

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit29-01-069>

DOI: 10.30890/2567-5273.2023-29-01-069

THE DEGREE OF SOLID-PHASE REDUCTION OF IRON FROM NICKEL ORE OXIDES IN A TUBULAR ROTARY KILN USING COALS OF ENERGY GROUPS AS REDUCING AGENTS

СТУПІНЬ ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА З ОКСИДІВ НІКЕЛЕВОЇ РУДИ В ТРУБЧАСТІЙ ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ В ЯКОСТІ ВІДНОВНИКІВ ВУГІЛЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ГРУП

Melnyk S. O. / Мельник С. О.*postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0009-3964-312X

Akreiev V. V. / Акреєв В. В.*postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0009-3705-4129

Prykhodko S. V. / Приходько С. В.*postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0005-0013-2198

Shevchenko D. V. / Шевченко Д. В.*postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0005-0013-2198

Ovcharuk A. M. / Овчарук А. М.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.**Institute of Industrial and Business Technologies, Dnipro, Gagarina avenue, 4, 49000**Інститут промислових та бізнес технологій, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, 49600*

Анотація. Вивчення процесів твердофазного відновлення заліза з оксидів з використанням в якості відновника вугілля антрацитових та енергетичних груп та розробка енергоефективних технологій отримання та застосування огарку з нікелевих руд, отриманого внаслідок випалювання в трубчастій обертовій печі, є актуальним науковим напрямом у кольоровій металургії. Експериментальне вивчення процесу твердофазного відновлення заліза з нікелевої рудної суміші проводили на ТОВ "Побужський феронікелевий комбінат" у трубчастій обертовій печі №1 (далі ТОП-1), в якості палива використовувався природний газ. Отримано залежності співвідношення вугілля (відновників), що використовуються надалі для відновлення металів у руднотермічній печі. В результаті виділення легких компонентів у процесі нагрівання вугілля двох марок за температур 300-1050 °С, визначені оптимальні співвідношення вугілля, що забезпечують попереднє відновлення заліза з нікелевмісної сировини. Додатково, у результаті вивчення процесу відновлення заліза з нікелевої руди визначено оптимальні співвідношення вугілля марок ДГ і АС (75% / 25%) при температурі 850-950 °С, що призводить до зниження витрати природного газу за рахунок горіння легких з вугілля, а також зниження витрати електроенергії під час плавлення огарку в руднотермічній печі.

Результати цього дослідження можуть мати практичне застосування в оптимізації виробничих процесів у металургійній промисловості, а також у виборі оптимальних марок вугілля для поліпшення ефективності та економічної доцільності процесів відновлення заліза в трубчастих обертових печах.

Ключові слова: нікелева руда, огарок, твердо фазне відновлення заліза з оксидів, ступінь металізації, довго полум'яне газове вугілля, вугілля антрацитових груп, трубчаста обертальна піч.

Вступ

Одним з методів відновлення заліза з оксидів нікелевої руди є використання трубчастої обертової печі. Цей тип печі дозволяє ефективно



проводити процес відновлення шляхом постійного переміщення матеріалу в печі. Однак, для успішного твердофазного відновлення заліза з оксидів нікелевої руди необхідне використання відновників.

Одним із потенційних відновників, які можуть бути використані в трубчастій обертовій печі, є вугілля енергетичних груп. Вугілля має високий вміст вуглецю, що дозволяє йому виступати як відновник, забезпечуючи процес твердофазного відновлення заліза з оксидів нікелевої руди [1].

Метою даної роботи є вивчення ступеня твердофазного відновлення заліза з оксидів нікелевої руди в трубчастій обертовій печі з використанням вугілля енергетичних груп в якості відновників.

Проведення експерименту

Проведення досліджень з вивчення впливу завантаження в ТОП суміші антрациту і вугілля з підвищеним вмістом летких на ступінь попереднього відновлення огарку.

