

УДК 669.15'74

О.Л. Беспалов, К.Д. Соколов, С.В. Приходько, О.В. Замковой,  
Д.А. Шевченко, С.А. Мельник, Н.Н. Новиков, Д.С. Овчарук, В.В. Солоха

## ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОНИКЕЛЯ ИЗ РУД РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Анотація.** У роботі наведені результати порівняльного аналізу показників виробництва феронікелю в умовах Побузького феронікелевого комбінату з використанням нікель сировини вітчизняного (Капітанівського) і зарубіжних (Нова Каледонія, Індонезія, Гватемала) родовищ. Впровадження в виробництво інноваційно-інвестиційних заходів: попередня сушка руди; отримання недогарка в трубчастих обертових печах з використанням пиловугільного палива (ПВП); реконструкція печі № 1, яка дозволила підвищити її фактичну потужність до 42 МВт; освоєння технології виплавки чорного феронікелю в цій печі з недоликом відновлення і ін. забезпечили можливість значно знизити собівартість продукції і підвищити ефективність виробництва. Методом рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) досліджено розподіл домішкових елементів в пробах чорного феронікелю традиційної і освоюваної технологій. Показано, що сірка знаходиться в вигляді сульфїду марганцю (MnS), а її зміст в 2 рази вище, ніж в звичайному сплаві.

**Ключові слова:** нікелеву сировину, рудотермічних піч, сірка, рафінування, плав соди, РСМА, сульфїди.

**Аннотация.** В работе приведены результаты сравнительного анализа показателей производства ферроникеля в условиях Побужского ферроникелевого комбината с использованием никельсодержащего сырья отечественного (Капитановского) и зарубежных (Новая Каледония, Индонезия, Гватемала) месторождений. Внедрение в производство инновационно-инвестиционных мероприятий: предварительная сушка руды; получение огарка в трубчатых вращающихся печах с использованием пылеугольного топлива (ПУТ); реконструкция печи № 1, позволившая повысить ее фактическую мощность до 42 МВт; освоение технологии выплавки черного ферроникеля в этой печи с недостатком восстановителя и др. обеспечили возможность значительно снизить себестоимость продукции и повысить эффективность производства. Методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) исследовано распределение примесных элементов в пробах черного ферроникеля традиционной и осваиваемой технологий. Показано, что сера находится в виде сульфидов марганца (MnS), а ее содержание в 2 раза выше, чем в обычном сплаве.

**Ключевые слова:** никелевое сырье, рудотермическая печь, сера, рафинирование, плав соды, РСМА, сульфиды.

**Annotation.** The results of the comparative analysis of ferronickel production indicators in terms Pobuzhsky ferro-nickel plant using domestic raw materials (Kapitanovskogo) and abroad (New Caledonia, Indonesia, Guatemala) deposits. Introduction of innovation and investment activities: pre-drying of ore; getting cinder in tubular rotary kilns using coal injection (PCI); reconstruction of furnace number 1, it will improve the actual power up to 42 MW; development of ferronickel smelting roughing technology in this furnace to a lack of a reducing agent, and others. have provided an opportunity to significantly reduce production costs and improve production efficiency. The method of X-ray microanalysis (EPMA) studied the distribution of trace elements in the samples of crude ferronickel and mastered traditional techniques. It is shown that the sulfur is present as manganese sulphide (MnS), and its content is 2 times higher than in the conventional alloy.

**Keywords:** nickel raw materials, ore-thermal furnace, sulfur, refining, melting soda, EPMA, sulfides.

Производство ферроникеля электротермическим способом из окисленных никельсодержащих руд является наиболее распространенным и, при всей сложности и энергоемкости, одновременно самым эффективным технологическим процессом [1, 2]. Под современной технологией выплавки ферроникеля понимается комплекс технических приемов и средств их реализации, обеспечивающий выплавку сплава заданного состава, эффективное управление процессами при рациональном использовании сырья и максимальной утилизации техногенных отходов. Такая технология должна обеспечивать стабильную работу, долгосрочную эксплуатацию, надежность работы оборудования и футеровки электропечей при максимальной эффективности производства для данных условий и экологических ограничений.

