

Шевченко Д.В., Овчарук А.М., Надточій А.А.

Проблема десульфурзації чорнового феронікелю, отриманого за технологією низького відновлення на Побузькому феронікелевому комбінаті

Shevchenko D.V., Ovcharuk A.M., Nadtochii A.A.

The problem of desulphurization of crude ferronickel obtained by low reduction technology at the Pobuzhsky ferronickel plant

Мета. З введенням в експлуатацію РТП1 канадської компанії Hatch на Побузькому феронікелевому комбінаті та переведенням її на технологію низького відновлення (ТНВ) стало можливим отримання феронікелю, що містить лише соті частки відсотка кремнію і вуглецю, що необхідні для содової десульфурзації в ковші, тому комбінатом впроваджено комплексну технологію, якою передбачається змішування (міксування) чорнового феронікелю, що випускається з РТП1 зі зниженим вмістом кремнію та вуглецю та з високим вмістом Ni, зі сплавом із РТП2 з низькою концентрацією нікелю та високою кремнію і вуглецю. Однак у зв'язку із зупинкою РТП2 на капітальний ремонт виникла потреба відпрацювати режим десульфурзації за комбінованою схемою, яка передбачає поєднати содову десульфурізацію та киснево-конвертерну, яка є скрутною і потребує додаткових матеріальних та енергетичних витрат. **Методика.** Термодинамічне моделювання виконане з використанням програмного комплексу HSC Chemistry 6.1. Аналітичні та промислові дослідження в умовах Побузького феронікелевого комбінату. **Результати.** Оброблено та проаналізовано результати промислових досліджень комбінованої технологічної схеми десульфурзації високовідсоткового феронікелю в ковші та конвертері, узагальнено технічні результати десульфурзації феронікелю на всіх етапах розвитку та вдосконалення його виробництва в умовах ПФК. **Наукова новизна.** Проведено рівноважний розподіл фаз у системі Fe-Ni-S-Na-Si-C-O з використанням бази даних програми «HSC Chemistry 6.0». Показано, що кремній впливає на повноту реакції десульфурзації. Визначено температурні межі процесу. **Практична значимість.** У промислових умовах Побузького феронікелевого комбінату відпрацьовано та освоєно комбіновану технологію десульфурзації високовідсоткового феронікелю з РТП1 за схемою ківш-кисневий конвертер, що забезпечило можливість роботи комбінату при зупинці РТП2 на капітальний ремонт та одержання товарної продукції.

Ключові слова: руднотермічна піч, чорновий феронікель, десульфурізація, кремній, вуглець, міксування.

Purpose. With the commissioning of the Canadian company Hatch's RTP1 at the Pobuzhsky Ferronickel Plant and its transfer to low-reduction technology, it became possible to produce ferronickel containing only hundredths of a percent of silicon and carbon, which are necessary for soda desulfurization in a ladle. Therefore, the plant has implemented a comprehensive technology that provides for mixing (mixing) crude ferronickel produced from RTP1 with a reduced silicon and carbon content and a high Ni content, with an alloy from RTP2 with a low nickel concentration and a high silicon and carbon. However, due to the shutdown of RTP2 for major repairs, there was a need to develop a desulfurization mode using a combined scheme that involves combining soda desulfurization and oxygen-converter desulfurization, which is difficult and requires additional material and energy costs. **Methodology.** Thermodynamic modeling was performed using the HSC Chemistry 6.1 software package. Analytical and industrial research in the conditions of Pobuzhsky Ferronickel Plant. **Results.** The results of industrial research of the combined technological scheme of high-percentage ferronickel desulfurization in a ladle and converter were processed and analyzed, the technical results of ferronickel desulfurization at all stages of development and improvement of production in the conditions of the PFC were summarized. **Scientific novelty.** The equilibrium distribution of phases in the Fe-Ni-S-Na-Si-C-O system was carried out using the database of the HSC Chemistry 6.0 program. It was shown that silicon affects the completeness of the desulfurization reaction. The temperature limits of the process were identified. **Practical significance.** In industrial conditions of the Pobuzhsky Ferronickel Plant, a combined technology for desulfurization of high-grade ferronickel from RTP1 using the ladle-oxygen converter scheme has been developed and mastered, which has provided the possibility of the plant operating when RTP2 is stopped for major repairs and obtaining commercial products.

