

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКИСЛЕННОЙ НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ САХАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2019 г. **Е.Н. Селиванов, С.В. Сергеева, Р.И. Гуляева**

Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 27.02.18 г., доработана 18.06.18 г., подписана в печать 22.06.18 г.

Методами рентгенографии, оптической микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа определены составы и распределение элементов в основных минеральных составляющих окисленной никелевой руды Сахаринского месторождения: гетите, гематите, серпентине, тальке и хлорите. Основная доля никеля сосредоточена в оксидах железа, где его содержание достигает 2,4 %, в то время как в силикатах магния – не превышает 0,4 %. Методами термоанализа, совмещенного с масс-спектрометрическим анализом газов, и последующей рентгенографии продуктов установлены последовательность и температурные интервалы превращений при нагреве руды в инертной и восстановительной средах. Обоснованы температурные режимы обжига руды для восстановления никеля и железа из их минералов. Температурные режимы нагрева образцов приняты близкими к условиям, реализованным в промышленных агрегатах (электропечи), где скорость нагрева шихты колеблется в пределах 5–15 град/мин, вплоть до температур плавления (1450 °С) ферроникеля и шлака. Сведения по вещественному составу, термическим свойствам и формам нахождения металлов в руде предложено использовать при выборе режимов и технологий их пиро- или гидromеталлургической переработки. Восстановление никеля и железа из оксидов в среде СО происходит при температурах выше 800 °С, в то время как серпентины остаются устойчивыми вплоть до 1200 °С. Применение кокса в качестве восстановителя позволяет восстанавливать железо и никель из серпентинов при температуре выше 1250 °С. Полученные данные использованы для обоснования режимов работы обжиговых и электрических печей при выплавке ферроникеля из окисленных руд. При обжиге образующиеся частицы ферроникеля будут содержать 2–4 % Ni. Завершение восстановительных процессов в электропечи обеспечит извлечение металлов из силикатов магния, что позволит незначительно повысить содержание никеля в ферроникеле.

Ключевые слова: руда, оксиды, никель, железо, нагрев, фазовые превращения, микроанализ, термические свойства, обжиг, восстановление, ферроникель.

Селиванов Е.Н. – докт. техн. наук, зав. лабораторией пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН (ИМЕТ УрО РАН) (620016, г. Екатеринбург, ул. Амурдсена, 101). E-mail: pcmlab@mail.ru.

Сергеева С.В. – канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории пирометаллургии цветных металлов, ИМЕТ УрО РАН. E-mail: lazarevasv@mail.ru.

Гуляева Р.И. – канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории пирометаллургии цветных металлов, ИМЕТ УрО РАН. E-mail: pcmlab@mail.ru.

Для цитирования: Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Гуляева Р.И. Фазовый состав и термические свойства окисленной никелевой руды Сахаринского месторождения. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 1. С. 16–24.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-16-24.

Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Gulyaeva R.I.

Phase composition and thermal properties of the Sakharinskoe deposit oxidized nickel ore

X-ray diffraction, optical microscopy and X-ray microanalysis were used to determine the composition and distribution of elements in the main mineral constituents of oxidized nickel ore at the Sakhalin deposit (goethite, hematite, serpentine, talc and chlorite). The main fraction of nickel is concentrated in iron oxides, where its content reaches 2,4 %, while in magnesium silicates it does not exceed 0,4 %. The sequence and temperature intervals of transformations were established when heating ore in inert and reducing media by means of thermal analysis methods combined with mass-spectrometric analysis of gases and subsequent X-ray phase analysis of products. The temperature regimes of ore roasting for the reduction of nickel and iron from their minerals were justified. The temperature regimes of sample heating are assumed to be close to the conditions implemented in industrial units (electric furnaces) where the rate of charge heating varies within 5–15 degrees/min, up to the melting point (1450 °C) of ferronickel and slag. It is proposed to use information on material composition, thermal properties and metal forms in ore to select regimes and technologies for their pyro- or hydrometallurgical processing. Nickel and iron recovery from oxides in CO environment occurs above 800 °C, while serpentines remain stable up to 1200 °C. The use of coke as a reducing agent allows reducing iron and nickel from serpentines at temperatures above 1250 °C. The obtained data were used to substantiate the operating conditions of roaster and electric furnaces during ferronickel

smelting from oxidized ores. When roasting, resulting ferronickel particles will contain 2–4 % Ni. Completing recovery processes in the electric furnace will ensure metal recovery from magnesium silicates, which will slightly increase the nickel content in ferro-nickel.

Keywords: ore, oxides, nickel, iron, heating, phase transitions, microanalysis, thermal properties, roasting, reduction, ferronickel.

Selivanov E.N. — Dr. Sci. (Tech.), head of Laboratory of pyrometallurgy of non-ferrous metals, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMET UB RAS) (620016, Russia, Ekaterinburg, Amundsen str., 101). E-mail: pcmlab@mail.ru.

Sergeeva S.V. — Cand. Sci. (Tech.), research scientist of Laboratory of pyrometallurgy of non-ferrous metals, IMET UB RAS. E-mail: lazarevasv@mail.ru.

Gulyaeva R.I. — Cand. Sci. (Chem.), senior researcher of Laboratory of pyrometallurgy of non-ferrous metals, IMET UB RAS. E-mail: pcmlab@mail.ru.

