

ISSN 2518-170X (Online),
ISSN 2224-5278 (Print)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ГЕОЛОГИЯ ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
СЕРИЯСЫ



СЕРИЯ
ГЕОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



SERIES
OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

5 (425)

ҚЫРҚҮЙЕК – ҚАЗАН 2017 ж.
СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ 2017 г.
SEPTEMBER – OCTOBER 2017

ЖУРНАЛ 1940 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1940 г.
THE JOURNAL WAS FOUNDED IN 1940.

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р ы

э. ғ. д., профессор, ҚР ҰҒА академигі

И.К. Бейсембетов

Бас редакторының орынбасары

Жолтаев Г.Ж. проф., геол.-мин. ғ. докторы

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

Абаканов Т.Д. проф. (Қазақстан)
Абишева З.С. проф., академик (Қазақстан)
Агабеков В.Е. академик (Беларусь)
Алиев Т. проф., академик (Әзірбайжан)
Бакиров А.Б. проф., (Қырғыстан)
Беспаев Х.А. проф. (Қазақстан)
Бишимбаев В.К. проф., академик (Қазақстан)
Буктуков Н.С. проф., академик (Қазақстан)
Булат А.Ф. проф., академик (Украина)
Ганиев И.Н. проф., академик (Тәжікстан)
Грэвис Р.М. проф. (АҚШ)
Ерғалиев Г.К. проф., академик (Қазақстан)
Жуков Н.М. проф. (Қазақстан)
Кенжалиев Б.К. проф. (Қазақстан)
Қожахметов С.М. проф., академик (Қазақстан)
Конторович А.Э. проф., академик (Ресей)
Курскеев А.К. проф., академик (Қазақстан)
Курчавов А.М. проф., (Ресей)
Медеу А.Р. проф., академик (Қазақстан)
Мұхамеджанов М.А. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Нигматова С.А. проф. (Қазақстан)
Оздоев С.М. проф., академик (Қазақстан)
Постолатий В. проф., академик (Молдова)
Ракишев Б.Р. проф., академик (Қазақстан)
Сейтов Н.С. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Сейтмуратова Э.Ю. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Степанец В.Г. проф., (Германия)
Хамфери Дж.Д. проф. (АҚШ)
Штейнер М. проф. (Германия)

«ҚР ҰҒА Хабарлары. Геология мен техникалық ғылымдар сериясы».

ISSN 2518-170X (Online),

ISSN 2224-5278 (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ (Алматы қ.).

Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрағат комитетінде 30.04.2010 ж. берілген №10892-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік.

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 300 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
<http://nauka-nanrk.kz/geology-technical.kz>

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2017

Редакцияның Қазақстан, 050010, Алматы қ., Қабанбай батыра көш., 69а.

мекенжайы: Қ. И. Сәтбаев атындағы геология ғылымдар институты, 334 бөлме. Тел.: 291-59-38.

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Г л а в н ы й р е д а к т о р
д. э. н., профессор, академик НАН РК

И. К. Бейсембетов

Заместитель главного редактора

Жолтаев Г.Ж. проф., доктор геол.-мин. наук

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

Абаканов Т.Д. проф. (Казахстан)
Абишева З.С. проф., академик (Казахстан)
Агабеков В.Е. академик (Беларусь)
Алиев Т. проф., академик (Азербайджан)
Бакиров А.Б. проф., (Кыргызстан)
Беспаяев Х.А. проф. (Казахстан)
Бишимбаев В.К. проф., академик (Казахстан)
Буктуков Н.С. проф., академик (Казахстан)
Булат А.Ф. проф., академик (Украина)
Ганиев И.Н. проф., академик (Таджикистан)
Грэвис Р.М. проф. (США)
Ергалиев Г.К. проф., академик (Казахстан)
Жуков Н.М. проф. (Казахстан)
Кенжалиев Б.К. проф. (Казахстан)
Кожамметов С.М. проф., академик (Казахстан)
Конторович А.Э. проф., академик (Россия)
Курскеев А.К. проф., академик (Казахстан)
Курчавов А.М. проф., (Россия)
Медеу А.Р. проф., академик (Казахстан)
Мухамеджанов М.А. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Нигматова С.А. проф. (Казахстан)
Оздоев С.М. проф., академик (Казахстан)
Постолатий В. проф., академик (Молдова)
Ракишев Б.Р. проф., академик (Казахстан)
Сейтов Н.С. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Сейтмуратова Э.Ю. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Степанец В.Г. проф., (Германия)
Хамфери Дж.Д. проф. (США)
Штейнер М. проф. (Германия)

«Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук».

ISSN 2518-170X (Online),

ISSN 2224-5278 (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №10892-Ж, выданное 30.04.2010 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 300 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
<http://nauka-nanrk.kz/geology-technical.kz>

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2017

Адрес редакции: Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69а.

Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева, комната 334. Тел.: 291-59-38.

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

E d i t o r i n c h i e f

doctor of Economics, professor, academician of NAS RK

I. K. Beisembetov

Deputy editor in chief

Zholtayev G.Zh. prof., dr. geol-min. sc.

E d i t o r i a l b o a r d:

Abakanov T.D. prof. (Kazakhstan)
Abisheva Z.S. prof., academician (Kazakhstan)
Agabekov V.Ye. academician (Belarus)
Aliyev T. prof., academician (Azerbaijan)
Bakirov A.B. prof., (Kyrgyzstan)
Bespayev Kh.A. prof. (Kazakhstan)
Bishimbayev V.K. prof., academician (Kazakhstan)
Buktukov N.S. prof., academician (Kazakhstan)
Bulat A.F. prof., academician (Ukraine)
Ganiyev I.N. prof., academician (Tadjikistan)
Gravis R.M. prof. (USA)
Yergaliev G.K. prof., academician (Kazakhstan)
Zhukov N.M. prof. (Kazakhstan)
Kenzhaliyev B.K. prof. (Kazakhstan)
Kozhakhmetov S.M. prof., academician (Kazakhstan)
Kontorovich A.Ye. prof., academician (Russia)
Kurskeyev A.K. prof., academician (Kazakhstan)
Kurchavov A.M. prof., (Russia)
Medeu A.R. prof., academician (Kazakhstan)
Muhamedzhanov M.A. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Nigmatova S.A. prof. (Kazakhstan)
Ozdoev S.M. prof., academician (Kazakhstan)
Postolatii V. prof., academician (Moldova)
Rakishev B.R. prof., academician (Kazakhstan)
Seitov N.S. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Seitmuratova Ye.U. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Stepanets V.G. prof., (Germany)
Humphery G.D. prof. (USA)
Steiner M. prof. (Germany)

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences.