Повышение требований к качеству сплава, ужесточение экономических и экологических требований диктуют необходимость дальнейшего повышения эффективности технологического процесса плавки.

Побужский ферроникелевый комбинат введен в эксплуатацию в декабре 1972 года. В 2000 году преобразован в ООО «Побужский ферроникелевый комбинат» (ООО «ПФК») – единственное в постсоветском пространстве горно-металлургическое предприятие с технологией прямой переработки (без обогащения и окускования) до 1,5 млн. тонн окисленной никелевой руды в год и получения до 100–120 тыс. тонн ферроникеля (сплава железа с никелем).

После длительной аварийной обстановки при восстановлении деятельности комбината в 2003 году были поставлены задачи модернизации, реконструкции производства, автоматизации производственных процессов, строительства новых участков с использованием передового опыта электротермистов отечественных и зарубежных предприятий, лучших разработок украинских и зарубежных научно-исследовательских организаций и институтов. Конечная цель – создание полностью безотходного, экологически чистого производства ферроникеля с минимальным расходом энергетических и технологических ресурсов на единицу производимой продукции и полной утилизацией вторичных материалов.

Действующая в настоящее время на ООО «ПФК» технологическая схема производства ферроникеля (рис. 1) претерпела значительные изменения и усовершенствования.

На комбинате внедрена технология предварительной сушки никельсодержащей руды, которая поступает от поставщика с влажностью более 35 % и снижается в процессе сушки до 20 %.

За период освоения технологии производства ферроникеля на ПФК с использованием никельсодержащей руды различных месторождений большое внимание уделялось поискам альтернативных энергоносителей при получении огарка в трубчатых вращающихся печах (ТВП) диаметром



расширить возможность его утилизации и наметить пути извлечения микрокоролек чернового ферроникеля высокоинтенсивным магнитным полем.

Кислые электропечные шлаки производства чернового ферроникеля  $\left( B = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} = 0,65 \right)$  оказывают агрессивное воздействие на футеровку, особенно в зоне шлакового пояса и на границе перехода шлак – металл.

Многочисленные исследования и разработки как отечественных, так и зарубежных специалистов [5, 6, 7], направленные на повышение стойкости футеровки, продление срока ее службы и увеличение периода межкапитального ремонта, пока не привели к существенным результатам и не приблизились к показателям, достигнутым электротермистами при производстве марганцевых ферросплавов в аналогичных электропечах типа РПЗ-63, которые повысили срок службы печей до 20–25 лет [8].

В сентябре 2011 года на комбинате для производства чернового ферроникеля канадской фирмой Hatch была введена в эксплуатацию печь РТП-1, конструкция которой обеспечивает возможность работы на демпфирующей футеровке [5]. Эксплуатация печи в течение длительного периода покажет перспективность ее использования при многошлаковых процессах производства ферроникеля.

В современных условиях рецессии и снижения объема производства металлопродукции усилия ученых и металлургов направлены на повышение качества продукции, снижение энергетических, материальных затрат и себестоимости продукции, внедрению природоохранных мероприятий, обеспечивающих полную утилизацию вторичных ресурсов и охрану среды обитания.

Колошниковые газы рудотермических печей полностью используются в качестве частичной замены энергетических углей, используемых как пылеугольное топливо при получении огарка, сухая пыль газоочисток, содержащая Ni – 2,8 %; Fe – 23,5 %; SiO<sub>2</sub> – 34,3 %; CaO – 2,4 %; MgO – 15,6 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,4 %, применяется для снижения влажности исходной никельсодержащей руды перед подачей ее на сушильные барабаны.