Citation: Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Gulyaeva R.I. Phase composition and thermal properties of the Sakharinskoe deposit oxidized nickel ore. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 1. P. 16–24 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-16-24.

Введение

При выплавке ферроникеля в электротермической печи рудообразующие минералы претерпевают физические и химические превращения, термические характеристики которых оказывают влияние на состав металла, шлака и показатели переработки в целом. В настоящее время управление процессом основано на согласовании протекающих реакций восстановления металлов и формирования шлака с режимами работы обжиговых и электротермических печей. Metallургические свойства минерального сырья зависят от его вещественного и химического составов, микроструктуры и распределения извлекаемых элементов по фазовым составляющим. Окисленные никелевые руды уральских месторождений образованы оксидами железа и минералами групп серпентина, талька, а также продуктами их метаморфизма, в которых доля изоморфного замещения магния на никель меняется в широких пределах [1, 2]. В зависимости от типа руды [3, 4] на долю серпентинов приходится от 30 до 80 % находящегося в ней никеля. Известные сведения о структуре руд уральских месторождений свидетельствуют о разнообразии их минералогического состава. Гарниерит гипергенного Сахаринского месторождения представлен [5] клинохлором, тальком, лизардитом, палыгарскитом, сепиолитом, клинтинитом, аннитом, сапонитом, смектитом, вермикулитом, глауконитом, томпсонитом, кварцем, доломитом, никельгексагидритом и др. Основными никельсодержащими фазами уральских никелевых руд являются серпентин и гетит. Гидротермальные минералы характеризуются меняющимися значениями температур фа-

зовых переходов и плавления, теплоемкости, содержаниями ценных металлов. Поэтому фазовый состав и термические свойства руды определяют параметры процессов металлургической переработки сырья, а также и извлечение никеля и железа в товарные продукты.

Цель работы — обоснование режимов обжига и плавки руды Сахаринского месторождения на основе данных о распределении ценных металлов по фазовым составляющим и термических превращениях при нагреве в инертной и восстановительной средах.

Методики экспериментов

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов выполнен с использованием дифрактометра ДРОН-2.0 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор на выходящем пучке) с последующей расшифровкой данных по базе данных PDF-2 [6]. Рентгеновский спектральный микроанализ (РСМА) проведен на растровом электронном микроскопе JSM-5900LV и энергодисперсионном рентгеновском спектрометре Oxford INCA Energy 200. Для пояснения фазовых переходов и определения границ протекания реакций применяли термогравиметрический, дифференциально-термический и масс-спектрометрический методы, реализованные на термоанализаторе NETZSCH 449 C Jupiter и сопряженном с ним квадрупольном масс-спектрометре QMS 403 C Aeolos. Масса навески (15–50 мг) взята в соответствии с рекомендованным типом оборудования. Температурные режимы нагрева образцов приняты близкими к условиям, реализованным в

промышленных агрегатах (электропечи), где скорость нагрева шихты колеблется в пределах 5–15 град/мин, вплоть до температур плавления (1450 °С) ферроникеля и шлака. Сравнение режимов восстановления руды газом (СО) и твердым углеродом (кокс) позволяет выявить последовательность превращений в реакционных смесях. Количество кокса принято близким к стехиометрически необходимому для полного восстановления никеля и железа из их оксидов. Перед экспериментами руду измельчали до крупности менее 0,16 мм. Нагрев образцов до 1100–1400 °С вели со скоростью 10 °С/мин в потоке 20–30 мл/мин аргона или смеси СО–Аг.

Для исследования взят образец окисленной никелевой руды Сахаринского месторождения, содержащий, %: 1,02 Ni, 0,02 Co, 8,5 MgO, 47,7 SiO₂, 20,5 Fe₂O₃, 3,4 Al₂O₃, 1,1 CaO. В качестве восстановителя использован кокс (КД-2), содержащий, %: 83,6 С, 0,6 S, 12,5 золы и 1,2 летучих.

Результаты экспериментов

Согласно данным рентгенофазового анализа исходный образец руды (рис. 1) представляет собой смесь гидросиликатов магния — серпентина, талька, оксидов железа и кварца. Гидроксиды железа имеют на рентгенограмме весьма слабые рефлексы-гало, что свидетельствует об их аморфизации.

По минераграфическим данным, основу руды составляют минералы группы серпентинов, кварца и гидроксидов железа, выявленные в виде блоков размером более 1 мм. Структурные составляющие руды имеют тесное взаимное прорастание и неоднородность структуры, при этом размеры монофазных включений редко превышают 200 мкм.

Как видно из рентгеновского спектрального микроанализа данных (см. рис. 2 и таблицу), существенная часть руды состоит из оксидов, гидроксидов и хромитов железа. Оксиды и гидроксиды

