



Оригинальная статья

УДК 669.15-198

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-205-210



ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ ИЗ ОКСИДНЫХ РАСПЛАВОВ

А. С. Вусихис¹, Л. И. Леонтьев^{1,2,3}, Е. Н. Селиванов¹,
С. В. Сергеева¹, С. Н. Тюшняков¹

¹ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

³ Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

Аннотация. Значимость исследований по восстановлению металлов из оксидных расплавов связана, в первую очередь, с пирометаллургической переработкой руд черных и цветных металлов. Так основной задачей в ходе переработки окисленных никелевых руд является повышение извлечения ценных металлов при требуемом (10 – 20 %) содержании никеля в ферроникеле и минимальном количестве примесей. С помощью методов термодинамического моделирования дана оценка показателям, достигаемым при восстановлении железа и никеля из оксидного расплава. Проведено две серии расчетов. В первой серии состав рабочего тела меняли по количеству оксидов железа и никеля при соотношении C_{FeO}/C_{NiO} , равном 10. Во второй серии при содержании C_{NiO} , равном 1,8 %, варьировали C_{FeO} для соотношений C_{FeO}/C_{NiO} от 10 до 20. Дозированное повышение количества СО в рабочем теле позволило проследить изменение составов оксидного (C_{MeO}) и металлического (C_{Me}) расплавов, а также степеней перехода никеля (φ_{Ni}) и железа (φ_{Fe}) в металлическое состояние. Корреляционные зависимости C_{NiO} , $\varphi_{Ni} = f(C_0, V_{CO})$ представлены в виде полиномов второй степени. Показатели φ_{Ni} и φ_{Fe} меняются с количеством введенного восстановителя, но мало зависят от состава исходной конденсированной фазы. На состав формируемого сплава Fe–Ni влияют содержания элементов в исходном расплаве и количество введенного восстановителя. Для сплавов характерно высокое (65 – 90 %) содержание никеля. Значение φ_{Ni} около 98 % достигнуто при количестве введенного СО около 80 м³ на 1 т расплава. При этом степень восстановления железа не превышает 5 %. При соотношении C_{FeO}/C_{NiO} , равном 10, содержание никеля в сплаве практически не зависит от содержания его оксида в исходном рудном расплаве и близко к 65 %. Увеличение C_{FeO}/C_{NiO} с 10 до 20 приводит к изменению C_{Ni} соответственно от 68,5 до 52,9 %. Полученные данные значимы для обоснования технологии переработки низкокачественных окисленных никелевых руд с выделением ферроникеля требуемого состава.

Ключевые слова: термодинамика, восстановление, никель, железо, содержание, расплав, никелевая руда

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию ИМЕТ УрО РАН.

Для цитирования: Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Тюшняков С.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из оксидных расплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 205–210. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-205-210>

Original article

THERMODYNAMIC SIMULATION OF IRON AND NICKEL REDUCTION FROM OXIDE MELTS

A. S. Vusikhis¹, L. I. Leont'ev^{1,2,3}, E. N. Selivanov¹,
S. V. Sergeeva¹, S. N. Tyushnyakov¹

¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

³ Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract. The significance of research on recovery of metals from oxide melts is primarily associated with pyrometallurgical processing of ferrous and non-ferrous metals. The main task during the processing of oxidized nickel ores is to increase the extraction of valuable metals with the required (10 – 20 %) nickel content in ferronickel and a minimum amount of impurities. The indicators achieved during the reduction of iron and nickel from oxide melt were evaluated by the thermodynamic simulation methods. Two series of calculations were carried out. In the first series, the working medium composition was changed by the amount of iron and nickel oxides at a C_{FeO}/C_{NiO} ratio equal to 10. In the second series, at a C_{NiO} content equal to 1.8 %, C_{FeO} value for C_{FeO}/C_{NiO} ratios was varied from 10 to 20. A dosed increase of CO amount in the working medium made it possible to trace the changes in compositions

