

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

*На правах рукопису*

**ВАНЮКОВА** Наталія Дмитрівна

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ  
ОКУСКОВАНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО  
МІСТЯТЬ ВУГЛЕЦЬ,  
ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ДОМЕННІЙ ПЛАВЦІ  
З МЕТОЮ ЕКОНОМІЇ КОКСУ**

Спеціальність 05.16.02 "Металургія чорних металів"

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 1995



Роботу виконано у Державній металургійній академії України

Науковий керівник - кандидат технічних наук,  
доцент Костьолов О.Л.

Офіційні опоненти: засл. діяч науки України,  
д.т.н. професор Казачков Є.А.  
к.т.н. Можаренко Н.М.

Провідне підприємство: Мет. комбінат "Запоріжсталь"

Захист відбудеться "19" грудня 1995 р. о 12<sup>30</sup> год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради К03.П.03 при Державній металургійній академії України за адресою: 320635, м.Дніпропетровськ, пр.Гагаріна, 4

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державної металургійної академії України.

Автореферат розіслано "17" листопада 1995 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук

Ю.С.Паніотов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Останнім часом одним із провідних напрямків науково-технічного прогресу в чорній металургії є підвищення якості залізородної сировини для доменної плавки. Приоритет при цьому віддається підвищенню механічної міцності і зниженню вмісту дрібних фракцій в агломераті і окотишах. Це забезпечує більш якісне використання відновлювальної властивості горнових газів і, як наслідок, зниження витрати коксу. Аналіз відновлювальних процесів, які відбуваються в окремому окотиші, вказує на їх топохімічний характер, і за цих умов центр окотиша не встигає відновитися. Відбувається перехід до первинного шлаку значної кількості закису заліза, який в подальшому відновлюється з розплаву прямим шляхом в умовах високих температур. За цих обставин, розвиток газово-вуглетермічного відновлення у шахті доменної печі в інтервалі температур 900-1000 °С за рахунок використання залізородних окотишів, які містять вуглець, буде сприяти зниженню ступеню прямого відновлення в горні доменної печі і зниженню витрати коксу.

Мета роботи. Розробка рекомендацій що до вмісту залишкового вуглецю в залізородних окотишах на основі дослідження відновлювальних процесів і розробленої математичної моделі газово-вуглетермічного відновлення залізородних окотишів, які містять вуглець.

### Наукова новизна:

- вперше було досліджено закономірності газово-вуглетермічного відновлення обпалених окотишів різної пористості, ядро яких являло собою суміш магнетиту з матеріалами, які містили вуглець, мали різну крупність і кількість яких змінювалася у широких межах;

- розроблено математичну модель, яка дозволяє розраховувати ступінь комплексного відновлення і ступінь прямого відновлення у залежності від вмісту і розміру часток вуглецю, а також пористості окотишів;

- обґрунтовано вимоги до технологічних показників вироблення залізородних окотишів, що містять вуглець, на конвеєрних обпалювальних машинах;

- методами мінералогічного і петрографічного аналізу вивчено структуру обпалених окотишів, що містять вуглець, а також їх металургійні властивості.

### Практична цінність роботи визначається:

- розробкою технологічних параметрів роботи обпалювальної конвеєрної

машини для термічної обробки залізорудних окотишів, що містять вуглець, в окислювальному середовищі з метою одержання заданого вмісту залишкового вуглецю в кінцевій структурі окотиша;

- дослідженням металургійних властивостей нового виду залізорудної сировини і відповідності її властивостей вимогам доменної плавки;

До захисту винесено наступні положення:

- результати дослідження газово-вуглетермічного і вуглетермічного відновлення залізорудних окотишів, що містять вуглець, з метою встановлення закономірностей процесів у залежності від вмісту залишкового вуглецю, ступеню обпалення окотишів, складу газу, тривалості і температури відновлення;

- результати дослідження окислювально-відновлювальних процесів у рудовугільному окотиші в умовах обпалення в окислювальному середовищі;

- результати промислового виробництва окотишів, які містять залишковий вуглець, і доменної плавки з використанням цих окотишів.

Особистий внесок у розробку наукових результатів полягає у тому, що автором самостійно організовано і проведено дослідження газово-вуглетермічного і вуглетермічного відновлення; на основі експериментальних даних розроблено математичну модель процесів відновлення залізорудних окотишів, які містять залишковий вуглець; в лабораторних умовах розроблено рекомендації по технології промислового виробництва; здійснено контроль за промисловим виробництвом і використанням окотишів у доменних плавках з подальшою обробкою одержаних виробничих даних.

Методи дослідження, використані для вирішення питань дисертаційної роботи, базуються на сучасній теорії відновлювальних процесів, фізико-хімічних і балансових розрахунках, статистичній обробці експериментальних даних, застосуванні сучасних методів моделювання.

Експериментальні дослідження доповнювалися натурними дослідженнями на пілотній установці, обпалювальних машинах і доменних печах шляхом порівняння з базовими періодами роботи цих агрегатів. Застосування цих методів дозволило встановити ефективність вироблення і використання залізорудних матеріалів, що містять вуглець.

Реалізація результатів у промисловості.

На дослідній фабриці Центральної і обпалювальній машині №1 Північного гірничозбагачувальних комбінатів вироблено промислові партії

залізорудних окотишів, що містять вуглець, які в подальшому проплавлялися у доменних печах Костянтинівського і ім. Петровського металургійних заводів. Використання від 25 до 50% дослідних окотишів у шихті доменних печей дозволило зменшити витрати коксу на 2,4 кг/т чавуну (у середньому по цеху). Економічний ефект склав 13,1 тис. крб. (за цінами 1990 р.).