ISSN 2518-170X (Online),

ISSN 2224-5278 (Print)

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 10892-Ж, issued 30.04.2010

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
<http://nauka-nanrk.kz/geology-technical.kz>

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2017

Editorial address: Institute of Geological Sciences named after K.I. Satpayev
69a, Kabanbai batyr str., of. 334, Almaty, 050010, Kazakhstan, tel.: 291-59-38.

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 5, Number 425 (2017), 132 – 140

**V. M. Shevko¹, B. D. Aytkulov², D. K. Aytkulov³,
G. E. Karataeva¹, D. D. Amanov¹, A. D. Badikova¹**

¹South-Kazakhstan state university named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan,

²Mining and ore company JSC «Ai Karaaul», Almaty, Kazakhstan,

³I. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: shevkovm@mail.ru, b.aitkulov@ai-karaaul.kz, dos.ait.58@mail.ru, karataevage@mail.ru,
loken666@mail.ru, sunstroke_91@mail.ru

RECOVERY OF FERRONICKEL FROM THE ORE OF THE BELOGORSK DEPOSIT

Abstract. The article presents the results of an investigation of the production of ferronickel from oxide ore at the Belogorsk deposit (0,29-1,72% Ni, 0,05-0,09% Co, 4,07-22,1% Fe, 0,38-0,55% Cr, до 0,67% Mn, 17,78-17,97% Si, 12,86-24,58% Mg, 0,48-0,78% Al, 49,93-51,9% O). A complete thermodynamic analysis of the performed by the complex HSC-5.1 revealed that an increase in the amount of carbon from 2 to 6% at 1400 ° C increases the degree of formation of elemental Ni up to 99.6%, Co-96.3%, while the Ni concentration in the ferroalloy decreases from 84, 4 to 7.4%, Co from 1.01 to 0.48%, and Fe increases from 14.6 to 62.4%. From the ore of the Belogorsk deposit at 1400 ° C in the presence of 3.5-6% carbon, ferronickel is formed, which, according to the content of Σ_{Ni} and Co, is 25-7.8% corresponding to the alloy FN-2, FN-3, FN-4; while 95-99,6%, and 75,3-97,06% of cobalt are extracted into the alloy. It has been experimentally established that during electric smelting of the ore Belogorsk deposit in a mixture with coke, ferronickel of grades from FN-4 to FN-1 (8-27.6% Ni) is formed.

Key words: oxide nickel ore, thermodynamic modeling, recovery, carbon, cobalt, iron, recovery, concentration, electric smelting, ferronickel.

УДК 546.74(574)

**В. М. Шевко¹, Б. Д. Айткулов², Д. К. Айткулов³,
Г. Е. Каратаева¹, Д. Д. Аманов¹, А. Д. Бадикова¹**

ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРОНИКЕЛЯ ИЗ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕЛОГОРСКОЕ

¹Южно-Казхастанский государственный университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,

²Горно-рудная компания АО «Ай Карааул», Алматы, Казахстан,

³Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Аннотация. Приводятся результаты исследования получения ферроникеля из оксидной руды месторождения Белогорское (0,29-1,72% Ni, 0,05-0,09% Co, 4,07-22,1% Fe, 0,38-0,55% Cr, до 0,67% Mn, 17,78-17,97% Si, 12,86-24,58% Mg, 0,48-0,78% Al, 49,93-51,9% O). Полным термодинамическим анализом выпол-

ненным комплексом HSC-5.1 найдено, что увеличение количества углерода от 2 до 6% при 1400 °С повышает степень образования элементного Ni до 99,6%, Co - 96,3%, при этом концентрация Ni в ферросплаве снижается от 84,4 до 7,4%, Co от 1,01 до 0,48%, а Fe возрастает от 14,6 до 62,4%. Из руды при 1400 °С в присутствии 3,5-6% углерода образуется ферроникель, который по содержанию ΣNi и Co 25-7,8% соответствует сплаву марок ФН-2, ФН-3, ФН-4; при этом в сплав извлекается 95-99,6% никеля, и 75,3-97,06% кобальта. Экспериментально установлено, что при электроплавке руды Белогорского месторождения в смеси с коксом формируется ферроникель марок от ФН-4 до ФН-1 (8-27,6% Ni).

Ключевые слова: оксидная никелевая руда, термодинамическое моделирование, восстановление, углерод, кобальт, железо, извлечение, концентрация, электроплавка, ферроникель.

Введение. В настоящее время 35% мировой никелевой продукции производится из оксидных руд [1]. Имея в виду, что 86% разведанных запасов Ni сосредоточено в оксидных рудах [2], в перспективе эти руды станут основным источником получения никеля. Это в частности относится к Казахстану, в недрах которого в 80 месторождениях [3] находится в оксидных формах до 3,2 млн. т никеля [4-6].

Несмотря на то, что гидрометаллургические методы переработки оксидных Ni-Co руд позволяют извлечь из руды не менее 90% Ni и Co и характеризуются, в сравнении с пирометаллургией, меньшими (на 30-50%) энергозатратами, эти методы имеют большую продолжительность и ориентированы на извлечение только основных металлов (Ni-Co). Поэтому они характеризуются низкой степенью комплексного использования сырья [6-11], а рекомендации по использованию кека после выщелачивания в производстве строительных материалов [8]- нерациональны в виду содержания в кеке 0,2% Ni. О перспективности пирометаллургической переработки оксидных никелевых руд можно судить по намерению промышленного получения ферроникеля из оксидной руды, по технологии разработанной учеными ИМиО (РК) и МиМиС (РФ) [12, 13]. Пирометаллургия позволяет увеличить степень комплексного использования сырья в связи с возможностью получения чугуна из шлаков производства ферроникеля, стального полупродукта [14], ферроникеля и литейного чугуна [15].

В статье приводятся результаты исследований образования ферроникеля разных марок из Белогорской руды. Силикатная кобальт-никелевая руда Белогорского месторождения является перспективным сырьевым источником в связи со значительными запасами никеля в Белогорской и Горностаевской группе месторождений [16].