Дослідження проведено на ТОП-1 в умовах діючого виробництва ТОВ "Побужський феронікелевий комбінат". Основні характеристики ТОП-1: довжина 70 м, радіус 4,5 м, кут нахилу 3° [2].

Для проведення досліджень під час капітального ремонту в конструкцію печі ТОП-1 внесено такі зміни:

- у внутрішньому просторі на відстані 28 м від гарячого кінця печі встановили підпірне кільце (поріг) заввишки 640 мм і завширшки 400 мм, виконане з вогнетривкого бетону;

- на відстані 30 м і 34 м від гарячого кінця на кожусі печі встановлено два вентилятори типу ВР-288-46-5 продуктивністю 10 000 м³/год, які подають повітря в піч для опалювання оксиду вуглецю і забезпечення вибухобезпечного процесу. У радіальному напрямку вентилятори зсунуті відносно один одного на 180 градусів. Живлення вентиляторів здійснюється за допомогою плаваючих струмозміначів;

- для здійснення контролю температурного режиму отримання огарку і визначення градієнта температури огарку і газу по довжині печі в одному радіальному напрямку встановили 5 термопар типу ТХА 10-88, оснащених радіо контролерами. Відстань від гарячого кінця печі до термопар 10 м, 18 м, 24 м, 32 м, 38 м відповідно. Робочі кінці термопар розміщені в спеціальних кишнях. При нижньому положенні термопар фіксується температура огарка, при верхньому положенні - температура пічних газів [3].

Дослідження з визначення оптимального співвідношення вугілля марки ДГ у складі відновників проведено за такими етапами:

Таблиця 1 - Етапи проведення експерименту

№ етапу	Співвідношення вугілля ДГ:АС у шихті, %	Вміст відновника в шихті, %
1	0:100	4
2	25:75	4
3	50:50	5
4	75:25	5
5	100:0	5



У період проведення досліджень на кожному етапі відібрано проби руди та огарку для виконання хімічного аналізу з визначенням Fe_2O_3 , FeO , $\text{Fe}_{\text{обш}}$, $\text{Fe}_{\text{мет}}$ та вологи. Хімічний склад вугілля виконаний перед початком проведення досліджень і залишався постійним протягом усього періоду випробувань [3].

Таблиця 2 - Хімічний склад вугілля, мас. дол. %

Марка	С	Летючі	Зола	S	Зола, %				
					CaO	$\text{Fe}_{\text{обш}}$	SiO_2	MgO	P
АШ	80,5	4,4	13,2	1,05	1,4	9,8	49	1,6	0,03
АС	86,3	5,3	7,4	0,85	2	9,5	51	1,8	0,031
ДГ	66,2	25,0	12,1	0,65	7,2	9	47	2,2	0,033

Для вугілля марки ДГ характерний підвищений вміст летких 25 мас. дол. %. Горіння летких речовин забезпечує необхідні умови для твердофазного відновлення в процесі обпалу. За цих умов основна частина тривалентного оксиду заліза відновлюється до двовалентного. Спостерігається також деяке відновлення оксиду заліза до металу [4].

Таблиця 3 - Хімічний склад нікелевої руди, мас. дол. %

№ етапа	Співвідношення вугілля ДГ до АС	Волога	$\text{Fe}_{\text{обш}}$	$\text{Fe}_{\text{мет}}$	FeO	Fe_2O_3
1	0	23,3	13,56	0,01	2,04	16,04
2	25	23,3	13,56	0,01	2,04	16,04
3	50	20,9	13,74	0,02	2,33	17,07
4	75	20,9	14,4	0,01	2,15	18,2
5	100	22,3	14,23	0,01	2,23	17,85