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідалися і обговорювалися на Всесоюзній науково-технічній конференції “Фізико-хімія процесів відновлення металів”, м.Дніпропетровськ, 1988 р.; Всесоюзній науково-технічній конференції “Проблеми теорії і технології підготовки залізорудної сировини для доменного процесу і безкоксової металургії”, м.Дніпропетровськ, 1990 р.; Всесоюзній науково-технічній конференції “Шляхи розвитку науки і техніки при підготовці руд чорних металів до металургійної переробки”, м.Кривий Ріг, 1991 р.; Всеукраїнській науково-технічній конференції “Теорія і практика вирішення екологічних проблем у гірничовидобувній і металургійній промисловості”, м.Дніпропетровськ, 1993 р.; Українсько-німецькому симпозиумі “Заміна коксу шляхом вдування вугільного порошку і використання інших енергоносіїв у доменному процесі з урахуванням екологічних вимог”, м.Донецьк, 1992 р.; VIII Міжнародній науково-технічній конференції “Теорія і практика киснево-конверторних процесів”, м.Дніпропетровськ, 1994 р.; Міжнародній конференції “Теорія і практика агломенного виробництва”, м.Дніпропетровськ, 1995 р.; III Міжнародному конгресі доменщиків, м.Новокузнецьк (Росія), 1995 р.

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 9 наукових статтях. Одержано 1 авторське свідоцтво на винахід.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 5 глав, які містять 105 сторінок друкованого тексту, з урахуванням 14 малюнків і 35 таблиць, переліку літературних джерел із 82 найменувань і додатків на 5 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

### 1. Сучасні уяви про відновлювальні процеси.

Шихтові матеріали, які знаходяться у доменній печі, поступово знижуючись, обробляються відновлювальними газами і зазнають значних перетворень. Інтенсивна робота доменної печі з низькою витратою коксу можлива за умов високої якості залізорудних матеріалів. Останнім часом під цим розуміють, як правило, фізико-механічні властивості. З іншого боку, витрата коксу суттєво залежить від фізико-хімічних властивостей залізорудної сировини і, в першу чергу, від її спроможності до відновлення.

Сучасні уяви про відновлювальні процеси пов'язані з теорією А.А.Байкова. Великий внесок у розробку механізму реакцій відновлення було зроблено С.Т.Ростовцевим, Г.Н.Чуфаровим, П.В.Гельдом, О.А.Єсіним, Д.І.Рижонковим, Ю.С.Юсфіним та іншими.

Процес відновлення у куску відбувається топохімічно. На певній стадії відновлення в центрі куску знаходиться оксид, ще не займаний відновленням, а зовні - металеве залізо. За цих умов відбувається транспорт газу у відповідності із законами Кнудсенівської дифузії, тобто по каналах, діаметр яких не перебільшує довжини вільного пробігу молекул, що ускладнює пересування газів. У зонах доменної печі з високою температурою, де на поверхні куска утворюється шар металевого заліза значної товщини, процес відновлення повністю визначає дифузія. У цих же зонах набуває розвитку процес вуглетермічного відновлення заліза, перебіг якого відбувається у газовій фазі. Реакції, що відбуваються у зоні контакту вуглецю з оксидами заліза в центрі куска, можуть значною мірою впливати на розвиток реакції прямого відновлення і ініціювати її. Поява газообразного продукту (СО) сприяє розвитку відновлення оксиду заліза з утворенням діоксиду вуглецю (СО<sub>2</sub>), подальша взаємодія якого з вуглицем (С) призводить до виникнення відновлювального газу (СО). Реалізація вказаних процесів вуглетермічного і газОВО-вуглетермічного відновлення рудних матеріалів у зонах доменної печі з помірним рівнем температур сприятиме інтенсифікації процесу відновлення.

Фундаментальні дослідження комплексного відновлення, проведені під керівництвом С.Т.Ростовцева, показали, що кінетика комплексного відновлення заліза і міра участі в ньому різних газів і вуглецю визна-

частея низкою факторів: температурою, швидкістю газового потоку і його складом, реакційною спроможністю і вмістом вуглецю, розміром і формою часток, рівнем досконалості контакту вуглецю і оксидів заліза, фізичною структурою і мінералогічним складом вихідних матеріалів.

У проведених свого часу дослідженнях комплексного відновлення дослідні матеріали містили твердий вуглець, розподілений по всьому об'ємові зразка. В дослідженнях, які проведено в межах дисертаційної роботи, розроблено технологію термічної обробки, що забезпечує одержання рудовугільних окотишів, ядро яких містить твердий вуглець. У дисертаційній роботі проведено дослідження відновлення таких окотишів газами, твердим вуглецем, а також процесів їх комплексного відновлення.

## 2.Методика досліджень.

Для одержання дослідних окотишів використовувався залізорудний концентрат Центрального, Північного і Полтавського гірничозбагачувальних комбінатів, доломітизований вапняк, бентонит, коксик, антрацитовий штиб. В лабораторних умовах були одержані окотиші з різноманітною основністю і різним вмістом твердого вуглецю. Для одержання окотишів, які містять залишковий вуглець, з участю автора було розроблено нову технологію обпалення рудовугільних гранул, яка складається із сушки, підігріву, запалення і агломерації з просисанням повітря. Для запобігання спіканню окремих окотишів між собою регулюється швидкість фільтрації газів, передбачена рециркуляція газів з пониженим вмістом кисню. Були досліджені окислювально-відновлювальні процеси, які відбуваються під час обпалення рудовугільних окотишів в окислювальній атмосфері.

Кінетику відновлення окотишів, які містять залишковий вуглець, було досліджено на термогравіметричній установці з періодичним контролем вмісту  $H_2$  і  $CO$  за допомогою хроматографу "ГАЗОХРОМ 3101". Було проведено чотири серії експериментів: визначення температури початку вуглетермічного відновлення; визначення ступеню контактного відновлення оксидів заліза твердим вуглецем; визначення ступеню газового відновлення для окотишів, які пройшли вуглетермічне відновлення; дослідження комплексного відновлення залізорудних окислених окотишів, які містять залишковий вуглець. Для окремих партій дослідно-промислових окотишів проводилися випробування гарячої міцності і спроможності до відновлення

(ДержСТ 19575-74 та ДержСТ 17212-71).

Для дослідження процесів комплексного відновлення і їх подальшого математичного опису було обрано композиційний, симетричний, трьохрівневий план експерименту.

