



УДК 622.772 : 669.293

СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ЧОРНОВИХ КОНЦЕНТРАТІВ РІДКІСНОМЕТАЛІЧНИХ РУД

Шпильовий Л. В.¹, Шпильовий К. Л.²

¹кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, E-mail: mineraltech.azov@gmail.com

²інженер, ТОВ «Азов-Мінералтехніка», Донське, Донецька область, Україна
E-mail: mineraltech.azov@gmail.com

MODERN TECHNICAL SOLUTIONS FOR PROCESSING ROUGH CONCENTRATES OF RARE METAL ORES

Shpilevoy L. V.¹, Shpilevoy K.L.²

¹candidate of technical sciences, senior researcher, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, Ukraine, E-mail: mineraltech.azov@gmail.com

²engineer, Azov-Mineraltehnika LLC, Donske, Donetsk region, Ukraine, E-mail: mineraltech.azov@gmail.com

ABSTRACT

The relevance of the problem. The article is devoted to the problem of processing poor rare metal ores. The combined method of processing such ores, which consists in determining the optimal boundary between mechanical processing and subsequent pyrometallurgical processing of the draft concentrate, which allows to increase the end-to-end removal of a rare metal.

The purpose of the article. Increase technical and economic indicators of mining and metallurgical processing of niobium ores.

Methods and equipment. Literary review, attraction of Internet resources, description of experimental studies.

Results. The technological parameters of the production of a draft pyrochlorine concentrate with mechanical methods of enrichment, and restorative smelting of such a concentrate are determined.

Scientific value of development. The concept of a rational technological processing scheme of raskometallic ore is proposed.

Practical importance. Using the proposed approach to processing the poor ore of rare metals, it is possible to significantly improve the technical and economic indicators of the work of the mining and processing enterprise. The arts may be helpful both researchers of processes of dressing and pyrometallurgical processing of ores and engineers of project organizations, students and graduate students.

Keywords: *pyrometallurgical processing, rare metal ores, optimal depth of mechanical processing, extraction*

У світовій практиці для підвищення вилучення металів з бідних рідкіснометалічних руд застосовують гідро- та пірометалургійні процеси переробки чорнових концентратів і бідних промпродуктів. Альтернативне застосування методів механічного збагачення приводить до значних втрат.

Одним з перспективних методів переробки бідних рідкіснометалічних руд, проміжних продуктів збагачення та чорнових концентратів є

пірометалургійна плавка, що в багатьох випадках дозволяє відмовитися від застосування кислот, хлору та інших активних і екологічно небезпечних речовин, спростити технологічну схему. Прикладом ефективного застосування металургійної переробки є метод відновлювальної плавки, що полягає в концентруванні рідкісних металів у сплаві із залізом (чавуні), який отримують в результаті відновлення оксидів рідкісних металів

вуглицем (коксом) в електродуговій печі при температурі процесу 1500-1800 °С. Цей метод придатний для переробки сировини з вмістом рідкісних металів менше 2 %. Додаткове збагачення досягається конвертуванням чавуну при 1250-1350 °С. В результаті продування повітрям вдається отримати шлаки з вмістом 6-12 % оксидів рідкісних металів, які придатні для наступної гідрометалургійної переробки, та досягти високого вилучення металів – 95,0 – 99,0 % [1].

Відомий різновид селективної плавки бідної тантал-ніобієвої руди родовища Crevir (Канада) з вмістом 0,17 % пентоксиду ніобію та 0,02 % пентоксиду танталу. Руду спочатку збагачують гравітаційним способом та магнітною сепарацією. Ніобій і тантал концентруються в немагнітній фракції. Концентрат містить 21 % пірохлору, 18 % циркону, 16 % апатиту, 12 % альбіту, 18 % піриту та 5 % магнетиту. Шихту, що складається з концентрату, коксу та залізної стружки, плавлять при температурі 1550-1700 °С і отримують фероніобій з 20 % вмістом карбідів ніобію і танталу. Обробкою такого, попередньо подрібненого, сплаву сірчаною кислотою в розчин переводять залізо, а карбіди ніобію і танталу залишаються в нерозчинному осаді. Далі проводять окиснювальний випал карбідів при 800 °С протягом 30 хв. та отримують синтетичний концентрат з вмістом ніобію 80 % та 8 % танталу [2]. Але проблем екології та охорони праці цей метод переробки бідних концентратів повністю не вирішує, а лише зменшує масштаб їх шкідливого впливу.

