



MELTING OF COMPLEX LATERITE ORES AND SELECTION OF THE OPTIMAL REDUCING AGENT

ПЛАВКА СКЛАДНИХ ЛАТЕРИТНИХ РУД ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ВІДНОВНИКА

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

Akreiev V. V. / Акреєв В. В.

postgraduate / аспірант

ORCID: 0009-0009-3705-4129

Melnyk S. O. / Мельник С. О.

postgraduate / аспірант

ORCID: 0009-0009-3964-312X

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. Сприятливі фізико-механічні характеристики нікелю призвели до його широкого застосування в різних продуктах близько двох мільйонів тон на рік. Нікель є найважливішим легуючим елементом в аустенітній нержавіючій сталі та інших спеціальних сплавах. Різке збільшення виробництва таких сплавів протягом останніх десятиліть значно збільшився попит на феронікель.

Щоб задовольнити збільшення промислового попиту, необхідні нові та ефективніші шляхи для вилучення нікелю з бідних і складніших руд за умов виснаження запасів багатих нікелевих руд. У цьому документі узагальнено досвід роботи в галузі освоєння та експлуатації технології електроплавки феронікелю та викладено досягнуті показники рудотермічної печі потужність 40 MWA та особливості процесу технології низького відновлення заліза та вибір оптимального відновника процесу.

Ключові слова: латерити, плавка феронікелю, рудотермічна піч, проблеми виплавки, технологія низького відновлення заліза, відновник.

1. Вступ

Латеритні відкладення утворюються в результаті вивітрювання основних гірських порід, які є складними сумішами феро-магнієвих мінералів, таких як олівін $(\text{Fe}, \text{Mg})_2 [\text{SiO}_4]$, піроксен $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{Si}_2 \text{O}_6$ та амфібол $(\text{Mg}, \text{Fe})_7 \text{Si}_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2$.

Промисловий інтерес латеритів складають три види мінералів:

- **Лимоніт:** гетит $(\text{FeO}(\text{OH}))$, також записується у вигляді $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, гематит, а іноді магнетит є основними мінералами. Вміст нікелю, як правило, від 1,0 до 1,5% масою, досить однорідного складу;

- **Сапролітом:** гарнієрит $(\text{Ni}, \text{Mg})_6 \text{Si}_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$ є основним мінералом нікелю для виробництва сортової сталі з вмістом до 10% за масою Ni. Сапроліти дуже неоднорідні і містять багато інших складів, що містять не менше нікелю, ніж гарнієрит. Зміст нікелю у яких близько 1,8 до 2,5% по масі.

- **Перехідні мінерали:** є перехідними між сапролітом та лимонітом.



Науковий підхід зумовлює доцільним виконати переробку лимонітів вилуговуванням, а сапролітів – пірометалургійними методами [2]. Однак скорочення сапролітових покладів змушує звертатися до переробки лимонітів і перехідних мінералів, пірометалургійними методами.

Крім того, підвищений попит на нікель призводить до того, що в переробку залучаються руди з небажаними проблематичними у пірометалургійній переробці показниками кислотності (S/M), високим вмістом гетиту, що збільшує співвідношення Fe/Ni. Ці руди створюють практичні проблеми при експлуатації печей, таких, наприклад, як:

- наявність великої кількості вільного кремнезему та гетиту обмежують температуру випалу огарка, для запобігання його спіканню в трубчастій печі, і як наслідок, збільшує питомі витрати електроенергії при плавленні шихти в електропечі;
- збільшення кислотності S/M призводить до наявності проблем, пов'язаних з електричними режимами роботи печей, а також кипіння (спінювання) розплаву шлаку, і як наслідок, призводить до аварійності самоспільних електродів.

У цьому документі зосереджено основні проблематики, з якими стикаються в процесі плавки нікелевих руд.

2. Основні проблеми

Основним обмежуючим фактором є те, що не всі потенційні руди можуть (або повинні) бути переплавлені в довільні сорти феронікелю.

При цьому феронікелеві заводи потрапляють у дві групи, що відрізняються ступенем відновлення заліза із руди:

- Низьке відновлення, яке відновлює від 15% до 30% заліза з руди;
- Високе відновлення, яке відновлює від 45% до 65% заліза з руди. У тому числі виробники нікелевого чавуну. Забезпечують рівень відновлення заліза в діапазоні від 70% до 80%.

Таким чином, кожен процес повинен починатися з визначення його оптимального ступеня відновлення заліза і відповідно сорту феронікелю [3]. Це визначення вимагає наступних кроків:

Визначення оптимального сорту феронікелю:

Очевидно те, що виробництво феронікелю з нижчим вмістом нікелю призводить до нижчої втрати нікелю в шлаковій фазі з двох причин: через низький вміст нікелю в шлаку і менших обсягах власне шлаку.

