПВП від 130 до 190 кг/т чавуну в печах Японії [20] супроводжувалося посиленням периферійного потоку газів і перегріванням кладки. Було встановлено, що цьому сприяло зміщення фокусу горіння (максимуму діоксиду вуглецю) до торця фурми і зменшення об'єму циркуляційної зони. Причиною цього стала заміна гарячого коксу холодним низькокалорійним вугіллям, чому теоретична температура зменшувалася. Для її збереження дуття збагачували киснем, що супроводжувалося зменшенням витрати і кінетичної енергії дуття. А якщо врахувати, що опір шихти зростає при збільшенні рудного навантаження, то цілком очевидно, що і з цієї причини розмір зони циркуляції зменшується. Для її відновлення швидкість дуття слід збільшити до величини більше 230 м/с. Це можна здійснити як збільшенням висову фурми, так і зменшенням їх перерізу.

Глибину зони циркуляції, за даними компанії «Negro» (Австралія), можна визначити за формулою:

$$L_{з.ц.} = -0,390 + 0,00505V_d \quad , \quad (3.7)$$

де V_d – швидкість дуття, м/с.

Відбір проб коксу із зони «тотермана» (нижче за рівень дуттєвих фурм) дозволив встановити зворотну залежність кількості дрібної фракції коксу (– 3 мм) від холодної міцності D_{i15}^{150} і середнього розміру завантаженого коксу і пряму залежність витрати ПВП і нижнього перепаду тиску газів від вмісту дрібної фракції коксу.

Рекомендується міру подрібнення коксу зменшити частково за рахунок збільшення гарячої міцності CSR, а частково за рахунок завантаження більшого коксу (фракції +45 мм) в центральну зону колошника у вигляді «неодружених» подач, а дрібнішого коксу (фракції +40 мм) із залізородною частиною – в проміжну і периферійну зони колошника. Це істотно поліпшить газопроникність шихти при високих витратах ПВП.

У доменних печах Канади вдування ПВП почали з 1996 р. [15]. При використанні недостатньо якісного коксу фракції +20 мм, окрім розглянутих вище труднощів, зіткнулися з проблемою налипання ПВП в колінах трубопроводів при транспортуванні його повітрям. Причиною цього став підвищений вміст фракції - 10 мкм. При зменшенні долі розміру фракції – 74 мкм з 80 до 65% вказане явище було усунене. Для збільшення витрати ПВП розмір коксу був збільшений до +20 мм, діаметр фурм був зменшений, а для повного спалювання вугілля застосували наконечник сопла фірми «Кавасакі» (Японія), що покращує дисперсію вугілля в зоні циркуляції.

Як відзначалося, при високих витратах ПВП потрібне істотне поліпшення якості шихти, її класифікації і розподіли в доменній печі [16, 17]. Кокс повинен мати максимальне значення показника $CSR > 65\%$ і мінімальне значення $CRI < 28\%$.

Доменний кокс після відсівання фракції – 30 мм на рудному дворі повинен проходити механічну обробку для стабілізації його міцності, після чого він повинен мати:

- діапазон гранулометричного складу: фракції +80 мм – менше 10%, фракції – 25 мм – менше 3 %, середній розмір шматків – 55 мм;
- механічну міцність M_{40} – більше 80%;
- вміст вологи – менше 4%.

На багатьох заводах використовують коксовий «горішок» в кількості до 120 кг/т чавуну і завантажують його пошарово з рудною частиною шихти.

Залізорудна частина повинна мати максимальне значення $Fe_{обц} / SiO_2$ і переважно складатися з окатишів (до 100%) з меншою долею агломерату. З метою підвищення гарячої міцності і поліпшення газопроникності шихти розширюється використання заздалегідь відновлених окатишів і металобрухту (до 20 %). За даними фірми «Коккерель Самбре» (Канада) співвідношення товщини шарів руди і коксу в подачі при збільшенні витрати ПВП до максимальних значень змінюється від 0,47 до 0,73.

Особливу увагу слід приділити складу і властивостям вугілля, а також

технології їх підготовки до спалювання в горні. На зарубіжних доменних печах використовують переважно антрацит, жирні, газові і полум'яні типи вугілля. Їх порівняльна характеристика з іншими видами доменного палива приведена в таблиці 3.1.

З таблиці 3.1 витікає, що коефіцієнти заміни коксу для ПВП вищі, ніж для природного газу. Вугілля відрізняється значно більшою теплотворною здатністю і меншим об'ємом горнового газу, що дозволяє за інших рівних умов використовувати його більше, ніж природного газу. Судячи із співвідношення С/Н, у вугіллі міститься водню у декілька разів більше, ніж в коксі, але його у декілька разів менше, ніж в мазуті і природному газі. Це знижує пружність газу, тобто при збільшенні тиску в печі він стискується у меншій мірі, ніж газ, що містить більше водню.

Таблиця 3.1 - Порівняльна характеристика різних видів палива

Паливо	Кокс	Мазут	Природний газ	Вугілля			
				Антрацит	Жирне	Газове	Полум'яне
Теплота згорання палива, МДж/кг	35,0	25,3	9,8	31,5	28,5	27,5	22,3
Коефіцієнт заміни коксу, кг/кг	-	1,20	0,92	0,95	0,88	0,83	0,80
Відношення С/Н, кг/кг	17,0	8,00	3,10	32,30	20,30	17,00	16,00
Об'єм продуктів горіння, м ³ /кг	1,68	2,87	4,20	1,90	2,01	2,05	1,97

З вищесказаного виходить, що чим вище марка вугілля, тобто вище вміст вуглецю, тим більше виділяється теплоти і вище коефіцієнт заміни коксу вугіллям. За результатами впровадження ПВП на доменних печах компанії «Hoogovens IJmuiden» (Голландія) автори роботи [18] вивели залежність коефіцієнта заміни від властивостей вугілля:

$$K_3 = 2,3C_B + 4,5H_{2B} + 0,97A_B - 1,19 \quad (3.7)$$

де C_B , H_B , A_B – вміст вуглецю, водню і золи у вугіллі, кг/кг, відповідно.

Видно, що, окрім вуглецю, корисна присутність водню, що міститься в летких вугіллі, яке покращує фізичні і хімічні властивості газу. З цієї точки зору слід було б виділити позитивний вплив оксиду вуглецю і негативний вплив інших компонентів летких речовин коксу. Спірним є позитивний вплив золи у вугіллі. По матеріалах досліджень [19], кожен відсоток летких речовин у вугіллі погіршує коефіцієнт заміни коксу на 0,0066; а відсоток золи – на 0,017 кг/кг.

Проте проведений розрахунок коефіцієнтів заміни для донецького вугілля марок АЗ, Т, Г і суміші АЗ і Г, рекомендованих для використання в якості ПУТ для доменних печей [20, 21] і приведених в таблиці 3.2, показав, що величини порівнянні з досягнутими на зарубіжних заводах.

Таблиця 3.2 – Склад ПВП з донецького вугілля та коефіцієнт заміни коксу (K_3) при вдуванні їх в доменну піч

Марка вугілля	Склад вугілля, %							K_3 кг коксу/ кг ПВП
	C_p	H_p	O_p	N_p	S_p	W_p	A_p	
АЗ	86,6	2,25	0,85	1,20	1,00	0,50	7,60	0,98
Т	81,0	3,80	1,00	1,30	1,30	0,50	11,10	0,95
П	70,2	5,20	9,20	2,50	0,30	0,50	12,10	0,78
Суміш 50% АЗ+50% П	78,5	3,80	5,10	1,35	0,65	0,50	9,92	0,88

Неважно помітити, що коефіцієнт заміни коксу тим вище, чим більше вугілля містить вуглецю, водню і менше кисню, тобто це вугілля марок А, АЗ і П. Проте дослідження показали, що повніше згорання спостерігається для вугілля, що містить підвищену кількість летких речовин: леткі речовини виділяються вже в порожнині фурми, утворюються пори і вуглець легше окислюється. Вугілля ж з низьким вмістом летких речовин легше розмелюється, за рахунок чого продуктивність млинів можна збільшити на 40 % і отримати дрібніші частки, щоб вони встигли згоріти в окислювальній зоні.

Для збільшення повноти згорання практикують подачу технічного кисню через трубку, коаксіально розташовану зовні інжекційної, через яку подають ПВП. Така технологія особливо ефективна при високих витратах ПВП.

Для поліпшення спалювання вугілля рекомендується прогрівати ПВП до температури 300 °С перед подачею в піч доменним газом. При цьому діоксид вуглецю адсорбується на поверхні вугілля, утворюючи вуглець – кисневі комплекси, що легко відділяються при нагріві в порожнині дутцевої фурми [22].

Для зменшення рудного навантаження і збільшення газопроникності шихти у світовій практиці застосовують подачу подрібнених флюсів і залізорудних матеріалів разом з ПВП [18,19].

В умовах істотного підвищення цін на природний газ з 2009 р. його заміна в доменних печах на пиловугільне паливо в кількості до 200 кг на тонну чавуну дозволить зменшити витрату коксу до 300–350 кг/т чавуну, підвищити продуктивність і понизити витрати на виплавку чавуну на 10–15% незважаючи на збільшення капітальних витрат на будівництво вуглепідготовчого відділення

Вимоги до якості шихти і дуття :

- залізорудна частина повинна складатися із стабілізованих і відсіяних від дрібної фракції (фракції – 5,0 мм) офлюсованих і частково відновних окатишів і агломерату з максимальним відношенням $Fe_{общ} / SiO_2$; щоб на кожні 100 кг ПВП на тонну чавуну вихід шлаку зменшувався на 32 кг рекомендується використовувати металодобавки до 200 кг/т чавуну;

- кокс повинен мати максимальні значення гарячої міцності - CSR (більше 62%), мінімальні значення реакційної здатності – CRI (менше 28%) і фракційний склад +(40–80) мм;

- вугілля повинне містити до 37 % летких і 12 % золи і вдуватися в піч в співвідношеннях: до 60% легкозаймисті (марки Г), решта – висококалорійні (марок А, АЗ і П);

- вугільна зола повинна мати температуру плавлення більше 1400 °С;

- співвідношення товщини шарів руди і коксу не повинне перевищувати 0,73;

– дуття слід збагачувати киснем до величин 23–33 % з розрахунку 0,5–0,8 м³ кисню/кг вугілля для підтримки теоретичної температури в межах 2000–2300 °С.