Высокомагнезиальные электропечные шлаки используются для рекультивации отработанных карьеров, производства строительного щебня, абразивных материалов, оптимизации шлакового режима при производстве марганцевых сплавов и в других направлениях.

Высокоосновные рафинировочные шлаки (B = 2,2–2,4), содержащие свыше 40 % железа, находят применение при выплавке чугуна в доменной печи и производстве офлюсованных материалов.

Побужский ферроникелевый комбинат изначально ориентировался на переработку отечественных окисленных никелевых руд Капитановского месторождения. Поскольку местное месторождение бедной окисленной

никелевой руды в настоящее время практически выработано, комбинат перешел на импортную руду. Вначале поставлялась руда из Новой Каледонии, затем – из Индонезии. В связи с тем, что Индонезия с 2013 года прекратила экспорт руды, ПФК перешел на гватемальскую руду. Химический состав руд различных месторождений приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав руд различных месторождений

Наименование месторождения	Химический состав, % по массе						
	Ni	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Новая Каледония (2006 г.)	2,22	14,89	38,77	1,11	20,60	1,66	1,74
Индонезия 2006–2012 г.г.)	2,08	12,62	42,95	1,05	21,45	1,18	1,91
Гватемала (2013–2016 г.г.)	1,88	15,66	34,8	1,23	22,0	0,98	2,7

На ПФК работают две руднотермические электропечи установленной мощностью трансформаторов 48 МВ·А (табл. 2).

Таблица 2

Удельный расход электроэнергии на сырье различных месторождений

Наименование месторождений	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т огарка
Новая Каледония	650
Индонезия	620
Гватемала (старая технология)	600
Гватемала (технология низкого восстановления металлов РТП-1)	580

Электроплавку осуществляли и осуществляют, используя огарок с температурой 700–800 °С – при работе на отечественном сырье следующего состава, %: 0,7–0,9 Ni; 0,03–0,05 Co; 15–18 Fe; 36–45 SiO<sub>2</sub>; 16–20 CaO; 4–6 MgO; на сырье Гватемалы состава, %: 2,10–2,15 Ni; 0,05–0,06 Co; 18,5–19,7 Fe; 35,0–37,5 SiO<sub>2</sub>; 23,0–25,0 MgO; CaO. Восстановление огарка идет за счет углерода антрацита марки АС или антрацитового штыба марки АШ.

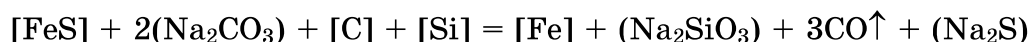
Черновой ферроникель с 10–14 % Ni имеет высокое содержанием серы, поступающей из углеродистого восстановителя и из руды, подвергается рафинированию, а затем разливается на разливочной машине или гранулируется.

Процесс рафинирования черного ферроникеля выполняется в три стадии:

1. Внепечная десульфурация жидкого черного ферроникеля.
2. Рафинирование от примесей углерода, кремния и хрома в вертикальных конвертерах с «кислой» футеровкой и верхней продувкой кислородом.

3. Рафинирование от серы, фосфора и доводка металла по химсоставу и температуре в вертикальном конвертере с «основной» футеровкой и верхней продувкой кислородом.

Внепечная десульфурация черного ферроникеля производится кальцинированной содой, плавом соды или их смесью в ковше для металла непосредственно при выпуске черного ферроникеля из РТП. Процесс десульфурации кальцинированной содой основан на образовании устойчивого сульфида натрия, концентрирующегося в шлаке:



После припечной десульфурации металл с содовым шлаком переливают в ковш с плавом соды. Образующийся после повторной обработки содовый шлак скачивается с поверхности металла деревянными скребками в чашу с «содовым» шлаком, а рафинированный от серы металл заливается в «кислый» конвертер.