Методика проведения исследований. Исходные реагенты. Исследования проводили методом термодинамического моделирования с использованием программного комплекса HSC-5.1, разработанного финской металлургической компанией Outokumpu [17]. Разработчики программного комплекса HSC-5.1 Chemistry (Outokumpu) основывались на идеологии консорциума SGTE (Scientific Group Thermodata Europe), которая занимается созданием, поддержкой и распространением высококачественных баз данных, предназначенных для расчета равновесного состава химически реагирующих систем. В состав SGTE входят специализированные научные центры Германии, Канады, Франции, Швеции, Великобритании и США. В нашей работе для расчета энергии Гиббса использовали подпрограмму ReactionEquations, а для полного термодинамического анализа подпрограмму Equilibrium Compositions комплекса HSC-5.1. Расчет равновесия в комплексе HSC-5.1 производится на основе принципа минимума энергии Гиббса исходя из выражения:

$$G(x) = \sum_{a=1}^f * \sum_{j=1}^{ia} X_j(C_j + \ln \left(\frac{X_j}{X_a} \right) + \ln \gamma_j) \rightarrow G(x) \min, \quad (1)$$

при ограничениях в виде системы линейных уравнений баланса массы вещества:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} X_j = b_i, \quad (2)$$

и условия нормировки:

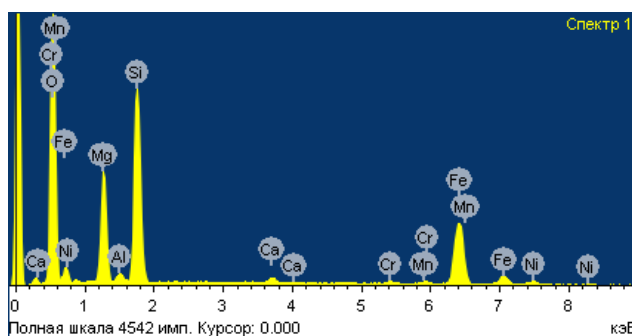
$$\sum_{j=1}^{La} X_j = X_a, \quad (3)$$

где f – общее число фаз системы; B_i – общее число независимого компонента i в системе; j_a – масса чисел, по независимых компонентов в фазе a системы; n – число независимых компонентов системы; C_j – эмпирическая термодинамическая функция; X_a – общее число молей фазы a в системе;

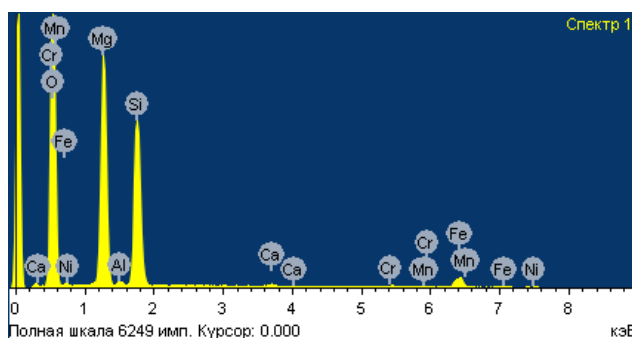
$\frac{X_j}{X_a}$ – мольная доля зависящего j компонента в фазе a ; Y_j – коэффициент активности j компонента.

Параметры равновесия термодинамической системы определяются решением математической задачи о нахождении экстремума с учетом всех ограничений с использованием функций Лагранжа и метода последовательных приближений Ньютона. В отличие от программного комплекса «Астра» используемый нами комплекс HSC-5.1 обладает базой данных примерно в 3 раза больше, чем база данных комплекса «Астара» [18, 19].

Электроплавку шихты, содержащую никелевую руду проводили в одноэлектродной дуговой печи. Перед проведением плавки в печь устанавливали графитовый тигель ($d=6$ см, $h=15$ см) и проводили разогрев его дугой в течение 20–25 мин. Затем в печь загружали первую порцию шихты (200 г). Проплавляли ее в течение 5–6 мин, после чего в печь загружали оставшуюся часть шихты (200 г) и проплавляли ее в течение 25–30 мин. В период плавки сила тока составляла 250–300 А, напряжение 45–50 В. После электроплавки печь охлаждалась в течение 6 часов. Графитовый тигель извлекали из печи и разбивали. Шлак и ферросплав взвешивали и анализировали на растровом электронном микроскопе марки JSM-6490LM (Япония). Белогорская руда содержит 0,29-1,72% Ni, 0,05-0,09% Co, 4,07-22,1% Fe, 0,38-0,55% Cr, до 0,67% Mn, 17,78-17,97% Si, 12,86-24,58% Mg, 0,48-0,78% Al, 49,93-51,9% O (рисунок 1). Никель в руде (на 95,19%) представлен



Проба 1 (богатая)



Проба 2 (бедная)

Элемент	Содержание, %	
	проба 1	проба 2
O	42,93	51,90
Mg	12,86	24,58
Al	0,78	0,48
Si	17,78	17,97
Ca	0,61	0,33
Cr	0,55	0,38
Mn	0,67	0,00
Fe	22,10	4,07
Ni	1,72	0,29

Рисунок 1 – Электронная микроскопия проб Белогорской руды

Figure 1 – Electron microscopy of the samples of the Belogorsk ore

силикатами сложного состава. При термодинамическом моделировании с учетом предварительной сушки руда имела следующий состав: 2,24% $2\text{NiO}\cdot\text{SiO}_2$, 0,15% $2\text{CoO}\cdot\text{SiO}_2$, 1,88% CaO , 2,23% Al_2O_3 , 0,84% MnO , 0,52% Cr_2O_3 , 13,14% MgO , 35,86% Fe_2O_3 , 43,14% SiO_2 .

Определялось влияние температуры, количества углерода (Уг, % от массы руды) на равновесную степень распределения элементов (α , %) и концентрацию металлов (С, %) в сплаве в системе Белогорская руда-углерод при давлении 1 бар.

Результаты исследований. Термодинамическим моделированием установлено, что в зависимости от температуры в системе руда – углерод присутствует 21 вещество: Fe_2O_3 , FeO , Fe , $2\text{NiO}\cdot\text{SiO}_2$, Ni , $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, Co , NiO , CaO , CoO , CaSiO_3 , MgSiO_3 , MgO , MnO , Al_2SiO_5 , Al_2O_3 , SiO_2 , CO , CO_2 , C , Cr_2O_3 . На рисунке 2 приведена информация о количественном распределении Ni, Co и Fe при 4% углерода от массы руды.

Из рисунка 1 следует, что восстановление Ni и Co уже заметно при 200 °С, а Fe – при $T \geq 400$ °С. Влияние температуры на равновесную степень образования (α , %) Ni, Co и Fe и концентрацию металлов в сплаве (С, %) приведено в таблице 1.