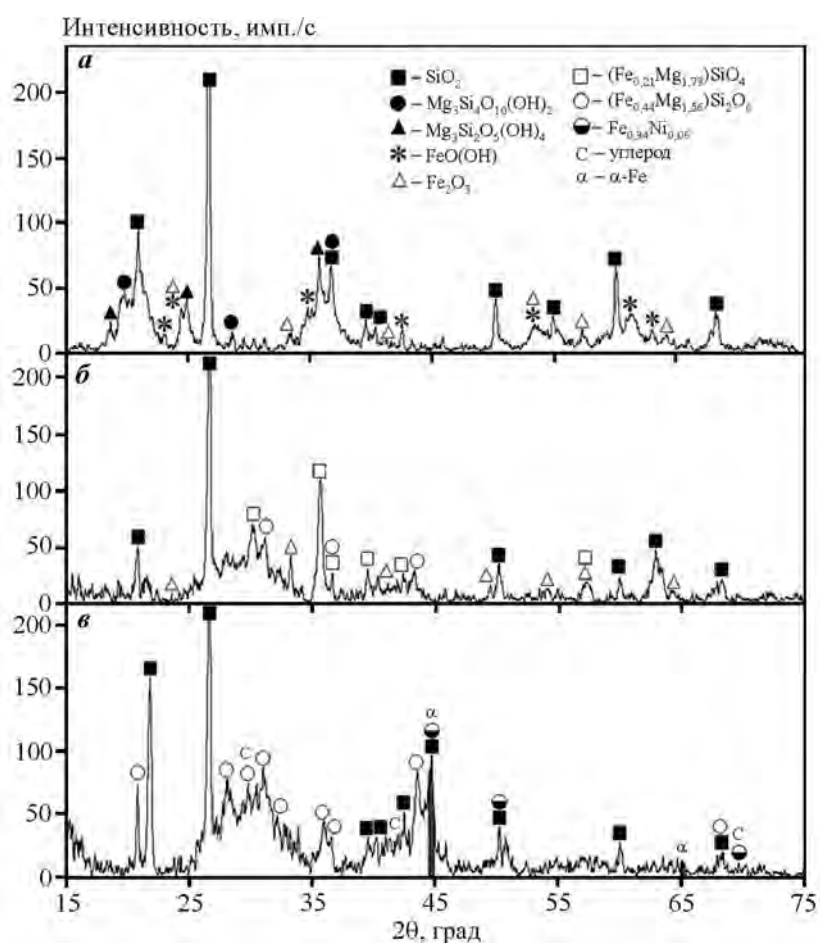


Рис. 1. Рентгенограмма руды (а) и продуктов ее обжига (Аг, 1100 °С) в нейтральной (б) и восстановительной (СО–Аг, 1250 °С) средах

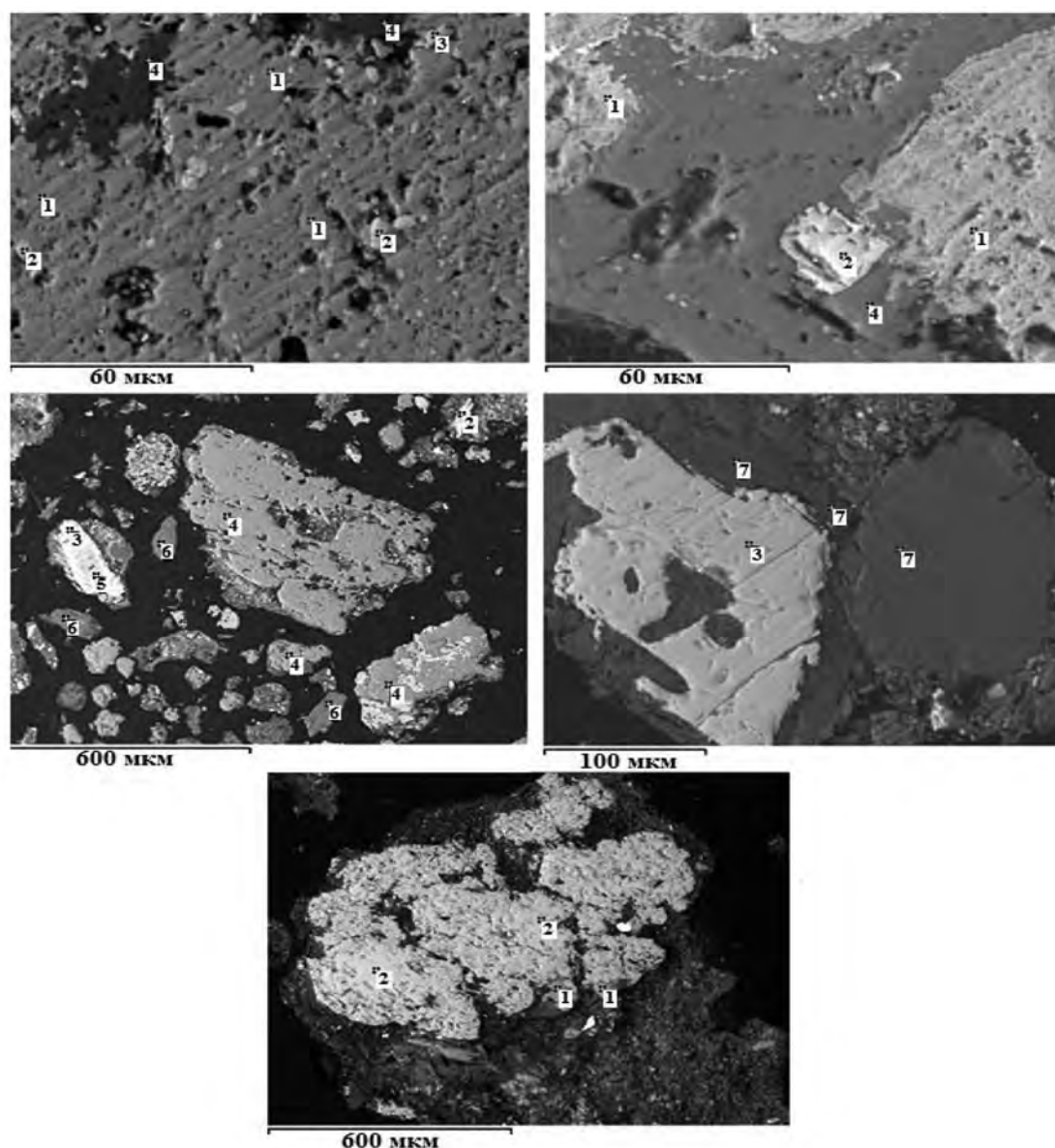


Рис. 2. Микроструктура различных участков руды и точки локального зондирования фаз