Таблиця 4 - Середній хімічний склад огарку, мас. дол. %

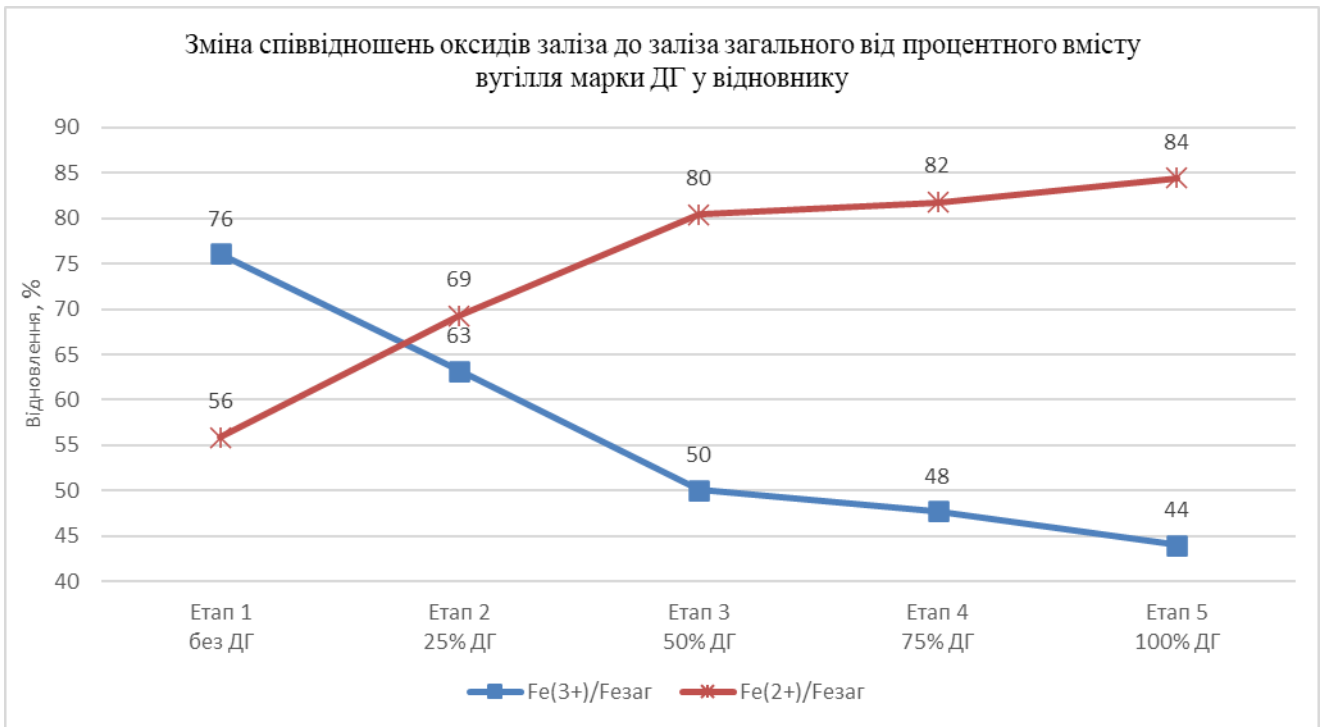
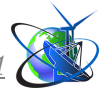
№ етапи	Співвідношення вугілля ДГ до АС	$\text{Fe}_{\text{обш}}$	$\text{Fe}_{\text{мет}}$	FeO	Fe_2O_3
1	0	12,14	0,18	6,78	9,24
2	25	12,63	0,24	8,75	7,98
3	50	13,36	0,32	10,74	6,69
4	75	13,73	0,35	11,23	6,55
5	100	13,6	0,45	11,48	5,98

Як впливає з таблиці 4, відсотковий вміст FeO в огарку з використанням вугілля марки ДГ порівняно із завантаженням без добавки вугілля марки ДГ до складу відновників (етап 1) збільшився в:

- Етап 2 вміст ДГ - 25 % у складі відновника в 1,29 разів;
- Етап 3 вміст ДГ - 50 % у складі відновника в 1,58 разів;
- Етап 4 вміст ДГ - 75 % у складі відновника в 1,66 разів;
- Етап 5 вміст ДГ - 100 % у складі відновника в 1,70 разів.