Вимоги до технології доменної плавки :

– для поліпшення газопроникності стовпа шихти і коксового «тотермана» рекомендується працювати з розпушеним центром печі, тобто неодружені подачі коксу фракції +45 мм завантажують в центр, а робочі подачі, що складаються з коксу фракції +40 мм, «коксого горішка» і залізородних матеріалів, - в периферійну і проміжну зони колошника;

– для досягнення максимальної міри окислення вуглецю у фурм слід подавати кисень у факел горіння ПВП, а вугілля нагрівати доменним газом з добавками стимуляторів горіння;

– працювати необхідно на максимально допустимому тиску газу в печі;

– для збереження об'єму зони циркуляції при збагаченні дуття киснем слід збільшити швидкість дуття зменшенням діаметру фурм і збільшенням їх висову в піч;

– розробити технологічні режими для компенсації теплоти в горні печі при короткочасних зупинках і наступних задуваннях доменних печей;

– обладнати доменні печі необхідними системами контролю і управління витратою і розподілом вугільного пилу по фурмам і технологічними параметрами доменної плавки.

3.2 Вплив використання антрациту як заміника коксу на технологічні показники виплавки чавуну в умовах доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

У роботі розглядаються технологічні аспекти технології виплавки передільного чавуну в доменних печах (зокрема №2–5 корисним об'ємом 1513 м³ кожна) в умовах доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь» на протязі 2000–2012 р.р. з застосуванням антрациту (таблиці 3.3–3.6). Аналіз заводських

даних показав на тенденцію збільшення витрати антрациту на усіх чотирьох доменних печах до 55 кг/т чавуну при збільшенні продуктивності печей до 3717 т/добу чавуну.

Таблиця 3.3 – Технологічні показники роботи доменної печі № 2 ПАТ «Запоріжсталь»

Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2008р.	2010р.	2012р.
Витрата антрациту, кг/т чавуну	0	7	35	40,6	48
Продуктивність печі, т/добу чавуну	1909	1870	1999	1628	1482
Витрата коксу, кг/т чавуну	569	519	520	511	515
Інтенсивність горіння (К + А), т/м ³ добу	0,632	0,572	0,645	0,522	0,485
Дуття:					
витрата, м ³ /хв.	2281	2321	2242	1926	1770
тиск, кПа	196	184	212	164	137
температура, °С	927	923	933	934	906
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	83	84	77	91	73
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	75	78	167	158,4	151,6
Вміст O ₂ в дутті, %	23,6	23,8	27,4	27,0	26,7
Колошниковий газ:					
тиск, кПа	77	63	96	50	28
температура, °С	355	378	337	307	298
вміст, % CO ₂	16,7	16,3	17,1	16,9	17,0
СО	23,3	21,9	24,1	24,2	23,5
Н ₂	6,9	6,5	8,1	7,6	6,8
Хімічний аналіз чавуну, %:					
кремній	0,910	0,910	0,820	0,850	0,820
марганець	0,630	0,660	0,840	0,640	0,610
сірка	0,030	0,024	0,027	0,026	0,026
фосфор	0,058	0,060	0,081	0,097	0,106
вуглець	4,210	4,270	4,450	4,480	4,500
Основність шлаку	1,20	1,20	1,19	1,19	1,2
Вміст Fe в шихті, %	52,31	52,10	52,62	54,82	54,04

Перевірка можливості заміни коксу при збільшенні витрат антрациту до 100 кг/т чавуну виконувалася в умовах доменної печі №2. Протягом 6 діб

підряд кількість завантаженого антрациту збільшували з 25 до 55 кг/т залізорудних матеріалів, що відповідає витраті 45–100 кг/т чавуну.

Таблиця 3.4 – Технологічні показники роботи доменної печі № 3 ПАТ «Запоріжсталь»

Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2008р.	2010р.	2012р.
Витрата антрациту, кг/т чавуну	0	29	40	52,3	55
Продуктивність печі, т/добу чавуну	2673	2845	3059	2853	2980
Витрата коксу, кг/т чавуну	538	463	440	440	428
Інтенсивність горіння (К + А), т/м ³ добу	0,719	0,700	0,734	0,702	0,720
Дуття:					
витрата, м ³ /хв.	2997	2893	2907	2665	2836
тиск, кПа	198	251	250	205	236
температура, °С	979	1001	1023	1043	1018
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	86	85	86	85	78
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	82	93	120	107,8	93,9
Вміст O ₂ в дутті, %	24,2	25,0	26,7	26,2	25,4
Колошниковий газ:					
тиск, кПа	79	124	125	80	115
температура, °С	201	316	305	250	268
вміст, % CO ₂	16,1	17,0	18,1	18,2	17,9
СО	23,5	21,4	22,8	23,8	22,2
Н ₂	6,3	7,5	7,4	7,4	7,0
Аналіз чавуну, %:					
кремній	0,900	0,780	0,810	0,840	0,770
марганець	0,490	0,500	0,430	0,420	0,450
сірка	0,024	0,025	0,026	0,024	0,025
фосфор	0,056	0,063	0,068	0,079	0,083
вуглець	4,240	4,520	4,440	4,50	4,550
Основність шлаку	1,21	1,21	1,19	1,19	1,20
Вміст Fe в шихті, %	52,17	52,52	52,70	53,39	54,39

Розглядався вплив витрат антрациту на наступні показники (рис. 3.2, 3.3): вміст кремнію в чавуні; масу рудної подачі; зміну рудного навантаження на кокс; температуру дуття; витрату природного газу.

Обробка експериментальних даних впливу витрати антрациту на вище зазначені показники проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

Таблиця 3.5 – Технологічні показники роботи доменної печі № 4 ПАТ «Запоріжсталь»

Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2008р.	2010р.	2012р.
Витрата антрациту, кг/т чавуну	0	15	26	39	47
Продуктивність печі, т/добу чавуну	2357	2860	3027	3109	2798
Витрата коксу, кг/т чавуну	523	478	468	458	441
Інтенсивність горіння (К + А), т/м ³ добу	0,620	0,750	0,748	0,772	0,684
Дуття:					
витрата, м ³ /хв.	2593	2954	3022	2919	2527
тиск, кПа	192	253	253	247	207
температура, °С	968	1044	1028	1021	1036
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	93	94	88	90	85
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	82	95	88	120	100
Вміст O ₂ в дутті, %	23,7	25,1	24,9	26,7	25,9
Колошниковий газ:					
тиск, кПа	128	12	129	85	118
температура, °С	339	311	284	257	296
вміст, % CO ₂	16,9	16,9	17,8	18,0	18,0
СО	22,0	21,9	23,5	23,7	21,9
Н ₂	6,9	7,1	7,8	7,6	7,1
Хімічний аналіз чавуну, %:					
кремній	0,88	0,85	0,78	0,80	0,84
марганець	0,32	0,40	0,47	0,39	0,38
сірка	0,024	0,026	0,025	0,026	0,026
фосфор	0,049	0,054	0,062	0,067	0,076
вуглець	4,19	4,31	4,50	4,46	4,49
Основність шлаку	1,20	1,21	1,21	1,19	1,20
Вміст Fe в шихті, %	52,10	52,55	52,62	52,61	53,37

В роботі встановлено, що при збільшення витрат антрациту з 25 до 55 кг/т чавуну рудне навантаження збільшували з 3,85 до 4,45 кг/кг, що

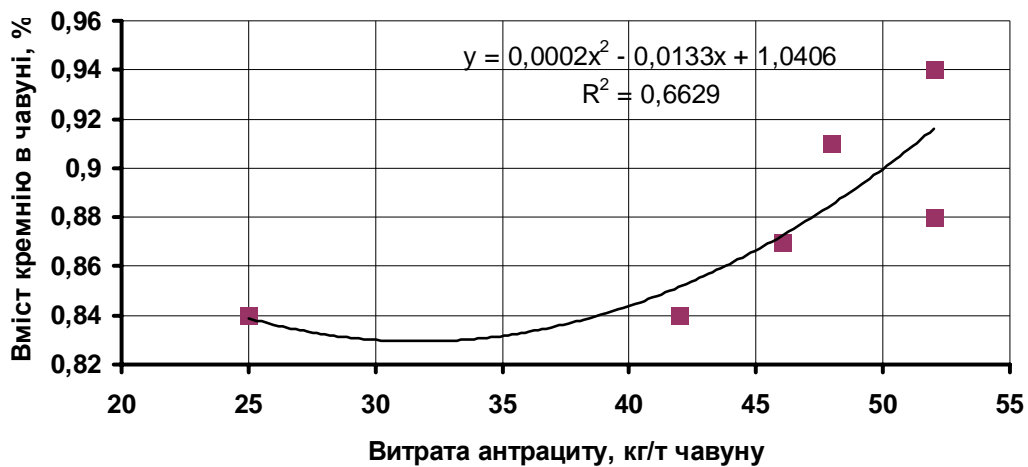
відповідає зниженню витрати коксу щонайменше на 60 кг/т чавуну. При цьому сумарна очікувана зміна витрати коксу від супутнього збільшення витрати природного газу, зменшення температури дуття і підвищення вмісту кремнію в чавуні близько до нуля (взаємно врівноважується), так що можливе скорочення витрати коксу на 60 кг/т чавуну обумовлене заміною його антрацитом (55 кг/т чавуну).