Key words: ore-thermal furnace, rough ferronickel, desulfurization, silicon, carbon, mixing.

Вступ. Нікель відноситься до групи важких кольорових металів і використовується в різних галузях індустрії, починаючи з виробництва легованої сталі і закінчуючи високотехнологічними розробками у медицині і електротехніці. Нікель – це елемент, який у природі існує у вигляді ряду оксидів, сульфідів і силікатів. Його важливість пояснюється унікальними властивостями: додавання нікелю у

сплави підвищує їх міцність, зносостійкість, корозійну стійкість, підвищує тепло і електропровідність, покращує магнітні і каталічні властивості. У ряді галузей промисловості, наприклад, при виготовленні реактивних двигунів, сплави нікелю, незамінні. Це метал, який наразі визнано одним із найцінніших матеріалів, що видобувався у 20-21 століттях.

© Шевченко Д.В. – УДУНТ
Овчарук А.М. – УДУНТ
Надточій А.А. – д.т.н., проф. УДУНТ

© Shevchenko D. – USUST
Ovcharuk A. – USUST
Nadtochii A. – d.t.s., profssor, USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Аналіз літературних даних та постановка задачі. На сьогоднішній день видобутком і переробкою нікелевих руд займаються 22 країни світу. Лідерами галузі вже довгий час залишаються Канада, Австралія та Нова Каледонія. До списку крупних виробників входять Індонезія і Куба. Руди найвищої якості добуваються на Філіппінах, у Новій Каледонії та Індонезії [1].

Власна мінерально-сировинна база нікелю в Україні представлена екзогенними родовищами силікатного нікелю кір вивітрювання Середнього Придніпров'я і Побужжя з вмістом нікелю 0,38-1,24%, тоді як у світі найбільше промислове значення мають родовища нікелю сульфідного типу. Нікель в Україні є, але разом з тим є і чимало проблем. І основна полягає в тому, що нікелеві руди України бідні. Єдине підприємство на території України, що здатне переробляти руди такого типу – Побузький феронікелевий комбінат працює повністю на імпортній сировині і належить міжнародній компанії Solway Investment Group [2] відмовляється від переробки вітчизняної сировини. Комбінат використовує лише імпортовану руду з вмістом нікелю 1,6-2,2 % родовищ Нової Каледонії, Індонезії та Гватемали [3].

При переведенні виробництва на використання імпортованих руд конструктивна технологічна схема практично не змінилася і включає в себе підготовку огарку в трубчастих обертових печах (ТОП), електровиплавку огарку в руднотермічних печах (РТП) потужністю 42 МВ·А для отримання чорного нікелю і його рафінування для отримання товарної продукції в 30-тонних конвертерах.

Технологічна схема рафінування чорного феронікелю базується на попередній десульфурзації рідкого феронікелю та послідовному рафінуванні

від кремнію, хрому, вуглецю, сірки та фосфору у вертикальних конвертерах LD з «кислою» і «основною» футеровкою з верхнім продуванням киснем. Перший етап десульфурзації чорного феронікелю проводиться за допомогою кальцинованої соди або содового розплаву - вторинного матеріалу хімічного виробництва, застосування якого дозволяє підвищити ефективність десульфурзації і коефіцієнт використання реагенту [4]. З введенням в експлуатацію РТП1 канадської компанії Hatch і переведенням її на технологію низького відновлення (ТНВ) стало можливим отримання феронікелю, що містить лише соті частки відсотка кремнію і вуглецю, що виключає можливість його вторинного рафінування содою.

Грунтовний аналіз та огляд способів рафінування сплавів на провідних світових підприємствах, що виробляють феронікель, наведений у роботах [4-7], дозволив узагальнити результати численних показників десульфурзації за різними технологічними схемами та намітити шляхи оптимізації процесу в умовах комбінату.

