



УДК 669.15-198

DOI 10.17073/0368-0797-2021-1-46-51



## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАСПЛАВОВ ВЫСОКОЖЕЛЕЗИСТОЙ ОКИСЛЕННОЙ НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ

А. С. Вусихис<sup>1</sup>, Е. Н. Селиванов<sup>1</sup>, С. В. Сергеева<sup>1</sup>, Л. И. Леонтьев<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup> Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, 4)

<sup>3</sup> Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 32а)

**Аннотация.** Ферроникель, получаемый в настоящее время из окисленных никелевых руд в различных агрегатах, содержит 5 – 20 % Ni. Экспериментально показана возможность получения богатого (около 70 % Ni) ферроникеля из расплава силикатной никелевой руды в ходе ее обработки газом-восстановителем. Используя методику термодинамического моделирования металлургических процессов, адаптированную к открытым системам, рассмотрены особенности восстановления высокожелезистой разновидности никелевой руды Серовского месторождения монооксидом углерода. Для расчетов принят следующий состав оксидного расплава, % (по массе): 60,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,4 NiO; 0,14 CoO; 5,8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 17,0 SiO<sub>2</sub>; 4,2 MgO; 11,1 CaO. Моделирование вели при давлении 0,1 МПа, количестве монооксида углерода в единичной порции 10,6 дм<sup>3</sup>/кг и температурах 1673, 1723, 1773 К. В ходе расчетов выявлены зависимости, связывающие содержания оксидов никеля (C<sub>NiO</sub>), железа (C<sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>, C<sub>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></sub>, C<sub>FeO</sub>) и кобальта (C<sub>CoO</sub>) в оксидном расплаве и металлов в сплаве (C<sub>Ni</sub>, C<sub>Fe</sub>, C<sub>Co</sub>), а также степени их перехода в металлическое состояние (φ<sub>Ni</sub>, φ<sub>Fe</sub>, φ<sub>Co</sub>) с количеством введенного газа. Определены содержания металлов в единичной порции восстановленного металла. В интервале температур 1673 – 1773 К и количестве введенного СО, равном 190 дм<sup>3</sup>/кг, содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в оксидном расплаве составляет 0,17 – 0,12 %, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – 1,77 – 1,05 %, FeO – 55,6 – 56,5 %, NiO – 0,026 – 0,037 %, CoO – 0,061 – 0,068 %. При степени восстановления никеля 98 % степень восстановления железа составляет 5 %, а кобальта – 56 – 61 %. В сплаве, сформированном из восстановленных металлов, содержится около 30 % никеля, 63 – 65 % железа и 2 % кобальта. Таким образом, показана возможность при определенных условиях селективного восстановления никеля и кобальта. Полученные данные значимы для обоснования параметров технологических процессов производства ферроникеля из высокожелезистых окисленных никелевых руд.

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

**Финансирование.** Работа выполнена по государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий.

**Для цитирования:** Вусихис А.С., Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Леонтьев Л.И. Термодинамическое моделирование восстановления металлов из расплавов высокожелезистой окисленной никелевой руды // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 46–51. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-46-51>

## THERMODYNAMIC MODELING OF METAL REDUCTION FROM MELTS OF HIGH-IRON OXIDIZED NICKEL ORE

A. S. Vusikhis<sup>1</sup>, E. N. Selivanov<sup>1</sup>, S. V. Sergeeva<sup>1</sup>, L. I. Leont'ev<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Metallurgy, UB RAS (101, Amundsen str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow 119049, Russian Federation)