of oxide (C_{MeO}) and metal (C_{Me}) melts, as well as the transition degrees of nickel (φ_{Ni}) and iron (φ_{Fe}) to the metal state. The C_{NiO} , $\varphi_{Ni} = f(C_0, V_{CO})$ correlation dependences are presented in form of the second-degree polynomials. The φ_{Ni} and φ_{Fe} indicators are changed with amount of introduced reducing agent, but it depends little on the initial condensed phase composition. The composition of the formed Fe–Ni alloy is affected by the content of elements in the initial melt and amount of the introduced reducing agent. Alloys are characterized by the high (65–90 %) nickel content. The φ_{Ni} value of about 98 % was achieved with the amount of introduced CO of about 80 m³ per ton of melt. In this case, the degree of iron reduction was no more than 5 %. When the C_{FeO}/C_{NiO} ratio is 10, the nickel content in the alloy is practically independent of the content of its oxide in the initial ore melt and is close to 65 %. An increase in the C_{FeO}/C_{NiO} ratio from 10 to 20 leads to the change in C_{Ni} from 68.5 to 52.9 %, respectively. The data obtained are significant for substantiation of the technology for processing low-quality oxidized nickel ores with the release of the required ferronickel composition.

Keywords: thermodynamics, reduction, nickel, iron, content, melt, nickel ore

Funding: The work was performed in terms of state assignment for the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Tyushnyakov S.N. Thermodynamic simulation of iron and nickel reduction from oxide melts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 205–210. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-205-210>

ВВЕДЕНИЕ

Окисленные никелевые руды Урала имеют сложный химический и фазовый состав [1–3]. Их подразделяют на четыре технологических типа: железистая, железисто-магнезиальная, магнезиальная, глиноземисто-магнезиальная. Содержание ценных компонентов в рудах колеблется в пределах, % (по массе): 0,7–1,5 Ni и 0,02–0,08 Co. Повышенное содержание оксидов магния и кобальта накладывает ряд ограничений на переработку сырья пирометаллургическими способами [4, 5]. Высокое и не стабильное содержание шлакообразующих компонентов в поступающей на переработку руде снижает эффективность применяемых процессов. Это требует оптимизации производства, новых технологических решений и способов производства ферроникеля из руд. Так электропечная технология дает возможность перерабатывать тугоплавкие и сложные по химическому и минералогическому составу руды за счет создания высокотемпературных зон и локализации процессов преобразования исходных веществ в конечные продукты [6, 7].

Изучению процесса восстановления никеля из оксидных систем, находящихся в твердом и расплавленном состоянии, посвящено большое количество работ [8–11]. В лабораторных условиях [1], в ходе обработки рудного расплава монооксидом углерода, был выделен железо-никелевый сплав с 70 % Ni. Столь высокое содержание никеля в сплаве можно пояснить малой степенью восстановления железа при барботаже расплава смесями CO–CO₂ и CO–N₂.

В настоящее время для анализа металлургических процессов широко используют методы термодинамического моделирования (ТДМ), позволяющие прогнозировать составы равновесных фаз в широких температурных интервалах, например HSC, TERRA, ИВТАН и др. [12–18]. Известна методика ТДМ, позволяющая приблизиться к реальным системам и более точно описывать процессы восстановления металлов при барботаже газом многокомпонентных оксидных расплавов [19]. Оригинальность методики состоит в том, что равновесие определяют для единичных порций газа,

вводимых в рабочее тело, а содержание оксидов восстанавливаемых металлов в каждом расчетном цикле принимают из предшествующих данных. Этот подход позволяет моделировать процессы и качественно оценить полноту протекания реакций в пирометаллургических агрегатах, использующих продувку расплава газом-восстановителем. В методологии приняты следующие допущения:

- расчет в единичном цикле ведут для системы расплав – газ;
- в ходе взаимодействия с очередной порцией газа равновесное содержание оксидов распространяется на весь объем расплава;
- металл, восстановленный в текущем цикле, в последующих расчетах не учитывают.