Состав фаз руды по данным РСМА (точки зондирования по рис. 2)

Номер точки	Фаза	Содержание *, мас.%								
		Mg	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Co	Mn	O
1	FeOOH	0,1–0,6	0,2–1,5	3,0–4,2	0,1–3,0	52,2–60,2	1,0–2,4	до 0,1	до 0,2	33,7–40,6
2	Fe ₂ O ₃	0,3–0,6	до 0,1	0,2–0,4	0,1–2,9	66,3–72,6	0,6–0,9	0,3–0,8	до 0,2	27,2–30,0
3	Fe _{4,1} CrO _{7,6}	1,1	1,0	0,6	12,7	52,1	0,6	–	0,9	28,7–30,6
4	SiO ₂	до 0,3	до 0,1	44,6–47,7	до 0,9	0,4–5,2	до 0,2	–	–	48,8–53,2
5	FeAl _{1,4} Cr _{2,2} O _{7,6}	4,8	12,2	0,1	34,5–1,0	16,4	–	–	0,3	31,5
6	Mg _{1,3} SiO _{3,3}	25,8	0,2	21,7	–	1,4	0,2	–	0,1	50,5
7	Mg _{3,3} Si ₂ FeAlO _{9,5}	22,3	7,8	17,3	1,0	7,2	0,4	–	–	48,4

* Остальное (до 100 %) – связанная вода и прочие элементы.

железа расположены плотными участками, в поле шлифа находится достаточно крупный конгломерат (около 300 мкм), состоящий из редко встречающихся частиц хромита и хроможелезистой шпинели. Частицы хроможелезистой шпинели имеют тесное взаимное прорастание с хлоритом. Никель в большем количестве сосредоточен в оксидах и гидроксидах железа, где его содержание колеблется от 0,7 до 2,4 %, по сравнению с хромитами (0,5–1,0 %). В гематите и гетите обнаружено около 0,4 % кобальта, в то время как в остальных минералах его содержание находится ниже уровня чувствительности оборудования (0,1 %). Значимую долю шлифа занимают частицы кварца, размер которых меньше 600 мкм. Кварц встречается как в виде самостоятельных крупных блоков, так и в конгломератах с оксидами и гидроксидами железа. Гидросиликат магния, содержащийся в руде в виде серпентина (антигорит), отвечает формуле $Mg_{3-x}Si_2O_5(OH)_4$. Содержание никеля в гидросиликатах магния не превышает 0,4 %, железа — 7,2 %, а кобальта — менее 0,1 %. Отношение содержаний железа и никеля в силикатах магния колеблется в пределах 5–20, что близко к ранее выявленным данным для руды Серовского месторождения [7].

Как следует из данных МРСА, основными никельсодержащими фазами являются гидратированные оксиды железа и силикаты магния. Полагая, что никель изоморфно замещает железо в решетке его оксидов, количество которых со-

ставляет 20,5 %, а также магний в серпентинитах, в пересчете на $Mg_3Si_2O_7$ — 17 %, можно оценить распределение цветных металлов по фазовым составляющим руды. Доля никеля в оксидах железа составляет 80 %, в серпентините — 20 %.

Полученные данные показывают, что с целью извлечения никеля восстановлению в первую очередь необходимо подвергать оксиды железа. Кварц и силикаты магния можно отделять как забалансовую составляющую руды, так как содержание никеля в них не превышает 0,4 %. Отделение силикатов магния можно рассматривать как самостоятельное направление, обеспечивающее концентрирование никеля в продукте, подлежащем металлургической переработке.

Согласно данным дифференциально-термического и масс-спектрометрического анализов (рис. 3), нагрев руды со скоростью 10 °С/мин в токе аргона сопровождается убылью массы образца (ТГ), достигающей 10,6 % при 1100 °С, связанной с удалением свободной и кристаллогидратной воды, а также разложением карбонатов. Экстремальные содержания (по ионному току) паров воды в отходящих газах выявлены при температурах 131, 290 и 600 °С, а диоксида углерода — при 400 и 645 °С. Имея в виду близость температуры разложения $CaMgCO_3$ с температурой выявленного экстремума ионного тока по CO_2 (44 ат. ед.), нами предполагается, что этот эффект сопровождается разложением доломита. На кривой теплового потока (ДТА) выявлены эндотермические (при $t =$