Рафинирование ферроникеля в кислом конвертере (после ковшевой десульфурации) предусматривает снижение содержания кремния, хрома и частично углерода. При этом для шихтовки используется никельсодержащий лом, твердый ферроникель, оборотный скрап, крупная магнитная фракция после магнитной сепарации шлака, лом черных металлов.

Из-за повышенной эрозии дианасовой футеровки в кислом конвертере окисляется только часть кремния и углерода, а остальное количество этих примесей удаляется при кислородном конвертировании в основном конвертере.

Химический состав черного ферроникеля, в зависимости от качества никельсодержащего сырья различных месторождений, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав черного ферроникеля различных месторождений

Наименование месторождения	Химический состав, % масс.						
	Ni	Si	Cr	C	S	P	Fe
Новая Каледония	16,89	1,93	1,29	2,84	0,3	0,02	остальное
Индонезия	18,51	4,02	1,53	2,55	0,26	0,0313	остальное
Гватемала (старая технология)	13,41	3,41	2,11	2,79	0,17	0,053	остальное
Гватемала (технология низкого восстановления металлов РТП-1)	43,0	0,01	0,04	0,03	0,48	0,064	остальное

В настоящее время на Побужском ферроникелевом комбинате на РТП-1 освоена технология производства черного ферроникеля с недостатком восстановителя (или технология низкого восстановления

железа). При этом содержание никеля в черновом ферроникеле превысило 40 %, а содержание кремния и углерода уменьшилось  $\approx$  до 0,01 %, что исключает возможность проводить процесс ковшевой десульфурации содой. При этом в два раза повысилось содержание серы, что составило около 0,5 %, а также значительно вырос расход электродной массы (в 5–8 раз).

В данный момент для повышения эффективности процесса десульфурации было принято решение смешивать электропечной ферроникель, выплавляемый по старой технологии на РТП-2, с электропечным ферроникелем, выплавляемым с недостатком восстановителя на РТП-1. Это дало возможность несколько улучшить процесс десульфурации, но проблему с высоким содержанием серы не решает. В табл. 4 приведен химический состав черного ферроникеля на РТП-1 и РТП-2, произведенного по разным технологическим схемам.

Таблица 4

Химический состав черного ферроникеля

Печь	Содержание элементов, % масс.							
	Ni	Co	Si	Cr	S	C	P	Cu
РТП-1	43,0	0,42	0,01	0,02	0,5	0,014	0,065	0,063
РТП-2	14,5	0,27	3,90	1,8	0,25	2,5	0,064	0,032

Для изучения поведения серы в процессе производства черного ферроникеля были отобраны пробы сплава и проведены исследования на установке РСМА (рентгеноспектральный микроанализатор). Результаты исследований приведены на рис. 2 и 3, из которых видно, что основное количество серы расположено на границах зерен и представлены соединениями MnS и NiS.

Структурный и фазовый анализ металла исследовали с использованием метода рентгеноспектрального микроанализа и растровой электронной микроскопии.

Исследования черного ферроникеля, выполненные по указанной методике, показали, что черновой ферроникель состоит из фаз различной отражательной способности: темной и светлой.

Запись спектров характеристического рентгеновского излучения показала, что все они имеют разный состав. Темная фаза содержит окислы железа и, частично, серы. Светлая фаза, в основном, состоит из железа и никеля.

Проведенные исследования позволили впервые применительно к условиям ПФК изучить фазовый состав и структуру черного ферроникеля, выплавляемого по разным технологиям, и подтвердить характер распределения в нем серы.