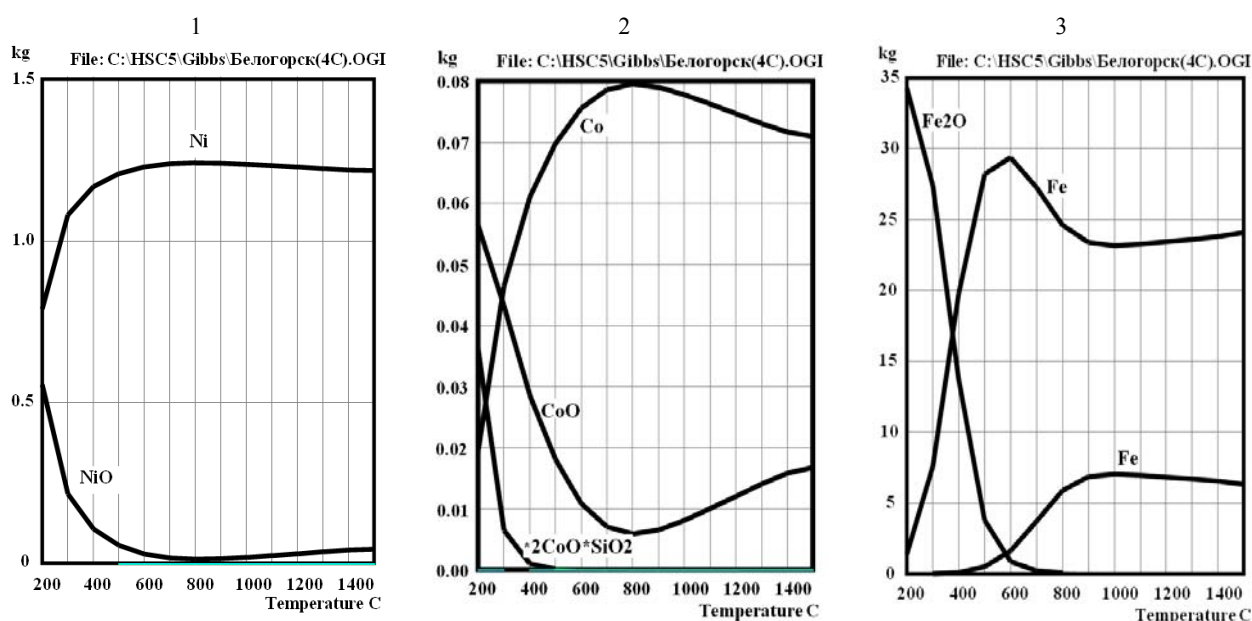


Рисунок 2 – Влияние температуры на количественное распределение веществ, содержащих Ni, Co и Fe в системе Белогорская руда – 4%С. Вещества содержащие: 1 – никель, 2 – кобальт, 3 – железо

Figure 2 – Temperature effect on the quantitative distribution of substances containing Ni, Co and Fe in the system Belogorsk ore – 4% C. Substances containing: 1 – nickel, 2 – cobalt, 3 – iron

Таблица 1 – Влияние температуры на равновесную степень образования (α , %) и концентрацию металлов в сплаве в системе Белогорская руда – 4% углерода

Table 1 – Effect of temperature on the equilibrium degree of formation (α ,%) and concentration of metals in the alloy in the Belogorsk Ore system – 4% carbon

α_{Me} , % C_{Me} , %	Температура, °С										
	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
α_{Ni}	96,4	98,0	98,8	98,8	98,8	98,8	98,8	98,8	98,2	98,0	97,2
α_{Co}	83,1	89,8	94,4	93,8	92,6	90,6	89,4	88,3	86,1	85,1	85,1
α_{Fe}	2,0	6,5	14,8	23,4	27,3	28,1	27,7	27,2	26,8	26,1	26,1
C_{Ni}	67,71	41,89	24,61	17,22	15,16	14,83	14,96	15,10	15,35	15,61	15,61
C_{Co}	3,91	2,57	1,56	1,1	0,97	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91
C_{Fe}	28,38	55,54	73,83	81,68	83,87	84,24	84,12	83,98	83,74	83,48	83,48

Из таблицы 1 видно, что в рассматриваемой системе восстановление металлов подчиняется закономерности: $\alpha_{Ni} > \alpha_{Co} > \alpha_{Fe}$. При $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\alpha_{Ni} = 98\%$, $\alpha_{Co} = 86,1\%$ и $\alpha_{Fe} = 83,7\%$. При возрастании температуры до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ C_{Ni} уменьшается до $15,61\%$, C_{Co} до $0,91\%$. Однако при этом C_{Fe} возрастает до $83,48\%$. Это связано с тем, что масса восстановившегося Fe в $6,56/1,22 = 5,38$ раз больше массы восстановленного Ni. При $1300\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в системе формируется ферроникель содержащий $15,35\text{--}15,61\%Ni$, $0,9\%Co$ и $83,48\text{--}83,74\%Fe$.

На рисунке 3 приведена информация о влиянии температуры и количества углерода (УГ, % от массы руды) на степень образования Ni, Co и Fe, из которого следует, что при 3–6% углерода и $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ α_{Ni} высокая и составляет $90,8\text{--}98,8\%$. Затем при уменьшении углерода до 2% α_{Ni} снижается до $10,6\%$. При $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость $\alpha_{Ni} = f(УГ)$ имеет вид:

$$\alpha_{Ni} = -161,57 + 86,6 \cdot УГ \text{ (от 2 до 3 УГ);} \quad (4)$$

$$\alpha_{Ni} = 94,929 + 0,7857 \cdot УГ \text{ (от 3 до 6 УГ).} \quad (5)$$

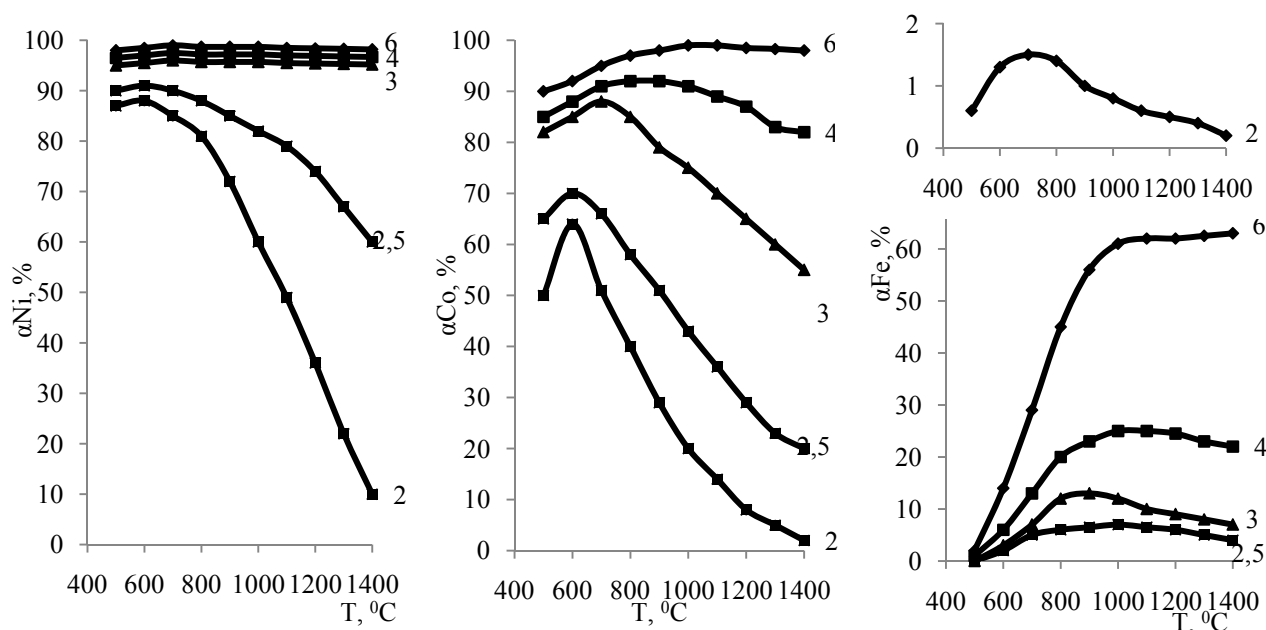


Рисунок 3 – Влияние температуры и количества углерода на степень восстановления металлов в системе руда-углерод при давлении 1 бар. Цифры у линий – количество углерода, % от массы руды

Figure 3 – Influence of temperature and amount of carbon on the degree of reduction of metals in the ore-carbon system at a pressure of 1 bar. The numbers at the lines – the amount of carbon, % from the mass of the ore

При увеличении углерода от 2 до 6% α_{Co} увеличивается при $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ от $1,9$ до $96,3\%$ в соответствии с уравнением:

$$\alpha_{Co} = -156,4 + 98,46 \cdot УГ - 9,4 \cdot УГ^2 \quad (6)$$

Процесс восстановления необходимо проводить при 4-6% C когда α_{Co} превышает 80%. При меньшем количестве углерода α_{Co} резко снижается. С увеличением углерода от 2 до 6% растет и восстановление железа до элементарного (от $0,1\%$ до $62,4\%$ при $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) по уравнению:

$$\alpha_{Fe} = -13,191 + 3,1068 \cdot УГ + 1,5886 \cdot УГ^2 \quad (7)$$

Концентрация металлов (C_{Me}) так же зависит от количества углерода и температуры (рисунок 4). Увеличение количества углерода снижает C_{Ni} и увеличивает C_{Fe} . При $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ эти зависимости описываются уравнениями:

$$C_{Ni} = 426,56 \cdot УГ^{-2,297} \quad (8)$$

$$C_{Fe} = -238,9 + 193,69 \cdot УГ - 38,663 \cdot УГ^2 + 2,5958 \cdot УГ^3 \quad (9)$$

Из рисунка 4 следует, что C_{Co} в сплаве уменьшается при увеличении температуры. При $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость $C_{Co} = f(U_{\Gamma})$ имеет экстремальный характер с максимумом (1,44%) при 3% C. При этом зависимость $C_{Co} = f(U_{\Gamma})$ описывается уравнением:

$$C_{Co} = -6,24 + 6,6325 \cdot U_{\Gamma} - 1,9962 \cdot U_{\Gamma}^2 - 0,1462 \cdot U_{\Gamma}^3 \quad (10)$$

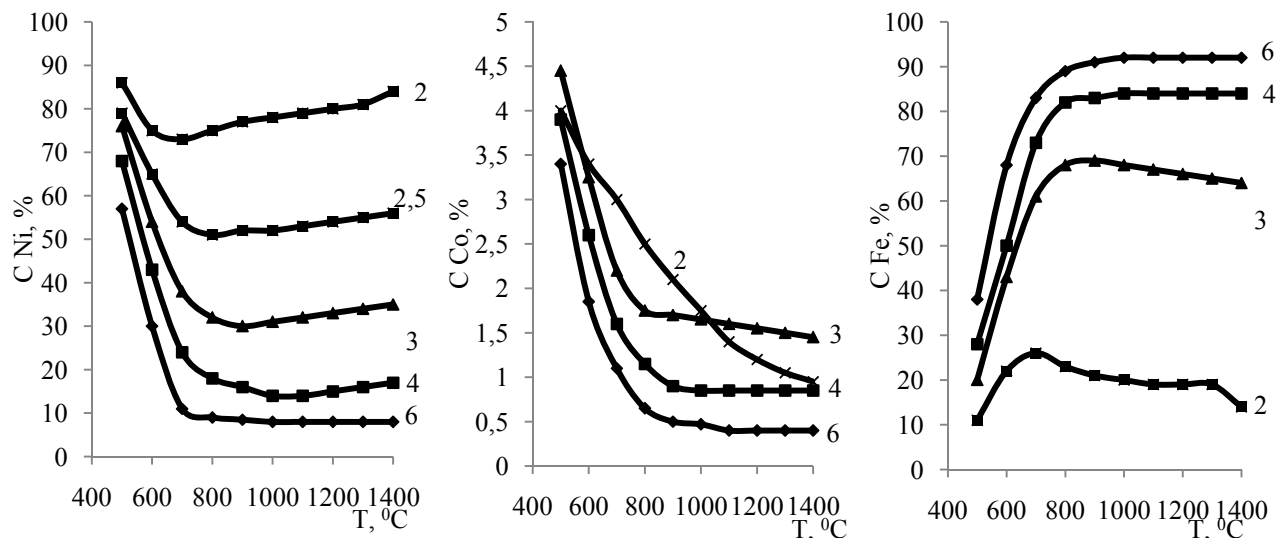


Рисунок 4 – Влияние температуры и количества углерода на концентрацию металлов в сплаве в системе БР-углерод при давлении 1 бар. Цифры у линий – количество углерода, % от массы руды

Figure 4 – Influence of the temperature and the amount of carbon on the concentration of metals in the alloy in the Belogorsk ore – carbon system at a pressure of 1 bar. The numbers at the lines – the amount of carbon, % from the mass of the ore

Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что при $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ влияние углерода на концентрацию Ni в сплаве и степень восстановления Ni имеет противоположный характер. Эта зависимость прямо-пропорциональная. С увеличением углерода концентрация Ni в сплаве уменьшается, а α_{Ni} возрастает. Для железа с увеличением углерода α_{Fe} и C_{Fe} возрастает.