<sup>3</sup> 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.** Ferronickel, currently obtained from oxidized nickel ores in various aggregates, contains 5 – 20 % Ni. The possibility of obtaining rich (about 70 % Ni) ferronickel from a melt of silicate-nickel ore during its treatment with reducing gas has been experimentally shown. Features of reduction of high-iron variety of nickel ore from the Serovskoye deposit with carbon monoxide are considered using the methodology of metallurgical processes thermodynamic modeling, adapted to open systems. For the calculations, the following composition of the oxide melt was adopted, mass. %: 60,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,4 NiO; 0,14 CoO; 5,8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 17,0 SiO<sub>2</sub>; 4,2 MgO; 11,1 CaO. The simulation was carried out at a pressure of 0.1 MPa, at amount of carbon monoxide in one portion – 10.6 dm<sup>3</sup>/kg and at temperature of 1673, 1723, 1773 K. During the calculations, dependencies were found that bind the content of nickel (C<sub>NiO</sub>), iron (C<sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>, C<sub>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></sub>, C<sub>FeO</sub>) and cobalt (C<sub>CoO</sub>) oxides in the oxide melt and metals in the alloy (C<sub>Ni</sub>, C<sub>Fe</sub>, C<sub>Co</sub>) as well as the degree of their transition to the metallic state (φ<sub>Ni</sub>, φ<sub>Fe</sub>, φ<sub>Co</sub>) with the amount of introduced gas. Contents of the components in a single portion of the reduced metal were determined. In the temperature range of 1673 – 1773 K and the introduced amount of CO equal to 190 dm<sup>3</sup>/kg, the content of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the oxide melt is 0,17 – 0,12 %; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – 1,77 – 1,05 %; FeO – 55,6 – 56,5 %; NiO – 0,026 – 0,037 % and CoO – 0,061 – 0,068 %. With a degree of nickel reduction of 98 %, degree of iron reduction is 5 %, and degree of cobalt reduction is 56 – 61 %. An alloy formed from reduced metals contains about 30 % Ni, 63 – 65 % Fe and 2 % Co. Thus, the possibility of selective reduction of nickel and cobalt under certain conditions is

shown. The data obtained are significant for substantiating the parameters of technological processes for the production of ferronickel from high-iron oxidized nickel ores.

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

**Funding.** The work was performed under the State Assignment of Institute of Metallurgy, UB RAS within the framework of the Program of Fundamental Research of State Academies.

**For citation:** Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Leont'ev L.I. Thermodynamic modeling of metal reduction from melts of high-iron oxidized nickel ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-46-51>

Известен ряд методов переработки окисленных никелевых руд с получением никелевого чугуна ( $Ni < 5\%$ ) [1–5] и ферроникеля (5–20 % Ni) [6–10]. Технологии на базе этих процессов имеют общий недостаток – низкое содержание никеля в образуемом ферросплаве, что связано с практически полным восстановлением как никеля, так и железа.

В последнее время для переработки руд используют барботажные процессы [11–14], обеспечивающие регламентированное восстановление металлов и варьирование содержания никеля в ферроникеле в более широких пределах. Экспериментально показана [15] возможность получения ферроникеля с 70 % Ni из расплава силикатной никелевой руды в ходе ее обработки газом-восстановителем.

Методы термодинамического моделирования (ТДМ) широко используют для решения теоретических и прикладных задач совершенствования металлургических технологий [16–20]. Однако в большинстве случаев они предназначены для анализа равновесия в замкнутых системах. По заданному составу рабочего тела (РТ) проводят расчет равновесных фаз, в том числе с введением определенного количества газа-восстановителя. Известна [21, 22] методология ТДМ, позволяющая приблизить расчеты к реальным системам и обосновать процессы восстановления металлов при барботаже газом многокомпонентных оксидных расплавов. Оригинальность методологии состоит в том, что равновесие определяют путем последовательных приближений для единичных порций газа, вводимых в рабочее тело. При этом 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, обеспечивающих барботаж расплава газом-восстановителем. В методологии приняты допущения, касающиеся достижения равновесия по всему объему расплава, последовательному изменению состава, полному выводу газа и восстановленного металла из РТ. В ходе расчетов определяют, как функцию от количества введенного восстановителя, составы оксидного расплава, газа и металла, соотношение продуктов, степень восстановления компонентов до металлического состояния. Ранее эта методика применялась для моделирования процессов восстановления металлов из расплавов магниальной

окисленной никелевой руды, где в качестве газа-восстановителя использовали смеси  $CO-CO_2$ ,  $H_2-H_2O$  и продукты конверсии природного газа.

Цель настоящего исследования состоит в моделировании процесса восстановления монооксидом углерода никеля, кобальта и железа из расплава высокожелезистой разновидности никелевой руды.