В зависимости от общего количества поданного восстановителя определяют следующие величины: составы оксидного расплава, газа и металла, соотношение этих продуктов, коэффициент перехода (извлечение) компонентов в металл. Ранее указанная методика была использована для оценки процессов совместного восстановления никеля и железа смесями CO–CO₂, H₂–H₂O и продуктами конверсии природного газа [19, 20] в системах, близких по составу к магнезиальным никелевым рудам. Определены закономерности изменения содержаний оксидов никеля (C_{NiO}) и железа (C_{FeO}), степеней их восстановления (φ_{Ni} и φ_{Fe}) и содержания никеля в сплаве (C_{Ni}) от количества введенного газа (V_r). Согласно полученным данным, выявлены условия, когда φ_{Fe} не превышает 5 %, а величина φ_{Ni} приближается к 100 %. Использование в качестве восстановителя монооксида углерода, водорода и их смесей с CO₂ или H₂O, а также конвертированного газа ведет к формированию металлического сплава с содержанием никеля более 70 %. Расчеты проведены применительно к рудам с соотношением C_{FeO}/C_{NiO} , равным 10, в то время как в реальных окисленных рудах Урала это соотношение колеблется в более широких пределах: от 10 до 20. Поэтому представляет значимость оценка влияния соотношения C_{FeO}/C_{NiO} на состав фаз, образованных в ходе восстановления рудных расплавов с повышенным содержанием железа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве рабочего тела (РТ) взята система $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO} - \text{NiO}$, состав которой варьировали по содержанию NiO от 1 до 2,5 %, а FeO – от 17,4 до 35,2 % (табл. 1). Массовое соотношение остальных компонентов принято постоянным: $\text{SiO}_2/\text{CaO} - 4$; $\text{SiO}_2/\text{MgO} - 20$; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 13,3$. Указанные составы и соотношения характерны для расплавов окисленных никелевых руд с флюсующей добавкой (CaO , CaCO_3). В качестве восстановителя использован монооксид углерода, вводимый порциями, эквивалентными $3,7 \text{ м}^3$ на 1 т расплава. Максимально вводимое количество восстановителя – $84 \text{ м}^3/\text{т}$.

Моделирование проведено для температуры 1773 К, обеспечивающей существование оксидной и металлической фаз в расплавленном состоянии и давлении газов 0,1 МПа. Степени восстановления железа и никеля (φ_{Fe} , φ_{Ni}) рассчитаны, как отношение их массы в металлическом состоянии (m_{Me}) к их исходному количеству ($m_{\text{Me}}^{\text{исх}}$) по уравнению

$$\varphi_{\text{Me}} = \frac{m_{\text{Me}}}{m_{\text{Me}}^{\text{исх}}} \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально состав рабочих тел 1–3 (табл. 1) принят постоянным по соотношению $C_{\text{FeO}}/C_{\text{NiO}}$ в оксидном расплаве, равном 9,6. Исходное содержание оксида никеля (C_{NiO}) меняется от 1,0 до 2,5 %, а оксида железа (C_{FeO}) – от 9,6 до 23,8 %. Увеличение количества введенного в расплав восстановителя (V_{CO}) сопровождается снижением значений C_{NiO} , в то время как показатели C_{FeO} практически не меняются (рис. 1). Вне зависимости от исходных содержаний оксидов никеля и железа в РТ, степени восстановления φ_{Ni} и φ_{Fe} , а также содержания никеля (C_{Ni}) и железа (C_{Fe}) в ферроникеле близки при равных количествах введенного восстановителя.

Исходя из полученных данных, первоначально значения C_{NiO} интенсивно уменьшаются, а величина φ_{Ni} достигает 80 % при V_{CO} около $40 \text{ м}^3/\text{т}$.

Далее степень восстановления никеля монотонно приближается к 100 %, что характерно для значений V_{CO} около $80 \text{ м}^3/\text{т}$. Степень восстановления железа линейно увеличивается с количеством введенного CO , и приближается к 5 % в рассматриваемом интервале величин V_{CO} .