Таблиця 3.6 – Технологічні показники роботи доменної печі № 5 ПАТ «Запоріжсталь»

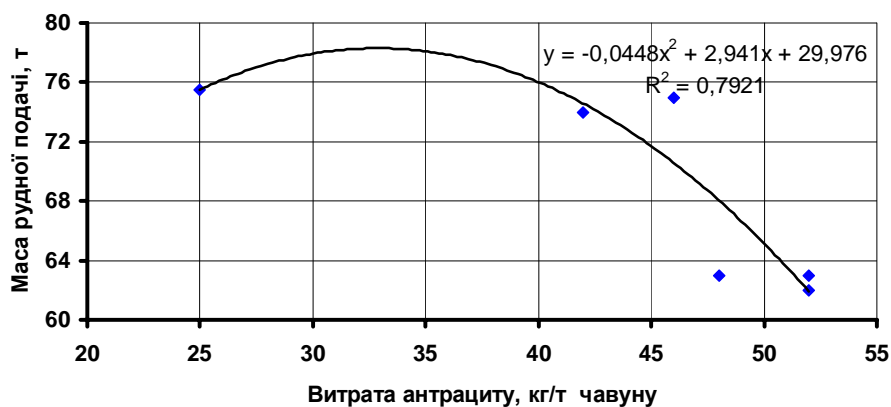
Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2008р.	2010р.	2012р.
Витрата антрациту, кг/т чавуну	4	27	34	43	48
Продуктивність печі, т/добу чавуну	2676	2915	2772	3254	2952
Витрата коксу, кг/т чавуну	525	468	459	461	446
Інтенсивність горіння (К + А), т/м ³ добу	0,708	0,721	0,683	0,820	0,730
Дуття:					
витрата, м ³ /хв.	3203	3128	3053	2986	2798
тиск, кПа	239	245	221	257	215
температура, °С	1024	1028	1027	1012	1042
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	75	87	85	91	79
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	72	92	80	142	99
Вміст O ₂ в дутті, %	23,6	24,8	24,1	28,0	25,6
Колошниковий газ:					
тиск, кПа	119	119	93	126	92
температура, °С	296	327	322	263	227
вміст, % CO ₂	15,9	16,6	16,5	18,4	18,4
СО	23,0	22,5	21,7	23,7	23,9
Н ₂	6,5	7,1	7,1	7,5	7,2
Хімічний аналіз чавуну, %:					
кремній	0,85	0,81	0,84	0,82	0,81
марганець	0,18	0,34	0,42	0,28	0,4
сірка	0,027	0,026	0,026	0,028	0,026
фосфор	0,053	0,053	0,062	0,066	0,078
вуглець	4,25	4,29	4,37	4,42	4,48
Основність шлаку	1,22	1,22	1,22	1,18	1,20
Вміст Fe в шихті, %	52,30	52,359	52,89	53,95	53,50

Таким чином, баланс чинників свідчить про можливість подальшої ефективної заміни коксу антрацитом з коефіцієнтом заміни вище 1 кг/кг.

Разом з тим, стабільного режиму плавки при витраті антрациту 100 кг/т чавуну досягти поки не вдалося. Це пов'язано з недостатньою вивченістю перехідних процесів при різкому збільшенні витрати вугілля, а також недотриманням умови своєчасного збільшення при цьому розміру подачі. Комплексне вивчення процесів дозволить виявити нові кількісні закономірності процесів і розробити раціональні параметри технології з постійною заміною коксу антрацитом до 100–150 кг/т чавуну [32].

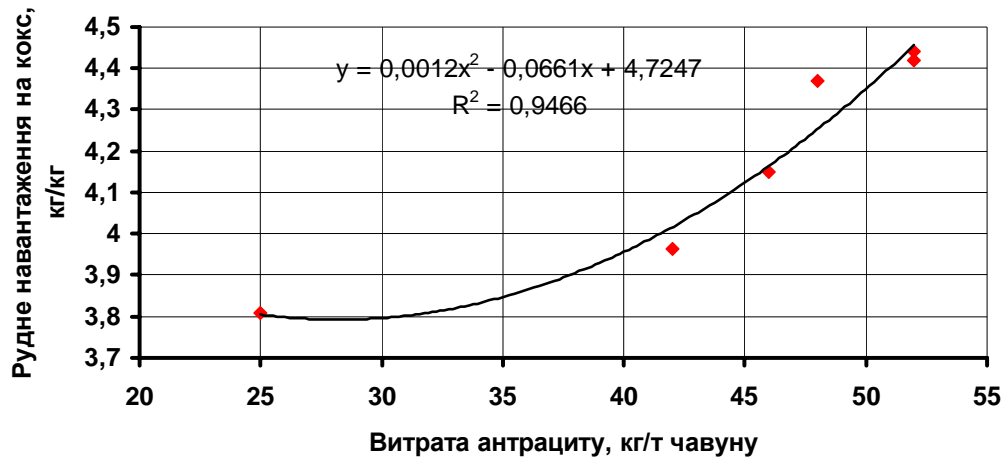


а

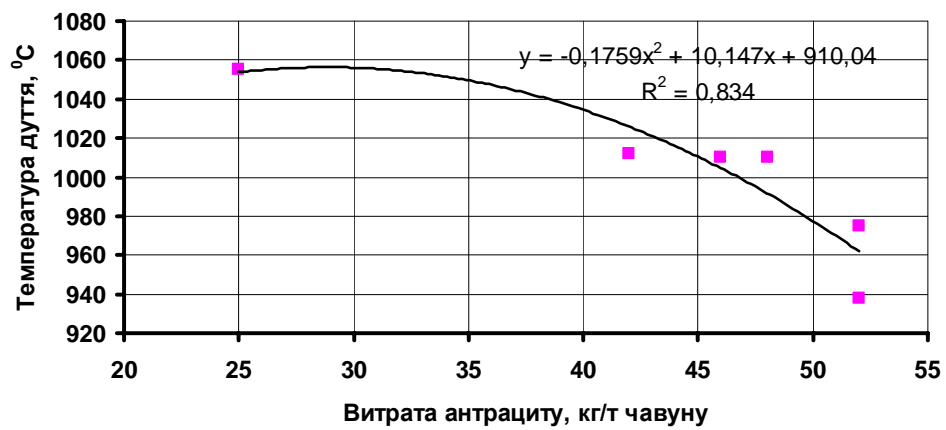


б

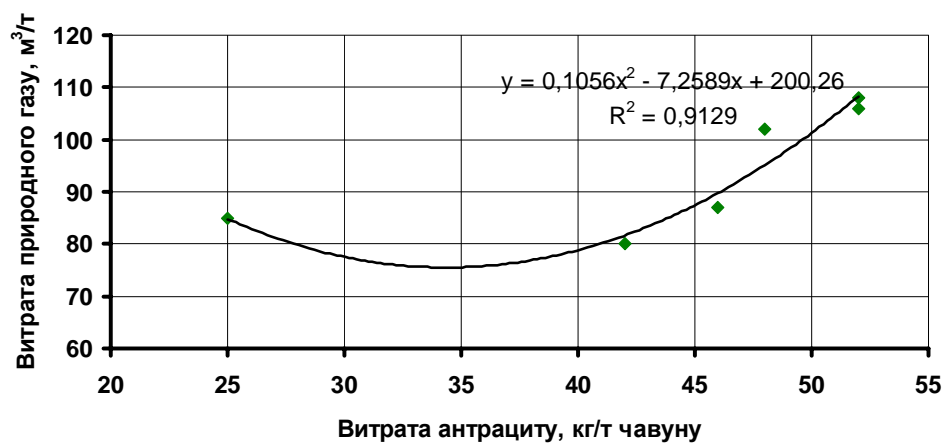
Рисунок 3.2 – Зміна вмісту кремнію (а) та маси рудної подачі (б) в ході підвищення витрат антрациту при доменній плавці [32]



а



б



в

Рисунок 3.3 – Зміна рудного навантаження на кокс (а), температури дуття (б) та витрати природного газу (в) в ході підвищення витрат антрациту при доменній плавці [32]

3.3 Висновки

1. В умовах доменної печі №2 ПАТ «Запоріжсталь» розглянуто можливість збільшення витрати антрациту як замітника коксу з 25 до 55 кг/т. Показано, що для підвищення ефективності доменної плавки необхідно використовувати збагачений антрацит з витратою 70–80 кг/т чавуну.

2. Запропонована технологія використання антрациту як замітника коксу при доменній плавці може бути корисною в умовах доменного виробництва провідних українських металургійних підприємств.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих чинників виробничого середовища доменного цеху

Основні джерела виділень шкідливих речовин в доменному цеху - ливарний двір і бункерна естакада.

Основну шкідливість представляє оксид вуглецю - безбарвний газ, що не має запаху і що не надає дратівливих дій на організм людини, він може викликати отруєння без будь-яких попередніх відчуттів. Потрапляючи в організм людини через легені, він порушує нормальні процеси газового обміну і окислення в організмі, що приводить до тяжких наслідків. Об'ємна частка оксиду вуглецю складає 29 %. Шкідливим чинником є також наявність високих концентрацій пилу в повітрі робочої зони при випуску чавуну і шлаку. У зоні чавуновізного ковшу, що заповнюється чавуном, утворюється хмара пилу, що складається в основному з графіту дрібних фракцій, концентрація пилу в цій зоні при випуску дуже значна. Концентрація пилу в повітрі підбункерних приміщень досягає 500 мг/м^3 . У підбункерних приміщеннях, обладнаних конвеєрами, аспіраційною системою відсмоктується близько 2,5 кг пилу на кожну тону чавуну. Після очищення в атмосферу викидається в середньому близько 90 кг пилу на 1 т чавуну. Постійна робота в запилених приміщеннях може привести до професійних захворювань, званими пневмоконіозами.