При цьому більш високе відновлення вимагає більше відновника і більше витрат енергії на тонну проплавленого недогарка.

Відповідно, виробництво феронікелю з нижчим вмістом нікелю, як правило, призводить до зниження обсягів переробки руди, оскільки потужності більшості плавильних печей є печі обмежені.

Таким чином, для будь-якої заданої руди та плавильної печі існує максимальний рівень виробництва нікелю, де зростання ступеня відновлення врівноважується зниженням обсягів проплаву руди.

На **малюнку 1** наведені ці кореляції в залежності від ступеня відновлення заліза для руди з вмістом 1,6% Ni, 16% Fe, та 2,2 S/M. Різка зміна нахилу кривої

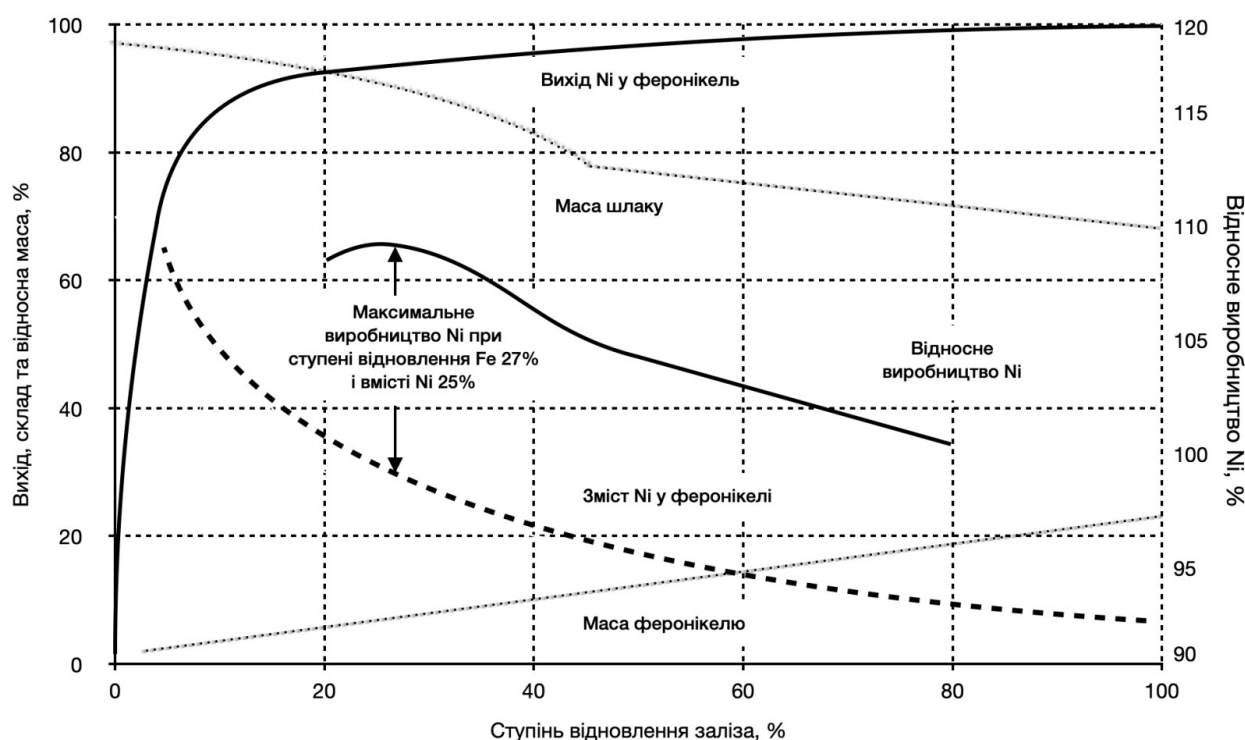


маси шлаку, на рівні близько 45% відновлення заліза, відбувається через окислення кремнію при виробництві феронікелю.

Оцінка металургійної доцільності цього оптимального сорту:

Цей крок включає оцінку безлічі робочих параметрів, такі як ліквідус температури металевої і шлакових фаз, необхідний перегрів феронікелю і шлаку, робочі температури, потенційна стабільність роботи, ймовірність окислення кремнію і вуглецю, кипіння розплаву і таке інше.

Вибір складу феронікелю є компромісом між оптимальним для даної руди (плавильної печі) та ймовірною стабільністю та довговічністю роботи за такого ступеня відновлення. Таким чином, цей вибір не може бути довільним на основі ідеї щодо затребуваності певного сорту феронікелю.