Теоретичні дослідження десульфурзації чорного феронікелю.

Термодинамічний аналіз сульфідів елементів, що входять до складу металургійних заліззовмісних систем, дозволяє намітити ймовірні реакції десульфурзації розплавів при технологічних процесах отримання феронікелю. Значний, якщо не визначальний вплив на поведінку сірки і, перш за все, її видалення з металу надає її активність, що підвищує реакційну здатність. Аналіз результатів досліджень впливу різних елементів на коефіцієнт активності сірки (рис. 1) у бінарних системах показує, що основними елементами, що підвищують активність сірки, є вуглець та кремній.

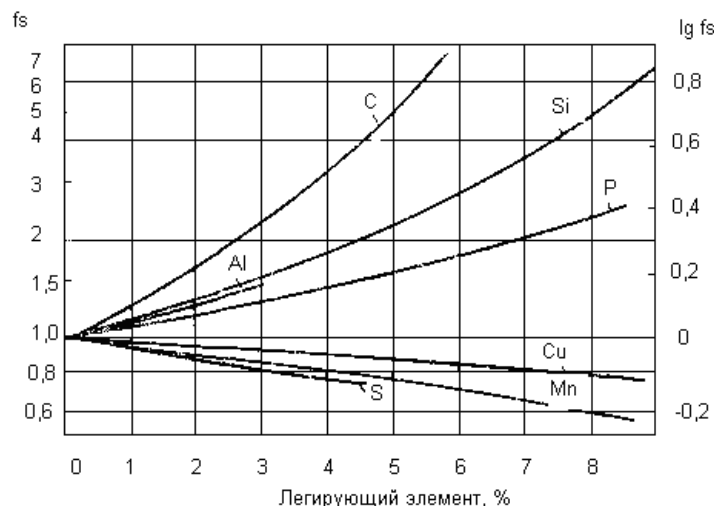


Рис. 1. Вплив різних елементів на коефіцієнт активності сірки [8]

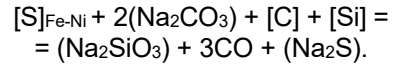
При збільшенні концентрації вуглецю та кремнію істотно підвищується коефіцієнт активності сірки і, відповідно, при даній концентрації сірки та її активності, чим значною мірою пояснюється суттєве поліпшення умов десульфурзації чавунів

порівняно з десульфурцією розплаву в сталеплавильних агрегатах [8].

Успішна та високоефективна десульфурация чорного феронікелю содою можлива при рафінуванні сплавів, що мають у своєму складі високу (3-5 %) концентрацію кремнію та вуглецю, що

підвищують коефіцієнт активності сірки та ступінь десульфурації. Цей процес заснований на утворенні в процесі реакції стійкого з'єднання сульфідів натрію, що переходить у шлак.

Процес видалення сірки може бути узагальнений реакцією



Температурні залежності вільних енергій Гіббса можливих реакцій взаємодії сірки з содою представлені в таблиці 1 та на рис. 2.

Таблиця 1. Температурні залежності вільних енергій Гіббса для реакцій взаємодії сульфідів з содою

№	Можлива реакція	Температурна залежність ΔG_T^0 , Дж/моль
1	$FeS + 3Na_2CO_3 + 2Si = 2Na_2SiO_3 + Na_2S + Fe + 3CO$	$-326578 - 430 \cdot T$
2	$NiS + 3Na_2CO_3 + 2Si = 2Na_2SiO_3 + Na_2S + Ni + 3CO$	$-340447 - 440 \cdot T$
3	$FeS + Na_2CO_3 + C = Fe + Na_2S + CO + CO_2$	$-362121 - 330 \cdot T$
4	$NiS + Na_2CO_3 + C = Ni + Na_2S + CO + CO_2$	$-348251 - 340 \cdot T$
5	$FeS + 2Na_2CO_3 + Si + C = Fe + Na_2SiO_3 + Na_2S + 3CO$	$103813 - 467 \cdot T$
6	$NiS + 2Na_2CO_3 + Si + C = Ni + Na_2SiO_3 + Na_2S + 3CO$	$89943 - 477 \cdot T$