Пил, незалежно від її складу, покриваючи шкіру, може закупорювати виходи сальних і потових залоз, що викликає захворювання шкіри. Пил в доменному виробництві нетоксичний, із вмістом оксиду кремнію до 10 %. Гранично допустима концентрація пилу в робочій зоні складає 4 мг/м^3 [33, 34].

Під впливом шуму настає безсоння, знижується працездатність, може виникнути професійне захворювання – туговухість. Допустимий рівень шуму складає 80 дБА. Вібрація впливає на нервову систему, на кровоносні судини.

При тривалому контакті може виникнути вібраційна хвороба. Норма вібрації складає 92 дБ при допустимій коливальній швидкості 2 мм/с [35].

Санітарно-гігієнічна характеристика робочого місця горнового представлена в (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Карта умов праці на робочому місці горнового доменної печі

№ з/п	Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас - шкідливі і небезпечні умови, характер праці			Тривалість дії чинника за зміну, %
				I ст.	II ст.	III ст.	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ :						
	I клас безпеки	0,05	0,36			7,2	90
	II клас безпеки	2,0	0,85				
	III-IV клас безпеки	10,0	39,0				90
	азоту діоксид	20,0	13,6				
	ангідрид сірчистий						
	вуглець оксид						
2	Пил фіброгенної дії, г/м ³	4	24,0		6		80
3	Шум, дБА	80	86	6			80
4	Вібрація (загальна), дБ	92	96		4		90
5	Мікроклімат в приміщенні:						
	- Температура, °С	26	37			1,1	90
	- Швидкість руху повітря, м/с	0,2-0,6	0,4				90
	- Відносна вологість повітря, %	40-60	37	3			90
	- Інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	140	280		140		90
6	Тяжкість і напруженість праці	Категорія робіт - важка, III напружена					

4.2 Заходи щодо усунення небезпечних та шкідливих чинників виробничого середовища доменного цеху

Пропонується для зниження запиленості наступні заходи:

– організація локальної витяжної вентиляції від льоток випуску чавуну і шлаку безпосередньо разом утворення пилових виділень, в місцях вивантаження, завантаження сирих матеріалів;

– матеріали, що порошать, повинні переміщатися пневмотранспортом, гідротранспортом і іншими раціональними способами. Пил після збору повинен поступати в апарати, які очищають пил: циклони, рукавні фільтри;

Заходи для зниження шкідливої дії тепловиділень:

– необхідно встановити стаціонарні або переносні вентиляційні установки для організації повітряного душу на робочих місцях;

– для ізоляції жолобів, ванн з чавуном і шлаком застосувати тепло ізолюючі екрани [33, 34].

Заходи щодо зниження шуму і вібрації – це зниження шуму може бути досягнуте пристроєм глушників в димар, пристроєм вихлопних клапанів з вбудованим приводом в між конусному просторі печі [35].

4.3 Технічні рішення по виробничій санітарії

У доменному цеху опалювання необхідне не тільки для створення необхідної температури в приміщенні, але і для збереження будівлі від руйнування. У цеху передбачається центральна водяна система опалювання з місцевими нагрівальними приладами, регістрами з гладких труб в приміщеннях ливарного двору, електроприміщеннях. Вентиляційні системи повинні забезпечувати кратність вентиляційного обміну, а також метеорологічні умови.

Значне коливання параметрів мікроклімату приводить до порушення терморегуляції організму. По характеру робіт доменне виробництво відноситься до категорії важких робіт (оскільки витрати енергії більше

290,75Вт, систематична фізична напруга, постійне пересування і перенесення тяжкості понад 10 кг). Технологічні операції виконуються в несприятливих кліматичних умовах.

Оптимальні і допустимі параметри мікроклімату в робочій зоні пічної ділянки доменного цеху представлені в таблицях 4.2 та 4.3 [36].

Таблиця 4.2 – Оптимальні норми температури, відносній вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні

Період року	Категорія тяжкості робіт	Температура, °С	Відносна вологість %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний і перехідний	Важка - III	16-18	40-60	0,3
Теплий	Важка - III	18-21	40-60	0,5

Таблиця 4.3 – Допустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні в теплий період року

Категорія робіт	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, не більше, %	Швидкість руху повітря, не більше, м/с
Важка - III	13-19	75	0,5

Для створення нормального мікроклімату на робочому місці горнового доменній печі необхідно застосувати повітряний душ або повітряну завісу, що є різновидом місцевої припливної вентиляції. Повітряний душ не зменшує кількість променистого тепла, що сприймається поверхнею одягу і тіла робочого, але збільшує тепловіддачу за рахунок подачі повітря в навколишнє середовище. Вельми перспективним для створення нормального мікроклімату на робочих місцях є застосування кільцевих повітряних завіс, що дозволяють ізолювати робоче місце від дій шкідливих чинників [32, 33, 35].

4.4 Електробезпека

Доменний цех є крупним споживачем електроенергії і має розвинене електрогосподарство, і складне електроустаткування. Електропостачання доменного цеху виконане відповідно до вимог ПБЄСУ споживачів по першій категорії.

До першої категорії відносять приміщення з підвищеною небезпекою, що характеризуються наявністю однієї з умов, що створюють таку небезпеку: вологості або електропровідному пилу; струмопровідної підлоги, стін, стель; температури вище 30 °С; відносній вологості вище 70 %.

До другої категорії відносять особливо небезпечні приміщення, що характеризуються наявністю однієї з умов, що створюють особливу небезпеку: відносна вологість 100 %; хімічно активне середовище або наявність двох і більше за умови підвищеної небезпеки. Прикладом таких приміщень доменного цеху служать приміщення доменного цеху, тунелі, підвали, колодязі.

До третьої категорії відносять приміщення без підвищеної небезпеки, що характеризуються відсутністю умов, що створюють підвищену і особливу небезпеку. До них відносяться конторські, конструкторські і інші приміщення. Живильна і розподільна мережа усередині об'єктів доменної печі виконана чотирижильними кабелями з алюмінієвими жилами.

Траси кабельних ліній вибрані з урахуванням найменшої витрати кабелів, зручності монтажу, експлуатації і забезпечення їх збереження від механічних і температурних пошкоджень.

Прокладка кабелю виконана в спеціально споруджених кабельних галереях і трубних блоків; між електроприміщеннями кабелі прокладені в сталевому футерованому коробі.

Поразка людини електричним струмом може наступити при двофазному і однофазному дотику до струмовідних частин, а також при дотику до струмовідних частин, а також при дотику до заземлених не струмовідних

частин, що опинилися під напругою, і при включенні на напругу кроку. Двофазний дотик є найбільш небезпечним, оскільки людина виявляється під повним робочою або між фазною (лінійною) напругою.

Найбільше розповсюдження має однополюсний дотик до струмовідних частин, де значення струму, що проходить через людину, в трифазній мережі залежать, перш за все, від режиму нейтралі джерела живлення.

Нейтраль джерела живлення може бути ізольована і глухозаземлена. Захист від поразки електричним струмом і спалахів можна здійснити захисним відключенням, або захисним заземленням.

У мережі із заземленою нейтраллю напругою до 1000 В заземлення неефективно, оскільки навіть при глухому замиканні на землю струм залежить від опору заземлення і з зменшенням останнього струм зростає. Тому для забезпечення безпеки дотику людини до корпусу електроустановки в аварійний період пропонується організувати занулення цієї установки.

Занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих не струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою. Занулення перетворює замикання на корпус в однофазне коротке замикання, внаслідок чого спрацьовує максимальний струмовий захист і селективно відключає пошкоджену ділянку мережі. Крім того, занулення знижує потенціали корпусів, що з'являються у момент замикання на землю (на якийсь час, поки не спрацьовує відключаючий апарат - запобіжник).

Очевидно, що занулення здійснює дві захисні дії – швидке автоматичне відключення пошкодженої установки від живлячої мережі і зниження напруги занулених металевих не струмопровідних частин, що опинилися під напругою.

Повторні заземлення нульового дроту повинні виконуватися на кінцях відгалужень повітряних ліній завдовжки більше 200 м і в середині ліній відгалуження довжиною 500 м [37].

4.5 Пожежна безпека доменного виробництва

У доменному цеху присутні такі горючі речовини, як природний і доменний газ, мазут, кокс, вугільний пил, ізоляція кабельного господарства, металізовані окатиші. Джерелами запалення можуть бути: променисте тепло, розплавлений чавун і шлак, і їх краплі, електричні іскри, дуги при коротких замиканнях в електричних ланцюгах, тепло і іскри від горіння і удару. Найбільш вірогідні пожежонебезпечні ділянки є місця загорання газу - погано провітрювані приміщення, де знаходиться апаратура під тиском; газові тракти з горючим газом, при попаданні в яких повітря (зважаючи на зниження тиску або припинення подачі газу) утворюється вибухонебезпечна суміш.

Метан – це основний компонент природного газу. Температура займання його в повітрі 645–800 °С, температура займання в кисні на 50–100 °С. Токсична дія його виявляється лише при такій концентрації, коли помітно зменшується вміст кисню в атмосфері. Присутність в природному газі баластних газів (азоту, вуглекислоти і ін.) підвищує температуру його займання.

Підходи і проїзди до пожежних агрегатів, кранів, а також первинним пристосуванням для гасіння пожежі не повинні захащуватися. Простір біля печей і пультів управління повинен бути вільним від сторонніх предметів, легкозаймистих і екзотермічних матеріалів. Велике значення має надійне охолодження кладки печі, що перешкоджає і прогару і виходу розплавленого металу з печі; необхідний контроль за охолодженням печі. При випуску чавуну і шлаку забороняється використовувати ковші, виливниці з водою або вологими матеріалами. Місця розливання повинні бути звільнені від горючих матеріалів, не передбачених технологічним регламентом.