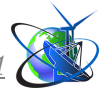
Малюнок 1. Залежність складу нікелю, виходу, виробництва феронікелю та шлаку від ступеня відновлення Fe.

Джерело: [3]

3. Контроль параметрів рудотермічної печі потужністю 40 MWA при зміні складу виробленого феронікелю.

Початковий період роботи рудотермічної печі відповідав усталеній технології високого відновлення заліза з додаванням до рудної суміші флюсів у вигляді вапняку та відновника антрацитової групи [4]. При цьому досягалися такі показники роботи:

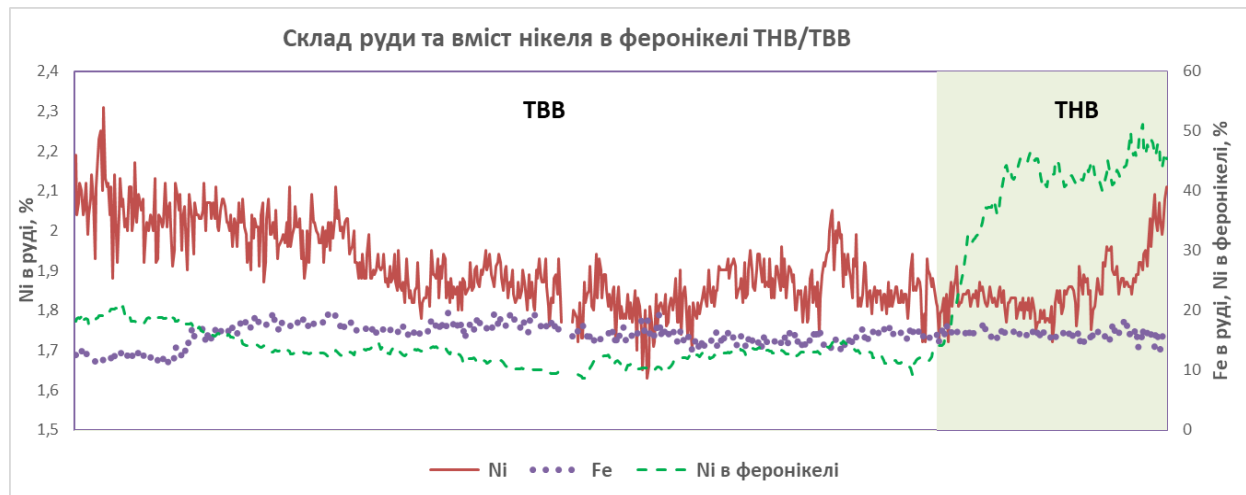
- потужність печі – до 41 МВт;
- відновлення заліза -60-65%;
- питома витрата електроенергії – 620 кВтг/т огарка;
- питома витрата вапняку – до 67 кг/т;
- питома витрата відновника –52-77,7 кг/т (залежно від типу відновника);
- вихід огарка із руди – до 106 %.



- вміст нікелю в чорновому феронікелі – до 14%;
- вміст вуглецю в чорновому феронікелі – до 3,5%;
- вміст кремнію в чорновому феронікелі – 3,5-4,5%.

Збільшення частини лимонітів в перероблюваних рудах призводило до стабільної зміни сорту феронікелю, зменшуючи частку нікелю в феронікелі і роблячи процес більш економічно недоцільним.

На **малюнку 2** відображена залежність зміни сорту феронікелю зі зниженням вмісту в ньому нікелю з 20% до 10% при збільшенні переробки лимонітів з більш високим вмістом заліза та нижчим вмістом нікелю.



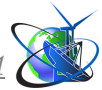
Малюнок 2. Зміна сорту феронікелю за зміни ступеня відновлення заліза

Авторська розробка

Проблематика підтримки стабільності технологічного процесу, погіршення сорту феронікелю та зниження економічної ефективності виробництва зумовили пошук шляхів переведення печі з технології високого відновлення на технологію низького відновлення заліза.

Переорієнтуванню рудотермічної печі на ТНВ передував період освоєння технології без застосування флюсів, тим самим із шихтування до рудної суміші виключили вапняк. При цьому стало спостерігатися погіршення виходу шлаку і відповідне накопичення його у ванні печі. Для поліпшення рідинної рухомості шлаку прийнято рішення про збільшення вмісту заліза в електропічних шлаках з 5,5% до 8% шляхом зниження частки антрацитового відновника з 3,5% до 2,5%. В результаті досягнуто збільшення вмісту заліза в шлаках до 8,7%, зниження вмісту кремнію в чорновому феронікелі до 1,8% (загальне зниження 3,9-1,8), збільшення температури металу до 1500 °С. Регулювання температури металу проводилося зниженням потужності печі до 30 МВт. З метою недопущення неконтрольованого окислення кремнію в чорновому феронікелі, частка відновника тимчасово збільшена до 3-4%. на показник 1,5-1,6%) до 1,1%. Подальше регулювання (стабілізація) вмісту кремнію в чорновому металі шляхом збільшення навішування відновника виявилось неефективним. Температура металу регулюється зниженням потужності печі до 25 МВт.