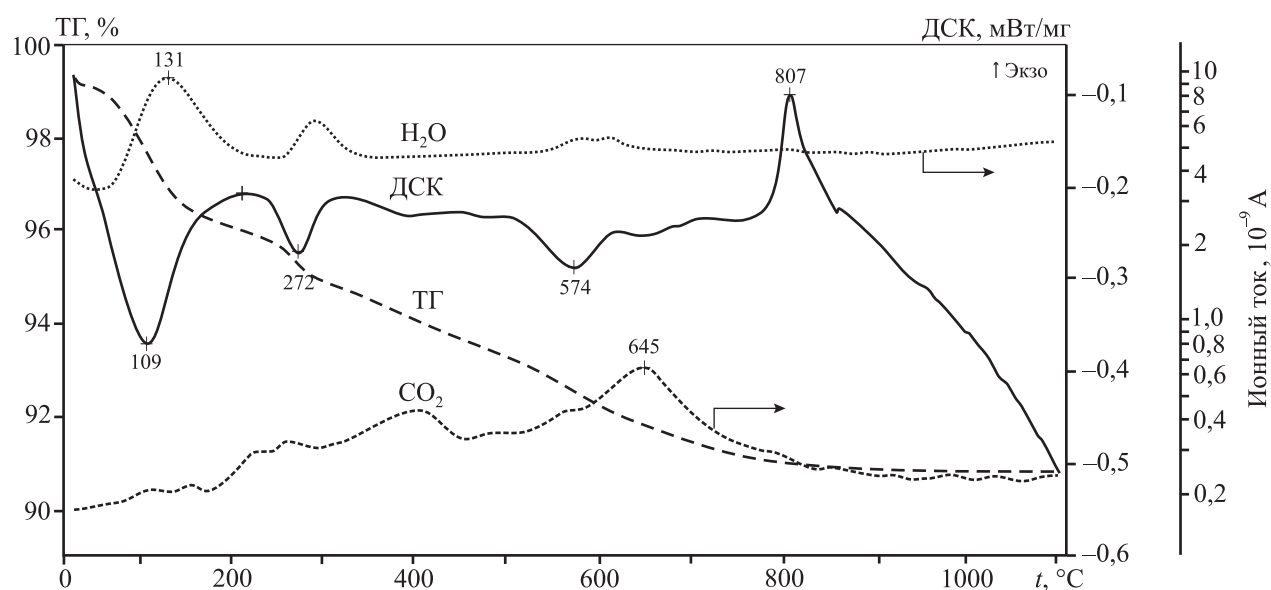
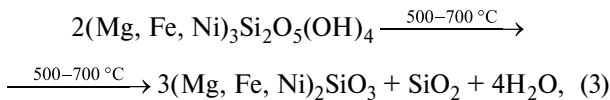
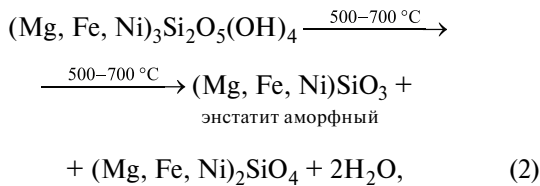
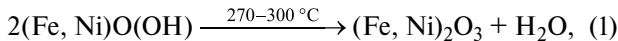
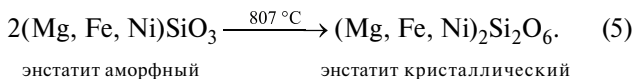


Рис. 3. Данные ДТА и масс-спектрометрии газов при нагреве (10 град/мин) руды в токе аргона

= 109, 272, 574, 645 °С) и экзотермический (807 °С) эффекты. Согласно литературным данным [8–10], нагрев окисленной никелевой руды в области низких температур сопровождается удалением физической влаги (109 °С), дегидратацией гидроксидов железа (270–300 °С) и гидросиликатов магния (650–810 °С), а также разложением доломита (645 °С). В соответствии с полученными данными, основные протекающие реакции имеют вид



Экзотермический эффект при $t = 807^\circ\text{C}$ соответствует [11, 12] кристаллизации аморфного энстатита:



Некоторое смещение температуры экстремума экзотермического эффекта от температуры перехода энстатита в кристаллическое состояние, по сравнению с ранее полученными данными, приведенными в работе [13], связано с сопутствующими примесями, в первую очередь — оксидами железа, а также со скоростью нагрева образца. В продуктах нагрева руды до $t = 1100^\circ\text{C}$ методом РФА выявлены (см. рис. 1) кварц, гематит, железосодержащие форстерит и энстатит.

В ходе оценки термических свойств руды в восстановительной среде (СО—Аг) установлено (рис. 4) первоначальное протекание процессов, аналогичных выявленным при нагреве образца в инертной (Аг) среде. Если в инертной среде реакции, сопряженные с изменением массы образца, завершаются при $t \sim 800^\circ\text{C}$ [14, 15], то в восстановительной среде убыль массы происходит во всем изученном интервале температур (до 1250°C). Это связано с развитием реакций восстановления ме-