Насосні станції доменних печей слід обладнати резервними насосами з електроприводами і резервними трубопроводами до печей. Забороняється проводити ремонт системи охолодження на оглядових майданчиках над чавунними і шлаковими льотками під час випуску продуктів плавки.

Захист від променистого тепла – одна з засобів пожежної безпеки при розливанні і транспортуванні рідкого чавуну. Пульти управління розливних машин та інші пульти управління, розташовані в безпосередній близькості від місця розплавленого чавуну і шлаку, виконують з негорючого матеріалу, захищеного металевією сіткою, засклені теплопоглинальним склом.

Всі кабельні і електричні приміщення обладналися пожежною сигналізацією.

Для виключення загоряння в транспортних галереях неприпустимо застосування відкритого вогню. На місці проведення вогняних робіт при ремонті необхідно підготувати первинні засоби пожежогасіння. Щоб уникнути загоряння транспортних стрічок забороняється приймати неохолоджений агломерат і кокс з температурою вище 100 °С.

Щоб уникнути пожежі на газових комунікаціях забороняється користуватися факелом для відігрівання газопроводу і арматури, а також для визначення місця витоку газу; застосовувати дерев'яні пробки для закриття штуцерів на газопроводах; складувати поблизу газопроводу горючі матеріали; підпалювати газ, що випускається при продуванні газопроводу.

Евакуація людей з будівлі доменного цеху у разі виникнення пожежі забезпечується через евакуаційні виходи, які повинні вести: з приміщення першого поверху безпосередньо назовні; з приміщень будь-якого поверху (окрім першого) в коридор, ведучий на сходову клітку.

Кількість евакуаційних виходів повинна бути не менше двох.

Електрична пожежна сигналізація служить для швидкого оповіщення служби пожежної охорони про виниклу пожежу в якому-небудь приміщенні доменного цеху. При необхідності пожежна сигналізація може бути суміщена з охоронною сигналізацією [33, 34].

У будівлі цеху забезпечують можливість швидкої безпечної евакуації людей в разі виникнення пожежі. Евакуаційні виходи ведуть з приміщень першого поверху назовні, з приміщень останніх поверхів на сходову клітку, що має вихід назовні. Пожежна безпека об'єктів будівництва повинна відповідати

вимогам ДБН В.1.1.7-2016 [38].

4.6 Розрахунок установки водяного пожежогасіння

Система автоматичної пожежної сигналізації складається з оповіщувача датчиків, що встановлюються в приміщеннях. Теплові оповіщувачі диференціальної дії типу ДПС-03 працюють на принципі різного наростання термоелектрорушійної сили в закреслених і посріблених спаях термопар.

Комбіновані теплові і димові оповіщувачі типу К1-1 мають чутливий елемент у вигляді іонізаційної камери (для реагування на дим) і терморезистори (для реагування на теплоту). При попаданні диму в іонізаційну камеру зменшується значення іонізаційного струму унаслідок поглинання димом – випромінювання радіоактивного ізотопу, що приводить до розбалансування електричної схеми і подачі відповідного електричного сигналу. Температура спрацьовування цих оповіщувачів 50–80 °С. Розрахункова площа обслуговування 100 м .

Площа приміщення $S = 100 \text{ м}^2$; висота $h = 6 \text{ м}$.

Інтенсивність зрошення водою $g = 0,9 \text{ л/м}^2$; час роботи $t = 15 \text{ хв}$.

Гасіння здійснюється спринклерними зрошувачами. Для таких зрошувачів $K_{\min} = 5 \text{ м}$; $K_{\max} = 100 \text{ м}$; p – вільний натиск перед зрошувачем.

Максимальна відстань між зрошувачами $L_{\max} = 2 \text{ м}$.

Приймаємо величину натиску перед зрошувачами $H = 10 \text{ м}$.

Визначимо натиск баку H_6 :

$$H_6 = S \cdot g \cdot t, \quad (4.1)$$

$$H_6 = 100 \cdot 0,9 \cdot 900 = 81000 \text{ л або } 81 \text{ м}^3.$$

Визначаємо витрати води Q_v через один зрошувач:

$$Q_B = K \cdot \sqrt{H_{пл}}, \text{ л/сек}, \quad (4.2)$$

де K – коефіцієнт продуктивності зрошувача, при діаметрі вихідного отвору 15 мм $K = 0,71 = 0,71$.

$$Q_B = 0,71 \cdot \sqrt{10} = 2,74 \text{ л/сек.}$$

Витрати води за годину через один зрошувач складає:

$$Q_B = 2,74 \cdot 3600 = 9864 \text{ л/год або } 9,86 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Визначити кількість зрошувачів n :

$$n = Q_6 / Q_{Bч} = 81,0 / 9,86 \sim 10 \text{ шт.}$$

Розподіляємо зрошувачі по площі цеху під стелею.

Витрати натиску:

$$H_1 = Q^2 / B, \quad (4.3)$$

де Q – витрати води на розрахунковій ділянці трубопроводу, л/сек;

B – характеристика трубопроводу, визначається за формулою:

$$B = K_1 / l, \quad (4.4)$$

де K_1 – коефіцієнт;

l – довжина ділянки трубопроводу, м.

Для наших умов $Q = Q_6 / 3600 = 81000 / 3600 = 22,5$ л/сек.

Для транспортування води приймаємо сталю електрозварну трубу з діаметром проходу 125 мм і товщиною стінки 3,2мм.

Для такої труби коефіцієнт $K_1 \sim 13530$.

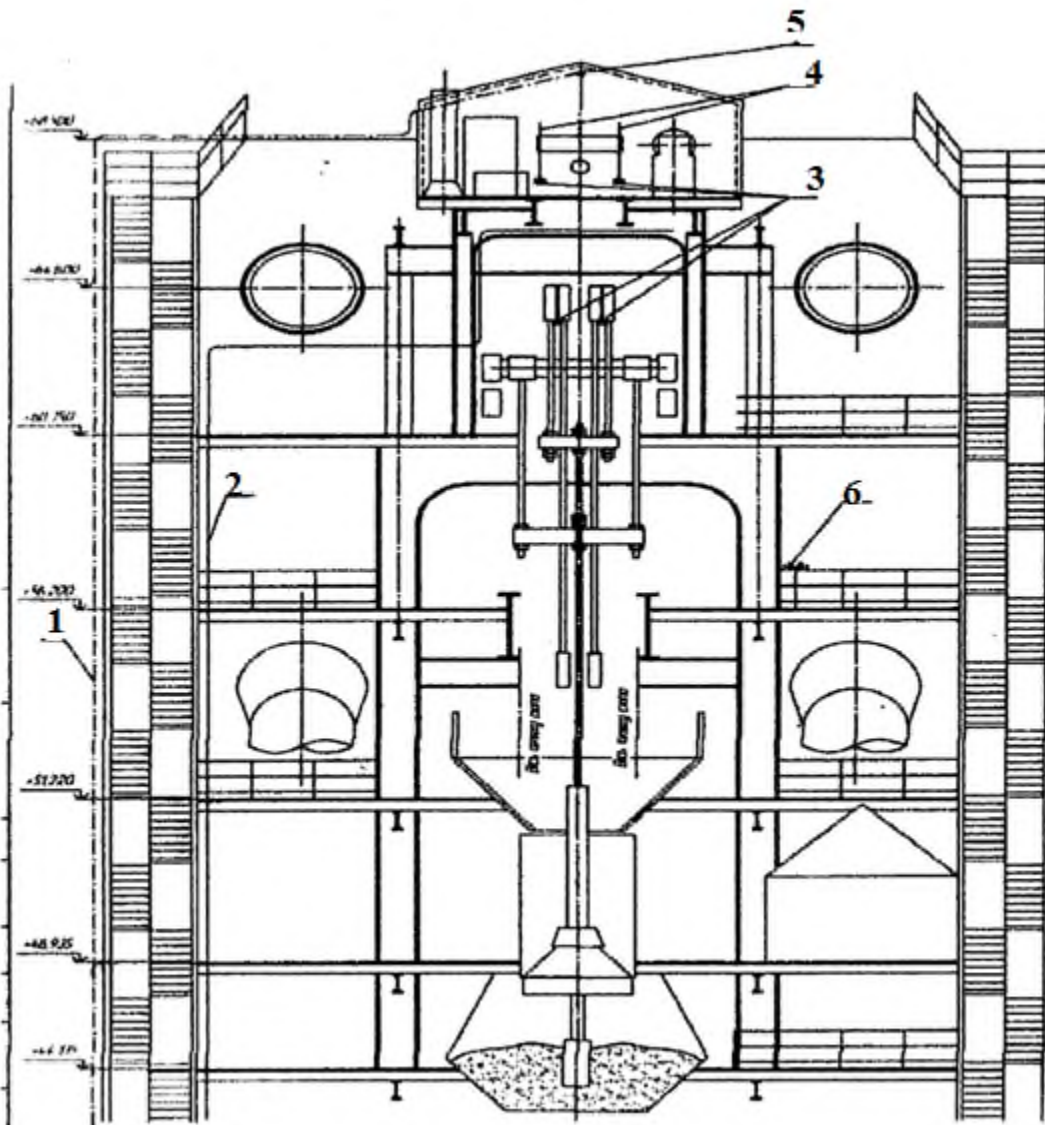
Приймаємо довжину трубопроводу $l = 50$ м.

$$B = 13530/50 = 273,$$

$$H_1 = (22,5)^2 / 273 = 1,85 \text{ м,}$$

$$H = H + H_1 = 10 + 1,85 = 12 \text{ м.}$$

Необхідний натиск води на пожежогасіння –12 м. Тобто необхідно встановити 10 зрошувачів під стелею.