Нами запропоновано застосувати плазмово-дуговий метод переробки бідного пірохлор-цирконового концентрату, отриманого від переробки руд Мазурівського родовища (Донецька обл.) [3]. Цей метод на відміну від попереднього, має перевагу в швидкості нагрівання шихти та можливості перегрівання металічної фази вище температури кипіння окремих елементів. Це дозволяє знизити вміст деяких елементів в металічному розплаві, наприклад алюмінію, магнію, кремнію; відповідно підвищується концентрація заліза та рідкісних металів.

Плазмово-дуговий нагрів дозволяє суттєво підвищити швидкість відновлювальних реакцій в печі в порівнянні із звичайною електричною дугою, та швидкість протікання відновлювальних реакцій не лише за рахунок підвищення температури розплаву, але і в результаті перемішування рідких металу та шлаку плазмовим струменем. Аргон, крім функції несучого газу плазми, виконує також роль утворювача нейтрального середовища по відношенню до газоподібного SiO, що міститься в газовій фазі.

При звичайній електродуговій плавці монооксид кремнію, що утворюється при цьому, окис-

нюється в робочій зоні печі та конденсується на поверхні шлаку.

При плазмово-дуговому нагріванні значна кількість кремнію з концентрату може вилучатися з печі у вигляді леткої сполуки – монооксиду кремнію, та збиратися як додатковий супутній товарний продукт плавки.

Практична перевірка вилучення кремнію з рідкіснометалічного концентрату у вигляді SiO, а також випарювання металічного кремнію під час відновлюваної плавки виконана на лабораторній плазмово-дуговій установці.

Для експериментів з плазмовими дугами постійного струму було розроблено, виготовлено та встановлено на зварювальний апарат ТДФ-1601У4 спеціальний мостовий діодний випрямляч струму. Охолодження діодів здійснювалося проточною водою.

Було проведено дослідження кінетики нагрівання робочого простору та горіння дуги змінного та постійного струму з подачею інертного газу (аргону), або без нього, через порожнистий електрод.

Встановлено, що використання змінного струму забезпечує більш стабільне горіння дуги, а подача аргону в зону горіння дуги дозволяє суттєво збільшити довжину дуги, створюючи тим самим в робочій зоні печі плазмовий потік, що призводить до зростання швидкості нагрівання тигля. Процес знекремнювання вивчався на прикладі відновлювальної плавки цирконового концентрату. Були виготовлені котуни, які складалися з цирконового концентрату та графітового порошку. Проведено дві порівняльні плавки на шихті однакового складу: 2,0 кг котунів та 1,0 кг феросиліцію. Обидві плавки починалися з розтоплення феросиліцію в електродуговому режимі роботи пічної установки. Потім в рідкий метал невеликими порціями завантажувалися котуни. Відновлення здійснювалося в першому випадку у звичайному електродуговому режимі печі, а в другому варіанті – в плазмово-дуговому режимі.

Під час першої плавки відновлювальні процеси, що супроводжувалися кипінням ванни з металом, завершувалося за 40 хвилин.

Під час плазмово-дугової плавки тривалість кипіння скоротилася до 20 хв., а кипіння було більш інтенсивним.

Результати хімічного аналізу металу, отриманого в результаті відновлювальних плавок цирконового концентрату, наведені в табл. 1, показують, що плавка із застосуванням плазмово-дугового нагрівання дозволяє отримати більш високий вміст цирконію в металі, та більш низький вміст кремнію. Вилучення цирконію у сплав для першої плавки – 76 %, для другої – 85 %.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів, отриманих в результаті відновлюваної плавки цирконового концентрату

Номер плавки	Вміст, %							
	Zr	Si	Fe	Ti	Mg	Al	Ca	C
Плавка 1	23,84	28,73	39,77	0,19	2,1	3,7	0,16	0,32
Плавка 2	38,66	16,10	26,92	0,23	4,2	4,8	0,5	0,16

Схема процесу відновлювальної плавки пірохлорового концентрату наведена на рисунку 1.