Розрахунок ступеню відновлення газом і твердим вуглецем проводився на основі схеми А.А.Байкова. В експериментах здійснювався безперервний контроль втрати маси зразку і концентрації CO у визначені інтервали часу. Результати вимірювання використовувалися як вихідні дані для розрахунків ступеню газового і вуглетермічного відновлення.

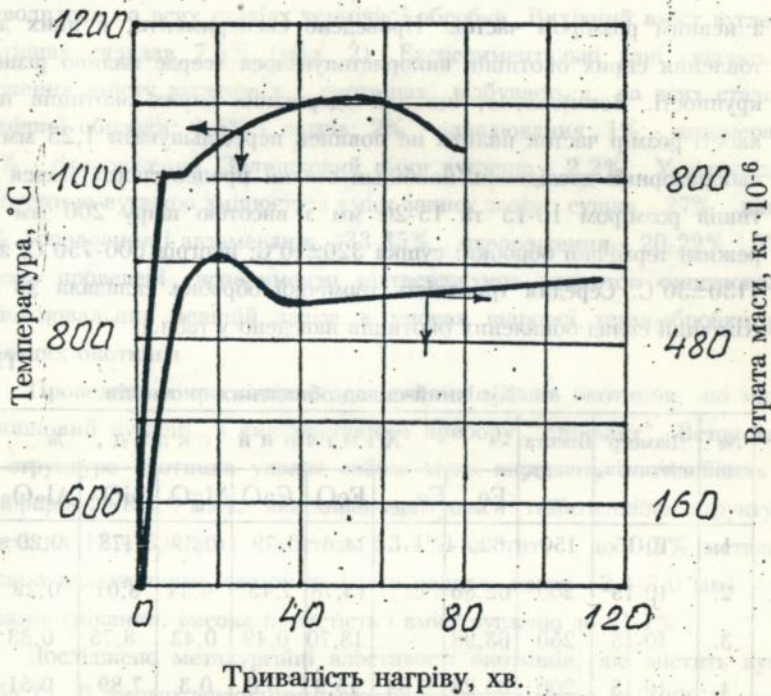
### 3. Дослідження окислювально-відновлювальних процесів у рудовугільному окотиші під час його термічної обробки в окислювальній атмосфері.

Аналіз складу газової фази та окислювально-відновлювальних процесів під час агломерації показує, що горіння вуглецю відбувається з участю кисню із складу шихти, тобто, мають місце реакції відновлення оксидів заліза. Було проведено досліди по вивченню кінетики вигорання із суміші з інертним додатком ( $Al_2O_3$ ). Вміст антрациту у суміші складав 20 %. Процес вигорання мав топохімічний характер. Збільшення витрати повітря від 180 до 1400  $cm^3/xв$  призвело до затухання процесу горіння, що пов'язано з охолоджуючою дією повітря. Вміст вуглецю в рудовугільних окотишах змінювали в межах від 5 до 20 %. Перебіг процесу оцінювався по тому, як змінюється температура в центрі окотиша і маса зразку. Результати експерименту зображено на мал.1.

Спочатку спостерігається швидкий нагрів окотиша до температури 1000°C, пізніше - повільне розігрівання окотиша за рахунок горіння вуглецю у зовнішньому шарі і подальше зниження температури, пов'язане з розвитком ендотермічних реакцій вуглетермічного відновлення. Збільшення температури для окотишів, які містять 20, 10 та 7 % вуглецю складає відповідно 100, 60 та 30 °C, а інтервал часу 67, 40 та 34 хвилини.

Обробка даних, які характеризують кінетику зміни маси зразку, показала, що спочатку відбувається різке зменшення маси, далі незначне зростання і повільне її зменшення, яке вказує на розвиток процесу вуглетермічного відновлення. Останнє підтверджується тим, що центр окотиша мав значний ступінь відновлення. Збільшення розміру часток вугілля призводить до зменшення загальної втрати маси, а відповідно, і ступеню

Зміна температури в центрі рудовугільного окотиша і його маси під час нагрівання в окислювальному середовищі



відновлення. Так, збільшення розміру часток вугілля від -0,005 мм до 0,063-1,0 мм зменшує втрату маси у 7 разів.

Таким чином, для нормального протікання технологічного процесу термічної обробки рудовугільних окотишів в окислювальній атмосфері, тобто, без спікання окремих окотишів між собою і із збереженням залишкового вуглецю, а також для отримання необхідних фізичних і фізико-хімічних властивостей окотишів, необхідно використовувати тверде паливо з певним розміром часток. Проведено експерименти, в яких для виготовлення сирих окотишів використовувалося тверде паливо різноманітної крупності. Встановлено, що для одержання сирих окотишів необхідної якості розмір часток палива не повинен перебільшувати 1,25 мм. Під час лабораторних досліджень найбільш сталий процес спостерігався для окотишів розміром 10-15 та 15-20 мм з висотою шару 200 мм і такому режимі термічної обробки: сушка  $320 \pm 10^\circ\text{C}$ ; підігрів  $600-750^\circ\text{C}$ ; запалення  $1130 \pm 30^\circ\text{C}$ . Середня тривалість термічної обробки складала 23 хвилини. Хімічний склад обпалених окотишів наведено у табл.1.

Таблиця 1.

Хімічний склад обпалених окотишів.

№ серії	Діаметр окотишів, мм	Висота шару, мм	Х і м і ч н и й   с к л а д ,   %							
			Fe <sub>заг</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>ост</sub>
1.	10-15	150	62,44	-	14,6	1,79	0,39	7,78	0,29	2,31
2.	10-15	200	62,86	сл	13,78	1,45	0,54	8,01	0,29	1,68
3.	10-15	250	63,98	-	18,70	0,49	0,43	8,75	0,33	2,57
4.	10-15	200	63,28	0,84	15,9	0,6	0,3	7,89	0,51	4,36
5.	15-20	200	63,28	-	22,4	4,15	0,74	7,82	0,36	1,62
6	10-15	200	62,44	сл	31,58	4,36	0,74	8,52	0,43	2,17

Прим. №1-5 - паливо - коксик, №6 - коксик-антрацит1:1. Крупність - 1,25 мм, витрата - 7%.