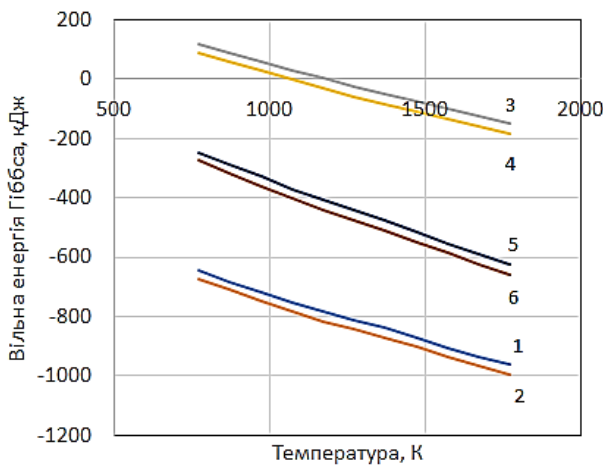


Рис. 2. Вільна енергія Гіббса для можливих реакцій взаємодії сульфідів з содою (цифри у кривих номера реакцій в табл.1)

Аналіз отриманих результатів показує, що термодинамічно на десульфурацію в системі більш ефективно впливає кремній (рис. 2, кр. 1, 2) порівняно з вуглецем (кр. 3, 4). Хоча деякі фахівці-виробники відзначають, що більший вплив на процес десульфурації надає саме вуглець, що, мабуть, пов'язано не тільки термодинамічно, але і з кінетичними параметрами процесу – впливом газової

фази (вміст CO) на перемішування реагентів та збільшенням їхньої контактної поверхні.

Рівноважний розподіл фаз у системі Fe-Ni-S-Na-Si-C-O, який провели з використанням бази даних програми «HSC Chemistry 6,0», показав, що кремній впливає на повноту процесу десульфурації (див. рис. 3, а і б).

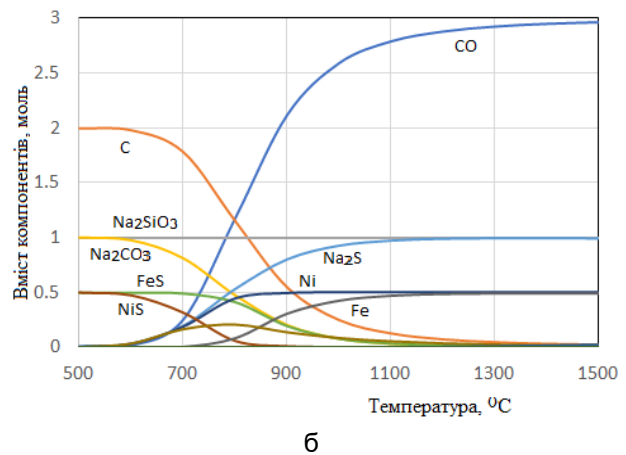
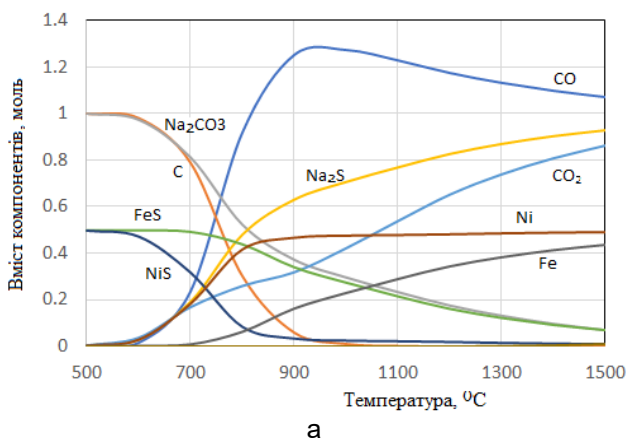


Рис. 3 - Рівноважний розподіл фаз у системах:
а) $0,5FeS+0,5NiS+Na_2CO_3+C$; б) $0,5FeS+0,5NiS+2Na_2CO_3+C+Si$

Інтенсивне зменшення сульфїду нікелю протікає при температурах 500-800 °С, а сульфїду заліза при 700-1300°С (рис. 3, б), тобто підвищення температури вище 1300-1350 °С не доцільно для процесу десульфурзації чорного феронікелю.