Обратно – пропорциональная зависимость наблюдается между α_{Ni} и C_{Ni} , прямо-пропорциональная между C_{Fe} и α_{Fe} и экстремальная между C_{Co} и α_{Co} (рисунок 5). Уравнения этих связей имеют вид:

$$C_{Ni} = 82,325 + 0,2398 \cdot \alpha_{Ni} - 9,7 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{Ni}^3 \quad (11)$$

$$C_{Fe} = 41,741 + 12,102 \ln \alpha_{Fe} \quad (12)$$

$$C_{Co} = 0,9567 + 0,279 \cdot \alpha_{Co} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{Co}^3 \quad (13)$$

В соответствии с [20] ТУ48-3-59-79 (с изменениями 1) ферроникель марки ФН-1 должен содержать $Ni + Co \geq 25\%$, ФН-2 $\geq 20\%$, ФН-3 $\geq 15\%$, ФН-4 $\geq 6\%$ и ФН-6 $\geq 3,5\%$. Взаимосвязь между ведущим элементом (никелем) и содержанием $\Sigma_{Ni \text{ и } Co}$ в сплаве показана на рисунке 6. По этому рисунку можно определить марку ферроникеля (по $\Sigma_{Ni \text{ и } Co}$) и α_{Ni} . Так, при $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ задавшись $\alpha_{Ni} \geq 90\%$ можно установить, что при получении ферроникеля марки ФН-1 с содержанием $\Sigma_{Ni \text{ и } Co} = 35-25\%$ α_{Ni} составит 90-93,8%, для получения ФН-2 ($\Sigma_{Ni \text{ и } Co} = 25-20\%$) α_{Ni} составит 93,8-95,6%, для получения ФН-3 ($\Sigma_{Ni \text{ и } Co} = 20-15\%$) α_{Ni} составит 95,6-97,1% и для получения ФН-4 ($\Sigma_{Ni \text{ и } Co} = 15-6\%$) α_{Ni} составит 97,6-99,6%. При этом α_{Co} будет несколько меньше, чем α_{Ni} (рисунок 7). Например, при $\alpha_{Ni} = 99,6\%$ α_{Co} составит 96,3% (6% C), а при $\alpha_{Ni} = 90\%$ (3% C) α_{Co} составит только 57%. Таким образом для достижения $\alpha_{Co} = 75-95\%$ процесс необходимо проводить при 3,5-6% углерода от массы руды. При этом α_{Ni} будет составлять 95-99,6%. Ферроникель в этом случае по $\Sigma_{Ni \text{ и } Co}$ будет соответствовать маркам ФН-2, ФН-3 и ФН-4.

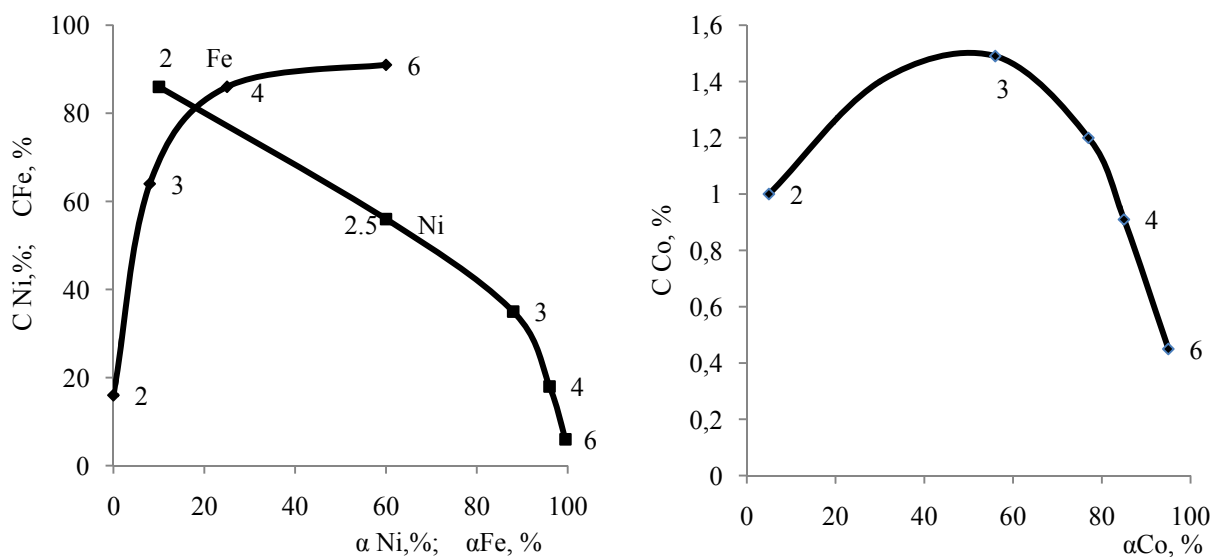
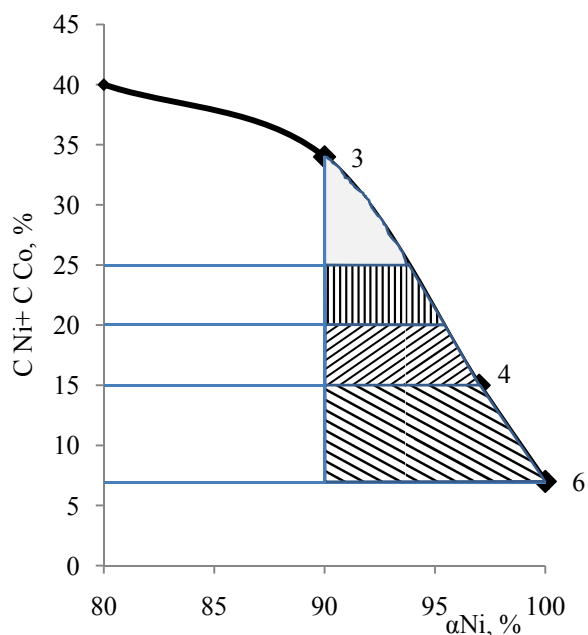


Рисунок 5 – Взаимосвязь между C_{Me} и α_{Me} в ферроникеле при 1400 °С.
Цифры у точек – количество углерода, % от массы руды

Figure 5 – Interconnection between C_{Me} and α_{Me} in ferronickel at 1400 °С.
The numbers at the lines – the amount of carbon, % from the mass of the ore



□ ФН-1 ▨ -ФН-2 ▩ -ФН-3 ▤ -ФН-4

Рисунок 6 – Взаимосвязь между $C_{\Sigma Ni}$ и C_{Co} в ферроникеле и α_{Ni} при 1400 °С с маркой ферроникеля.

Цифры у точек – количество углерода, % от массы руды

Figure 6 – Interconnection between $C_{\Sigma Ni}$ and C_{Co} in ferronickel and α_{Ni} at 1400 °С with brand ferronickel.