Укрупнені лабораторні дослідження по вдосконаленню технології одержання окотишів, які містять вуглець, було проведено з використанням шихтових матеріалів, які застосовуються на фабриці огрудування Північного гірничо-збагачувального комбінату. Для зменшення кількості експериментів застосовувався симплекс-метод з одержанням моделі типу  $Y = f(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) = \max$ .

У дисертаційній роботі наведено вихідний симплекс, робоча таблиця експериментів симплекс-планування із заміною кожного досліджуваного новим і результати експериментів по одержанню окотишів, які містять вуглець - вихідні дані для побудови математичної моделі. За допомогою кореляційно-регресійного аналізу були одержані поліноміальні моделі у вигляді множинних рівнянь регресії.

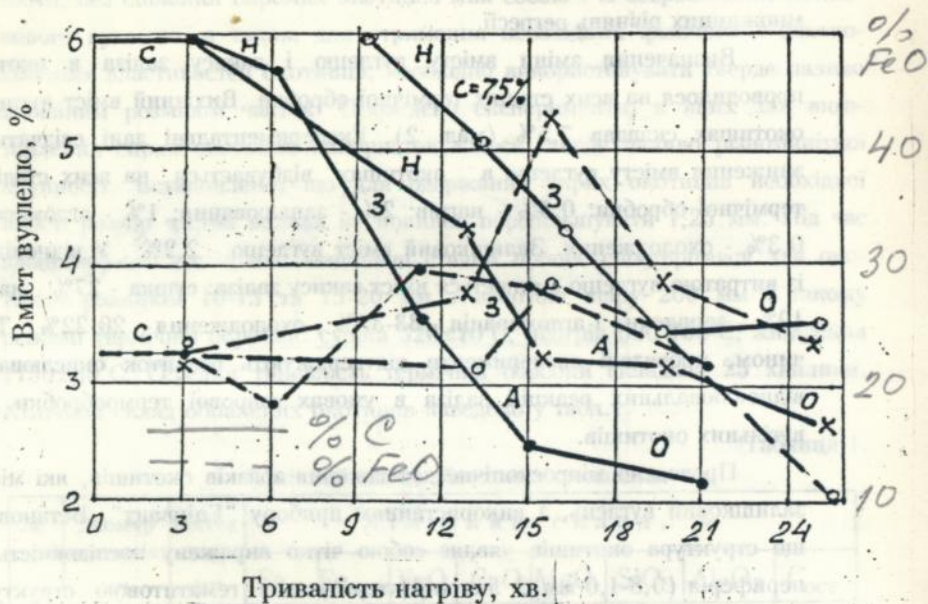
Визначення зміни вмісту вуглецю і заліза в окотишах проводилося на всіх стадіях термічної обробки. Вихідний вміст вуглецю в окотишах складав 7,5% (мал. 2). Експериментальні дані свідчать, що зниження вмісту вуглецю в окотишах відбувається на всіх стадіях їх термічної обробки: 0,5% - нагрів; 2% - запалювання; 1% - агломерація і 0,3% - охолодження. Залишковий вміст вуглецю - 2,2%. У відповідності із витратою вуглецю змінюється вміст заліза: сушка - 27%, нагрів - 19%, запалювання і агломерація - 33-35%, охолодження - 20-22%. Таким чином, проведені експерименти підтверджують розвиток окислювально-відновлювальних реакцій заліза в умовах шарової термообробки рудовугільних окотишів.

Проведено мікроскопічне дослідження зразків окотишів, які містили залишковий вуглець, з використанням прибору "Епиквант". Встановлено, що структура окотишів уявляє собою чітко виражену послідовність зон: периферія (0,8-1,0 мм), яка характеризується гематитовою структурою; перехідна (2,4-3,0 мм) - містить 53,4% вуглецю і до 0,5% металевого заліза з включеннями часток твердого палива; центр (2,4-3,0 мм) - твердофазне спікання, висока пористість і вміст вуглецю до 21,1%.

Досліджено металургійні властивості окотишів, які містять вуглець (табл.2). В умовах високотемпературного відновлення до 1000°C спостерігається повільна усадка без порушення газопроникливості шару. При підвищенні температури відновлення на 50-100°C розміри усадки і перепад тиску в шарі значно зростають при незначному збільшенні ступеню відновлення.

Температура відновлення, °C	Вміст вуглецю, %	Вміст заліза, %
1000	2,2	27
1050	2,2	27
1100	2,2	27
1150	2,2	27
1200	2,2	27
1250	2,2	27
1300	2,2	27
1350	2,2	27
1400	2,2	27
1450	2,2	27
1500	2,2	27
1550	2,2	27
1600	2,2	27
1650	2,2	27
1700	2,2	27
1750	2,2	27
1800	2,2	27
1850	2,2	27
1900	2,2	27
1950	2,2	27
2000	2,2	27

Кінетика зміни вмісту вуглецю і заліза в окотишах під час їх термічної обробки



- С - сушка
- Н - нагрів
- З - займання
- А - агломерація
- О - охолодження

Таблиця 2.

Результати випробувань вироблених на "ОК-278" окотиншів, які містять вуглець, у порівнянні із звичайними.

		Звичайні	Які містять вуглець
1.	Вміст вуглецю у вихідному матеріалі, %	0,0	0,67
2.	Вихід фракцій після випробування за ДержСТ 137-77		
	+5 мм, %	82,7	80,2
	0 - 5 мм, %	15,3	17,6
3.	Густина матеріалу, г/см <sup>3</sup>		
	- позірна	3,33	2,27
	- істинна	4,66	4,63
4.	Пористість, %		
	- загальна	28,54	38,01
	- відкрита	27,82	37,88
5.	Вихід класів після випробування за ДержСТ 19575-84		
	+ 10 мм, %	67,6	44,8
	+ 7 мм, %	21,8	6,2
	+ 5 мм, %		4,5
	+ 3 мм, %		3,9
	+ 1 мм, %	4,0	3,9
	+ 0,5 мм, %		1,7
	0 - 0,5 мм, %	6,6	10,3
	Середнє зважений діаметр часток, мм	10,3	12,0
	Ступені:		
	відновлення	40,98	48,17
	металізації	14,24	19,24
6.	Вміст вуглецю після обробки за ДержСТ 19575-84, %	0,0	0,22
7.	Показники випробувань за ДержСТ 21707-76,		
	- перепад тиску, Па	141	804
	- усадка шару, %	37,5	51,5
	Ступені:		
	відновлення, %	65,68	68,34
	металізації, %	50,36	59,61
8.	Вміст вуглецю після обробки за ДержСТ 21707-76, %	0,0	0,0
9.	Високотемпературні характеристики		
	- температура початку утворення рідини (T <sub>н.ф.</sub> ), °C	1305	1370
	- температура формування первинного шлаку (T <sub>р</sub> ), °C	1400	1460
	- температура краплининого стікання (T <sub>м.ф.</sub> ), °C	1440	1480
	- температура закінчення утворення рідини (T <sub>ж</sub> ), °C	1480	1520
	- маса витікаючого розливу, %	80	80
	у тому числі первинного шлаку, %	17	9