Значения C_{Ni} снижаются по ходу восстановления от 90 до 66 %. Это связано с тем, что константа равновесия реакции восстановления никеля на два порядка выше, чем железа. По мере уменьшения содержания оксида никеля в расплаве, возрастает доля железа, восстанавливаемого единичной порцией CO . Общее количество восстановленных металлов (сумма m_{Fe} и m_{Ni}) зависит от исходного содержания восстанавливаемых оксидов в расплаве. Для разделения оксидного

Таблица 1

Составы рабочих тел для термодинамического моделирования

Table 1. Compositions of working media for thermodynamic simulation

Показатель	Рабочее тело					
	1	2	3	4	5	6
C_{NiO} , %	2,5	1,8	1,0	1,8	1,8	1,8
C_{FeO} , %	23,8	17,4	9,6	35,2	26,3	17,4
$C_{\text{FeO}}/C_{\text{NiO}}$	9,6	9,6	9,6	19,6	14,5	9,6

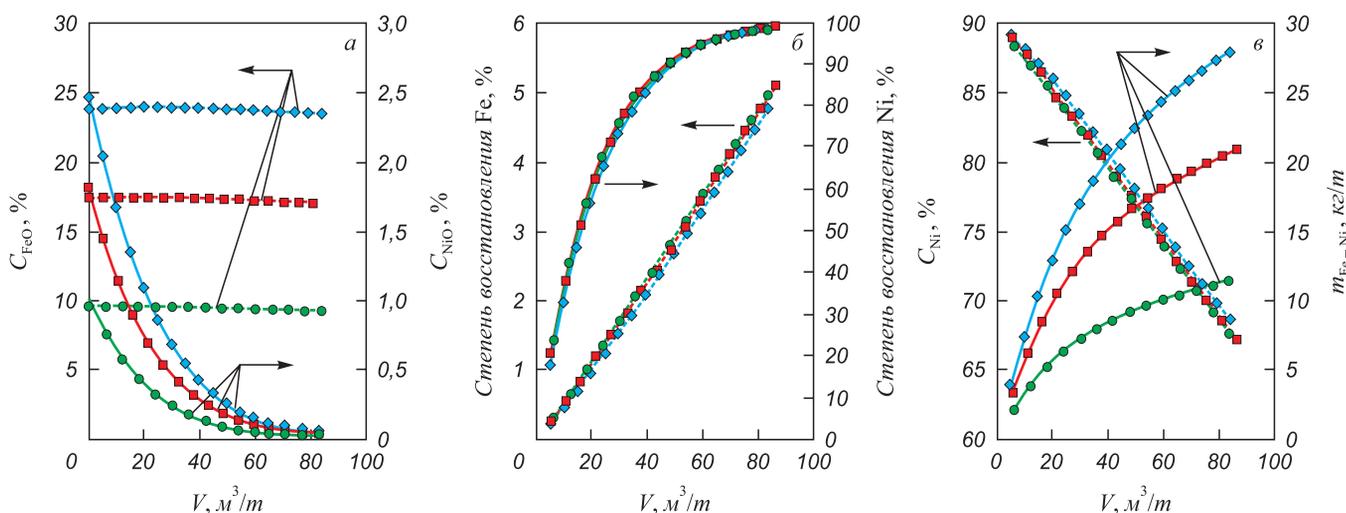


Рис. 1. Изменение значений C_{NiO} и C_{FeO} (а), φ_{Ni} и φ_{Fe} (б), C_{Ni} и массы металла (е) от количества монооксида углерода (V_{CO}), введенного в оксидный расплав (составы 1 (♦), 2 (■), 3 (●) см. табл. 1)

Fig. 1. Change in the values of C_{NiO} and C_{FeO} (a), φ_{Ni} and φ_{Fe} (b), C_{Ni} and the mass of metal (e) as a function of amount of carbon monoxide (V_{CO}) introduced into the oxide melt: compositions 1 (♦), 2 (■), 3 (●) in Table 1

расплава и металла важна такая величина, как кратность шлака, определяемая по отношению масс оксидного расплава и восстановленного металла. Во всех рассмотренных вариантах РТ эта величина составляет не менее 30.