The numbers at the lines – the amount of carbon, % from the mass of the ore

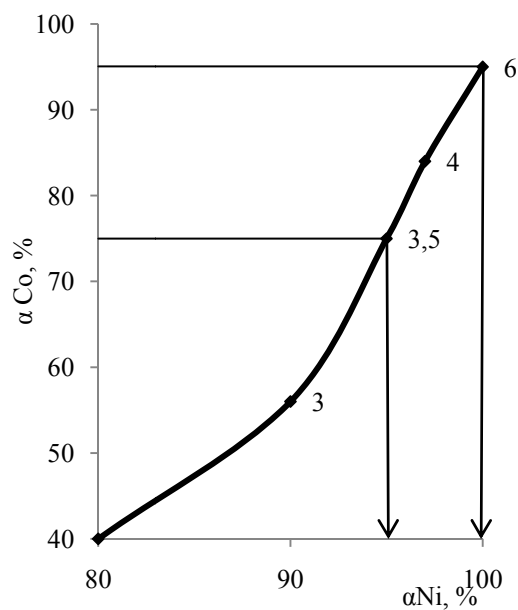


Рисунок 7 – Взаимосвязь между α_{Ni} и α_{Co} в ферроникеле при 1400 °С.
Цифры у точек – количество углерода, % от массы руды

Figure 7 – The Interconnection between α_{Ni} and α_{Co} in ferronickel at 1400 °С.

The numbers at the lines – the amount of carbon, % from the mass of the ore

При электроплавке руды (1,7% Ni, 0,08% Co) в смеси с различным количеством кокса, получен ферроникель (рисунок 8), содержащий 8–27,6% Ni и 0,4–0,9% Co (т.е. марок от ФН-4 до ФН-1) (таблица 2).



Рисунок 8 – Ферроникель, полученный из Белогорской руды в присутствии 2,5% кокса (1), 5% кокса (2) и 10% кокса (3)

Figure 8 – Ferronickel, obtained from the Belogorsk ore in the presence of 2,5% кокса (1), 5% кокса (2) и 10% кокса (3)

Таблица 2 – Влияние кокса на содержание металлов в сплаве, %

Table 2 – Effect of coke on the content of metals in the alloy, %

Количество кокса, % от массы руды	2,5	5,0	10,0
Содержание Ni	7-8,3	11,2-13,0	26,2-28,3
Содержание Co	0,36-0,44	0,54-0,63	0,86-0,94

Заклучение.

1. На основании полученных результатов по равновесному взаимодействию Белогорской руды с углеродом можно сделать следующие выводы:

- взаимодействие в системе происходит с участием Fe_2O_3 , FeO , Fe , $2\text{NiO}\cdot\text{SiO}_2$, Ni , $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, Co , NiO , CaO , CoO , CaSiO_3 , MgSiO_3 , MgO , MnO , Al_2SiO_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , CO , CO_2 , C .

- при постоянных температурах (600–1400 °C) увеличение количества углерода от 2 до 6% повышает α_{Ni} , α_{Co} и α_{Fe} например при 1400 °C α_{Ni} от 10,6 до 99,6%, α_{Co} от 1,9 до 96,3%, α_{Fe} от 0,09 до 62,4%.

- увеличение количества углерода от 2 до 6% снижает содержание Ni и Co в сплаве и увеличивает Fe. Так при 1400 °C C_{Ni} уменьшается от 84,4% до 7,4%, C_{Co} от 1,01 до 0,48% и C_{Fe} возрастает от 14,6 до 62,4%.

- найдено, что между α_{Ni} и C_{Ni} наблюдается обратно пропорциональная зависимость, %; между α_{Ni} и C_{Co} – экстремальная ($\alpha_{\text{Co}} = 57,1\%$, $C_{\text{Co}} = 1,44\%$); между α_{Fe} и C_{Fe} – прямо пропорциональная.

- при 1400 °C из руды в присутствии 3,5–6% углерода образуется ферроникель, который по содержанию $\Sigma_{\text{Ni}}^{\text{и Co}}$ 25–7,8% соответствует сплаву марок ФН-2, ФН-3, ФН-4; при этом степень извлечения Ni в сплав составляет 95–99,6%, а кобальта – 75,3–97,06%.

2. Экспериментально установлено, что при электроплавке руды Белогорского месторождения в смеси с коксом формируется ферроникель марок от ФН-4 до ФН-1 (8–27,6% Ni).

REFERENCES

[1] Reznik I.D. (2002) Directions for the development of technology for the processing of oxidized nickel ores [Napravleniya razvitiya tehnologii pererabotki oksislennykh nikel'nykh rud]. Collection of scientific papers GINCVETMET: New frontiers in non-ferrous metallurgy [Sb. nauch. trudov GINCVETMET: Novy'erubezhi v cvetnoymetallurgii]. Moscow. P. 181-201 (In Russian)

[2] Gasik M.I., Ljakishev N.P. (1999) Theory and technology of electrometallurgy of ferroalloys [Teoriya i tehnologijaj elektrometallurgii ferrosplavov]. Moscow, Intermet Inzhiniring. (In Russian)

[3] Abdullina A.A. (1997) Mineral resources of Kazakhstan: deposits of chromium, nickel, cobalt, vanadium [Mineral'nye resursy Kazahstana: mestorozhdenija hroma, nikelja, kopal'ta, vanadija]. (Almaty). (In Russian)

[4] Kovgan P.A. (2008) Promising technologies for processing oxidized nickel ores [Perspektivnye tehnologii pererabotki oksislennykh nikel'nykh rud]. Non-ferrous metals. P. 43-45 (In Russian)

[5] Zhatkanbaev E.E., Zhatkanbaeva Zh.K., Zhakienova A.T. (2014) Leaching of nickel from oxidized ores of the Bugetkol deposit [Vyshhelachivanie nikelja iz oksislennykh rud mestorozhdenija Bugetkol']. The Way of Science, International Scientific Journal. Volgograd [Put' nauki, Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. Volgograd]. P. 18-20 (In Russian)

[6] Kosmuhambetov A.R., Valishevskaja T.Ju. and others (2014) Break - down of the nickel-cobalt-containing ore by the method of hydrochloric acid waxing [Vskrytie nikel'kobal'tsoderzhashhej rudy metodom soljanokislotnogo vel'cevanija]. Vestnik KazNTU. P. 340-344 (In Russian)