#### 4. Кінетичні закономірності газово-вуглетермічного відновлення залізородних окотишів, що містять вуглець.

Відомо, що швидкість комплексного відновлення не є сумою швидкостей реакції відновлення заліза твердим вуглицем і газом. На ступінь відновлення заліза в значній мірі впливають реакції генерації монооксиду вуглецю за рахунок твердого вуглецю.

Експериментально визначена температура початку взаємодії залишкового вуглецю з оксидами заліза (температурний інтервал - 1000-1100°C, швидкість нагріву - 50 град/хв, витрата аргону - 150 см<sup>3</sup>/хв). Помітне відновлення починається в інтервалі температур 800-1000°C (за розрахунками - 682 °C ). Дані з кінетики вуглетермічного відновлення наведено на мал.3.

Експериментальні дані показують: при підвищенні вмісту залишкового вуглецю зростає ступінь відновлення, що вказує на прямий зв'язок між кількістю відновленого заліза і кількістю вуглецю, використаного для відновлення.

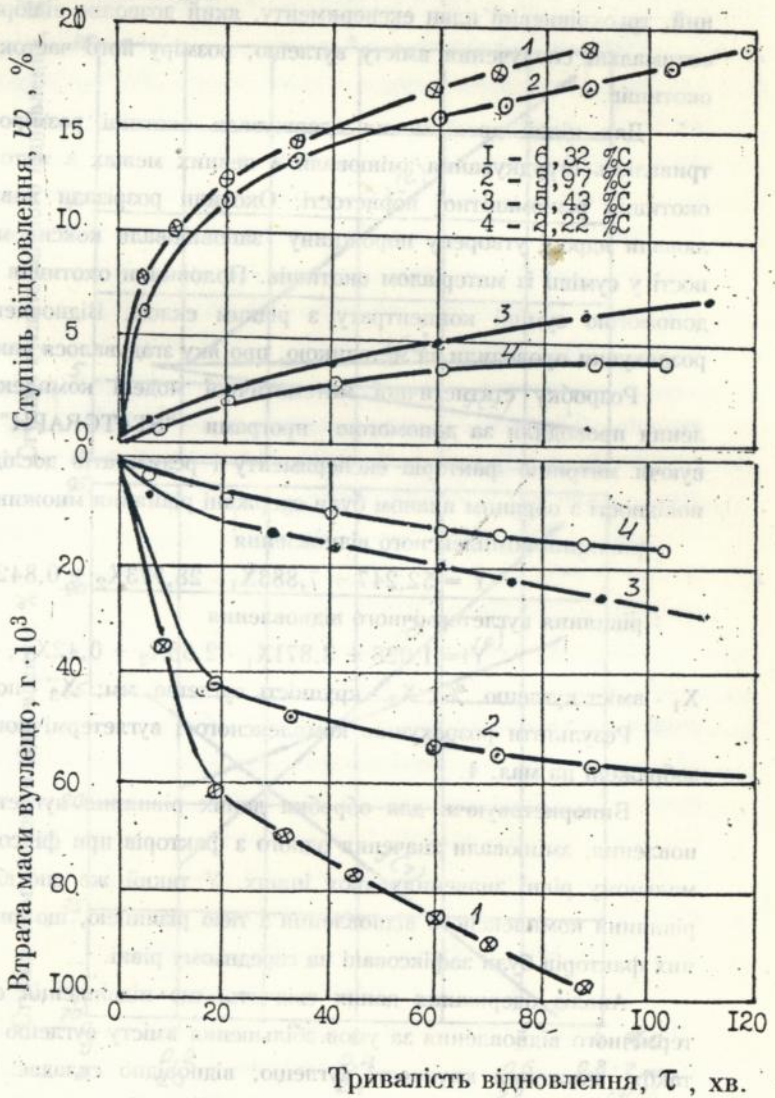
Окотиші, які містять вуглець ( $C_{\text{зал}} = 2,97, 2,38$  та  $2,22\%$  ), відновлювали воднем (температура - 1000°C, витрата водню -  $5 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/хв). Встановлено, що наявність вуглецю в окотиші прискорює процес комбінованого відновлення.

Для відновлення окотишів, які містять вуглець, в струмені монооксиду вуглецю, були одібрані проби під час промислового освоєння нової технології. Їх властивості задовільняли вимоги доменної плавки. Вміст залишкового вуглецю змінювався від 0,2 до 2,1%, а заліза від 10,5 до 54,2% . Збільшення вмісту залишкового вуглецю різко інтенсифікує процес відновлення. Так, для окотишів з вмістом залишкового вуглецю  $C_{\text{зал}}=0,2\%$  тривалість відновлення до ступеню 80% складала 100 хвилин, а при підвищенні  $C_{\text{зал}}$  до 2% - лише 20-25 хвилин.

Під час розвитку комплексного відновлення парціальний тиск CO у середній окотиша вищий, ніж парціальний тиск CO горнивого газу. За цих умов зовнішня оболонка і ядро окотиша відновлюються з зовнішньої і внутрішньої сторін, що інтенсифікує процес.