В связи с тем, что никелевые руды имеет высокую температуру плавления [23], для ее снижения вводят флюсоующие добавки (оксид кальция). Поэтому для расчетов принят следующий состав оксидного расплава, % (по массе): 60,4  $Fe_2O_3$ ; 1,4 NiO; 0,14 CoO; 5,8  $Al_2O_3$ ; 17,0  $SiO_2$ ; 4,2 MgO; 11,1 CaO. Моделирование проводилось при давлении 0,1 МПа, количестве монооксида углерода в единичной порции 10,6  $dm^3/kg$  и температурах 1673, 1723, 1773 К. В ходе расчетов выявлены изменения в содержании оксидов никеля ( $C_{NiO}$ ), железа ( $C_{Fe_2O_3}$ ,  $C_{Fe_3O_4}$ ,  $C_{FeO}$ ) и кобальта ( $C_{CoO}$ ) в оксидном расплаве и металлов в сплаве ( $C_{Ni}$ ,  $C_{Fe}$ ,  $C_{Co}$ ), а также степени их перехода в металлическое состояние ( $\varphi_{Ni}$ ,  $\varphi_{Fe}$ ,  $\varphi_{Co}$ ), определяемые как отношение количества восстановленного металла к исходному  $\left( \varphi_{Me} = \frac{m_{Me}}{m_{исх}} \right)$ , с количеством введенного монооксида углерода.

По изменению содержания в расплаве оксидов железа, никеля и кобальта (рис. 1) процесс восстановления можно разделить на две стадии. Первоначально происходит взаимодействие монооксида углерода с оксидами железа: содержание  $Fe_2O_3$  снижается, FeO повышается, а  $Fe_3O_4$  проходит через максимум. До завершения перехода  $Fe_2O_3$  в  $Fe_3O_4$  и FeO содержание оксидов цветных металлов практически не меняется. Некоторое увеличение их содержания связано с уменьшением массы оксидного расплава.

Вторая стадия процесса характеризуется формированием металлической фазы. Содержание оксида никеля уменьшается почти до нуля при изменении количества введенного CO ( $V$ ) от 100 до 150  $dm^3/kg$ . Доля оксида кобальта в этом промежутке значений  $V$  снижается почти на 50 %. Значения величин  $C_{FeO}$  остаются практически неизменными. Это позволяет констатировать следующую последовательность восстановления металлов из низших окислов: Ni, Co, Fe.

Переход цветных металлов и железа в металлическое состояние ( $\varphi_{Me} > 0$ ) имеет место при значениях  $V$  свыше