- [7] Carlson and Simons, (1961) in Extractive Metallurgy of Copper, Nicrel, Nicrel and Cobalt // AIME, Qnenelued. P. 363-396.
- [8] Sizikova N.V. (2008) Physicochemical studies of hydrometallurgical processes of recovery of nickel, and cobalt from nontronite ores and development of rational technology on their basis [Fiziko-himicheskie issledovaniya gidrometallurgicheskikh processov izvlecheniya nikelja, i kobal'ta iz nontronitovyhrud i razrabotka racional'noj tehnologii naihosnove]. Thesis of the candidate of technical sciences Ust'-Kamenogorsk [Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk Ust'-Kamenogorsk]. 106 p. (In Russian)
- [9] Sizikova N.V., Pavlov A.V., Kushakova L. B., Borcov B.A. (2007) Research on the leaching of oxidized nickel-cobalt ores [Issledovanijapovyshhelachivanijuokislennyhnikel'-kobal'tovyhrud]. Complex use of mineral raw materials. Almaty. [Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ja]. P. 68-74 (In Russian)
- [10] Reznik I.D., Ermakov G.P., ShneersonJa.M. Nikel'. (2001) LLC "Science and Technology" [OOO "Nauka i tehnika"]. Moscow. 468 p. (In Russian)
- [11] Shevko V.M., Bishimbaev V.K., Ajtkulov D.K. and others (2012) [Processing of nickel-cobalt containing natural and manmade and raw materials by chloridation method [Pererabotka nikel'-kobal'tsoderzhashhego prirodnoego i tehnogennogo i syr'jahloridovozgnochnym metodom]. Shymkent, South Kazakhstan state university. M. Auezova. 363 p. (In Russian)
- [12] Sadykov S.B., Kozhahmetov S.M., Kvjatkovskij A.S., Sadyk M.B. (2015) Prospects of using Vanyukov smelting technology for processing low-grade oxidized Co-Ni ores [Perspektivy ispol'zovaniya tehnologii plavki Vanjukovadlja pererabotki nizkosortnyh oksislennyh So-Ni rud]. Materials of the International Scientific and Practical Conference "Resource-saving technologies in the enrichment of ores and metallurgy of non-ferrous metals" [Materialy MNPК «Resursoberegajushhie tehnologii v obogashhenii rud i metallurgii cvetnyh metallov»]. Almaty. P. 199-203 (In Russian)
- [13] Sadykov K.S. Kozhahmetov S.M. and the others. (2011) Method for processing raw materials containing non-ferrous metals and iron [Sposob pererabotki syr'ja, sodержashhego cvetnye metally i zhelezo]. Innovative patent of the Republic of Kazakhstan [Innovacionnyj patent RK 24888]. (In Russian)
- [14] Gran N.B., Onishhin B.P., Majzel' E.I.(1971)Electric smelting of oxidized nickel ores [Jelektroplavka oksislennyh nikel'evyh rud]. Moscow. Metallurgy [Moskva Metallurgija]. 248 p. (In Russian)
- [15] Veselovskij A.A. (2015) Method of processing of furnace dump nickel slags for ferronickel and cast iron [Sposob pererabotki pechnyh otval'nyh nikel'evyh shlakov na ferronikel' i litejnyjchugun] Patent of the Russian Federation 2542127 [Patent RF 2542127]. (In Russian)
- [16] Djachkov B.A., Kuzmina O.N. Zimanovskaja N.A. and the others (2015) Nickel-shaped weathering crusts Carsk-gornostaevsk of the ophiolite belt of East Kazakhstan. [Nikelenosnyekoryvyvetrivaniyacarsko-gornostaevskogooffiolitovogopojasa Vostochnogo Kazahstana]. Materials XV international meeting on the geology of placers and deposits of weathering crust. [Materialy XV mezhdunarodnogo soveshhanija po geologii rossypej i mestorozhdenij kor vyvetrivaniya]. Permian: Perm State University. P. 59-60 (In Russian)
- [17] Roine A. (2002). Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium loft ware with Extensive Thermochemical Database. Pori: Outokumpu Research OY
- [18] Trusov B.G. (1991) Modeling of chemical and phase equilibria at high temperatures [Modelirovanie himicheskikh i fazovyh ravnovesij pri vysokih temperaturah]. Moscow: Moscow State University [Moskva MGU]. (In Russian)
- [19] Sinjarev G.B., Vatolin N.A. and the others (1982) The use of EC for thermodynamic calculations of metallurgical processes. [Primenenie JeVMDljaTermodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov]. Moscow. (In Russian)
- [20] TS 48-3-59-79. Ferronickel. Specifications.

В. М. Шевко¹, Б. Д. Айткулов², Д. К. Айткулов³, Г. Е. Каратаева¹, Д. Д. Аманов¹, А. Д. Бадикова¹

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент, Қазақстан,

²Тау-кен компаниясы АҚ «Ай Карааул», Алматы, Қазақстан,

³Қ. И. Сәтбаев атындағы Геологиялық ғылымдар институты, Алматы, Қазақстан

БЕЛОГОРСК КЕН ОРНЫНЫҢ КЕНДЕРІНЕН ФЕРРОНИКЕЛЬДІ АЛУ

Аннотация. Мақалада Белогорск кен орнының оксидті кендерінен ферроникельді алуды зерттеу нәтижелері келтіріледі (0,29-1,72% Ni, 0,05-0,09% Co, 4,07-22,1% Fe, 0,38-0,55% Cr, до 0,67% Mn, 17,78-17,97% Si, 12,86-24,58% Mg, 0,48-0,78% Al, 49,93-51,9% O). HSC-5.1 кешенімен орындалған толық термодинамикалық талдау арқылы 1400⁰С кезінде көміртек мөлшерінің 2-ден 6% дейін артуы элементті Ni түзілу дәрежесі 99,6% дейін, Co -96,3% дейін арттырады, болай болса, феррокорытпадағы Ni концентрациясы 84,4%-дан 7,4% дейін, Co 1,01-ден 0,48% дейін төмендейді, ал Fe 14,6-дан 62,4% дейін артады. Белогорск кен орнының кендерінен 1400⁰С кезінде 3,5-6% көміртегінің қатысуында ФН-2, ФН-3, ФН-4 маркалы қорытпаға сәйкес келетін $\Sigma_{Ni \text{ және } Co}$ 25-7,8% мөлшері бойынша ферроникель түзіледі; бұл кезде қорытпаға 95-99,6% және 75,3-97,06% кобальт алынады. Эспериментті зерттеу нәтижесінде Белогорск кен орнының кендерін электрлі балқыту кезінде қорытпаға кокспен бірге ФН-4, ФН-1 (8-27,6% Ni) маркалы ферроникель қалыптасатыны анықталды.

Түйін сөздер: оксидті никель кендері, термодинамикалық үлгілеу, қалпына келтіру, көміртек, кобальт, темір, қалпына келтіру, байыту, электрлік балқыту, ферроникель.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz

ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print)

<http://geolog-technical.kz/index.php/kz/>

Верстка Д. Н. Калкабековой

Подписано в печать 16.10.2017.

Формат 70x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

18,9 п.л. Тираж 300. Заказ 5.