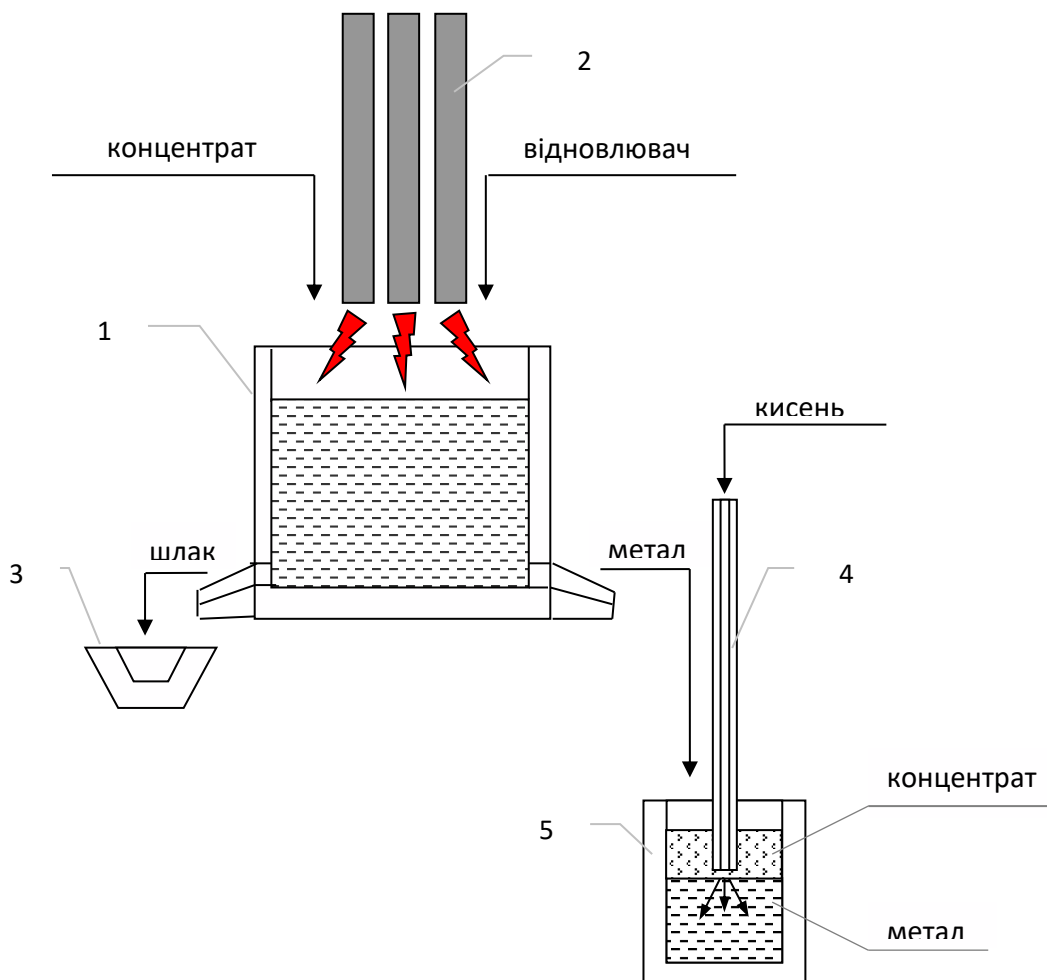


Рисунок 1. Схема процесу відновлювальної плавки пірохлорового концентрату

1 – ванна дугової електричної печі; 2 – графітові електроди; 3 – шлакова виливниця; 4 – киснева фурма; 5 – футерований ківш.

Незважаючи на високий вміст кремнезему та низький вміст рідкісних металів для безпосереднього використання феросплаву у чорній металургії, з бідних рідкіснометалічних концентратів можна отримати феросплави з достатньо високим вмістом рідкісних металів, який досягається за рахунок скорочення кількості шлаку та, очевидно, випаровування відновлених металевих алюмінію і кремнію. При відповідних умовах значну частину кремнезему можна вилучити шляхом сублимації монооксиду кремнію. Отриманий, в результаті окиснення киснем повітря SiO, дрібнодисперсний діоксид кремнію SiO₂ після уловлювання його в спеціальному циклоні та очищенні може бути ще одним

супутнім продуктом комплексної переробки руди.