Наступним кроком через неможливість подальшого збільшення потужності рудотермічної печі на величину більше 25 МВт через критичну температуру



металу, що могло вкрай негативно позначитися на стабільності конструкцій печі, включаючи вогнетривку футеровку, подальше технологічне управління рудотермічної піччю було можливим за технологією низького відновлення. Для чого виконано зміну типу відновника, що використовується, з антрацитової марки вугілля на енергетичні, приблизного наступного складу:

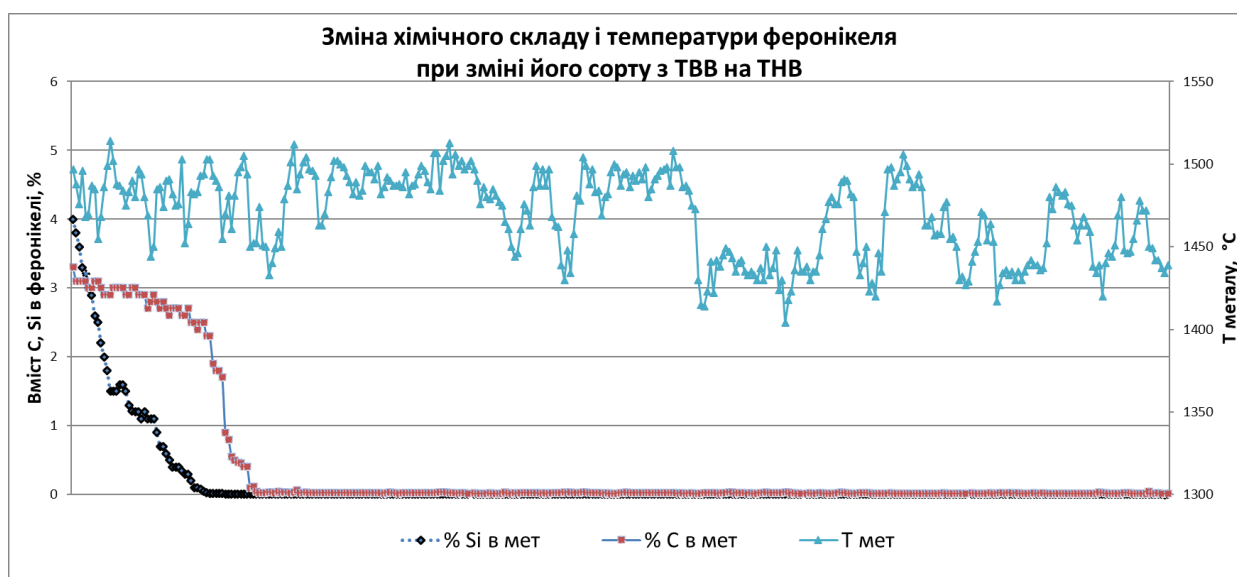
- зола – 10,8%;
- леткі – 34,5%;
- сірка – 0,5%;

та контролем фракційного складу.

Подальші кроки були спрямовані на стабілізацію технологічних параметрів роботи печі та повне оновлення розплавів у печі.

Зниженням частки енергетичного відновника досягнуто максимальне окислення кремнію з феронікелю, досягнувши вмісту 0,2% та деякого окислення вуглецю до 2,5%. Потужність печі обмежувалася максимально, аж до повних зупинок 25 МВт через підвищену температуру металу більше 1500 °С. Період залишкового окислення кремнію в печі і початку окислення вуглецю характеризувався активним спінюванням шлакової ванни, через що частка енергетичного відновника, що використовується, була знижена до 1,5%. Щоб уникнути аварійних виходів розплаву, експлуатація печі проводилася в режимі оплавленої ванни з питомою витратою електроенергії до 700 кВт/т огарка і більше. Вміст кремнію знизився до 0,1%, вміст вуглецю – до 2,5%. Зафіксовано зниження температури шлаку до 1490 °С (нижче за температуру металу). Цей факт свідчив про початок періоду активного окислення вуглецю, який тривав протягом 9 діб.

Період окислення вуглецю характеризувався активним спінюванням шлакової ванни і відповідними повними зупинками рудотермічної печі для осадження шлаку, що спінився. Температура металу за період знижено з 1500 °С до 1470 °С (малюнок 3).