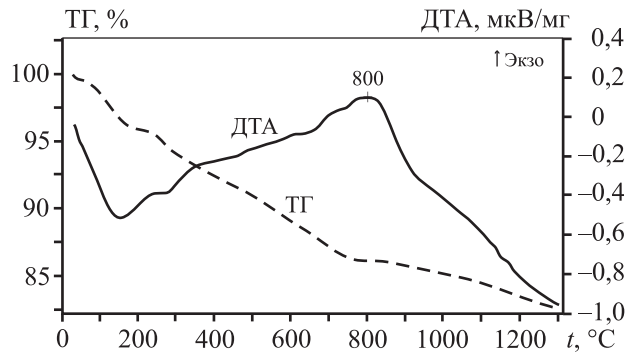
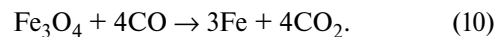
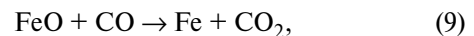
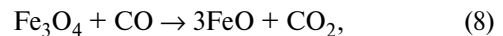
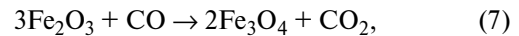
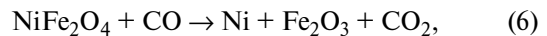
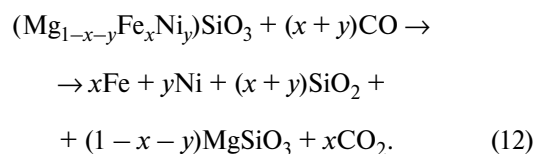
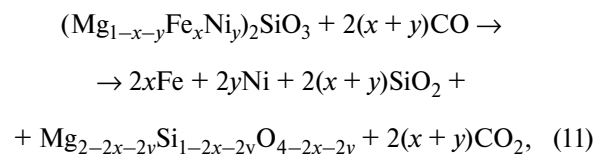


Рис. 4. Термограмма руды при нагреве (20 град/мин) в среде СО—Аг

таллов из оксидов железа и никеля по реакциям [8, 16]:



Восстановление никеля и железа из силикатов магния протекает при более высоких температурах по реакциям

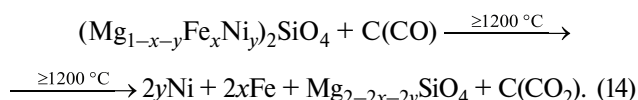


Подтверждением завершения процессов восстановления оксидов железа являются данные РФА образовавшегося продукта (см. рис. 1). На рентгенограмме продуктов нагрева руды в среде монооксида углерода не выявлены рефлексы, отвечающие Fe_{1-x}O , но зафиксированы характерные для $\alpha\text{-Fe}$. Полагая, что восстановление никеля из оксида начинается раньше, чем железа из FeO_x , эти рефлексы следует отнести к ферроникелю. Образующиеся при повышенных температурах железо и никель имеют неограниченную взаимную рас-

творимость, состав сплава Fe—Ni (ферроникель) зависит от соотношений Ni/Fe в восстанавливаемых оксидах. Вероятное содержание никеля в ферроникеле, исходя из полного восстановления $(\text{Fe,Ni})_2\text{O}_3$ и FeO_x , составляет 2—5 %.

Превращения, происходящие при нагреве руды и кокса, взятых в массовом соотношении 10 : 1, оценены при нагреве смеси до 1400 °С. В проведенных опытах начало восстановительных процессов в руде наблюдается при $t > 800$ °С, что характерно для оксидов железа и коррелирует с литературными данными [17]. Следует отметить, что пары воды, выделяющиеся при $t = 500\text{--}700$ °С в ходе дегидратации силикатов магнезия по реакциям (2)—(3), способны окислять металлические фазы, образовавшиеся на ранних стадиях восстановления руды, а также введенный кокс [8, 18]. В области повышенных температур помимо термических эффектов, аналогичных выявленным при нагреве руды в инертной среде, зафиксированы (рис. 5) изменения, характерные для углетермических реакций. При температурах выше 1100 °С возрастают содержания (ионные токи) CO_2 и CO в газообразных продуктах взаимодействия, что указывает на протекание реакций восстановления металлов из оксидов железа и никеля [19—21]. Убыль массы навески достигает 16,3 % при $t = 1400$ °С.

Согласно [22—24], восстановление серпентина углеродом кокса в условиях непрерывного нагрева начинается при $t \sim 1200$ °С и интенсивно протекает при $t = 1400$ °С. Можно полагать, что первоначально происходят реакции восстановления железа и никеля из их оксидов, и только при $t > 1200$ °С — из продуктов разложения серпентинитов. Последующее укрупнение частиц ведет к формированию крицы ферроникеля. Суммарно реакции восстановления металлов можно представить в виде



Полученные данные позволяют судить о вероятных фазовых превращениях при термической обработке руды Сахаринского месторождения и тем самым выбрать необходимые параметры обжига, обеспечивающего формирование фаз, предпочтительных для используемых металлургических переделов. Так, восстановительный обжиг руды следует вести при температурах 800—1000 °С, обеспечивающих полное разложение гидроксидов и карбонатов, а также восстановление оксидов железа и никеля; образующиеся частицы ферроникеля будут содержать