Досліджено основні параметри (вміст вуглецю, крупність палива і пористість окотишів), які впливають на ступінь вуглетермічного і комплексного відновлення. Виходячи із умов процесу, кількості факторів і

Кінетика вуглетермічного відновлення і газифікації вуглецю в окотишах у ізоермічному режимі



Мал. 3.

цілей дослідження, з метою розробки статистичної моделі комплексного відновлення залізорудних окотишів було обрано композиційний, симетричний, трьохрівневий план експерименту, який дозволяє підібрати найбільш оптимальні сполучення вмісту вуглецю, розміру його часток і пористості окотишів.

Для цілей дослідження одержували окотиші розміром 15 мм, а тривалість огрудкування змінювали в певних межах з метою одержання окотишів різноманітної пористості. Окотиші розрізали навпіл, висвердлювали ядро і утворену порожнину заповнювали коксиком різної крупності у суміші із матеріалом окотишів. Половинки окотишів склеювали за допомогою суміші концентрату з рідким склом. Відновлення зразків і розрахунки проводили за методикою, про яку згадувалося раніше.

Розробку статистичної математичної моделі комплексного відновлення проводили за допомогою програми "STATGRAPH", використовуючи матрицю факторів експерименту і результатів досліджень. У відповідності з обраним планом були одержані рівняння множинної регресії:

- рівняння комплексного відновлення

$$Y = 52,247 + 7,883X_1 - 28,773X_2 + 0,842X_3 ;$$

- рівняння вуглетермічного відновлення

$$Y = 1,028 + 3,871X_1 - 2,66X_2 + 0,42X_3 , \quad \text{де}$$

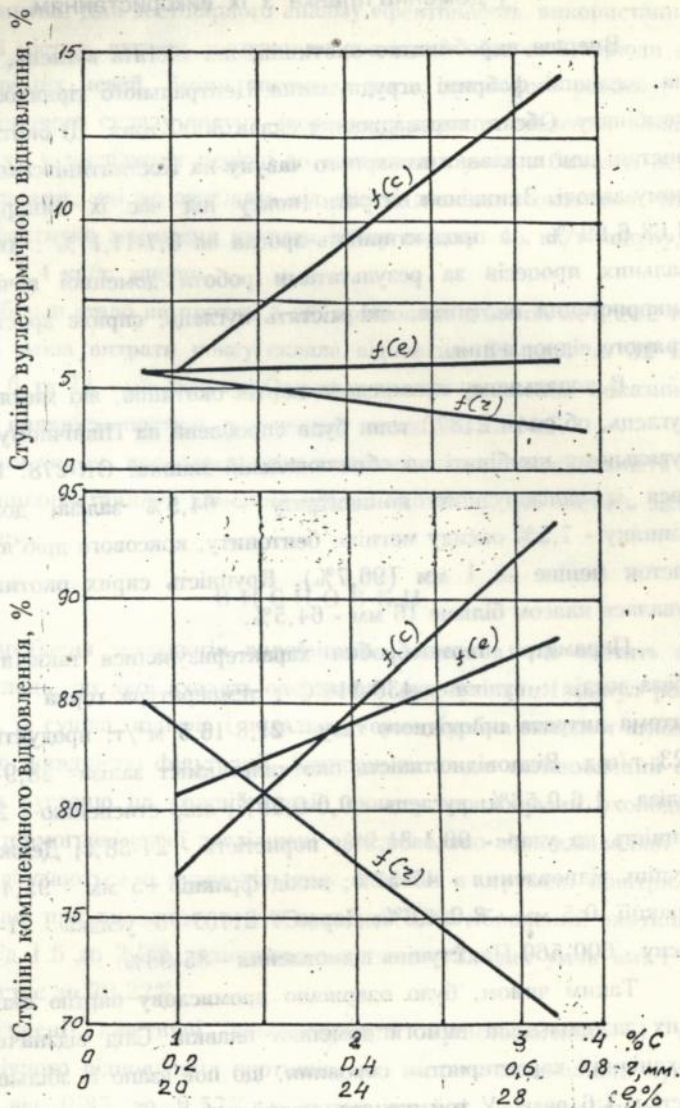
$X_1$  - вміст вуглецю, % ;  $X_2$  - крупність вуглецю, мм;  $X_3$  - пористість, %.

Результати розрахунків комплексного і вуглетермічного відновлення зображені на мал. 4.

Використовуючи для обробки даних рівняння вуглетермічного відновлення, змінювали значення одного з факторів при фіксованих на мінімальному рівні значеннях двох інших. У такий же спосіб досліджували рівняння комплексного відновлення з тією різницею, що значення незмінних факторів були зафіксовані на середньому рівні.

Аналіз одержаних даних свідчить, що підвищення ступеню вуглетермічного відновлення за умов збільшення вмісту вуглецю і пористості, а також зниження крупності вуглецю, відповідно складає: 3,87% на 1% вуглецю, 0,04% на 1% пористості і 7,27% на 1 мм крупності. Відповідні значення для комплексного відновлення: 7,87%, 0,84% та 28,7% . Таким чином, наявність в окотишах тонкоподрібненого вуглецю інтенсифікує процес їх відновлення.

Залежність ступеню відновлення від основних факторів,  
розрахована за допомогою математичної моделі



C - вміст вуглецю, %; Г - крупність палива, мм; E - пористість, %

Мал. 4.

## 5. Вироблення промислових партій залізорудних офлюсованих окотишів, які містять залишковий вуглець і доменна плавка з їх використанням.

Вперше виробництво окотишів, які містять вуглець, було здійснено на дослідній фабриці огрудкування Центрального гірничозбагачувального комбінату. Обсяг впровадження склав 3000 тонн. Ці окотиші були використані для виплавки ливарного чавуну на Костянтинівському металургійному заводі. Зниження витрати коксу під час їх використання склало 3,68-6,99 % , а продуктивність зросла на 8,7-11,1 % . Аналіз відновлювальних процесів за результатами роботи доменної печі показав, що використання окотишів, які містять вуглець, сприяє зростанню ступеню прямого відновлення.

