

Изучение силикотермического процесса восстановления никеля и железа методом термодинамического моделирования*

Салина В.А., Жучков В.И., Заякин О.В.

Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург, Российская Федерация

valentina_salina@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты изучения влияния концентрации кремния ферросилиция: ФС5 (5% Si), ФС20 (20% Si), ФС35 (35% Si), ФС50 (50% Si), ФС65 (65% Si) на степень восстановления никеля (η_{Ni}) и железа (η_{Fe}) многокомпонентной оксидной системы $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-FeO-NiO-P_2O_5$ при температуре 1500 °С методом термодинамического моделирования. Для моделирования использован программный комплекс HSC Chemistry 6.12, разработанный Outokumpu (Финляндия). В базу данных введены химические соединения Ni_3Si и Ni_5Si_2 с соответствующими термодинамическими характеристиками. Расчеты выполнены с применением подпрограммы “Равновесные составы” (Equilibrium Compositions) при давлении газовой фазы 1 атм, содержащей 2,24 м³ N₂ в качестве нейтральной добавки. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о термодинамической возможности восстановления никеля и железа из оксидной системы $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-FeO-NiO-P_2O_5$ кремнием ферросилиция. Степень восстановления железа увеличивается с 88,8 до 91,4% при повышении концентрации кремния ферросилиция [Si]_{ФС} с 5 до 65%. Степень восстановления никеля с увеличением концентрации кремния ферросилиция практически не меняется и составляет 99,8-99,7%. Степень использования кремния составляет 92,1-94,5%. Определен химический состав комплексного сплава – ферросиликоникеля. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для разработки технологии получения ферросиликоникеля из никелевой руды силикотермическим методом.

Ключевые слова: оксидная система, термодинамическое моделирование, ферросилиций, степень восстановления, комплексный сплав.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение в металлургической промышленности получило металлотермическое восстановление элементов из оксидов кремнием, который является одним из основных восстановителей при производстве низкоуглеродистых марок ферросплавов (феррохрома, ферротитана, феррованадия, ферромарганца и т.д.) [1-3]. Большую часть никель- и хромсодержащих ферросплавов применяют для получения нержавеющей стали, мировой объем производства которой постоянно растет и в 2018 году составил 50,7 млн т [4, 5].

АКТУАЛЬНОСТЬ, НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Для получения данных о новых процессах необходимо знание термодинамической возможности их протекания. Известные методы термодинамических расчетов [6-8] позволяют оперативно и качественно решить ряд актуаль-

ных и перспективных задач.

Автором работы [9] приведены результаты термодинамического моделирования в элементарных системах, которые подтвердили возможность восстановления никеля углеродом из оксида. Полученные результаты позволили разработать технологию прямого легирования стали никелем путем присадок в завалку оксидного материала.

В работе [10] рассмотрены вопросы восстановления никеля из оксида углеродом при использовании никелевого концентрата, полученного путем гидрометаллургического обогащения полиметаллических марганцевых руд и селективного осаждения. С использованием программного комплекса «Терра» определены технологические параметры восстановления никеля из концентрата при легировании стали. Извлечение никеля из концентрата – 92-95% в случае использования брикетов из никелевого концентрата и кокса при легировании стали, выплавляемой в дуговой электропечи.

Авторами работы [11] разработана термодинамическая база данных, которая может быть использована для моделирования процесса получения никеля из руд. Получен набор самосогласованных энергетических функций Гиббса, который обеспечивает наилучшее возможное описание термодинамических свойств и фазовых равновесий в системе $MgO-NiO-SiO_2$.

Изучен процесс восстановления соединений (NiO , Fe_2O_3 , $NiFe_2O_4$, Fe_2O_3+NiO , Fe_2O_3+Ni) в системе $Fe-Ni-O$ с применением в качестве восстановителя H_2 и активированного углерода, а также проанализирован механизм восстановления $NiFe_2O_4$ [12]. Определено, что при использовании в качестве восстановителя H_2 эти системы имеют более низкие начальные температуры реакции и более низкие скорости реакции, чем при активированном углероде. Продукты восстановления $NiFe_2O_4$ с повышением температуры появляются в следующем порядке: $NiFe_2O_4 \rightarrow Fe_3O_4+NiO \rightarrow Fe_3O_4+Ni \rightarrow FeO+Fe_xNi_y \rightarrow Fe_xNi_y+Fe(Fe_mC_n)$.