Таким чином, введення в експлуатацію РТП1 канадської компанії Hatch і переведення її на технологію низького відновлення привело до отримання феронікелю, що містить лише соті частки відсотка кремнію і вуглецю, що виключає можливість його вторинного рафінування содою.

Таблиця 2. Хімічний склад чорного феронікелю на РТП1 і РТП2, %

	Ni	Co	Si	Cr	S	C	P	Cu
РТП1	47	0,42	0,01	0,02	0,5	0,014	0,065	0,063
РТП2	14,5	0,27	3,90	1,8	0,25	2,5	0,064	0,032

Мікшування дозволило повернутися до проектної технології - позапічної десульфурзації кальцинованою содою в ковші та доведення металу в конвертері.

У зв'язку із зупинкою РТП2 на капітальний ремонт, а РТП1 продовжувала працювати за технологією низького відновлення, виникла потреба відпрацювати режим десульфурзації за комбінованою схемою. Ця схема передбачає поєднати содову десульфуррацію та киснево-конвертерну, яка є скрутною і потребує додаткових матеріальних та енергетичних витрат. Проведені випробування показали, що при необхідності можливе здійснення альтернативної схеми рафінування на противагу існуючій на даний момент на комбінаті.

За промислову кампанію з виплавки феронікелю за технологією низького відновлення в РТП1 та його десульфуррацію за комбінованою технологією було зроблено 95 випусків. Аналіз показників роботи РТП1 за досліджуваний період із виробництва та рафінування високовідсоткового феронікелю дозволив зробити такі висновки:

1. Розроблена технологічна схема десульфуррації забезпечує отримання товарного феронікелю, що відповідає вимогам міжнародних стандартів. Середній вміст сірки (S) становить 0,059%, а ступінь десульфуррації досягає 80-84%.

2. Для забезпечення отримання феронікелю з низьким вмістом S було витрачено:

- вапняку (CaCO ₃),	кг/т Ni	31
- феросиліцію ФС75,	-«-	45
- соди (Na ₂ CO ₃),	-«-	57,3
- алюмінію (Al),	-«-	8,54
- вапна (CaO),	-«-	169
- кисню (O ₂),	м ³ /т Ni	162
- час плавки,	год	2,15
- час продування,	хв	20,6.

3. Вилучення нікелю в товарну продукцію з чорного феронікелю, що містить 42,1 % Ni і 0,283 % S, становило 92,4 %, тобто втрати нікелю на стадії рафінування становлять близько 8%.

Тому комбінатом було розроблено та впроваджено комплексну технологію, якою передбачається змішування (мікшування) чорного феронікелю, що випускається з РТП1 зі знизеним вмістом кремнію та вуглецю (до 0,01 %) та з високим вмістом Ni (понад 50 %), зі сплавом із РТП2 з низькою концентрацією нікелю (10-17 %) та високою кремнію і вуглецю, необхідні для содової десульфуррації в ковші. У табл. 2 наведено хімічний склад чорного феронікелю на РТП1 та РТП2, виробленого за різними технологічними схемами.

4. За період випробувань було вироблено чорного феронікелю загальним обсягом 3341,6 т або 1521 т нікелю, сірки введено 9,457 т, а перейшло у товарний сплав 1,534 т, тобто десульфуррація за даною схемою дозволила видалити 7923 т або понад 83% сірки. На 1 кг віддаленої сірки витрачено, кг: вапняку 60,6; феросиліція 8,752; соди 11,0; алюмінію 1,73; вапна 30,165; кисню 29 нм³.