На підставі результатів аналізів, наведених у таблиці 3, розраховано відношення вмісту $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_{\text{обш}}$ та $\text{FeO}/\text{Fe}_{\text{обш}}$ у огарку за етапам [3].

Як показано на малюнку 1, зі збільшенням відсоткового вмісту вугілля марки ДГ у відновнику відношення $\text{Fe}^{(+2)}/\text{Fe}_{(\text{обш})}$ підвищується і відповідно відношення $\text{Fe}^{(+3)}/\text{Fe}_{(\text{обш})}$ знижується, що характерно для протікання процесів твердофазного відновлення [3].



Малюнок 1. Зміна співвідношень оксидів заліза до заліза загального від відсоткового вмісту вугілля марки ДГ у відновнику

Основними характеристиками процесу твердофазного відновлення оксидів заліза є ступінь відновлення і ступінь металізації. Для визначення цих характеристик було виконано розрахунок матеріальних балансів за вмістом заліза [5].

Для розрахунку матеріального балансу за залізом у період проведення досліджень здійснювали контроль маси шихтових матеріалів, що завантажуються, отриманого огарку, пиле виносу з печі з використанням даних АСУ ТОП-1. Результати розрахунків матеріальних балансів за етапами представлені в таблиці 5 [3].

Ступінь відновлення - це відношення кількості відібраного в процесі відновлення кисню до кількості його у вихідній сировині, що характеризує повноту відновлення [5].

Таблиця 5. Баланси за вмістом заліза в руді та огарку

№ п/п	Етап	Прихід (за сухою рудою)			Витрата (огарок)			
			т	Fe	О	т	Fe	О
	1	Fe _{мет}	0,87	0,87		16,29	16,29	
	1	FeO	177,59	138,13	39,47	606,74	471,91	134,83
	1	Fe ₂ O ₃	1396,38	977,47	418,91	826,89	578,82	248,07
	1	Всього	1574,85	1116,47	458,38	1449,92	1067,02	382,90
	1	Нев'язка					4,43 %	
	2	Fe _{мет}	0,13	0,13		3,10	3,10	
	2	FeO	27,45	21,35	6,10	115,40	89,75	25,64
	2	Fe ₂ O ₃	215,83	151,08	64,75	105,17	73,62	31,55
	2	Всього	243,41	172,56	70,85	223,67	166,47	57,20
	2	Нев'язка					3,53 %	



№ п/п	Етап	Прихід (за сухою рудою)				Витрата (огарок)		
			т	Fe	O	т	Fe	O
	3	Fe _{мет}	0,77	0,77		12,43	12,43	
	3	FeO	89,99	69,99	20,00	420,54	327,09	93,45
	3	Fe ₂ O ₃	660,15	462,10	198,04	262,08	183,46	78,62
	3	Всього	750,90	532,86	218,04	695,05	522,97	172,08
	3	Нев'язка					1,85 %	
	4	Fe _{мет}	0,11	0,11		3,88	3,88	
	4	FeO	24,20	18,83	5,38	123,59	96,12	27,46
	4	Fe ₂ O ₃	195,14	136,60	58,54	72,12	50,48	21,63
	4	Всього	219,45	155,53	63,92	199,58	150,49	49,10
	4	Нев'язка					3,24 %	
	5	Fe _{мет}	0,20	0,20		5,30	5,30	
	5	FeO	26,77	20,82	5,95	134,37	104,51	29,86
	5	Fe ₂ O ₃	212,90	149,03	63,87	69,97	48,98	20,99
	5	Всього	239,87	170,05	69,82	209,64	158,79	50,85
	5	Нев'язка					6,63 %	

Ступінь металізації - відношення відсоткового вмісту заліза металевого і заліза загального в продукті [5].

Ступінь відновлення і ступінь металізації отриманого огарку за етапами представлені в таблиці 6.