Авторами [13] разработана технология получения никелевого чугуна (2-5% Ni) из лимонита (> 35% Fe, ~ 1% Ni) путем спекания на агломерационной машине с последующим плавлением в доменной печи при температуре 1500 °С. Степень восстановления никеля составляет ~ 80%. Это процесс быстро развивался в Китае, но в связи со снижением цен на никель и осуществлением строгой экологической политики не получил широкого развития.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции “Материаловедение и металлургические технологии” (RusMetalCon-2019), <https://rusmetalcon.susu.ru>

Изучено влияние основности $(CaO+MgO)/(Al_2O_3+SiO_2)$ на процесс расплавления и рост частиц ферроникеля в сапролитно-латеритной руде в процессе Krupp-Renn (Nipon Yakin Oheyama) [14]. В работе показаны преимущества применения процесса Krupp-Renn для производства ферроникеля из руд, расплавляемых во вращающемся реакторе при 1300...1350 °С. Определено, что добавление CaO и повышение основности от 0,5 до 0,8 снижает температуру плавления латеритной руды, а ее увеличение от 0,9 до 1,8 повышает в атмосфере, содержащей 100% CO. Образование жидкой фазы способствует росту частиц ферроникеля, а размер частиц ферроникеля может быть увеличен путем оптимизации основности в процессе восстановления латеритных руд.

В работе [15] автором установлена возможность получения хромоникелевого полупродукта в процессе непрерывного переплава металлизированных окатышей в рудно-термической печи, работающей с закрытым колошником в режиме сопротивления. В качестве исходных шихтовых материалов использовали металлизированные окатыши Ново-Михайловского ГОКа, коксовый орешек, закись никеля, хромовую руду Донского месторождения. Содержание хрома и никеля в металле составило 7,78-19,3 и 5,6-10,8% соответственно. Степень восстановления хрома составила 92%.

Авторами работ [16, 17] проведено термодинамическое моделирование процесса восстановления элементов из системы $Cr_2O_3-FeO-Al_2O_3-SiO_2-MgO-CaO$ с применением в качестве восстановителя ферросиликоникеля (28% Fe, 65% Si, 7% Ni). Определены оптимальные расход восстановителя 105% и основность шлака $(CaO)/(SiO_2)=1,86-1,9$. В работах [18, 19] приведены результаты термодинамического моделирования процесса восстановления хрома из Cr_2O_3 кремнием ферросилиция ФС45 и ФС65. Установлено, что повышение основности $(CaO)/(SiO_2)$ с 1 до 3 позволяет увеличить степень восстановления хрома с 74,4 до 86,7% и с 77 до 88% при использовании в качестве восстановителя кремния ФС45 и ФС65 соответственно.

В литературе имеются сведения о влиянии элементов Cr-Fe-Ni расплава на его плотность и вязкость [20], а также на вязкость Fe-Ni расплава [21]. Определено, что увеличение содержания железа в расплаве повышает его вязкость.

Таким образом, результаты представленного аналитического обзора работ показали, что существуют базы данных для проведения термодинамического моделирования процесса восстановления никеля из оксидного материала, получения ферроникеля, но отсутствуют сведения об изучении влияния концентрации кремния ферросилиция на процесс восстановления никеля и железа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для металлургической промышленности актуально знание параметров металлотермического восстановления никеля, железа и других элементов никелевых руд и концентратов. В связи с этим определена необходимость выполнения термодинамического моделирования для изучения влияния концентрации кремния ферросилиция: ФС5 (5% Si), ФС20 (20% Si), ФС35 (35% Si), ФС50 (50% Si), ФС65 (65% Si) на степень восстановления никеля и железа из многокомпонентной оксидной системы $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-FeO-NiO-P_2O_5$ при температуре 1500 °С.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходной оксидной системы для проведения термодинамического моделирования использовали окисленную никелевую руду, а в качестве восстановителя кремний ферросилиция: ФС5, ФС20, ФС35, ФС50, ФС65. Химический состав руды приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав руды, %