5. При десульфуррації чорного феронікелю утворилося 1546,7 т конвертерного шлаку, що містить, % за масою: Ni 0,52; Fe 45,8; SiO₂ 11,5; CuO 16,02; MgO 7,95; Al₂O₃ 0,73. Кратність шлаку становила 0,6; основність CaO+MgO/SiO₂ 2,08. Втрати Ni зі шлаком становили 8 т, утилізація якого є актуальною проблемою. Де-які шляхи щодо вирішення питання утилізації цих шлаків розглянуті у роботах [9-11].

Інтерес викликає порівняльний аналіз технічних показників процесу рафінування чорного феронікелю за трьома схемами (табл. 3) – проектна, мікшування та дослідна (комбінована).

Аналіз показує, що найбільш ефективною є проектна технологія, за якою обидві печі працюють на повне відновлення.

Аналізуючи показники роботи печей РТП1 і РТП2 за технологією мікшування розплаву на випуску з печі, слід зазначити, що піч РТП2 працює більш ефективно, тому що за один і той же період роботи з печі РТП1 із вмістом Ni в сплаві 45,22 % випуску на 34 % менше, ніж із печі РТП2 із вмістом нікелю 10,53%.

Рафінування чорного феронікелю за опитною технологією викликало необхідність збільшити витрату феросиліцію, додатково використовувати алюміній і вапно, при цьому час плавки зріс на 26 і 40 %, порівняно з технологією мікшування та проектною (табл. 4), значно знижується і продуктивність процесу – 52, 2 та 60 % відповідно.

Порівняння питомих витрат матеріалів на рафінування та видалення 1 кг сірки ще раз підтверджує більш високу ефективність проектної схеми (табл. 5), яка базується на десульфуррації нікелевого чавуну.

Таблиця 3. Технічні показники позапечної десульфурзації чорного феронікелю за різними технологічними схемами

№ п/п	Найменування показника	Технологічні схеми			
		Опитна	Мікшування		Проектна
			РТП1	РТП2	
1	Чорновий феронікель, т	3341,6	1022,1	5889,25	10525
2	Нікелю, т	1406,8	462,55	619,6	1418
3	Вміст Ni, т	42,1	45,22	10,53	13,48
4	Вміст S, т	0,283	0,36	0,089	0,298
5	Витрата CaCO ₃ , т	48,0	805,5		305
6	Витрата FeSi, т	70,0	18,56		48,15
7	Витрата соди, т	87,17	73,85		117,7
8	Витрата Al, т	13,75	-		-
9	Витрата вапна, т	239,0	-		Fe руда79
10	Час плавки, год	2,15	1,7		0,7/0,84
11	Продукція O ₂ , хв	20,6	21,64		8,12/15,21
12	Витрата O ₂ , нм ³	228630	194402/286645		320058/107991
Отримано:					
13	Товарний FeNi, т	2600	5920		9130
14	Нікелю, т	1521	1119,6		1584
15	Вміст Ni, %	54,53	18,9		17,4
16	Вилучення Ni, %	92,4	95,9		90,6
17	Вміст S, %	0,059	0,043		0,068
18	Кратність шлаку	0,60	0,40		0,26
19	Нікелю в шлаку, %	0,52	0,19/0,14		0,18/0,226
20	Видалено сірки, т	0,792	0,635		2,516

Таблиця 4. Питомі витрати матеріалів на рафінування феронікелю за різними технологічними схемами, кг/1 т Ni

№ п/п	Стаття витрат	Технологічні схеми		
		Опитна	Мікшування	Проектна
1	Витрата кальцинованої соди	57,3	65,96	70,5
2	Витрата вапняку	31,5	72,0	192
3	Витрата феросиліцію	46	16	30
4	Витрата алюмінію	9	-	
5	Витрата вапна	157	-	
6	Витрата кисню, нм ³	150	429	270
7	Вміст [S], %	0,059	0,043	0,068
8	Вилучення Ni, %	92,4	95,9	90,6
9	Продуктивність, т Ni/сутки	16,0	48,7	51,1
10	Час плавки, год	2,15	1,7	1,54
11	Час продувки, хв	20,6	21,84	23,3