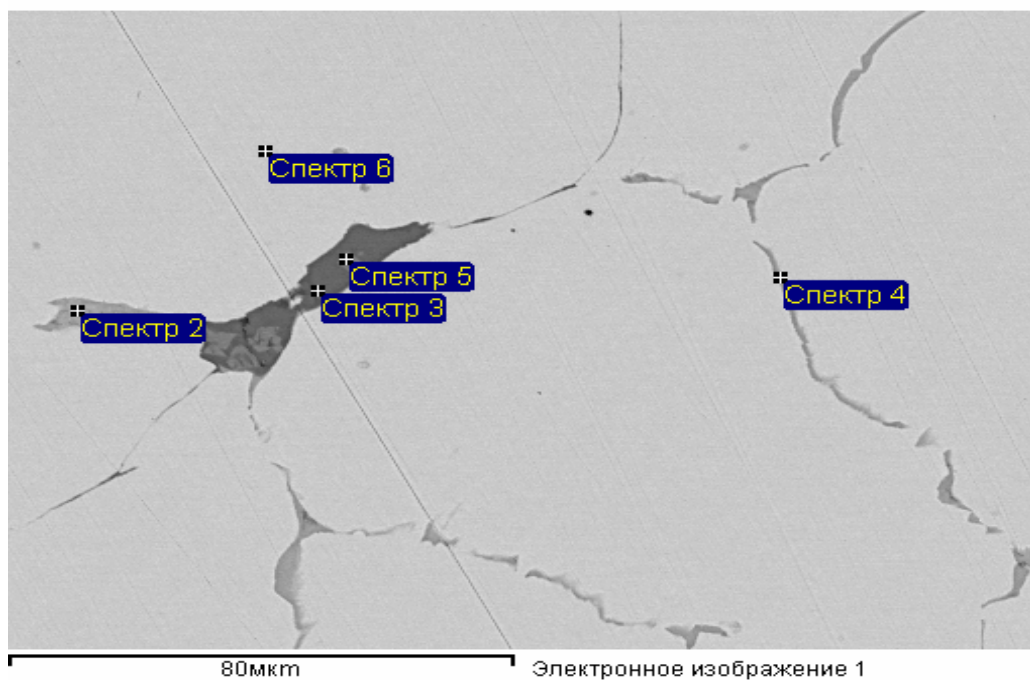


Рисунок 2 – Образец № 1, РТП-1 (Ni – 43,0; Si – 0,01; Cr – 0,2; S – 0,5; C – 0,14; P – 0,065; Cu – 0,063)