Таблиця 6. Ступінь відновлення і ступінь металізації отриманого огарку, мас. дол. %

№ етапу	Ступінь відновлення	Ступінь металізації
1	16,47	1,50
2	19,27	1,86
3	21,08	2,37
4	23,19	2,57
5	27,17	3,33

Ступінь відновлення огарку при завантаженні вугілля марки ДГ 100% зросла в 1,65 разів, ступінь металізації відповідно в 2,22 разів порівняно із завантаженням без добавки вугілля марки ДГ до складу відновника [3].

Таблиця 7. Ступінь переходу Fe₂O₃ в FeO і FeO в Fe_{мет}, %

№ етапу	Fe ₂ O ₃ в FeO	FeO в Fe _{мет}
1	48,72	3,16
2	58,98	3,20
3	65,16	3,44
4	66,67	3,78
5	67,59	4,65

На процеси твердофазного відновлення крім хімічного складу вихідної сировини великий вплив чинить гранулометричний склад і температурний режим процесу [3].

Гранулометричний склад огарку представлений у таблиці 8, хімічний склад огарку за фракціями (етап 5) представлений у таблиці 9.

**Таблиця 8. Гранулометричний склад огарку, %**

№ проби	Вміст фракції, мас. дол. %		
	-0,063 + 0,315 Дрібна	-0,63 + 5 Середня	-10 + 40 Крупна
1	13,1	33,4	53,5
2	12,1	34,1	53,8
3	12,4	32,1	55,6
4	14,7	32,3	53,1
6	21,1	33,2	45,7

Таблиця 9. Хімічний склад огарку за фракціями, мас. дол. %

Компоненти	Фракція, мм		
	-0,063 + 0,315 Дрібна	-0,63 + 5 Середня	-10 + 40 Крупна
Fe _{общ}	21,50	11,40	8,10
Fe _{мет}	0,30	0,31	0,32
FeO	19,10	10,60	6,60
Fe ₂ O ₃	9,10	4,10	3,80

Аналіз показників таблиці 8 і таблиці 9 показав, що активніше процес твердофазного відновлення протікає в дрібній фракції руди.

Контроль температури огарку і газів по довжині печі здійснювали за допомогою термопар, встановлених на кожусі на відстані від гарячого кінця 10 м, 18 м, 24 м, 32 м, відповідно. Дані за температурами газу й огарку в печі наведено в таблиці 9 і таблиці 10 [3].

Таблиця 10. Середньодобова температура огарку, °С

№ заміру	Вивантаження (гарячий кінець)	т.1	т.2	т.3	т.4
1	869,38	964,17	849,98	635,03	321,53
2	861,25	978,17	834,92	622,35	332,57
3	857,5	901,43	849,58	623,20	346,36
4	846,25	874,22	886,09	684,59	367,62
5	849,38	1036,32	791,0	649,24	352,11
Середнє	856,75	950,86	842,32	642,88	344,04

Таблиця 11. Середньодобова температура газів, °С

№ заміру	т.1	т.2	т.3	т.4
1	1042,65	952,51	837,87	417,07
2	1098,72	960,33	839,38	447,66
3	1053,03	971,89	853,35	469,09
4	983,52	1026,83	908,28	476,69
5	1129,72	1005,97	889,84	470,74
Середнє	1061,53	983,51	865,74	456,25

У період досліджень спостерігалось підвищення температури огарку в гарячому кінці печі (т.1) до 1036 °С, що призвело до його розм'якшення та утворення гарнісажу на футеровці ТОП.



Однією з причин підвищення температури огарку в гарячій зоні печі є порушення режиму роботи пальника. Режим роботи пальників налаштований на співвідношення газ - холодне повітря. При використанні гарячого повітря після рекуператора режимна карта роботи пальників не відповідає поточним умовам роботи [3].

Для контролю вмісту CO, CH₄ і пилу у газах, що відходять, ТОП-1 було виконано пило газові виміри.