Таблиця 5. Матеріальні витрати на рафінування та десульфурзацію чорного феронікелю, кг/кгS

№ п/п	Стаття витрат	Технологічні схеми		
		Опитна	Мікшування	Проектна
1	Кальцинована сода	110	116	44
2	Вапняк	61	267	121
3	Феросиліцій	88,4	29,2	19,14
4	Алюміній	17,4	-	-
5	Вапно	301	-	-
6	Кисень, нм ³	288	757	170

Висновки. У промислових умовах Побузького феронікелевого комбінату відпрацьовано та освоєно комбіновану технологію десульфурзації високовідсоткового феронікелю з РТП1 за схемою ківш-кисневий конвертер, що забезпечило можливість роботи комбінату при зупинці РТП2 на капітальний ремонт та одержання товарної продукції, що містить 54,55% нікелю та 0,059% сірки.

Аналіз показників процесу рафінування чорного феронікелю за трьома способами,

відпрацьованими на комбінаті – дослідна технологія, технологія міксування та проектна, підтвердили, що найбільш ефективною є проектна, за якою обидві печі працюють на повне відновлення. Питомі матеріальні витрати на рафінування та видалення 1 кг сірки за проектною технологією найбільш низькі, так, наприклад, витрата соди приблизно в 2,5 рази менше, ніж за іншими схемами, феросиліцію в 1,5-4,6 рази; кисню 1,7-4,5 рази; а також виключається застосування алюмінію та вапна.

Перелік посилань

1. Що таке нікель і для чого він потрібен? (дата звернення: 30.06.2024). <https://moyaosvita.com.ua/himiya/shho-take-nikel-i-dlya-chogo-vin-potriben/>
2. Solway Investment Group. Режим доступу: Solway Investment Group, GmbH – Private international mining and metals group located in Switzerland. Solway operates mines and smelting plants in Guatemala, Ukraine, Russia, Indonesia and Macedonia, with a focus on nickel production. (дата звернення: 02.06.2024). <https://solwaygroup.com/>
3. Чи є в Україні нікель? – Національна асоціація добувної промисловості України. (дата звернення: 02.06.2024). <https://neiau.com.ua/chi-%D1%94-v-ukra%D1%97ni-nikel/>
4. Спосіб виплавки чорного феронікелю з оптимальним вмістом кремнію: Патент на корисну модель. 62847 Україна: С22В 23/00. № u201108521; заявл. 07.07.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17. 4 с. <https://iprop-ua.com/inv/imx6ve1x/>
5. Новиков Н.В., Капран И.И., Соколов К.Д., Гасик М.И., Овчарук А.Н. Исследование химического минералогического состава никелевых руд для выплавки ферроникеля. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 3. С. 19-22.
6. Відновна суміш для електротермічного виробництва феронікелю: Патент на корисну модель 109001 Україна: С22В4/06 № u201600821; заявл. 02.02.2016, опубл. 10.08.2016. Бюл. № 25. 3 с. <https://iprop-ua.com/inv/nq727gg1/>
7. Беспалов О.Л., Соколов К.Д., Приходько С.В., Замковой О.В., Шевченко Д.А., Мельник С.А., Новиков Н.Н., Овчарук Д.С., Солоха В.В. (2017). Современное состояние и перспективы совершенствования технологии производства ферроникеля. *Актуальные проблемы развития металлургической науки и образования*. С. 204-211. https://nmetau.edu.ua/file/zbirka_dopovidey_100-richchya_efimenka.pdf
8. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. К.: Вища школа, 1988. 351с.
9. Шевченко Д.В., Приходько С.В., Надточій А.А., Шутов В.Ю., Овчарук А.М. (2024). Розвиток технології виробництва феронікелю в Україні. *Сучасна електрометалургія*. №2. С. 5-12. <https://doi.org/10.37434/sem2024.02.01>
10. Novotova E., Hrajvoronskaya I. (2019). Сорбційні властивості металургійних шлаків. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 84(), 88-97. <https://europub.co.uk/articles/-A-554893>
11. Хоботова Э.Б., Грайворонская И.В., Даценко В.В., Баумер В.Н. (2011). Оценка возможности использования шлака при производстве ферроникеля для очистки сточных вод. *Химия и технология воды*. Т. 33. № 4. С. 443-450. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130652>