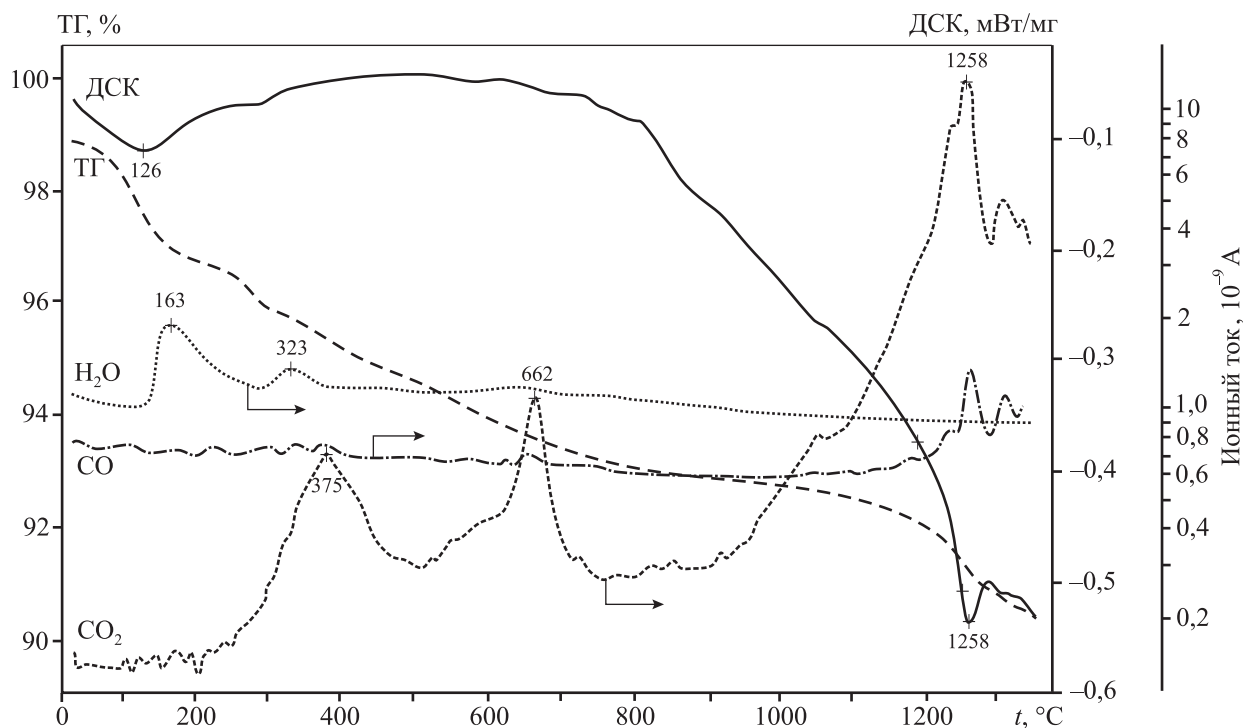


Рис. 5. Термограмма (10 град/мин) смеси руды с коксом в токе аргона и данные масс-спектрометрии газов

2–5 % Ni. Завершение восстановительных процессов в электропечи обеспечит извлечение металлов из силикатов магнезия, что позволит незначительно повысить содержание никеля в ферроникеле.

Заключение

Основными минеральными составляющими руды Сахаринского месторождения являются оксиды и гидроксиды железа, магниевые гидросиликаты (серпентины, тальк, хлорит), железохромовые шпинели и кварц. Основная доля никеля сосредоточена в оксидах железа, где его содержание достигает 2,4 %, в то время как в гидросиликатах магнезия — не превышает 0,4 %. Различия в содержании цветных металлов в минералах предполагают возможность разделения фаз и концентрирования никеля, что является предметом отдельного исследования.

Выявлены последовательность и температурные интервалы превращений в ходе термической обработки руды Сахаринского месторождения. В инертной среде помимо разложения гидратов и карбонатов происходит формирование железистых силикатов магнезия, устойчивых при повышенных температурах. Восстановление никеля и железа из оксидов в среде CO имеет место выше 800 °С, в то время как серпентины остаются устойчивыми вплоть до 1200 °С. Использование кокса в качестве восстановителя позволяет восстанавливать железо и никель из серпентинов при температуре выше 1250 °С. Полученные данные предполагается использовать для обоснования режимов работы обжиговых и электрических печей при выплавке ферроникеля из окисленных руд.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН по теме № 0396-2015-0082 (регистрационный номер АААА-А16-116022610056-0).

Литература/ References

1. Резник И.Д., Ермаков Г.Л., Шнеерсон Я.М. Никель. Т. 1. М.: Наука и технологии, 2001.
Reznik I.D., Ermakov G.L., Shneerson Ya.M. Nickel. Vol. 1. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2001 (In Russ.).
2. Никитин К.К., Глазковский А.А. Никеленосные коры выветривания ультрабазитов и методы их изучения. М.: Недра, 1970.
Nikitin K.K., Glazkovskii A.A. Nickel-bearing crusts of weathering of ultrabasites and methods of their study. Moscow: Nedra, 1970 (In Russ.).
3. Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Удоева Л.Ю., Панкратов А.А. Распределение никеля по фазовым составляющим окисленной никелевой руды Серовского месторождения. *Обогащение руд.* 2011. No. 5. С. 46—50.
Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Udoyeva L.Yu., Pankratov A.A. Nickel distribution in the Serovskoe deposit oxide nickel ore phase constituents. Obogashchenie rud. 2011. No. 5. P. 46—50 (In Russ.).
4. Вершинин А.С., Витковская И.В., Эдельштейн И.И., Вареня Г.Д. Технологическая минералогия гипергенных никелевых руд. Л.: Наука, 1988.
Vershinin A.S., Vitkovskaya I.V., Edel'shtein I.I., Varenya G.D. Technological mineralogy of hypergenic nickel ores. Leningrad: Nauka, 1988 (In Russ.).
5. Talovina I.V., Lazarenkov V.G., Ryzhkova S.O., Ugol'kov V.L., Vorontsova N.I. Garnierite in nickel deposits of the Urals. *Lithol. Miner. Resources.* 2008. Vol. 43. P. 588—595. DOI: 10.1134/S0024490208060060.
6. Powder diffraction file (PDF), produced by the International Centre for Diffraction Data, Newtown Square, PA.
7. Лазарева С.В., Селиванов Е.Н., Удоева Л.Ю., Гуляева Р.И. Термические свойства высокомагнезиальной никелевой руды Серовского месторождения. В сб.: *Современные металлические материалы и технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург, 24—26 июня 2009 г.)*. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. С. 177—182.
Lazareva S.V., Selivanov E.N., Udoyeva L.Yu., Gulyaeva R.I. Thermal properties of high-magnesium nickel ore of the Serovskoye deposit. In: Advanced metal materials and technologies: Proc. of the Intern. sci. and techn. conf. (Sankt-Peterburg, 24—26 June 2009). Sankt-Peterburg: Politechnical University, 2009. P. 177—182 (In Russ.).
8. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamic of the reduction roasting of nickeliferous laterite ore. *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 2016. Vol. 4. P. 320—346. DOI: 10.4236/jmmce.2016.46028.
9. Pickles C.A., Forster J., Elliott R. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Miner. Eng.* 2014. Vol. 65. P. 33—40. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.05.006.
10. Selivanov E.N., Lazareva S.V., Udoyeva L.Y., Gulyaeva R.I. Structure and thermal transformations of hydrated magnesium silicates. *Defect Diffus. Forum.* 2011. Vol. 312—315. P. 708—712. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.708.
11. Rhamdhani M.A., Hayes P.C., Jak E. Nickel laterite. Part 1. Microstructure and phase characterisations during reduction roasting and leaching. *Miner. Process. Extract. Metall.* 2009. Vol. 118 (3). P. 129—145. DOI: 10.1179/174328509X431391.