Результати пило газових вимірів показали, що у відхідних газах ТОП-1 вміст CO періодично перевищував норматив у 3-4 рази, що пов'язано з порушенням роботи пальника під час подачі на нього повітря, нагрітого в рекуператорі до 214 °С. Збільшення пило виносу з печі та викидів в атмосферу в процесі досліджень не спостерігалось. Викид пилу в атмосферу не перевищував норматив для джерела викидів №33 і становив у середньому 330 мг/нм³ за норми 760 мг/нм³ [7].

За результатами опрацювання даних роботи ТОП-1 виконано розрахунок питомих норм витрат матеріалів, що завантажуються, одержуваного огарку, природного газу. Питомі норми витрат за етапами представлені в таблиці 12.

Таблиця 12. Питомі норми витрат, т/т сухої руди

Шихтові матеріали	етап 1 (ДГ — 0 %)	етап 2 (ДГ — 25 %)	етап 3 (ДГ — 50 %)	етап 4 (ДГ — 75 %)	етап 5 (ДГ — 100 %)
Огарок	0,902	0,825	0,889	0,927	0,935
Вапняк	0,057	0,007	0,048	0,053	0,052
Відновник у т.ч.:	0,052	0,057	0,063	0,063	0,064
АШ	0,041	0,034	0,014	0,016	
АС	0,010	0,009	0,017		
ДГ		0,014	0,031	0,047	0,064
Витрата природного газу, м ³	86,500	84,314	83,092	82,150	81,208
Витрата природного газу середня за період досліджень, м ³ /т сухої руди		83,090			

Зменшення питомої витрати природного газу відбувається за рахунок збільшення частки вугілля марки ДГ у складі відновника. Питома витрата природного газу без використання вугілля марки ДГ за даними комбінату становить 86,5 м³/т сухої руди. Середня питома витрата природного газу за період досліджень з використанням вугілля марки ДГ склала 83,090 м³/т сухої руди. Економія природного газу за рахунок використання вугілля марки ДГ у складі відновника становить 3,41 м³/т сухої руди [3].

Отриманий у ТОП-1 огарок прямував для подальшого перероблення в РТП-1. Завантаження огарку в РТП-1 здійснювалося як з ТОП-1, так і з ТОП-2 у співвідношенні 1:1.

Для перевірки окиснюваності заліза в огарку, що надходив з ТОП-1 на переробку в РТП-1 відібрано 2 паралельні проби під час вивантаження огарку з ТОП-1 і з кубеля подачі огарку в РТП. Результати аналізу представлені в таблиці 13.



Таблиця 13. Хімічний склад огарку, мас. дол. %

Місце відбору проби	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃
Огарок при вивантаженні з ТОП-1	15,00	0,37	14,20	5,10
Огарок із кубеля	15,00	0,24	13,80	6,10

Як видно з таблиці 13, окислення заліза металевого та оксидів заліза було незначним.

У процесі роботи РТП-1 здійснювався контроль за такими технологічними показниками:

- питома витрата електроенергії;
- хімічний склад металу.

Аналіз хімічного складу чорнового нікелю показав, що при переробці огарку з використанням в якості відновника при завантаженні в шихту 100 % вугілля марки ДГ, зменшився вміст Si з 5 % до 2,8 %, що призвело до зростання температури металу вище норми, тому найдоцільнішою є переробка огарку з вмістом у складі відновника 75 % вугілля марки ДГ (етап 4) [6].

Економія питомої витрати електроенергії на 1 т огарку за рахунок попереднього твердофазного відновлення становить 5 кВт/т огарку [3].

Висновки

1. Використання вугілля марки ДГ у складі відновника при обпалюванні нікелевої руди з отриманням огарку позитивно впливає на процес твердофазного відновлення. Найефективнішим для подальшого плавлення огарку в РТП є завантаження шихтових матеріалів з відновником, що містить 75 % вугілля марки ДГ і 25 % вугілля марки антрацитових груп (АС).

2. Економія природного газу за рахунок використання вугілля марки ДГ у складі відновника становить 3,41 м³/т сухої руди або ~4%.