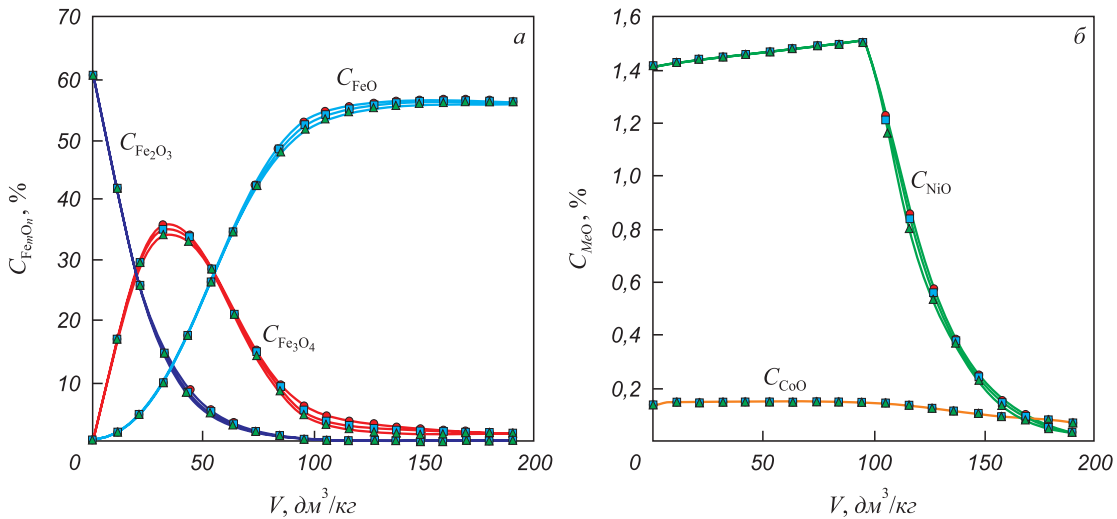


Рис. 1. Изменение состава расплава по оксидам железа ( $C_{Fe_2O_3}$ ,  $C_{Fe_3O_4}$ ,  $C_{FeO}$ ) (а) и цветных металлов ( $C_{NiO}$ ,  $C_{CoO}$ ) (б) от количества введенного СО при температурах, К:  
● – 1673; ■ – 1723; ▲ – 1773

Fig. 1. Change in the melt composition in iron oxides ( $C_{Fe_2O_3}$ ,  $C_{Fe_3O_4}$ ,  $C_{FeO}$ ) (а) and non-ferrous metals ( $C_{NiO}$ ,  $C_{CoO}$ ) (б) from the amount of CO introduced at temperatures, K:  
● – 1673; ■ – 1723; ▲ – 1773

100  $dm^3/kg$  (рис. 2). Из наклона линий на прямолинейных участках следует, что интенсивность повышения металлизации на единицу введенного восстановителя (СО) возрастает в последовательности  $\frac{\varphi_{Ni}}{V} > \frac{\varphi_{Co}}{V} > \frac{\varphi_{Fe}}{V}$ . Введение в оксидный расплав монооксида углерода в количестве 180  $dm^3/kg$  позволяет достичь значений  $\varphi_{Ni}$  около 98 %, в то время как для кобальта эта величина составляет 60 %, а для железа около 5 %. Полученные

данные позволяют судить о возможностях селективного восстановления никеля из оксидного расплава. Имея ввиду изменение состава оксидного расплава от количества введенного монооксида углерода, следует предполагать и вариабельность состава образуемого сплава (рис. 3). По мере уменьшения значений  $C_{NiO}$  в РТ происходит снижение  $C_{Ni}$  в суммарном объеме металла от 70 % для начального цикла расчетов до 32 % при значениях  $V$  около 190  $dm^3/kg$ .

Следует отметить, что содержание никеля в ферроникеле единичного цикла расчетов меняется в большей степени. Если первоначально значения единичного цикла и суммарного металла близки между собой, то в конце существенно отличаются. Так для расплава с содержанием оксида никеля около 0,03 % значения  $C_{Ni}^i$  составляют 4 – 6 %. Соотношения  $\frac{C_{Ni}}{C_{Co}}$  и  $\frac{C_{Ni}^i}{C_{Co}^i}$  на начальной и заключительной стадии восстановления металлов также существенно отличаются. Если в начальный период это соотношение превышает 50 единиц, что близко к техническим условиям на товарный ферроникель, то на завершающей стадии это отношение в ферроникеле составляет 2 – 3.

Увеличение количества вводимого в РТ монооксида углерода сопровождается падением качества образуемого ферроникеля (см. таблицу). Это связано с тем, что первоначально протекает преимущественно восстановление никеля, содержание его в формируемом сплаве много больше, чем железа и кобальта. По ходу восстановления металлов происходит уменьшение доли оксида никеля в расплаве, а кобальта и железа остается практически на том же уровне. Это

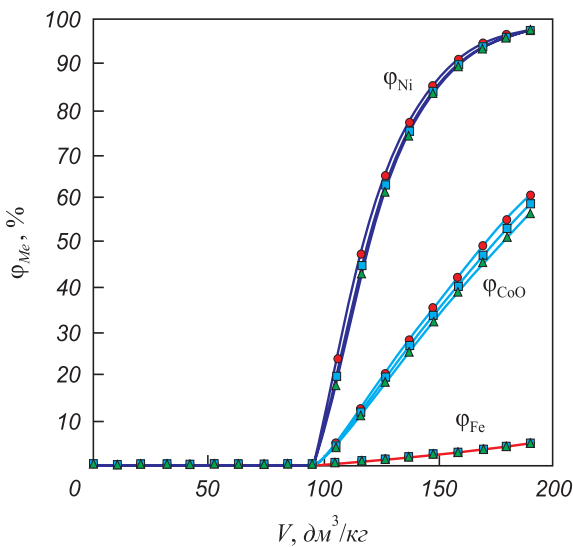


Рис. 2. Изменение степени перехода в металлическое состояние Ni, Fe, Co от расхода СО при температурах, К:  
● – 1673; ■ – 1723; ▲ – 1773