Такие значения указывают на необходимость принятия мер по коагуляции частиц металла, что достигают интенсивным барботажем расплава, обеспечивающим флотацию металла на поверхность шлака, его коалесценцию и осаждение. Функциональные зависимости, связывающие C_{NiO} ($R^2 = 0,895$) и φ_{Ni} ($R^2 = 0,984$) с количеством введенного восстановителя и исходным составом расплава (1773 К), имеют вид:

$$C_{NiO} = 1,20 + 0,23C_0 + 0,018C_0^2 - 4,93 \cdot 10^{-2}V_{CO} + 3,65 \cdot 10^{-4}V_{CO}^2; \quad (2)$$

$$\varphi_{Ni} = 8,15 + 0,71C_0 - 0,507C_0^2 + 2,75V_{CO} - 2,06 \cdot 10^{-2}V_{CO}^2. \quad (3)$$

Составы рабочих тел 4 – 6 (табл. 1) имеют содержание оксида никеля (C_{NiO}) в РТ, равное 1,8 %, в то время как величина C_{FeO} составляет 17,4; 26,3; 35,2 %. Для этих составов значение C_{NiO} (рис. 2) монотонно уменьшается с количеством введенного монооксида углерода и достигает 0,033 %. Для таких значений V_{CO} величина φ_{Fe} не превышает 5 %. Количество восстановленного металла и доля никеля в ферроникеле зависят от C_{FeO} . Для РТ с повышенными значениями C_{FeO} величины C_{Ni} имеют меньшие значения. Функциональные зависимости, связывающие C_{NiO} ($R^2 = 0,987$) и φ_{Ni} ($R^2 = 0,986$) с количеством введенного восстановителя и исходным составом расплава (1773 К), имеют вид:

$$C_{NiO} = 8,67 - 7,58C_0 + 2,06C_0^2 - 5,17 \cdot 10^{-2}V_{CO} + 3,99 \cdot 10^{-4}V_{CO}^2; \quad (4)$$

$$\varphi_{Ni} = -382,9 + 407,9C_0 - 106,4C_0^2 + 2,84V_{CO} - 2,20 \cdot 10^{-2}V_{CO}^2. \quad (5)$$

Достигнутые в заключительном цикле расчетов показатели (табл. 2), показывают на то, что монооксид углерода как восстановитель обеспечивает выделение ферроникеля с высокими значениями C_{Ni} и φ_{Ni} , в то время как значения C_{Fe} и φ_{Fe} остаются на низком уровне.

Таким образом, уменьшение исходного содержания оксида никеля в РТ симбатно меняет массу ферроникеля. Значения C_{Ni} в сплаве уменьшаются до 70 % по ходу восстановления. По мере уменьшения значений C_{NiO} в оксидном расплаве незначительно интенсифи-

Таблица 2

Результаты термодинамического моделирования (завершающий цикл расчетов)

Table 2. Results of thermodynamic simulation (the final circle of calculations)

Показатель	Рабочее тело					
	1	2	3	4	5	6
$V_{CO}, \text{ м}^3/\text{т}$	83,9	81,1	83,9	80,0	81,9	81,1
$C_{NiO}, \%$	0,041	0,030	0,017	0,033	0,031	0,040
$C_{FeO}, \%$	23,5	17,0	9,3	34,8	25,8	17,0
$C_{Ni}, \%$	68,6	68,5	67,7	52,9	59,4	68,5
$\varphi_{Ni}, \%$	98,4	98,2	98,5	98,3	98,4	98,2
$\varphi_{Fe}, \%$	4,75	4,75	4,96	4,60	4,72	4,75
Кратность шлака	34,5	47,7	85,9	36,0	40,9	47,7