В подальшому промислова партія окотишів, які містять залишковий вуглець, об'ємом 21870 тонн була вироблена на Північному гірничо-збагачувальному комбінаті на обпалювальній машині ОК-278. Шихта складалася із залізорудного концентрату - 64,5% заліза, доломітизованого вапняку - 7,5% оксиду магнею, бентониту, коксового дріб'язку з розміром часток менше за 1 мм (96,7%). Крупність сирих окотишів характеризувалася класом більше 16 мм - 64,5%.

Параметри термообробки характеризувалися такими показниками (база-дослід): сушка - 430-316°C ; температура горна - 1230-1095°C ; питома витрата природного газу - 21,8-16,5 м<sup>3</sup>/т; продуктивність - 252-223 т/год. Відповідно якість окотишів: вміст заліза- 58,9-59,5%; закис заліза - 1,6-9,56%; вуглець - 0,0-0,39%; опір стисненню - 218-120 кг/ок; міцність на удар - 90,1-81,9%; пористість - 24-38%; ДержСТ 19575-84: ступінь відновлення - 47-57%; вихід фракції +5 мм - 95,4-87,8%; вихід фракції -0,5 мм - 3,0-4,6%; ДержСТ 21707-76: усадка - 71-84%; перепад тиску - 600-560 Па; ступінь відновлення - 85-98%.

Таким чином, було одержано промислову партію окотишів, якість яких задовольняла вимоги доменної плавки. Слід відзначити зниження механічних характеристик сировини, що пов'язано із збільшенням пористості у 1,6 рази. У той же час, новий вид сировини мав набагато кращі фізико-хімічні характеристики у порівнянні з окотишами, які виготовляються за традиційною технологією.

Доменна плавка з використанням окотишів, які містять залишко-

вий вуглець, проводилася на заводі ім.Петровського. Доля дослідних окотишів у шихті складала від 47 до 57% . В базовому періоді використовувалися окотиші Північного гірничозбагачувального комбінату поточно-го виробництва. Для достовірного аналізу ефективності використання окотишів, які містять вуглець, розглянуто дослідний і базовий періоди роботи цеху і окремих печей. Зміни шихтових умов, дуттьового режиму, якості коксу і хімічного складу чавуну скореговані шляхом зведення показників роботи цеху у дослідному періоді до однакових умов з базовим періодом за показниками, які не залежать від якості дослідних окотишів. Відлому по цеху фактичне зниження витрати коксу склало 15 кг/т чавуну, після зведення - 2,4 кг/т чавуну.

Найбільш стало на протязі 8 діб працювали доменні печі №2 та №6. Фактична зміна витрати коксу склала відповідно 64 кг/т та 32 кг/т, а зведена - 6 та 14 кг/т чавуну. Одною з причин зниження показників по цеху була наявність настилі у доменних печах №3 та №5.

Таким чином, проведена доменна плавка показала доцільність виробництва і використання в доменній плавці окотишів, які містять залишковий вуглець.

## В И С Н О В К И.

1. Розроблена технологія виробництва окотишів, що містять залишковий вуглець, до якої входять одержання рудовугільних гранул розміром 15-20 мм, їх сушка, підігрів і подальша термообробка методом агломерації із заданою швидкістю фільтрації. Експериментально встановлений ступінь вигорання вуглецю на кожній стадії процесу, враховуючи охолодження. Методом термогравиметрії досліджені окислювально-відновлювальні процеси, що відбуваються в рудовугільному окотиші в струмені повітря. Встановлено, що при вихідному вмісті вуглецю 7,5% обладаний окотиш може містити від 1,6 до 2,2% залишкового вуглецю. За цих умов вміст заліза зростає до 20-22%.

2. Досліджені кінетичні закономірності вуглетермічного і газово-вуглетермічного відновлення окотишів, які містять залишковий вуглець у кількості від 0,37 до 9,57% у ізотермічних і неізотермічних умовах у струмені водно та монооксиду вуглецю. Експериментально встановлений температурний інтервал початку взаємодії залишкового вуглецю з оксидами заліза, який знаходиться у межах 800 - 1000°C. Розвиток від-

повлювальних процесів у значній мірі визначається вмістом вуглецю, крупністю його часток та пористістю окотишів. Збільшення вмісту залишкового вуглецю прискорює процес відновлення у 4-5 разів.

3. Розроблена статистична математична модель для розрахунків вуглетермічного і комплексного відновлення окотишів, які містять залишковий вуглець. З цією метою використовувався композиційний, симетричний, трьохрівневий план експерименту. Розроблена методика підготовки проб сирих окотишів, які містять задану кількість вуглецю різноманітної крупності і мають різну пористість.

Встановлено, що підвищення ступеню вуглетермічного відновлення за умов збільшення вмісту вуглецю і пористості, а також зниження крупності вуглецю, відповідно складає: 3,87% на 1% вуглецю, 0,04% на 1% пористості і 7,27% на 1 мм крупності і для комплексного відновлення 7,87% , 0,84% та 2,87% відповідно.

4. Вироблені промислові партії окотишів, які містять залишковий вуглець у кількості від 0,39 до 1,1%, на дослідно-промисловій фабриці огрудкування Центрального і промисловій обпалювальній машині ОК-278 Північного гірничозбагачувальних комбінатів. Визначені їх фізико-хімічні та механічні властивості. Встановлено, що окотиші, які містять залишковий вуглець, містять також понад 10% закису заліза, мають підвищену спроможність до відновлення, підвищену пористість і сприятливі високо-температурні властивості, що дозволяє характеризувати їх як сировину, яка відповідає до вимог доменної плавки.

5. Досліджена структура окотишів, які містять залишковий вуглець, на "Епикванті". Встановлено, що структура окотишів являє собою чітко виражену послідовність зон: периферія (0,8-1,0 мм), яка характеризується гематитовою структурою; перехідна (2,4-3,0 мм) - містить 53,4% вюститу і до 0,5% металевого заліза з включеннями часток твердого палива; центр (2,4-3,0 мм) - твердофазне спікання, висока пористість і вміст вуглецю до 21,1%.