Малюнок 3. Зміна сорту феронікелю під час переходу з технології високого відновлення заліза на технологію низького відновлення.

Авторська розробка

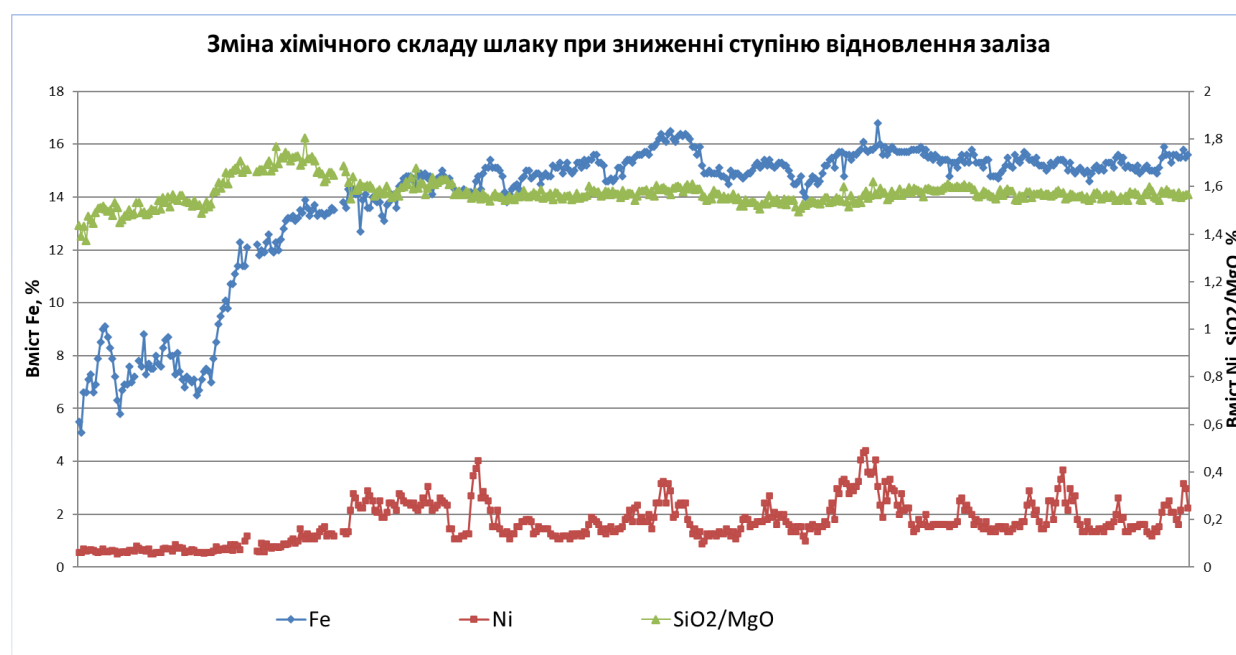


Остаточний період переведення феронікелевої рудотермічної печі на технологію низького відновлення характеризувався активним окисненням вуглецю з феронікелю та плавним набором технологічної потужності.

Період повного окиснення кремнію та вуглецю з феронікелю обґрунтував твердження про можливе протікання позапічної десульфурзації без наявності кремнію в металі та повного припинення процесу позапічної десульфурзації при зниженні вмісту вуглецю менше 2%.

Подальше рафінування феронікелю стало можливим виключно шляхом мікшування чорнового феронікелю з рудотермічної печі, що працює на технології високого відновлення заліза.

До кінця цього періоду окиснення вуглецю температура чорнового феронікелю стабілізована на показнику 1430 °С, шлаку - до 1580 °С.



Малюнок 4. Зміна складу шлаку зі зниженням ступеня відновлення заліза.
Авторська розробка

Наступний період виходу в робочий режим роботи рудотермічної печі був пов'язаний зі стабілізацією шлакового режиму (**малюнок 4**) та вирішенням практичних завдань:

- визначення оптимальної питомої витрати електроенергії

При цьому спостерігається природна залежність зниження питомої витрати електроенергії зі збільшенням потужності (**малюнок 5**), а також стабільна залежність зниження питомої витрати електроенергії зі збільшенням вмісту заліза (лимонітів) у руді, що переробляється (**малюнок 6**).