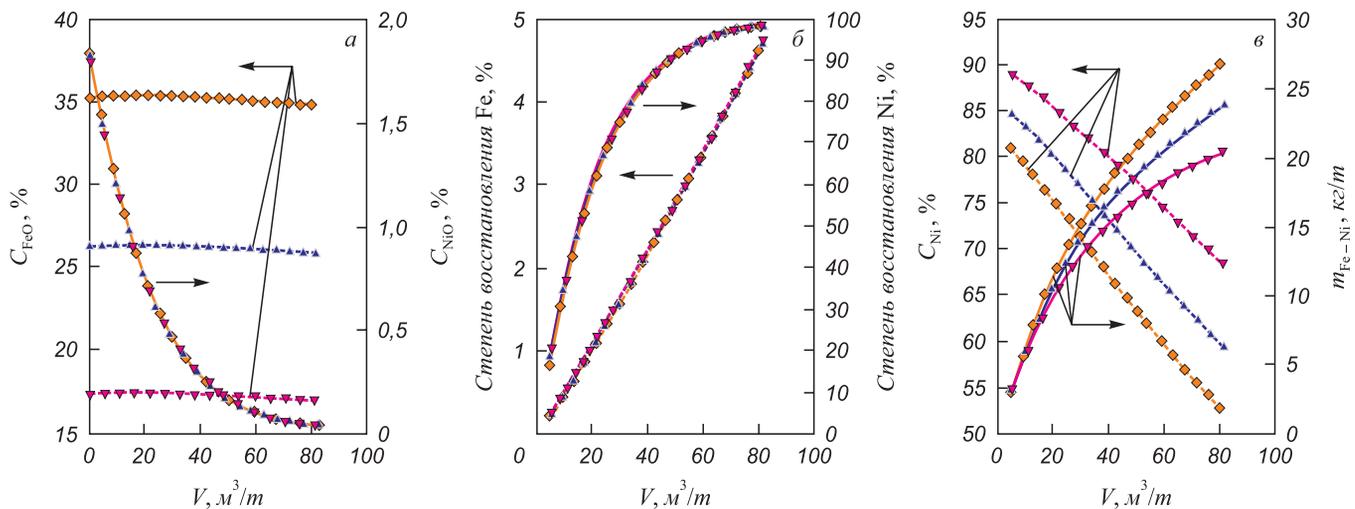


Рис. 2. Изменение значений C_{NiO} и C_{FeO} (а), φ_{Ni} и φ_{Fe} (б), C_{Ni} и массы металла (в) от количества монооксида углерода (V_{CO}), введенного в оксидный расплав (составы 4 (♦), 5 (▲), 6 (▼) см. табл. 1)

Fig. 2. Change in the values of C_{NiO} and C_{FeO} (a), φ_{Ni} and φ_{Fe} (b), C_{Ni} and the mass of metal (c) as a function of amount of carbon monoxide (V_{CO}) introduced into the oxide melt: compositions 4 (♦), 5 (▲), 6 (▼) in Table 1

цируется восстановление железа. Величины C_{NiO} и C_{FeO} в исходном РТ определяют количество восстановителя, необходимого для полного перевода никеля в металлическое состояние.

Выводы

Методами термодинамического моделирования проведен анализ изменения состава расплава окисленной никелевой руды по ходу восстановления монооксидом углерода. Дробное введение СО в рабочее тело позволило оценить основные параметры процесса, вплоть до

достижения степени восстановления никеля 98 %. Соотношение C_{FeO}/C_{NiO} в оксидном расплаве влияет на степень восстановления металлов и состав формируемого ферроникеля. При постоянном соотношении C_{FeO}/C_{NiO} , но увеличении количества этих оксидов в РТ, значения C_{Ni} в ферросплаве не меняются для выбранного V_{CO} . Увеличение соотношения C_{FeO}/C_{NiO} при постоянном содержании оксида никеля в исходном расплаве приводит к снижению C_{Ni} в формируемом ферросплаве.