Fig. 2. Change in the degree of transition to metallic state of Ni, Fe, Co from CO consumption at temperatures, K:  
● – 1673; ■ – 1723; ▲ – 1773

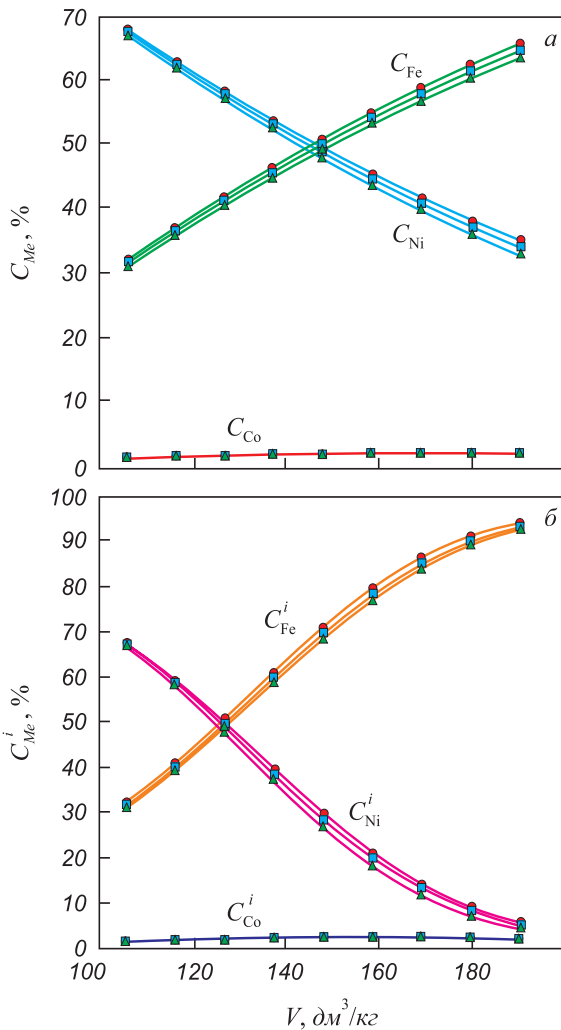


Рис. 3. Изменение содержаний никеля ( $C_{Ni}$ ), железа ( $C_{Fe}$ ), кобальта ( $C_{Co}$ ) в ферроникеле от количества введенного CO для обобщенного суммарного металла (а) и в единичных циклах (б) при температурах, К:  
 ● – 1673; ■ – 1723; ▲ – 1773

Fig. 3. Change in the contents of nickel ( $C_{Ni}$ ), iron ( $C_{Fe}$ ), and cobalt ( $C_{Co}$ ) in ferronickel from the amount of added CO for the generalized total metal (a) and in unit cycles (б) at temperatures, K:  
 ● – 1673; ■ – 1723; ▲ – 1773

приводит к их преимущественному восстановлению на последующих этапах и увеличению значений  $C_{Fe}$  и  $C_{Co}$  в сплаве. К заключительному циклу расчетов ( $V = 90 \text{ dm}^3/\text{kg}$ ) степень восстановления никеля составила 98,4, 98,0, 97,6 % для температур 1673, 1723, 1773 К соответственно.