3. Економія питомої витрати електроенергії на 1 т огарку за рахунок попереднього твердофазного відновлення становить 5 кВт/т огарку або ~1%.

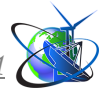
4. Для уточнення отриманих даних щодо економії питомої витрати природного газу на ТОП-1 і питомої витрати електроенергії на РТП-1 необхідний більш тривалий період досліджень. Економія питомої витрати електроенергії на РТП-1 може бути визначена за 100 % завантаження попередньо відновленого огарку. Для забезпечення цих умов необхідна одночасна робота ТОП-1 і ТОП-2 з отриманням попередньо відновленого огарку.

Літературні джерела:

1. Тарасов А.В., Уткін Н.І. Загальна металургія. - М.: Металургія, 1997, 286 с.

2. Технологічна інструкція підготовка шихтових матеріалів та обпалення шихти в обпалювальному цеху ТОВ «ПФК» Код: ПФК-СВ-ТІ-13-0001. Ганусовський Д.

3. Звіт ДП "Державний науково-дослідний та проектний інститут титану" ІТ-13-1/1. М.В. Хазнаферов, А.Д. Суцинський, Ю.В. Поплавський, Н.Ф. Рябчикова. 2013 р.



4. Звіт з науково-дослідної роботи «Складання енергетичного балансу рудотермічних печей РТП-1 та РТП-2 при виробництві феронікелю в умовах ТОВ «ПФК». Овчарук А.М., Безуглий А.В., Кривенко В.В., Замкової О.В., Цветков І.В., Надточій А.А., Коноваленко В.П., Кухтіна А.Л., Овчарук О.О., Трунова І.В. Дніпро, 2018.

5. Щитов А.Є., Галімов М.Д., Окунев О.І. Твердофазне відновлення висококремністої руди з виділенням металізованого продукту // Дифузія, сорбція і фазові перетворення в процесах відновлення металів: Зб. - М.: Наука, 1981.

6. Опис виробництва феронікелю на ТОВ «ПФК»: <https://pfk.com.ua/>

7. Соколов А.В., Єжов Є.І., Усевич М.І., Бобковський О.Г. Фазові перетворення при відновлювальному випалюванні окислених нікелевих руд // КІМС. - Алма-Ата. - 1989, №8.

Abstract. *The study of the processes of solid-phase reduction of iron from oxides using anthracite and energy groups of coal as a reducing agent, development of energy-efficient technologies for production and use of calcine from nickel ores obtained by firing in a rotary kiln is a current scientific direction in non-ferrous metallurgy. An experimental study of the process of solid-phase reduction of iron from a nickel ore mixture was carried out at «Pobuzhsky Ferronickel Works» LLC in tubular rotary kiln No. 1 (hereinafter referred to as TRK-1), natural gas was used as fuel. The dependence of the ratio of coal (reducing agents), which are subsequently used for reduction of metals in an ore-smelting furnace, was obtained. As a result of the release of volatile components during the heating of two grades of coal at a temperature of 300-1050 °C, the optimal ratios of coal were determined to ensure the preliminary reduction of iron from nickel-containing raw materials. Additionally, as a result of studying of the process of iron recovery from nickel ore, the optimal ratios of energy coal and anthracite coal grades (75% / 25%) at a temperature of 850-950 °C were determined, which leads to reduce consumption of natural gas due to the combustion of volatiles from coal, as well as reducing energy consumption of calcine melting process in an ore-smelting furnace.*

The results of this research can have practical application in the optimization of production processes in the metallurgical industry, as well as in the selection of optimal grades of coal in order to improve the efficiency and economic rationality of iron reduction processes in tubular rotary kilns.

Key words: *nickel ore, calcine, solid-phase reduction of iron from oxides, level of metallization, long-flame gas coal, coal of the anthracite group, rotary tubular kiln.*

Статтю надіслано: 24.10.2023 р.

© Мельник С.О.