Полученные данные полезны при обосновании барботажной обработки оксидных расплавов с выделением цветных металлов в виде ферросплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. М.: Metallurgiya, 1997. 432 с.
2. Бугельский Ю.Ю., Витовская И.В., Никитина А.П. Экзогенные рудообразующие системы коры выветривания. М.: Наука, 1990. 244 с.
3. Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарев А.А. Общая минералогия. М.: Академия, 2008. 416 с.
4. 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. № 5. С. 46–50.
5. Сорокин Е.М., Астахова Ю.М., Быстров И.Г., Иванова М.В. и др. Минералого-технологические особенности железных руд Серовского месторождения // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2015. № 1. С. 18–23.
6. Пахомов Р.А., Старых Р.В. Предварительное восстановление окисленных никелевых руд // Металлы. 2014. № 6. С. 3–11.
7. Selivanov E.N., Sergeeva S.V. Prospects for the ferronickel production development from the Urals oxidized nickel ores // *KnE Materials Science*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 77–91. <http://doi.org/10.18502/kms.v5i1.3954>
8. Chen J., Hayes P.C. Mechanisms and kinetics of reduction of solid NiO in CO/CO₂ and CO/Ar gas mixtures // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019. Vol. 50B. P. 2623–2635. <http://doi.org/10.1007/s11663-019-01662-5>
9. Antola O., Holappa L., Paschen P. Nickel ore reduction by hydrogen and carbon monoxide containing gases // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1995. Vol. 15. No. 1–4. P. 169–179. <http://doi.org/10.1080/08827509508914195>
10. Liu M., Liu X., Guo E., Chen P., Yuan Q. Novel process of ferrometallic nickel production from nickel laterite by semi-molten state reduction // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. No. 8. P. 1749–1754. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1749>
11. Wang X., Sun T., Chen C., Hu T. Current studies of treating processes for nickel laterite ores // 2nd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2017). P. 139–152.
12. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamic of the reduction roasting of nickeliferous laterite ore // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2016. Vol. 4. P. 320–346. <http://doi.org/10.4236/jmmce.2016.46028>
13. Pickles C.A., Forster J., Elliott R. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 65. P. 33–40. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.006>
14. Rhamdhani M., Hayes P., Jak E. Nickel laterite. Part 2 – Thermodynamic analysis of phase transformations occurring during
1. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pyrometallurgical Processing of Complex Ores*. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.).
2. Bugel'skii Yu.Yu., Vitovskaya I.V., Nikitina A.P. *Exogenous Ore-Forming Systems of Weathering Crust*. Moscow: Nauka, 1990, 244 p. (In Russ.).
3. Bulakh A.G., Krivovichev V.G., Zolotarev A.A. *General Mineralogy*. Moscow: Akademiya, 2008, 416 p. (In Russ.).
4. Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Udоеva L.Yu., Pankratov A.A. Distribution of nickel by phase components of oxidized nickel ore of the Serovskoye deposit. *Obogashchenie rud*. 2011, no. 5, pp. 46–50. (In Russ.).
5. Sorokin E.M., Astakhova Yu.M., Bystrov I.G., Ivanova M.V., etc. Mineralogical and technological features of iron ores of the Serovskoye deposit. *Vestnik Instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN*. 2015, no. 1, pp. 18–23. (In Russ.).
6. Pakhomov R.A., Starykh R.V. Preliminary reduction of oxidized nickel ores. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, no. 11, pp. 853–860.
7. Selivanov E.N., Sergeeva S.V. Prospects for the ferronickel production development from the Urals oxidized nickel ores. *KnE Materials Science*. 2019, vol. 5, no. 1, pp. 77–91. <http://doi.org/10.18502/kms.v5i1.3954>
8. Chen J., Hayes P.C. Mechanisms and kinetics of reduction of solid NiO in CO/CO₂ and CO/Ar gas mixtures. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019, vol. 50, no. 6, pp. 2623–2635. <http://doi.org/10.1007/s11663-019-01662-5>
9. Antola O., Holappa L., Paschen P. Nickel ore reduction by hydrogen and carbon monoxide containing gases. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1995, vol. 15, no. 1–4, pp. 169–179. <http://doi.org/10.1080/08827509508914195>
10. Liu M., Liu X., Guo E., Chen P., Yuan Q. Novel process of ferrometallic nickel production from nickel laterite by semi-molten state reduction. *ISIJ International*. 2014, vol. 54, no. 8, pp. 1749–1754. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1749>
11. Wang X., Sun T., Chen C., Hu T. Current studies of treating processes for nickel laterite ores. In: *2nd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2017)*, pp. 139–152.
12. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2016, vol. 4, pp. 320–346. <http://doi.org/10.4236/jmmce.2016.46028>
13. Pickles C.A., Forster J., Elliott R. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*. 2014, vol. 65, pp. 33–40. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.006>
14. Rhamdhani M.A., Hayes P.C., Jak E. Nickel laterite. Part 2 – Thermodynamic analysis of phase transformations occurring during reduction