1 – паропровід; 2 – водопровід; 3 – термосигналізатори; 4 – шланг гнучкий;
5 – паровий колектор; 6 – пожежний кран

Рисунок 4.1 – Устаткування водяного пожежогасіння міжконусного простору доменної печі

4.7 Висновки

1. Проаналізовано небезпечні та шкідливі чинники виробничого середовища доменного цеху та запропоновані заходи щодо їх усунення. Приведено розрахунок установки водяного пожежогасіння міжконусного простору доменної печі.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасні методи інтенсифікації доменного процесу та розглянуто аспекти технології доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива.

2. В умовах доменної печі №2 ПАТ «Запоріжсталь» розглянуто можливості збільшення витрати антрациту як замітника коксу з 25 до 55 кг/т. Показано, що для підвищення ефективності доменної плавки необхідно використовувати збагачений антрацит з витратою 70–80 кг/т чавуну.

3. Запропонована технологія використання антрациту як замітника коксу при доменній плавці може бути корисною в умовах доменного виробництва провідних українських металургійних підприємств.

4. Проаналізовано небезпечні та шкідливі чинники виробничого середовища доменного цеху та запропоновані заходи щодо їх усунення. Приведено розрахунок установки водяного пожежогасіння міжконусного простору доменної печі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Фурдичко Л. Є., Скварко Ю. В. Сучасний стан та перспективи металургійної галузі України : фінансові показники розвитку, експорт-імпорт продукції. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України* : зб. наук. пр. 2016. Вип. 3(119). С. 102–106.
2. Тарасенко О. Ю. Стратегічний розвиток металургійної галузі України на основі підвищення інноваційного потенціалу. *Менеджер*. 2014. №2(68). С. 114–118.
3. Кушакова Н. О. Металургійний комплекс України : загальна характеристика та сучасний стан розвитку. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2019. Вип. 23. Частина 1. С. 162–166.
4. Пилипенко А. А. Стратегічні напрямки підприємств металургійної галузі. *Ефективна економіка*. 2014. №1.
5. Сігарьов Є. М. Технології ресурсозбереження в металургії : конспект лекцій для освітньо-професійної програми підготовки магістрів за напрямом 136 Металургія (Частина 1). Кам'янське : ДДТУ, 2018. 80 с.
6. Бузоверя М. Т., Можаренко Н. М., Бузоверя В. М. Влияние состава комбинированного дутья на показатели материальных и тепловых балансов. *Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства* : материалы первой международной научно-технической конференции, 1998.
7. Гаспарян В. Е. О повышении эффективности применения природного газа в доменных печах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2008. №2. С. 10–13.
8. Севернюк В.В. Современные проблемы технологического прогресса доменной плавки. *Металлургическая и горнорудная промышленность* 2008. №6. С. 8–10.
9. Аронов С. П., Нестеренко Л. Л. Химия твердых горючих ископаемых. Харьков : Харьковский университет, 1960. 372 с.
10. Абраменков Ю. Я. Про коефіцієнт заміни коксу іншим паливом у

доменній печі. *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2006. №6. С. 100–102.

11. Химическая технология твердых горючих ископаемых; под ред. Г. Н. Макарова, Л. Д. Харламповича. Москва : Химия, 1986. 496 с.

12. Комплексная оценка углей как заменителей кокса в доменной плавке / Б. П. Волынкина, А. С. Михайленко, А. Ф. Авцинов и др. *Известия вузов. Черная металлургия*, 1998. №8. С. 15–18.

13. Товаровский И. Г., Лялюк В. П. Эволюция доменной плавки : монография. Днепропетровск : Пороги, 2001. 424 с.

14. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. Днепропетровск : Пороги, 2003. 599 с.

15. Доменное производство : справочник; под редакцией И. П. Бардина. Москва : Металургиздат, 1963. Т.1. 648 с.

16. Похвиснев А. Н., Абрамов В. С., Красавцев Н. И., Леонидов Ш. С. Доменное производство. Москва : Металургиздат, 1951. 707 с.

17. Красавцев Н. И. Металлургия чугуна. Москва : Металургиздат, 1952. 639 с.

18. Павлов М. А. Металлургия чугуна. Часть 1. Введение, сырые материалы. Москва : Металургиздат, 1955. 212с.

19. Сорокин В. А. Работа доменной печи с добавкой каменного угля. *Сталь*. 1942. Вып. №5–6. С. 3–7.

20. Опыт доменной плавки с частичной заменой кокса каменным углем / И. В. Котельников, Н. Н. Попов, Н. А. Прядко и др. *Сталь*, 1994. №8. С. 15–20.

21. Применение каменного угля для частичной замены металлургического кокса в доменной плавке / А. В. Дидевич, Л. В. Быков, А. В. Зотов и др. *Труды V Международного конгресса доменщиков*. Днепропетровск : Пороги, 1999. С. 242–244.

22. Гусаров А. К. Доменная плавка с частичной заменой кокса каменным углем. *Металлург*, 1997. №12. С. 15–16.

23. Бочка В. В. Распределение материалов на колошнике доменной печи

при частичной замене кокса кусковым углем. *Труды V Международного конгресса доменщиков*. Днепропетровск : Пороги, 1999. С. 315–317.

24. Бочка В. В., Донской Е. Г., Костенко Г. П., Пустыльников Ю.Н. Некоторые особенности выплавки чугуна при использовании кусковых заменителей кокса. *Стратегия качества в промышленности и образовании : сборник трудов международной конференции (Варна, 3–10 июня 2005г.)*. Днепропетровск : Пороги, 2005. С. 44–47.

25. Лялюк В. П. Повышение эффективности доменной плавки путем совершенствования управления процессами в горне печи : докт. дисс, НМетАУ - Днепропетровск, 2002. 351 с.

26. Воденнікова О. С. *Металургія чорних металів: конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія»*. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 144 с.

27. ПАТ «Запоріжсталь». URL: <https://zaporizhstal.com/> (дата звернення: 01.12.2022).

28. ДСТУ ISO 4701:2019 (ISO 4701:2019, IDT). Руди залізні та залізо прямого відновлювання. Визначення гранулометричного складу методом розсіювання. На заміну ДСТУ ISO 4701:2012 [Чинний від 2020-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 31 с.

29. ДСТУ 8811.1:2018. Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Метод визначення загального заліза. На заміну ДСТУ ГОСТ 23581.18:2008 [Чинний від 2019-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2018. 7 с.

30. ДСТУ Б В.2.7-250:2011. Матеріали будівельні. Дієлькометричний метод вимірювання вологості. На заміну ГОСТ 21718-84, MOD [Чинний від 2012-12-01]. Київ : Мінрегіон України, 2012. 7 с.

31. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю [Чинний від 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с.

32. Воденнікова О., Бабак А., Воденнікова Л. Застосування антрациту як замітника коксу при доменній плавці. *Scientific discussions and solution*

development : VI International Scientific and Practical Conference (December 05–07, Graz, Austria). Graz: -, 2022. pp. 316–324.

33. Бринза В. Н., Зинковський М. М. Охрана труда в черной металлургии. Москва : Металлургия, 1982. 335 с.

34. Ефанов П. Д., Берг А. И. Охрана труда и техника безопасности в сталеплавильном производстве. Москва : Металлургия, 1987. 230 с.

35. Алексеев В. Г. Шум и вибрация на производстве. Москва : Энергия, 1980. 352 с.

36. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ; прийнятий з 01.12.1999 р. №42. Київ, 12 с.

37. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 448 с.

38. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ; затверджено та наказом Мінрегіоном України від 31.10.2016 р №237 та введений в дію з 01.06.2017 р. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35с.

ДОДАТКИ

ДАДАТОК А

**НАУКОВІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
МАГІСТРА**



SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT

85.	Воденнікова О., Бабак А., Воденнікова Л. ЗАСТОСУВАННЯ АНТРАЦИТУ ЯК ЗАМІННИКА КОКСУ ПРИ ДОМЕННІЙ ПЛАВЦІ	316
86.	Воропай Е.С., Юрченко А.О. ПРО ЕЛЕМЕНТИ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОННИХ ПОСТІВНИКІВ	325
87.	Леонтьев П.О., Яцина І.В. WASTE-TO-ENERGY – ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІДХОДІВ В ЕНЕРГІЮ	328
88.	Рубель А.О., Курасва А.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ НАПРЯМНИХ ПРИСТРОЇВ ПОСУДИН У ЛОБОВОМУ НАПРЯМКУ ДЛЯ КАНАТНО-ПРОФІЛЬНИХ ПРОВІДНИКІВ	331
TOURISM		
89.	Баяндінова С.М., Амангелды Д.С. ЕРЕКШЕ ҚОРҒАЛАТЫН ТАБИҒИ АУМАҚТАРДЫҢ РЕКРЕАЦИЈАЛЫҚ ӨЛЕУЕТІН КЕШЕНДІ БАҒАЛАУ (БАЯНАУЫЛ ҰЛТТЫҚ ТАБИҒИ ПАРКІ МЫСАЛЫНДА)	336
90.	Замзаева Д.Т., Абдреева Ш.Т. ТУРИЗМ САЛАСЫНДАҒЫ ФРАНЧАЙЗИНГТІ ДАМУ	341
91.	Көшкімбаева Ү.Т., Жәнібекова А.Е. ҚАЗАҚСТАННЫҢ ТУРИЗМІН ДАМУДАҒЫ ОҢАЛТУДЫҢ ЖАҒДАЙЫ	345
92.	Көшкімбаева Ү.Т., Жұмәбетова І.М. ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЭТНОГРАФИЯЛЫҚ ТУРИЗМНІҢ ӨЗЕКТІЛІГІ МЕН ДАМУ ЖОЛДАРЫ	349

ЗАСТОСУВАННЯ АНТРАЦИТУ ЯК ЗАМІННИКА КОКСУ ПРИ ДОМЕННІЙ ПЛАВЦІ

Воденнікова Оксана

канд.техн.наук, доцент

Запорізький національний університет, Україна

Бабак Антон

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Запорізький національний університет, Україна

Воденнікова Лариса

асистент

Запорізький державний медичний університет, Україна

Вступ. На сьогодні для підвищення конкурентоспроможності коксу на світовому ринку необхідно вдосконалити його технологію виробництва всіх її стадіях: від добору складу шихти з допомогою різних способів підготовки (кінцевого дроблення, змішування, ущільнення та інше) до формування якостей коксу у вигляді позалінійної обробки.