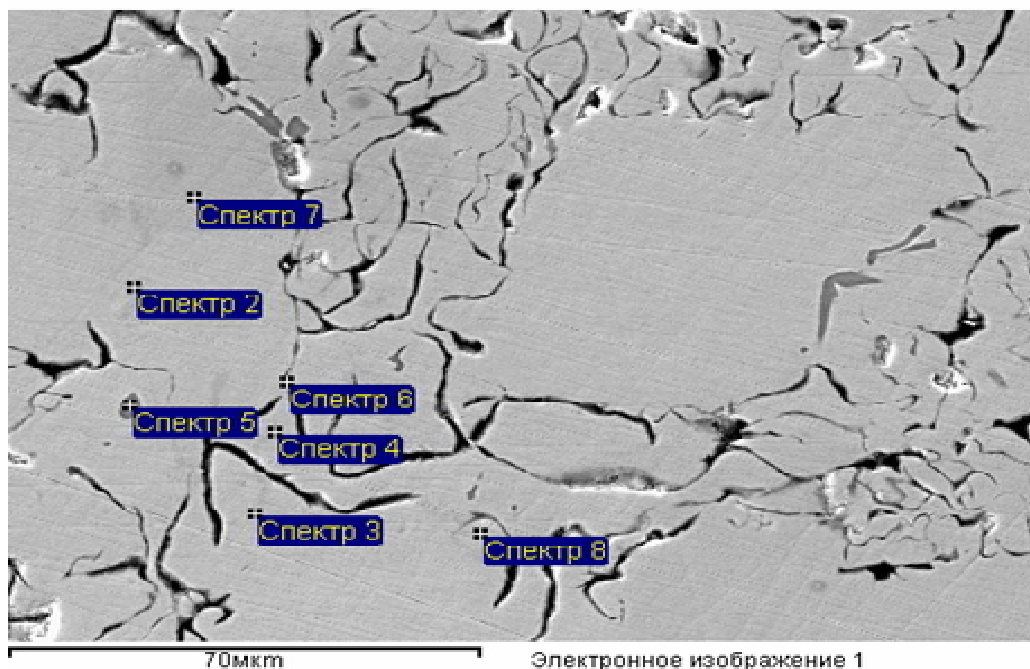


Рисунок 3 – Образец № 2, РТП-2 (Ni – 14,5; Co – 0,27; Si – 3,9; Cr – 1,8; S – 0,25; C – 2,5; P – 0,064; Cu – 0,032)

### ВЫВОДЫ

Результаты выполненных исследований показали, что использование никельсодержащего сырья зарубежных месторождений, содержащего концентрацию никеля в 1,5–2,5 раза выше, чем в отечественном, позволило значительно улучшить технико-экономические показатели и уменьшить энергетические затраты на 90–120 кВт·ч в сравнении с отечественной рудой.



Внедрение в производство чернового ферроникеля предварительной сушки руды, получение огарка в трубчатых печах с использованием пылеугольного топлива (ПУТ), реконструкция печи № 1, позволившая повысить ее фактическую мощность до 42 МВт, освоение в ней технологии выплавки сплава с недостатком восстановителя, позволившей получать ферроникель, содержащий более 40 % Ni, утилизация вторичных никельсодержащих материалов дало возможность значительно снизить себестоимость продукции. Это позволило комбинату занять 5-е место в рейтинге ТОП-10 экспортеров металлургической продукции [9].

Работа печи с недостатком восстановителя приводит к повышению содержания серы до 0,5 % и снижению содержания кремния и углерода в ферроникеле, что затрудняет проведение припечной десульфурации кальцинированной содой или плавом соды.

Исследовано распределение серы и других элементов в образцах чернового ферроникеля методом РСМА. Показано, что основное количество серы находится в соединении с марганцем, образуя сульфид MnS.

В дальнейшем предусматриваются исследования поведения серы и других примесных элементов на всей технологической цепочке производства. Намечен путь совершенствования технологической схемы рафинирования чернового ферроникеля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов: Учебник для вузов / Гасик М.И., Лякишев Н.П. – Днепропетровск: ГНПП «Системные технологии», 2005 – 448 с.
2. Грань Н.И., Оницин Б.П. и Майзель Е.И. Изд-во «Металлургия», 1971. – С. 248.
3. Способ выплавки чернового ферроникеля с оптимальным содержанием кремния. Патент № 62847 от 12.09.2011г. Бюл. № 17, авт. Гасик М.И., Новиков Н.В., Соколов К.Д. и др.
4. Восстановительная смесь для электротермического производства ферроникеля. Патент Украины № 109001 от 10.08.2016г. Бюл. № 15, авт. Беспалов О.Л., Приходько С.В., Данов О.В. и др.
5. Совместная реконструкция печи № 1 на Побужском ферроникелевом комбинате. М.Джастребески, Т.Кохпер, К.Воллас, Н.В.Новиков и др.
6. Исследование работы футеровки рудотермических печей при выплавке ферроникеля / Соколов К.Д., Капран И.И., Лихачев В.Ф. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 6. – С. 32–35.
7. Анализ условий и причин износа огнеупоров при выплавке ферроникеля / К.Д.Соколов, А.Н.Овчарук, Н.В.Новиков, И.И.Капран // Сучасні проблеми металургії. – 2003. – С. 198.
8. Рудовосстановительные электропечи повышенной мощности – новый этап в развитии электротермии на стыке двух тысячелетий / Сучасні проблеми металургії. Том 19, выпуск 1 (2016). Наукові вісті. – Дніпро: НМетАУ, 2016. – с. 254–260.
9. Бизнес № 51–52 (1194–1195), 21 декабря 2015г., с. 22.