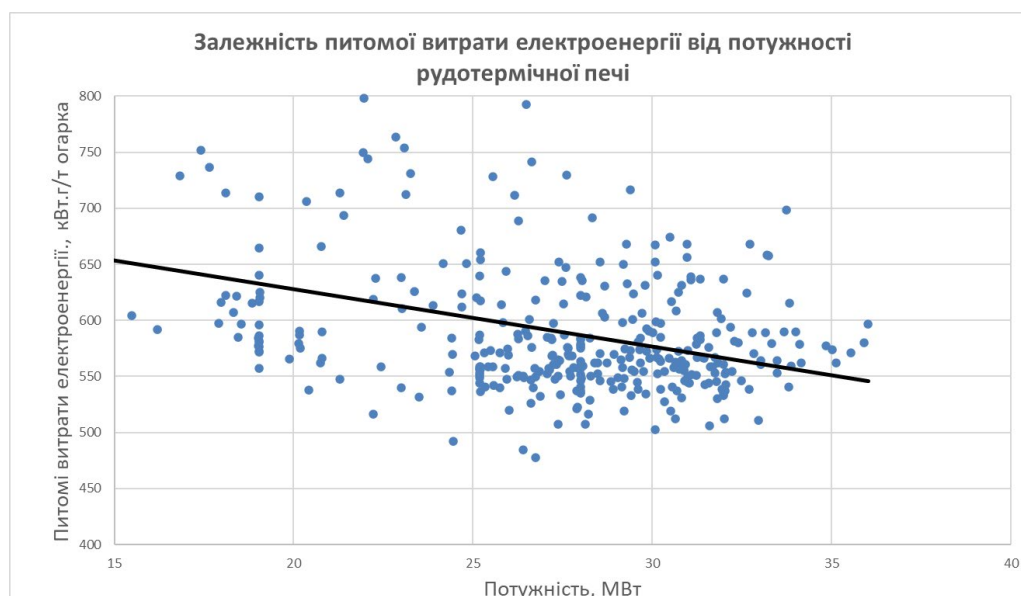
Таким чином, перехід на технологію низького відновлення заліза є не тільки технологічно оптимальним, а й економічно доцільним, знижуючи витрати основної економічної складової – електроенергії.

- робота на електричних режимах, що забезпечують оптимальну температуру чорнового феронікелю та електропічного шлаку (**малюнок 7**).

Це продиктоване необхідністю через те, що зниження струмових

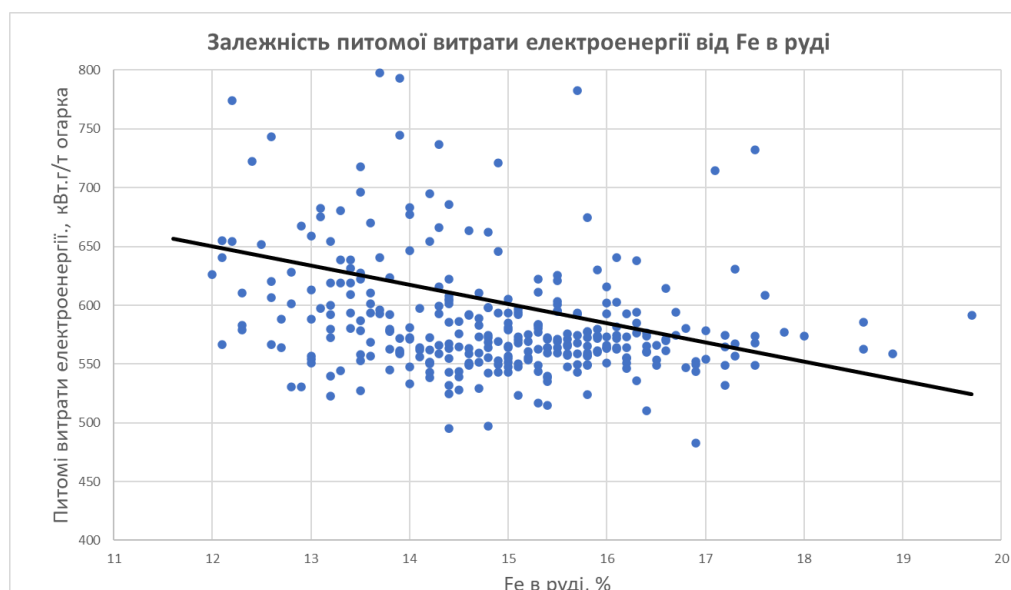


навантажень до 18-20 кА призводило до підвищення температури металу до 1460 °С і збільшення температури шлаку до 1670 °С, при руйнівно діяло на футерування через критичний перегрів шлаку;



Малюнок 5. Залежність питомої витрати електроенергії від потужності рудотермічної печі