References

1. *Shcho take nikel i dlia choho vin potriben?* <https://moyaosvita.com.ua/himiya/shho-take-nikel-i-dlya-chogo-vin-potriben/>
2. *Solway Investment Group. Режим доступу: Solway Investment Group, GmbH – Private international mining and metals group located in Switzerland.* Solway operates mines and smelting plants in Guatemala, Ukraine, Russia, Indonesia and Macedonia, with a focus on nickel production. <https://solwaygroup.com/>
3. *Chy ye v Ukraini nikel?* – Natsionalna asotsiatsiia dobuвної promyslovosti Ukrainy. <https://neiau.com.ua/chi-%D1%94-v-ukra%D1%97ni-nikel/>
4. Hasyk, M. I., Zaporozhets, B. O., Novikov, M. V., Novikov, M. M., Ovcharuk, A. M., Prykhodko, S. V., Romanenko, V. A., Sokolov, K. D., Taran, O. Yu., & Filov, O. S. (2011). *Sposib vyplavky chornovoho feronikeliju z optymalnym vmistom kremniiu.* (Patent No. 62847). Derzhavna Sluzhba Intelktualnoyi Vlasnosti Ukrainy.
5. Novikov, N. V., Kapran, I. I., Sokolov, K. D., Gasik, M. I., & Ovcharuk, A. N. (2005). Issledovanie khimicheskogo mineralogicheskogo sostava nikelovykh rud dlia vyplavki feronikelia. *Metallurgicheskaja i gornorudnaia promyshlennost*, (3), 19-22
6. Bespalov, O. L., Prykhodko, S. V., Danov, O. V., Melnyk, S. O., Tsvitkov, I. V., Taran, O. Yu., Ovcharuk, D. S., Novikov, M. M., & Danyliuk, V. V. (2016). *Vidnovna sumish dlia elektrotermichnogo vyrobnytstva feronikeliju.* (Patent No. 109001). Derzhavna Sluzhba Intelktualnoyi Vlasnosti Ukrainy
7. Bespalov, O. L., Sokolov, K. D., Prikhodko, S. V., Zamkovoii, O. V., Shevchenko, D.A., Melnik, S. A., Novikov, N. N., Ovcharuk, D. S., & Solokha, V. V. (2017). Sovremennoe sostoianie i perspektivy sovershenstvovaniia tekhnologii proizvodstva feronikelia. *Aktualnye problemy razvitia metallurgicheskoi nauki i obrazovaniia*, pp. 204-211. https://nmetau.edu.ua/file/zbirka_dopovidey_100-richchya_efimenka.pdf
8. Efimenko, G. G., Gimmelfarb, A. A., & Levchenko, V. E. (1988). *Metallurgija chuguna*. Vishcha shkola

9. Shevchenko, D. V., Prykhodko, S. V., Nadtochii, A. A., Shutov, V. Yu., & Ovcharuk, A. M. (2024). Rozvytok tekhnolohii vyrobnytstva feronikeliu v Ukraini. *Suchasna elektrometalurhiia*, (2), 5-12. <https://doi.org/10.37434/sem2024.02.01>
10. Hobotova, E., & Hrajvoronskaya, I. (2019). Sorption properties of metallurgical slags. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, (84), 88-97. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.84.0.88>
11. Khobotova, E. B., Graivoronskaia, I. V., Datsenko, V. V., & Baumer, V. N. (2011). Otsenka vozmozhnosti ispolzovaniia shlaka pri proizvodstve feronikelia dlia ochistki stochnykh vod. *Khimiia i tekhnologiiia vody*, 33(4), 443-450. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/130652>

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.10.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.10.2024