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	NiO	P ₂ O ₅	SO ₃
1,5	53,6	18,4	4,8	20	1,5	0,005	0,15

Расчеты термодинамического моделирования проведены с применением программного комплекса HSC 6.12 Chemistry, разработанного Outokumpu (Финляндия), и основанного на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [6]. ПК HSC 6.12 Chemistry позволяет определять термодинамические константы химических реакций ($\Delta H_{p-ции}$, $\Delta S_{p-ции}$, $\Delta G_{p-ции}$, K_p) при изобарических и изотермических условиях процесса. Равновесный состав многокомпонентной оксидной системы $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-FeO-NiO-P_2O_5$ определен с применением подпрограммы "Equilibrium Compositions" (Равновесные составы) при температуре 1500 °С и давлении газовой фазы, равном 1 атм. В базу данных ПК HSC Chemistry 6.12 введены химические соединения Ni_3Si и Ni_5Si_2 с соответствующими термодинамическими характеристиками. Значение энтальпии образования ($\Delta H_{298,15}^0$) соединений Ni_3Si и Ni_5Si_2 взято из фундаментального справочника [22]. На основе полуэмпирических методах расчета определены недостающие термодинамические константы [23]. Для вычисления использовали алгоритм программы минимизации потенциала Гиббса "GIBBS". Газовая фаза системы содержала 2,24 м³ N₂ в качестве нейтральной добавки для ускорения вычислительной процедуры поиска равновесного состава.

На рис. 1 приведена зависимость степени восстановления никеля (η_{Ni}) и железа (η_{Fe}), содержания железа в сплаве [Fe] от концентрации кремния в ферросилиции. Установлено, что повышение концентрации кремния способствует увеличению степени восстановления железа из его оксида (FeO) при температуре 1500 °С (кривая 1) и снижению содержания железа в сплаве (кривая 2). Так, степень восстановления железа увеличилась на 2,3% (с 88,8 до 90,8%) при повышении концентрации кремния с 5 до 20% и на 0,7% при повышении с 20 до 65%. Увеличение степени восстановления железа при повышении содержания кремния в ферросилиции от 5 до 65% объяснимо различной химической активностью кремния в этих сплавах и увеличением концентрации "свободного" кремния.

Содержание железа в металле уменьшилось на 6,7% (с 98,3 до 91,7%), что объяснимо снижением его концентрации в ферросилиции при увеличении кремния.

Степень восстановления никеля при увеличении концентрации кремния ферросилиция с 5 до 65% практически не изменилась и составила 99,8-99,74% при температуре 1500 °С (рис. 1, кривая 3), а его содержание в сплаве увеличилось в 5,3 раза (с 1.24 до 6.55%) (табл. 2), что можно объяснить меньшей термодинамической прочностью NiO ($\Delta G_{298,15}^0 = - 211,957$ кДж/моль), по сравнению с FeO ($\Delta G_{298,15}^0 = - 244,299$ кДж/моль) [20] и химической активностью кремния.