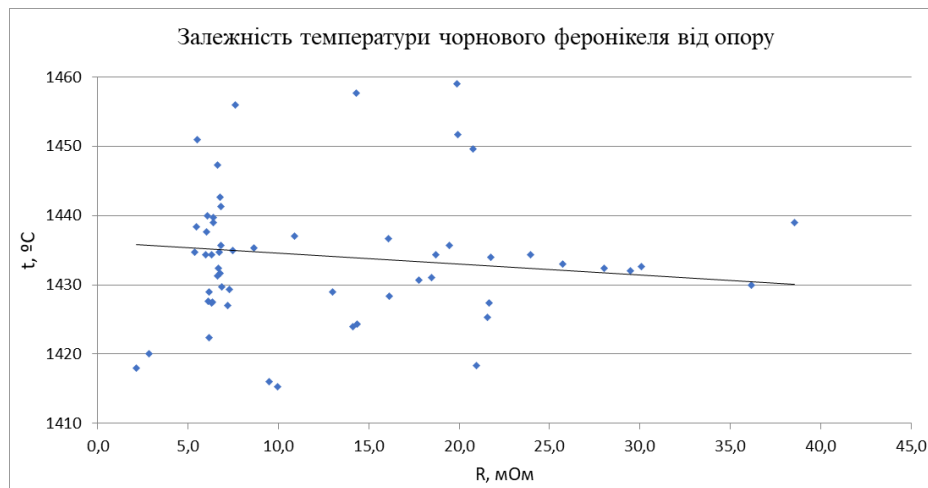
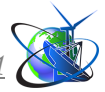
Авторська розробка



Малюнок 6. Залежність питомої витрати електроенергії від вмісту заліза у руді

Авторська розробка

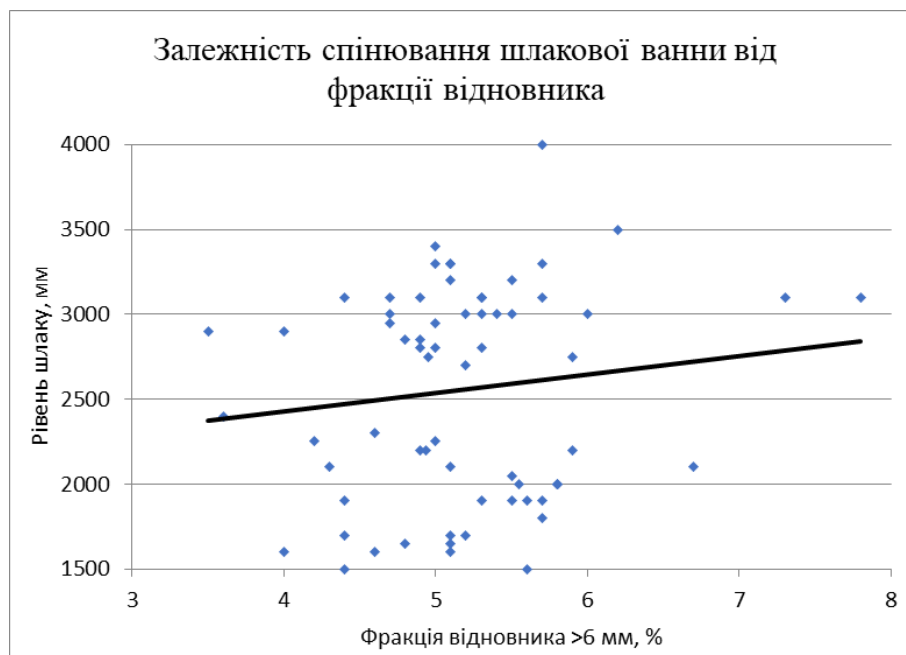
Збільшення ж струмових навантажень до 26-28 кА давало зворотний ефект зі зниженням температури чорнового феронікелю з відповідним подовженням каналів металевих шпурів (підвищувало їх стійкість), але тим самим ускладнювало евакуацію «короткого» металу через малий його перегрів і зниження температури електропічного шлаку з відповідним збільшенням вмісту в них прямих втрат нікелю.



Малюнок 7. Залежність температури чорного феронікелю від опору

Авторська розробка

• зниження рівня шлаку, що спінився, в печі, що збільшується при вмісті вуглецю в огарку більше 1% і знижується при падінні вуглецю в недогарку менше 1%



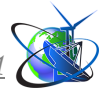
Малюнок 8. Залежність спінювання шлакової ванни від фракції відновника