- reduction roasting // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2009. Vol. 118. P. 146–155. <http://doi.org/10.1179/174328509X431409>
15. Luoma R. A thermodynamic analysis of the system Fe–Ni–O // CALPHAD. 1995. Vol. 19. No. 3. P. 279–295. [http://doi.org/10.1016/0364-5916\(95\)00026-B](http://doi.org/10.1016/0364-5916(95)00026-B)
 16. Chen S., Guo S., Jiang L., Xu Y., Ding W. Thermodynamic of selective reduction of laterite ore by reducing gases // Transactions of Non-ferrous Metals Society of China (English Edition). 2015. Vol. 25. No. 9. P. 3133–3138. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63943-7](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63943-7)
 17. Prostakova V., Chen J., Jak E., Decterov S.A. Experimental study and thermodynamic modeling of the MgO–NiO–SiO₂ system // Journal of Chemical Thermodynamics. 2013. Vol. 62. P. 43–55. <http://doi.org/10.1016/j.jct.2013.02.019>
 18. Prostakova V., Chen J., Jak E., Decterov S.A. Experimental study and thermodynamic optimization of the CaO–NiO, MgO–NiO and NiO–SiO₂ systems // CALPHAD. 2012. Vol. 37. P. 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.calphad.2011.12.009>
 19. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer // Third Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel, 2004. P. 1_72–77.
 20. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer // Proc. of European Metallurgical Conf. Emc2005, 18-21 September, 2005, Dresden, Germany. Vol. 3. P. 1349–1358.
 - roasting. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2009, vol. 118, pp. 146–155. <http://doi.org/10.1179/174328509X431409>
 15. Luoma R. A thermodynamic analysis of the system Fe–Ni–O. CALPHAD. 1995, vol. 19, no. 3, pp. 279–295. [http://doi.org/10.1016/0364-5916\(95\)00026-B](http://doi.org/10.1016/0364-5916(95)00026-B)
 16. Chen S., Guo S., Jiang L., Xu Y., Ding W. Thermodynamic of selective reduction of laterite ore by reducing gases. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2015, vol. 25, no. 9, pp. 3133–3138. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63943-7](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63943-7)
 17. Prostakova V., Chen J., Jak E., Decterov S.A. Experimental study and thermodynamic modeling of the MgO–NiO–SiO₂ system. Journal of Chemical Thermodynamics. 2013, vol. 62, pp. 43–55. <http://doi.org/10.1016/j.jct.2013.02.019>
 18. Prostakova V., Chen J., Jak E., Decterov S.A. Experimental study and thermodynamic optimization of the CaO–NiO, MgO–NiO and NiO–SiO₂ systems. CALPHAD. 2012, vol. 37, pp. 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.calphad.2011.12.009>
 19. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer. In: Third Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel, 2004, pp. 1_72–77.
 20. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer. In: Proc. of European Metallurgical Conf. Emc2005, 18-21 September, 2005, Dresden, Germany, vol. 3, pp. 1349–1358.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Семенович Вусихис, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик, советник, Президиум РАН, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-4343-914X

Евгений Николаевич Селиванов, д.т.н., заведующий лабораторией пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН

Светлана Владимировна Сергеева, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН

Станислав Николаевич Тюшняков, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-0864-0462

Aleksandr S. Vusikhis, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, UB RAS

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

Leopold I. Leont'ev, Academician, Adviser, Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS", Chief Researcher, Institute of Metallurgy, UB RAS

ORCID: 0000-0002-4343-914X

Evgenii N. Selivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, UB RAS

Svetlana V. Sergeeva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, UB RAS

Stanislav N. Tyushnyakov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, UB RAS

ORCID: 0000-0002-0864-0462

Поступила в редакцию 16.04.2020

После доработки 23.06.2020

Принята к публикации 01.03.2021

Received 16.04.2020

Revised 23.06.2020

Accepted 01.03.2021