Використання плазмового джерела тепла дозволяє достатньо просто переробляти дрібнодисперсну сировину, організувавши її подачу в потоці плазмовоутворюючого газу. Чим більше диспергована речовина, тим більш ефективною є переробка, адже нагрівання та випарювання більш дрібних частинок відбувається швидше, і з меншими витратами енергії.

Дрібнодисперсна сировина разом з відновлювачем (вугільний пил) подається у високотемпературну реакційну зону в потоці плазмовоутворюючого газу. Висока температура (близько 3000 °C) забезпечує швидке й найбільш повне відновлення оксидів всіх металів, що

входять до складу концентрату (Nb, Ta, Zr, Fe, Al, Si). При цьому кремній та алюміній переходять у газову фазу і виводяться із реакційної зони в спеціальну камеру-кондесатор, де охолоджуються, переходять у рідкий стан та випускаються у виливницю. Тугоплавкі рідкісні метали та залізо залишаються в рідкій фазі і накопичуються на дні реакційної камери, з якої періодично випускаються.

Даний процес моделювався за допомогою програми термодинамічних розрахунків **Oracle**. Отримані результати моделювання високотемпературних відновлюваних процесів дозволяють зробити висновки про принципову можливість їх реалізації.

Встановлено, що оптимальна глибина збагачення руд Мазурівського родовища визначається вмістом пентоксиду ніобію у чорновому пірохлоровому концентраті на рівні 7,0-7,5 % (або сумарним вмістом пентоксиду ніобію та танталу близько 8,0 %). При цьому наскрізне вилучення пентоксиду ніобію в концентрат складає 60-61 % (проти 26 % при механічних методах збагачення), вилучення танталу – 74 %. Схема доводки чорнового рідкіснометалічного концентрату при цьому спрощується – з неї будуть виключені останні стадії доводки.

Операція магнітного збагачення є дуже витратною через низьку продуктивність сепараторів, високу їх вартість та значні витрати на обслуговування.

Застосування в технології переробки чорнового концентрату відновлювальної плавки дозволяє отримати ніобієвий продукт відповідних кондицій, придатний для подальшої металургійної переробки, вже при напруженості магнітного поля 9,7-11,0 кЕ (097-1,1 Тл), та відмовитися від застосування високоградієнтних сепараторів.

При цьому прибуток від реалізації готової продукції додатково зростає на 375 дол. США на кожній тонні руди.

Проведені техніко-економічні дослідження дозволили виявити діапазони оптимальної глибини збагачення рідкіснометалічних руд Мазурівського родовища на основі критерію максимального прибутку від реалізації кінцевої товарної продукції.

Зниження глибини механічного збагачення (до вмісту пентоксиду ніобію 7-8 % в чорновому концентраті) призводить до зростання загального сумарного (наскрізного) вилучення в 2,3 рази у порівнянні із збагаченням руди механічними методами та металургійною переробкою більш багатих чорнових концентратів (з сумарним вмістом пентоксиду ніобію та танталу близько 16-19 %).

Виконані розрахунки показують, що оптимізація співвідношення механічного та пірометалургійного збагачення в комбінованих схемах переробки бідної руди є досить ефективним напрямком вдосконалення виробництва рідкісно-металічної продукції.

Але робота гірничо-переробного підприємства на основі використання критерію «оптимальної глибини збагачення» можлива лише у випадку, коли гірничо-збагачувальне виробництво знаходиться в єдиному комплексі з металургійним цехом у складі одного підприємства.

В умовах повного циклу переробки руди на гірничо-металургійному заводі можлива і необхідна оптимізація співвідношення механічного збагачення та металургійної обробки продуктів збагачення на основі критерію «максимальний прибуток від реалізації кінцевої товарної продукції».