Особливо підвищення якості та конкурентоспроможності коксу набуває особливого значення у зв'язку з використанням у доменному виробництві прогресивних технологій (наприклад, адування піловугільного палива [1, 2]), які інтенсифікують процес доменної плавки та знижують витрату коксу (за даними [3] від 360 до 260 кг/т чавуну). Інтенсифікація доменного процесу здійснюється двома шляхами [4]:

- за рахунок постійного зростання потужності доменних печей і вдосконалення їх конструкції;
- за рахунок поліпшення якості шихтових матеріалів.

У якості відомих заміників коксу можна використовувати природний газ, коксовий газ, мазут, піловугільне паливо та деякі інші вуглеводні [5].

Подача заміників коксу відбувається безпосередньо через фурми в зону горіння. Внаслідок цього неможливо забезпечити витрату коксу нижче 250-300 кг/т чавуну. Це пояснюється тим, що кокс повинен виконувати ще й роль розпушувача стовпа шихтових матеріалів.

Ефективним напрямом заміни коксу є використання антрациту, яке не призводить до суттєвої зміни основних технологічних параметрів процесу: продуктивності печі, виходу колошникового газу, утворення шлаку та інші [6].

Мета роботи – оцінка впливу використання антрациту в якості заміника коксу для умов доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь».

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:

1. Проаналізувати вплив збільшення витрати антрациту в доменних печах №2-5 ПАТ «Запоріжсталь» на протязі 2000-2012 р.р. на основні техніка-

економічні показники доменної плавки.

2. Розглянути можливості ефективної заміни коксу антрацитом в умовах доменної печі №2 ПАТ «Запоріжсталь».

Результати дослідження. У роботі розглядаються технологічні аспекти технології виплавки передельного чавуну в доменних печах (зокрема №2-5 корисним об'ємом 1513 м³ кожна) в умовах доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь» на протязі 2000-2012 р.р. з застосуванням антрациту (таблиці 1-4). Аналіз заводських даних показав на тенденцію збільшення витрати антрациту на усіх чотирьох доменних печах до 55 кг/т чавуну при збільшенні продуктивності печей до 3717 т/добу чавуну.

Перевірка можливості заміни коксу при збільшенні витрати антрациту до 100 кг/т чавуну виконувалася в умовах доменної печі №2. Протягом 6 діб підряд кількість завантаженого антрациту збільшували з 25 до 55 кг/т залізорудних матеріалів, що відповідає витраті 45-100 кг/т чавуну.

Розглядався вплив витрати антрациту на наступні показники (рис.1, 2):

- зміну рудного навантаження на кокс;
- температуру дуття;
- витрату природного газу;
- вміст кремнію в чавуні;
- масу рудної подачі.

Обробка експериментальних даних впливу витрати антрациту на вище зазначені показники проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

В роботі встановлено, що при збільшенні витрати антрациту з 25 до 55 кг/т чавуну рудне навантаження збільшували з 3,85 до 4,45 кг/кг, що відповідає зниженню витрати коксу щонайменше на 60 кг/т чавуну. При цьому сумарна очікувана зміна витрати коксу від супутнього збільшення витрати природного газу, зменшення температури дуття і підвищення вмісту кремнію в чавуні близько до нуля (взаємно врівноважується), так що можливе скорочення витрати коксу на 60 кг/т чавуну обумовлене заміною його антрацитом (55 кг/т чавуну).

Таким чином, баланс чинників свідчить про можливість подальшої ефективної заміни коксу антрацитом з коефіцієнтом заміни вище 1 кг/кг.

Разом з тим, стабільного режиму плавки при витраті антрациту 100 кг/т чавуну досягти поки не вдалося. Це пов'язано з недостатньою вивченістю перехідних процесів при різкому збільшенні витрати вугілля, а також недотриманням умови своєчасного збільшення при цьому розміру подачі. Комплексне вивчення процесів дозволить виявити нові кількісні закономірності процесів і розробити раціональні параметри технології з постійною заміною коксу антрацитом до 100-150 кг/т чавуну.

TECHNICAL SCIENCES
SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT

Таблиця 1.
Технологічні показники роботи доменної печі № 2 ВАТ «Запоріжсталь»

Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2008р.	2010р.	2012р.
Витрата коксівного газу, м ³ /т чугуна	0	7	35	40,6	48
Продуктивність печі, т/добу чугуна	1909	1870	1999	1628	1482
Витрата коксу, кг/т чугуна	569	519	520	511	515
Інтенсивність горіння (E + A), т/м ³ добу	0,632	0,572	0,645	0,522	0,485
Дуття: витрата, м ³ /т.	2281	2321	2242	1926	1770
тиск, кПа	196	184	212	164	137
температура, °C	927	923	933	934	906
Витрата природного газу, м ³ /т чугуна	83	84	77	91	73
Витрата кисню, м ³ /т чугуна	75	78	167	158,4	151,6
Вміст O ₂ в дутті, %	23,6	23,8	27,4	27,8	26,7
Композитивний газ: тиск, кПа	77	63	96	50	28
температура, °C	355	378	337	307	298
вміст, % CO ₂	16,7	16,3	17,1	16,9	17,0
CO	23,3	21,9	24,1	24,2	23,5
H ₂	6,9	6,5	8,1	7,6	6,8
Хімічний аналіз чугуна, %:					
кремій	0,910	0,910	0,820	0,850	0,820
марганець	0,630	0,660	0,840	0,640	0,610
сірка	0,030	0,024	0,027	0,026	0,026
фосфор	0,058	0,060	0,081	0,097	0,106
вуглець	4,210	4,270	4,450	4,480	4,500
Окисненість шлаку	1,20	1,20	1,19	1,19	1,2
Вміст Fe в шлаці, %	52,31	52,10	52,62	54,82	54,04

TECHNICAL SCIENCES
SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT

Таблиця 2.
Технологічні показники роботи доменної печі № 3 ВАТ «Запоріжсталь»

Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2006р.	2010р.	2013р.
Витрата коксівного газу, кг/т чавуну	0	29	40	52,3	55
Продуктивність печі, т/добу чавуну	2673	2645	3059	2851	2980
Витрата коксу, кг/т чавуну	538	463	440	440	428
Інтенсивність горіння (K + A), т/м ³ доби	0,719	0,700	0,734	0,702	0,720
Дуття:					
витрата, м ³ /хв	2997	2893	2907	2665	2836
тиск, кПа	198	251	250	205	236
температура, °С	979	1081	1023	1043	1018
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	86	85	86	85	78
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	82	93	120	107,8	93,9
Вміст O ₂ в дутті, %	24,2	25,0	26,7	26,2	25,4
Кислотний газ:					
тиск, кПа	79	124	125	80	115
температура, °С	201	316	305	250	268
вміст, % CO ₂	16,1	17,0	18,1	18,2	17,9
CO	23,5	21,4	22,8	23,8	22,2
H ₂	6,3	7,5	7,4	7,4	7,0
Аналіз чавуну, %					
кремій	0,900	0,780	0,810	0,840	0,770
марганець	0,490	0,500	0,430	0,420	0,450
сірка	0,024	0,025	0,026	0,024	0,025
фосфор	0,056	0,063	0,068	0,079	0,083
вуглець	4,240	4,520	4,440	4,50	4,550
Основаність шлаку	1,21	1,21	1,19	1,19	1,20
Вміст Fe в шихті, %	52,17	52,52	52,70	53,39	54,39

Таблиця 3.
Технологічні показники роботи доменної печі № 4 ВАТ «Запоріжсталь»

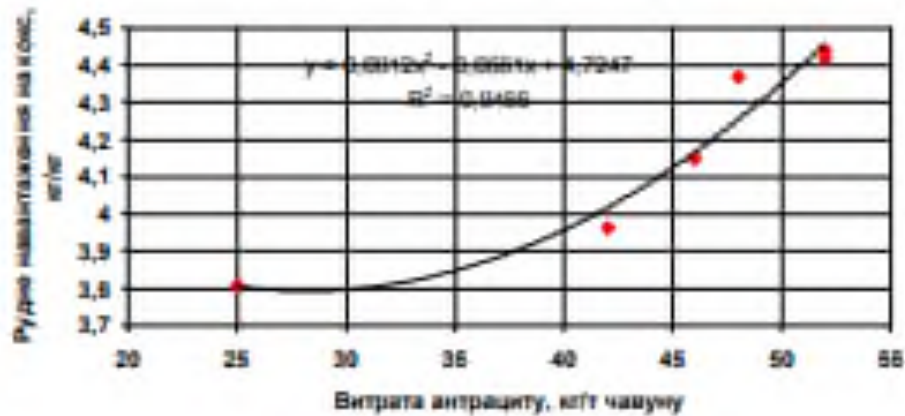
Технологічний показник	Дослідний період				
	2006р.	2003р.	2008р.	2010р.	2012р.
Витрата коксівного газу, м ³ /т чавуну	0	15	26	39	47
Продуктивність печі, т/добу чавуну	2337	2860	3027	3109	2798
Витрата коксу, кг/т чавуну	323	478	468	438	441
Інтенсивність горіння (K + A), т/м ³ доби	0,620	0,750	0,748	0,772	0,684
Дуття:					
витрата, м ³ /т.	2593	2954	3022	2919	2527
тиск, кПа	192	253	253	247	207
температура, °С	968	1044	1028	1021	1036
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	93	94	88	90	85
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	82	95	88	120	100
Вміст O ₂ в дутті, %	23,7	25,1	24,9	26,7	25,9
Калориметричний газ:					
тиск, кПа	128	12	129	85	118
температура, °С	339	311	284	257	296
вміст, % CO ₂	16,9	16,9	17,8	18,0	18,0
CO	22,0	21,9	23,5	23,7	21,9
H ₂	6,9	7,1	7,8	7,6	7,1
Хімічний аналіз чавуну, %:					
кисень	0,88	0,85	0,78	0,80	0,84
марганець	0,32	0,40	0,47	0,39	0,38
сірка	0,024	0,026	0,025	0,026	0,026
фосфор	0,049	0,054	0,062	0,067	0,076
вуглець	4,19	4,31	4,50	4,46	4,49
Щільність металу	1,20	1,21	1,21	1,19	1,20
Вміст Fe в металі, %	52,10	52,55	52,62	52,61	53,37