12. *Хорошавин А.Г.* Форстерит. М.: Теплотехника, 2004. *Khoroshavin A.G.* Forsterite. Moscow: Teplo tekhnika, 2004 (In Russ.).
13. *Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н.* Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. *Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N.* Thermal analysis of minerals and rocks. Leningrad: Nedra, 1974 (In Russ.).
14. *Bunjaku A., Kekkonen M., Taskinen P., Holappa L.* Thermal behavior of hydrous nickel-magnesium silicates when heating up to 750 °C. *Miner. Process. Extract. Metall.* 2011. Vol. 120 (3). P. 139–146. DOI: 10.1179/1743285511Y.0000000011.
15. *Чернобровин В.П., Пашкеев И.Ю., Михайлов Г.Г., Лыкасов А.А., Сенин А.В., Толканов О.А.* Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд. Челябинск: ЮУрГУ, 2004. *Chernobrovin V.P., Pashkeev I.Yu., Mikhailov G.G., Lykasov A.A., Senin A.V., Tolkanov O.A.* Theoretical foundations of the processes of production of carbon ferrochromium from the Urals ores. Chelyabinsk: YuUrGU, 2004 (In Russ.).
16. *Zevgolis E., Zografidis C., Halikia I.* The reducibility of the Greek nickeliferous laterites: A review. *Miner. Process. Extract. Metall.* 2010. Vol. 119 (1). P. 9–17. DOI: 10.1179/174328509X431472.
17. *Tsuji H.* Behavior of reduction and growth of metal in smelting of saprolite Ni-ore in rotary kiln for production of ferro-nickel alloy. *ISIJ Int.* 2012. Vol. 52 (6). P. 1000–1009. DOI: 10.2355/isijinternational.52.1000.
18. *Bo Li, Hua Wang, Yonggang Wei.* The reduction of nickel from low-grade nickel laterite ore using a solid-state deoxidization method. *Miner. Eng.* 2011. Vol. 24. P. 1556–1562. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.08.006.
19. *Samouhos M., Taxiarchou M., Hutcheon R., Devlin E.* Microwave reduction of a nickeliferous laterite ore. *Miner. Eng.* 2012. Vol. 34. P. 19–29. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.09.005.
20. *Song Chen, Shu-qiang Guo, Lan Jiang, Yu-ling Xu, Weizhong Ding.* Thermodynamic of selective reduction of laterite ore by reducing gases. *Trans. Nonfer. Met. Soc. China.* 2015. Vol. 25. P. 3133–3138. DOI: 10.1016/S1003-6326(15)63943-7.
21. *Utigard T., Bergman R.A.* Gaseous reduction of laterite ores. *Metall. Mater. Trans. B.* 1992. Vol. 23. P. 271–275.
22. *Yang J., Zhang G., Jahanshahi S., Ostrovski O.* Reduction of a garnieritic laterite ore by CO–CO₂ gas mixtures. In: *Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry: 14-th Intern. Ferroalloys Congr. (Kiev, Ukraine, 31 May – 4 June 2015).* P. 518–527.
23. *Shiwei Zhou, Yonggang Wei, Bo Li, Hua Wang, Baozhong Ma, Chengyan Wang.* Chloridization and reduction roasting of high-magnesium low-nickel oxide ore followed by magnetic separation to enrich ferronickel concentrate. *Metall. Mater. Trans. B.* 2016. Vol. 47. P. 145–153. DOI: 10.1007/s11663-015-0478-8.
24. *Emmanuel N. Zevgolis, Charalabos Zografidis, Theodora Perraki, Eammon Devlin.* Phase transformations of nickeliferous laterites during preheating and reduction with carbon monoxide. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2010. Vol. 100. P. 133–139. DOI: 10.1007/s10973-009-0198-x.