Повышение температуры несколько снижает полноту восстановления всех металлов. Поэтому при равных значениях количества введенного CO, повышенной температуре соответствуют меньшие степени восстановления металлов ( $\varphi_{Ni}$ ,  $\varphi_{Fe}$ ,  $\varphi_{Co}$ ). Сравнение полученных данных с данными работ [21, 22] показали, что соотношение  $\frac{C_{FeO}}{C_{NiO}}$  в оксидном расплаве влияет на степень восстановления металлов и состав формируемого

**Параметры системы, отвечающие заключительному циклу расчетов**

**System parameters corresponding to the final calculations cycle**

$T$ , К	1673	1723	1773
$V$ , $\text{dm}^3/\text{kg}$	190	190	190
Содержание в оксидном расплаве, % (по массе)			
$C_{Fe_2O_3}$	0,17	0,14	0,12
$C_{Fe_3O_4}$	1,77	1,36	1,05
$C_{FeO}$	55,7	56,1	56,5
$C_{NiO}$	0,026	0,033	0,037
$C_{CoO}$	0,062	0,065	0,069
Содержание в газе, % (об.)			
CO	86,9	87,7	88,5
CO <sub>2</sub>	13,1	12,3	11,5
Кратность шлака	27	28	29
Содержание в обобщенном (суммарном) ферроникеле, % (по массе)			
$C_{Ni}$	32,8	33,9	35,0
$C_{Fe}$	65,2	64,1	63,0
$C_{Co}$	2,03	2,02	2,02
Степень перехода в металлическое состояние, %			
$\varphi_{Ni}$	98,4	98,0	97,6
$\varphi_{Fe}$	5,16	4,89	4,64
$\varphi_{Co}$	60,9	58,5	56,3
Содержание в ферроникеле единичного цикла, % (по массе)			
$C_{Ni}^i$	4,2	5,2	5,9
$C_{Fe}^i$	93,9	92,9	92,4
$C_{Co}^i$	1,9	2,0	2,0

ферроникеля. Увеличение этого соотношения приводит к снижению доли никеля в сплаве.

Во взятых для анализа рабочего тела интервалах температур и количествах газа, содержание кобальта в сплаве меняется в пределах 1,5 – 2,3 %, что не влияет на агрегатное состояние сплава [24]. При температуре 1673 К металл, восстановленный единичной порцией газа, будет находиться в твердом состоянии вне зависимости от содержания в нем никеля. Около 1723 К расплавленным будет металл, содержащий более 40 % никеля. Увеличение температуры до 1773 °С приводит к тому, что в твердом состоянии будет находиться только металл, образованный в последних циклах и содержащий менее 10 % никеля.

Полученные данные позволяют обосновать технологические параметры процесса восстановления рудного расплава: температура – несколько выше ликвидуса для соответствующего сплава. Эффективность использования восстановительной и селективно-восстанови-

тельной способности газа уменьшается с температурой, в связи с чем значительный перегрев расплава не целесообразен. Первоначальное восстановление высших оксидов железа до двухвалентного состояния целесообразно выделить в отдельный процесс. Исходя из особенностей восстановления высокожелезистых оксидных расплавов, возможна селекция по никелю, железу и кобальту.

## Выводы

Методами термодинамического моделирования выявлены особенности восстановления железа, никеля