ВИСНОВКИ

Концепція раціональної технологічної схеми переробки рідкіснометалічної руди полягає в наступному [4]:

1. попередня крупногрудкова сепарація руди крупністю –30 мм фотометричним методом для виділення ніобій- і цирконійвмісних порід – альбіту та маріуполіту, – від мікрокліну та інших порід, що на 45-50 % зменшує обсяги перероблюваної руди;

2. подрібнення руди у відцентровій дробарці ударної дії та відцентровому млині металної дії до крупності –1 мм, що дозволяє досягти більш повного розкриття пірохлору в грубих класах крупності;

3. мокра магнітна сепарація (в слабкому і високоградієнтному полях) подрібненої руди для вилучення магнетиту, та часткового вилучення егірину і біотиту, з метою створення оптимальних умов для наступного гравітаційного збагачення у відцентровому концентраторі, за яких досягається вилучення пентоксиду ніобію в чорновий концентрат 3,0-3,5 %;

4. гравітаційне збагачення у відцентрових концентраторах, що дозволяє підняти вміст пентоксиду ніобію і танталу в чорновому концентраті до 7-8 % при вилученні 77,25 %;

5. пірометалургійна переробка бідного чорнового концентрату з сумарним вмістом пентоксидів ніобію і танталу 7-8 %.

REFERENCES / СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов. – М.: Металлургия, 1991. – 432 с.
2. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. – М.: СП Интернет Инжиниринг, 1999. – 764 с.
3. Шпилевой К.Л., Костецкий Ю.В. Переработка некондиционных редкометаллических продуктов / Разработка рудных месторождений: Научно-технический сборник // Криворожский технический университет. Вып. 1(90), 2006. – С. 122-125.
4. Шпилевой Л. В., Білецький В. С., Шпилевой К. Л. Збагачення ніобієвих руд / За ред. В.С. Білецького. – К.: Видавництво ФОРМ Халіков Р.Х., 2021. – 160 с.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Актуальність проблеми. Стаття присвячена проблемі переробки бідних рідкіснометалічних руд. Описано комбінований метод переробки таких руд, який полягає у визначенні оптимальної межі між механічним збагаченням та наступною пірометалургійною переробкою чорнового концентрату, що дозволяє підвищити загальне (наскрізне) вилучення рідкісного металу

Мета статті. Підвищити техніко-економічні показники гірничо-металургійної переробки бідних ніобієвих руд.

Методи і апаратура. Літературний огляд, залучення інтернет-ресурсів, опис експериментальних досліджень.

Результати. Визначені технологічні параметри виробництва чорнового пірохлорового концентрату механічними методами збагачення, та відновлювальної плавки такого концентрату .

Наукова цінність розробки. Запропонована концепція раціональної технологічної схеми переробки рідкіснометалічної руди.

Практичне значення. Використовуючи запропонований підхід до збагачення і переробки бідної руди рідкісних металів можна суттєво поліпшити техніко-економічні показники роботи гірничо-переробного підприємства.

Стаття може бути корисна як дослідникам процесів збагачення і пірометалургійної переробки руд, так і інженерам проектних організацій, студентам та аспірантам.

Ключові слова: пірометалургійне збагачення, рідкіснометалічні руди, оптимальна глибина механічного збагачення, вилучення.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Актуальность проблемы. Статья посвящена проблеме переработки бедных редкометаллических руд. Описано комбинированный метод переработки таких руд, который состоит в определении оптимальной границы между механическим обогащением и последующей пиromеталлургической переработкой чорнового концентрата, что позволяет повысить сквозное извлечение редкого металла.

Цель статьи. Повысить технико-экономические показатели горно-металлургической переработки ниобиевых руд.

Методы и апаратура. Литературный обзор, привлечение интернет-ресурсов, описание экспериментальных исследований.

Результаты. Определены технологические параметры производства чорнового пирохлорового концентрата механическими методами обогащения, и восстановительной плавки такого концентрата.

Научная ценность разработки. Предложена концепция рациональной технологической схемы переработки редкометаллической руды.

Практическое значение. Используя предложенный подход к обогащению и переработке бедной руды редких металлов можно существенно улучшить технико-экономические показатели работы горно-перерабатывающего предприятия. Статья может быть полезна как исследователям процессов обогащения и пиromеталлургической переработки руд, так и инженерам проектных организаций, студентам и аспирантам.

Ключевые слова: пиromеталлургическое обогащение, редкометаллические руды, оптимальная глубина механического обогащения, извлечение.

ABOUT AUTORS

Шпильовий Л.В. кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, E-mail: mineraltech.azov@gmail.com

Шпильовий К.Л. інженер, ТОВ «Азов-Мінералтехніка», Донське, Донецька область, Україна, E-mail: mineraltech.azov@gmail.com