Авторська розробка

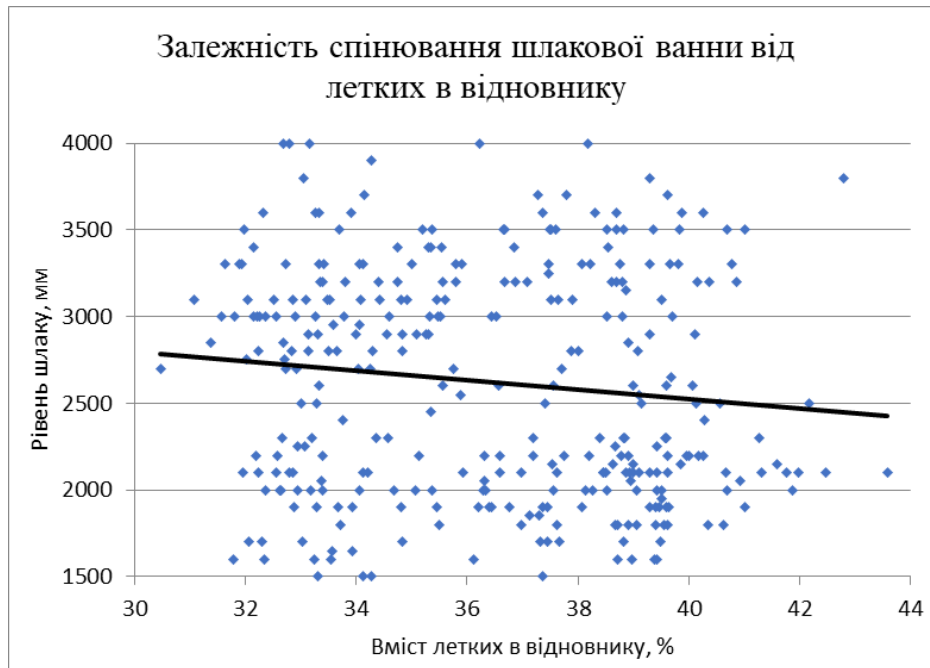
Вміст залишкового вуглецю в огарку, при постійному дозуванні відновника, залежить від активності відновника (малюнок 8) та його фракційного складу, часу знаходження матеріалу у ТОП та температурного профілю ТОП. Переважно використання «молодого» вугілля, з високим вмістом летких та фракційним складом $-6 \text{ мм} > 95\%$ (малюнок 9, 10) [5].

Досягнуті показники роботи рудотермічної печі на ТНВ [4]:

- потужність печі – 37МВт
- відновлення заліза – до 15%;



- питома витрата електроенергії- 583 кВтг/т огарка;
- питома витрата вапняку – 0кг/т;
- питома витрата відновника – 36,6 кг/т;
- вихід огарка з руди- 91,0%.
- вміст нікелю в чорновому феронікелі – 45%;
- вміст вуглецю в чорновому феронікелі – до 0,02%;
- вміст кремнію у чорновому феронікелі – 0,01%.



Малюнок 9. Залежність спінювання шлакової ванни від вмісту летких відновника

Авторська розробка



Малюнок 10. Зміна рівня шлаку, вмісту летких та фракції відновника.

Авторська розробка

З урахуванням роботи двох рудотермічних печей, одна з яких працює з високим ступенем відновлення заліза, інша – з низьким ступенем відновлення заліза, досягнуто потенціалу виробництва можливого повного спектру сортів феронікелю, з вмістом нікелю в товарному феронікелі від 18 % до 70 %.



Літературні джерела

1. Frank Crundwell, Michael Moats, V. Ramachandran, Tim Robinson, William Davenport «Видобувна металургія нікелю, кобальту та металів платинової групи», стаття, січень 2011 р.
2. M.Y. Solar, Ian Candy, B. Wasmund «Вибір оптимальної марки феронікелю для виплавки нікелевих латеритів», 2008 р.
3. Maurice Y. Solar & Sina Mostaghel «Виплавка складних латеритних руд», наукові статті, публікація онлайн грудень 2014 р.
4. Технологічна інструкція електроплавка огарка у руднотермічних печах № ПФК-УВ-ТІ-14-0002 від 18.02.2022
5. С.В. Приходько, В.К. Солоха «Звіт з переходу на технологію низького відновлення заліза в РТП-1 на Побузькому феронікелевому комбінаті», 2015 р

***Abstract.** The favorable physical and mechanical characteristics of nickel have led to widespread use in various products, about two million tons per year. Nickel is the most important alloying element in austenitic stainless steel and other special alloys. The dramatic increase in the production of these alloys over the past decade has significantly increased the demand of ferronickel. In order to meet increased industrial demand, new and more efficient ways of nickel production from poor and more complex ores are needed in conditions of depletion of reserves of rich nickel ores. This document summarizes the experience in the field of development and operation of ferronickel electric smelting technology, sets out performance of ore-smelting furnace with a capacity of 40 MWA and the features of the process of low iron reduction technology, selection of the optimal process reducing agent.*

***Key words:** laterites, ferronickel smelting, ore-thermal furnace, smelting problems, low iron reduction technology, reducing agent.*

Стаття відправлена: 24.10.2023 р.

© Приходько С.В.