и кобальта из многокомпонентного оксидного расплава с повышенным содержанием железа и отношением  $\frac{C_{FeO}}{C_{NiO}}$  более 43. Показана невозможность восстановления никеля и кобальта до полного перевода оксидов железа в низшее валентное состояние (FeO). Определены составы ферроникеля, сформированные при подаче единичного объема восстановителя и влияние температур на достигаемые показатели. Полученные данные использованы для обоснования параметров технологических процессов производства ферроникеля из высокожелезистых окисленных никелевых руд.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. М.: Металлургия, 1997. 432 с.
2. Yucel O., Turan A., Yildirim H. Investigation of pyrometallurgical nickel pig iron (NPI) production process from lateritic ores // 3<sup>rd</sup> Int. Symposium on High Temperature Processing, TMS (The Minerals, Metals & Material Society). 2012. P. 17–23.
3. Yildirim H., Morcali M.H., Turan A., Yucel O. Nickel pig iron production from lateritic nickel ores // 13<sup>th</sup> Int. Ferroalloys Congress, June 2013, Almaty, Kazakhstan. P. 237–244.
4. Kruger P., Silva C.A., Vieira C.B., Araujo F.G.S., Seshadri V. Relevant aspects related to production of iron nickel alloys (pig iron containing nickel) in mini blast furnaces // 12<sup>th</sup> Int. Ferroalloys Congress, Sustainable Future, June 6–9, 2010, Helsinki, Finland. P. 671–681.
5. Turan A., Yucel O., Yildirim H. Nickel pig iron (NPI) production from domestic lateritic nickel ores using induction furnace // Int. Iron & Steel Symposium, Karabuk, Turkey, April 2012. P. 337–344.
6. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнеерсон Я.М. Никель. Т. 2. М.: Наука и техника, 2001. 468 с.
7. Kotze I.J. Pilot plant production of ferronickel from nickel oxide ores and dusts in a DC arc furnace // Minerals Engineering. 2002. Vol. 15. No. 11. P. 1017–1022. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00127-9)
8. Тарасов А.В., Парецкий В.М. Современный взгляд на роль электроплавки в производстве тяжелых цветных металлов // Электromеталлургия. 2003. № 5. С. 12–23.
9. Reynolds Q.G., Jones R.T. Semi-empirical modelling of the electrical behavior of DC-arc smelting furnaces // Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. No. 6. P. 1–7.
10. Keskinilic E. Nickel laterite smelting processes and some examples of recent possible modifications to the conventional route // Metals. 2019. Vol. 9. No. 9. P. 974–990. <https://doi.org/10.3390/met9090974>
11. Ковган П.А., Абуов М.Г., Едилбаев А.И. Перспективные технологии переработки бедных окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 43–45.
12. Цымбулов Л.Б., Князев М.В., Цемехман Л.Ш., Кудабаяев Е.А., Головлев Ю.И. Анализ различных вариантов технологической схемы переработки окисленных никелевых руд на ферроникель с применением двухзонной печи Ванюкова // Цветные металлы. 2010. № 10. С. 15–21.
13. Быстров В.П., Федоров А.Н., Щелкунов В.В., Быстров С.В. Использование процесса Ванюкова для переработки окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2011. № 8–9. С. 155–158.
14. Bakker M.L., Nikolic S., Mackey P.J. ISASMELT™ TSL applications for nickel // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. No. 7. P. 610–619. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.016>
15. Крашенинников М.В., Маршук Л.А., Леонтьев Л.И. Селективное восстановление никеля из оксидного расплава // Расплавы. 1998. № 4. С. 45–48.
1. Leont'ev L.I., Vatin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pyrometallurgical Processing of Complex Ores*. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.).
2. Yucel O., Turan A., Yildirim H. Investigation of pyrometallurgical nickel pig iron (NPI) production process from lateritic ores. In: *3<sup>rd</sup> Int. Symposium on High Temperature Processing, TMS (The Minerals, Metals & Material Society)*. 2012, pp. 17–23.
3. Yildirim H., Morcali M.H., Turan A., Yucel O. Nickel pig iron production from lateritic nickel ores. In: *13<sup>th</sup> Int. Ferroalloys Congress, Almaty, Kazakhstan, June 2013*, pp. 237–244.
4. Kruger P., Silva C.A., Vieira C.B., Araujo F.G.S., Seshadri V. Relevant aspects related to production of iron nickel alloys (pig iron containing nickel) in mini blast furnaces. In: *12<sup>th</sup> Int. Ferroalloys Congress, Sustainable Future, Helsinki, Finland, June 6 – 9, 2010*, pp. 671–681.
5. Turan A., Yucel O., Yildirim H. Nickel pig iron (NPI) production from domestic lateritic nickel ores using induction furnace. In: *Int. Iron & Steel Symposium, Karabuk, Turkey, April 2012*, pp. 337–344.
6. Reznik I.D., Ermakov G.P., Shneerson Ya.M. *Nickel*. Vol. 2. Moscow: Nauka i tekhnika, 2001, 468 p. (In Russ.).
7. Kotze I.J. Pilot plant production of ferronickel from nickel oxide ores and dusts in a DC arc furnace. *Minerals Engineering*. 2002, vol. 15, no. 11, pp. 1017–1022. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00127-9)
8. Tarasov A.V., Paretskii V.M. Modern role of electric melting in production of heavy non-ferrous metals. *Elektrometallurgiya*. 2003, no. 5, pp. 12–23. (In Russ.).
9. Reynolds Q.G., Jones R.T. Semi-empirical modelling of the electrical behavior of DC-arc smelting furnaces. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004, no. 6, pp. 1–7.
10. Keskinilic E. Nickel laterite smelting processes and some examples of recent possible modifications to the conventional route. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 9, pp. 974–990. <https://doi.org/10.3390/met9090974>
11. Kovgan P.A., Abuov M.G., Edil'baev A.I. Promising technologies for processing poor oxidized nickel ores. *Tsvetnye metall*. 2008, no. 2, pp. 43–45. (In Russ.).
12. Tsybulov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., Kudabaev E.A., Golovlyov Yu.I. Analysis of various variants of processing of oxidized nickel ores into ferronickel using a two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metall*. 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
13. Bystrov V.P., Fedorov A.N., Shchelkunov V.V., Bystrov S.V. Using the Vanyukov process for processing oxidized nickel ores. *Tsvetnye metall*. 2011, no. 8-9, pp. 155–158. (In Russ.).
14. Bakker M.L., Nikolic S., Mackey P.J. ISASMELT™ TSL applications for nickel. *Minerals Engineering*. 2011, vol. 24, no. 7, pp. 610–619. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.016>
15. Krashenninnikov M.V., Marshuk L.A., Leont'ev L.I. Selective reduction of nickel from oxide melt. *Rasplavy*. 1998, no. 4, pp. 45–48. (In Russ.).

16. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Metallurgiya, 1994. 352 с.
17. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ, 2013. 96 с.
18. Pickles C.A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore // *Mineral Engineering*. 2013. Vol. 54. P. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029>
19. Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy // *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*. Oxford: Elsevier Ltd., 2014. Chapter 2.4. P. 701–838.
20. 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. No. 4. P. 320–346. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2016.46028>
21. 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 // 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel. 2004. P. 1\_72–77.
22. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interactio during reduction in bubbled layer // *European Metallurgical Conf. EMC'2005, Dresden, Germany, September 18–21, 2005*. Vol. 3. P. 1349–1358.
23. Slag Atlas. 2<sup>nd</sup> ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmdH, 1995. 616 p.
24. Raynor G.V., Rivlin V.G. Co–Fe–Ni in Phase Equilibria in Iron Ternary Alloys. London: Inst. Metals, 1988. P. 247–255.
16. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling in High Temperature Inorganic Systems*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
17. Belov G.V., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling of Chemically Reacting Systems*. Moscow: MG TU, 2013, 96 p. (In Russ.).
18. Pickles C.A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Mineral Engineering*. 2013, vol. 54, pp. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029>
19. Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*. Oxford: Elsevier Ltd., 2014, Chapter 2.4, pp. 701–838.
20. 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, no. 4, pp. 320–346. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2016.46028>
21. 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. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel. 2004, pp. 1\_72–77.
22. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interactio during reduction in bubbled layer. *European Metallurgical Conf. EMC'2005, Dresden, Germany, September 18 – 21, 2005*. Vol. 3, pp. 1349–1358.
23. *Slag Atlas*. 2<sup>nd</sup> ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmdH, 1995, 616 p.
24. Raynor G.V., Rivlin V.G. *Co–Fe–Ni in Phase Equilibria in Iron Ternary Alloys*. London: Inst. Metals, 1988, pp. 247–255.

#### 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

**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

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

**Aleksandr S. Vusikhis**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy  
ORCID: 0000-0002-6395-0834  
E-mail: vas58@mail.ru

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

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

**Leopol'd I. Leont'ev** Dr. Sci. (Eng.), Academician, Adviser of RAS, Prof., Chief Researcher, Institute of Metallurgy, National University of Science and Technology "MISIS"

Поступила в редакцию 09.04.2020  
После доработки 12.04.2020  
Принята к публикации 25.12.2020

Received 09.04.2020  
Revised 12.04.2020  
Accepted 25.12.2020