TECHNICAL SCIENCES
SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT

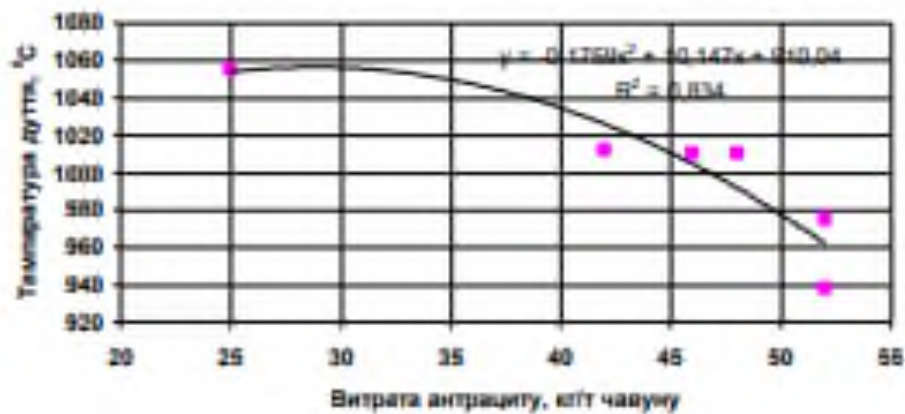
Таблиця 4.
Технологічні показники роботи доменної печі № 5 ВАТ «Запоріжсталь»

Технологічний показник	Дослідний період				
	2000р.	2003р.	2006р.	2010р.	2012р.
Витрата коксівного газу, м ³ /т чугуна	4	27	34	43	48
Продуктивність печі, т/добу чугуна	2676	2915	2772	3254	2952
Витрата коксу, кг/т чугуна	325	468	459	461	446
Інтенсивність горіння (K + A), т/м ³ доби	0,708	0,721	0,683	0,820	0,730
Дуття:					
витрата, м ³ /т	3203	3128	3051	2986	2798
тиск, кПа	239	245	221	257	215
температура, °С	1024	1028	1027	1012	1042
Витрата природного газу, м ³ /т чугуна	75	87	85	91	79
Витрата кисню, м ³ /т чугуна	72	92	80	142	99
Вміст O ₂ в дутті, %	23,6	24,8	24,1	28,0	25,6
Калорийності газу:					
тиск, кПа	119	119	93	126	92
температура, °С	296	327	322	263	227
вміст, % CO ₂	15,9	16,6	16,5	18,4	18,4
CO	23,0	22,5	21,7	23,7	23,9
H ₂	6,5	7,1	7,1	7,5	7,2
Хімічний аналіз чугуна, %:					
кисень	0,85	0,81	0,84	0,82	0,81
марганець	0,18	0,34	0,42	0,28	0,4
сірка	0,027	0,026	0,026	0,028	0,026
фосфор	0,053	0,053	0,062	0,066	0,078
вуглець	4,25	4,29	4,37	4,42	4,48
Щільність газу	1,22	1,22	1,22	1,18	1,20
Вміст Fe в шихті, %	52,30	52,359	52,89	53,95	53,50

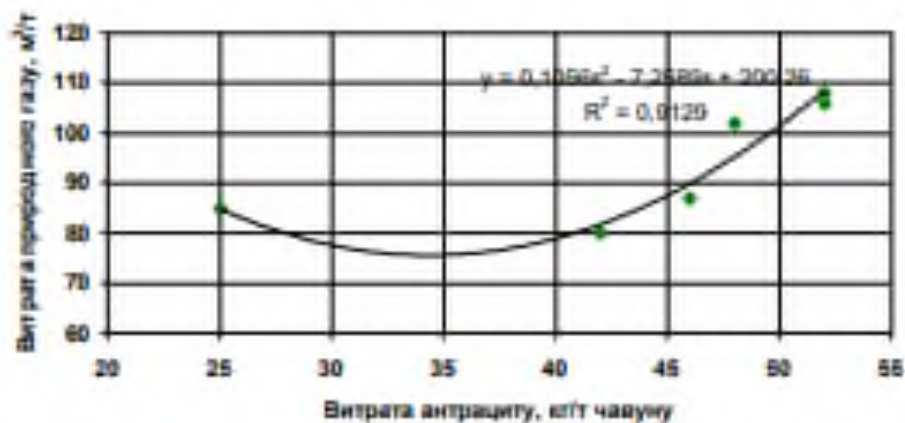
TECHNICAL SCIENCES
SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT



а



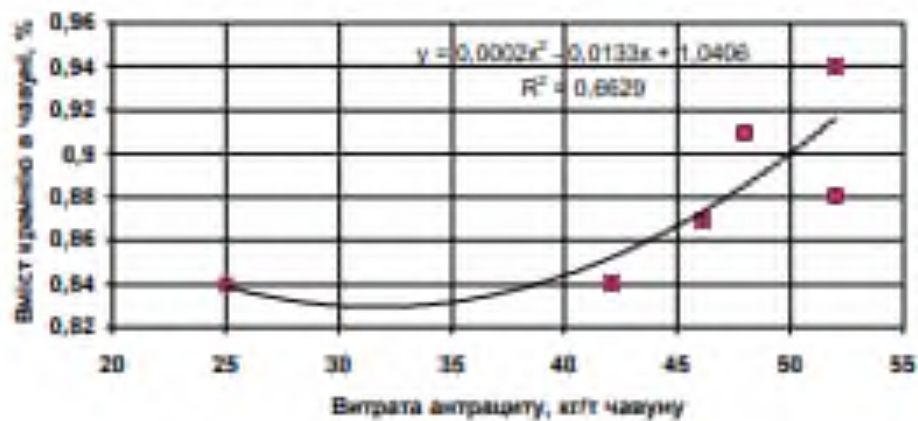
б



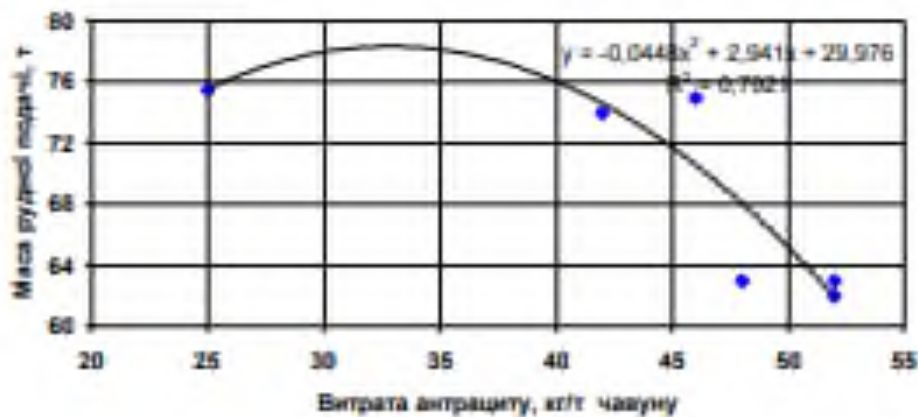
в

Рисунок 1. Зміна рудного навантаження на коже (а), температури дуття (б) та витрати природного газу (в) в ході підвищення витрати антрациту при доменній плавці

TECHNICAL SCIENCES
SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT



а



б

Рисунок 2. Зміна вмісту кремнію (а) та маси рудної подачі (б) в ході підвищення витрат антрацитів при доменній плавці

Висновки. Розглянуто можливості збільшення витрати антрацитів як замінива коксу з 25 до 55 кг/т чавуну в умовах доменної печі №2 ПАТ «Запоріжсталь». Показано, що для підвищення ефективності плавки необхідно використовувати збагачений антрацит з витратою 70-80 кг/т чавуну.

Список літератури:

1. Эффективность и ресурсы палеугольной технологии выплавки чугуна / С.Л. Ярошевский, В.В. Кочура, А.М. Кузнецов и др. *Металл и литей Украина*. 2018. №9-10(304-305). С. 7-22.
2. Воденіков С.А., Аносов В.Г., Дантев Д.О. Вплив способу подавання пизовугільного палива на ефективність його використання під час доменного плавлення. *Металургія*. 2013. Вип. 2(30). С. 16-20.
3. Курунов И.Ф. Шахтовые материалы, кокс, эксплуатация и показатели работы доменных печей. *Сталь*. 2001. № 3. С. 7-13.

TECHNICAL SCIENCES
SCIENTIFIC DISCUSSIONS AND SOLUTION DEVELOPMENT

4. Техніко-економічні показники доменної плавки та шляхи інтенсифікації доменного процесу. URL: <http://um.co.ua/4/4-19/4-190714.html> (дата звернення: 01.12.2022).
5. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса : учебн. пособие. Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 257 с.
6. Новохатский А.М., Михайлов Г.Д., Карпов А.В. Применение антрацита в качестве заменителя кокса в доменном производстве. URL: <http://uas.su/conferences/donplu2011/008/008.php> (дата звернення: 01.12.2022).