6. Проведена доменна плавка з використанням окотишів, які містять залишковий вуглець. Доля дослідних окотишів у шихті склала 47-57%. За умов середнього вмісту залишкового вуглецю 0,39%, фактичне зниження витрати коксу в середньому по цеху склало 15 кг/т чавуну, а збільшення продуктивності - 37 т/добу.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ НАДРУКОВАНО У ТАКИХ РОБОТАХ

1. Дослідження процесу відновлення термічно зміцнених залізорудних окотишів, які містять вуглець/Н.Д.Ванюкова, Н.А.Колбін//”Фізико-хімія процесів відновлення металів”. - Тези доповідей Всесоюзної науково-технічної конференції. - Дніпропетровськ. -1988. - с.120.
2. Дослідження окислювально-відновлювальних процесів у рудовугільному окотиші під час його термічної обробки в окислювальній атмосфері /Н.Д.Ванюкова, Н.А.Колбін, О.О.Гогенко//”Фізико-хімія процесів відновлення металів”. -Тези доп. Всес. наук.-техн. конф. -Дніпропетровськ. -1988 р. - с.122.
3. Одержання офлюсованих окотишів, які містять залишковий вуглець /Д.А.Ковальов, О.Л.Костюлов, О.О.Гогенко, К.В.Шмат, Н.Д.Ванюкова// Проблеми металургійного виробництва (Респ.міжвід. наук.-техн. зб.). - №104. -1991. -с.70-73.
4. Дослідження структури обпалених окотишів, які містять вуглець /Г.С.Васильєв, Н.Д.Ванюкова, Н.А.Колбін//”Проблеми теорії і технології підготовки залізорудної сировини для доменного процесу і безкоксової металургії”. -Тез. доп. . Всес. наук.-техн. конф. -Дніпропетровськ. -1990 р. - с.194.
5. Дослідження закономірностей використання залишкового вуглецю у складі окотишів в умовах відновлювально-теплової обробки/Д.А.Ковальов, О.Л.Костюлов, Н.Д.Ванюкова и др.//”Шляхи розвитку науки і техніки при підготовці руд чорних металів до металургійної переробки”. -Тез. доп. Всес. наук.-техн. конф. - Кривий Ріг. -1991. - с.11.
6. Металургійні властивості обпалених залізорудних окотишів, які містять вуглець/Д.А.Ковальов, І.Й.Дишлевич, М.А.Гладков, Н.Д.Ванюкова//”Теорія і практика киснево-конверторних процесів”. -Тез. доп. VIII Міжнародної наук.-техн. конф. -Дніпропетровськ. -1994. -с.133.
7. Економія витрати коксу за рахунок розвитку комплексного відновлення під час використання термічно зміцнених залізооксидних флюсовугільних композицій /Д.А.Ковальов, С.Т.Пліскановський, О.Л.Костюлов, О.О.Гогенко, Н.Д.Ванюкова, Ф.М.Журавльов, М.А.Гладков// Матеріали українсько-німецького симпозиуму “Заміна коксу шляхом вдювання пиловугільного порошу і використання інших енергоносіїв у доменному процесі з урахуванням екологічних вимог” 9 -10 грудня 1992 р.,

м. Донецьк. У 2-х томах. -Том 2. -с.27-34.

8. Вплив виду твердого палива на якість окотишів, що містять вуглець/ Д.А.Ковальов, І.Й.Дишлевич, Н.Д.Ванюкова//“Теорія і практика киснево-коверторних процесів”. -Тез. доп. VIII Міжнародної наук.-техн. конф. -Дніпропетровськ. -1994. -с.129.

9. Розробка статистичної математичної моделі комплексного відновлення окотишів із залишковим вуглецем/ Д.А.Ковальов, І.Й.Дишлевич, Н.Д.Ванюкова //III конгрес доменщиків. -Тез. доп. -Новокузнецьк. -1995. -с. 73-75.

10. Спосіб обпалення рудно-паливних окотишів/Г.Г.Єфіменко, Д.А.Ковальов, В.А.Овсянников, Н.Д.Ванюкова//А.с.№1388442, МКВ С22В 1/04. Надрук. 15.04.88. Б.И. №14.

**Vanukova N.D.** Physicochemical Fundamentals of the Reduction Process of the sintered Ironbearing Materials containing Carbon using for saving Koke in the Blast Furnace Melt.

The dissertation for the degree competition of the candidate of technical sciences on the spesiality 05.16.02 - Metallurgy of Ferrous Metals, state Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 1995.

Nine research works and one patent are defended wich are devoted to solution of actual problem of the blast furnace coke rate reducing. This paper contains theoretical and experimental investigations of the iron ore pellets production wich contain carbon. It is determined and proved experimentally that it is possible to produce pellets wich contain carbon. This carbon makes it possible to develop the complese reduction in the blast furnace. The obtained results provided a basis for the new technology of the carbonbearing pellets production and their put into practice.

Key words: carbonbearing pellets, reduction, coke, blast furnace.

**Ванюкова Н.Д.** Физико-химические основы процессов восстановления окискованных углеродсодержащих железорудных материалов, используемых в доменной плавке с целью получения кокса.

Диссертация на сонскание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - Metallurgy черных металлов, Государственная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, 1995.

Защищается девять научных работ и одно авторское свидетельство, которые посвящены решению актуальной проблемы снижения расхода доменного кокса. Диссертация содержит теоретические и экспериментальные исследования производства и использования окатышей, содержащих остаточный углерод. Экспериментально подтверждена возможность производства углеродсодержащих окатышей. Остаточный углерод способствует развитию комплексного восстановления в доменной печи. Полученные результаты обеспечивают базу для новой технологии производства углеродсодержащих окатышей и их практическому использованию.

Ключевые слова: carbonbearing pellets, reduction, coke, blast furnace.

Ключевые слова: углеродсодержащие окатыши, восстановление, кокс, доменная печь.

Ваш

44091D

АВ 33.430

Підписано до друку 25.10.95 г.

Формат 60x84/16. Бумага типогр. №2. Друк офсетний.

Фіз.д.л. 1,5. Зал.-вид.л. 1,32.

Тираж 50 прим. Заказ 211. Безкоштовно.

Металургічний комбінат "Запоріжсталь",  
330008, Запоріжжя, Південне шосе, 72