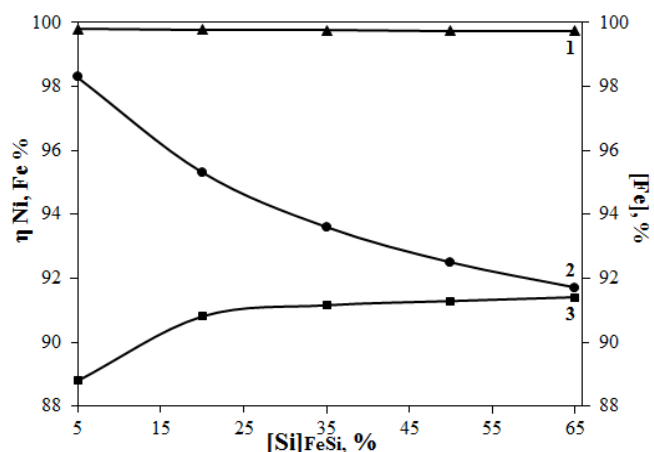


Рис. 1. Изменение степени восстановления никеля и железа ($\eta_{Ni, Fe}$) и содержания железа в сплаве $[Fe]$ от концентрации кремния ферросилиция $[Si]_{FeSi}$ при температуре 1500 °С: 1 – степень восстановления никеля (η_{Ni}), %; 2 – содержание железа в сплаве $[Fe]$, %; 3 – степень восстановления железа (η_{Fe}), %

Концентрация кремния в сплаве увеличивается с 0,35 до 1,28% при повышении его содержания в ферросилиции с 5 до 65%. Рассчитана степень использования кремния ферросилиция, которая увеличивается с 92,1 до 94,5% при повышении содержания кремния в ферросилиции. Концентрация вредных примесей серы и фосфора в сплаве составляет 0,063-0,334% и 0,023-0,122% соответственно (табл. 2). Химический состав комплексного сплава ферросиликоникеля при температуре 1500 °С представлен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав сплава, %

Элемент	ФС5	ФС20	ФС35	ФС50	ФС65
Fe	98,3	95,3	93,6	92,5	91,7
Ni	1,24	3,63	5,0	5,91	6,55
Si	0,35	0,80	1,04	1,19	1,28
S	0,063	0,185	0,256	0,302	0,334
P	0,023	0,067	0,093	0,110	0,122

Оксидный расплав, образующийся в процессе восстановления элементов кремнием ферросилиция, содержит CaO, SiO₂, FeO, NiO, Al₂O₃, MgO, P₂O₅ и SO₃. Фазовый состав шлака представлен силикатами и алюминатами железа, кальция, магния и чистыми оксидами. Результаты термодинамического моделирования могут быть использованы для разработки технологии получения комплексного сплава – ферросиликоникеля из никелевой руды с использованием в качестве восстановителя кремния ферросилиция: ФС5, ФС20, ФС35, ФС50, ФС65. Лучшие результаты по степени восстановления железа при низкой стоимости ферросилиция могут быть получены при использовании сплавов с 30-40% кремния. На степень восстановления никеля концентрация кремния в ферросилиции не влияет. Концентрация никеля в сплаве увеличивается с 1,24 до 6,55% при повышении содержания кремния в ферросилиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показали термодинамическую возможность восстановления никеля и железа из многокомпонентной оксидной системы CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-FeO-NiO-P₂O₅ кремнием ферросилиция: ФС5, ФС20, ФС35, ФС50, ФС65 при температуре 1500 °С. Степень восстановления железа увеличивается с 88,8 до 91,4% с повышением концентрации кремния в ферросилиции $[Si]_{FeSi}$ с 5 до 65%. Степень восстановления никеля с увеличением концентрации кремния ферросилиция практически не меняется и составляет 99,8-99,74%. Степень использования кремния составляет 92,1-94,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рысс М.А. Производство ферросплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
2. Лякишев Н.П. Metallurgia хрома / Н.П. Лякишев, М.И. Гасик. – М.: Москва «Элиз», 1999. – 582 с.
3. Zayakin O.V. Study of the possibility of obtaining non-decomposing slag during low-carbon ferrochrome production / O.V. Zayakin, R.N. Statnykh, V.I. Zhuchkov // Metallurgist. – 2019. – Vol. 62, No. 9-10. – P. 875-881. DOI: 10.1007/s11015-019-00744-8
4. <https://ussa.su/news/1898>, 2019 (дата обращения: 17.05.2019).
5. Перспективы производства нержавеющей стали с использованием отечественных хромовых и никелевых ферросплавов / В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев, Е.Н. Селиванов и др. // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: сб. тр. Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 5-7 ноября 2014 г.). – Екатеринбург, 2014. – Т.2. – С. 210-215.
6. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. – Pori: Outokumpu research OY, 2002.
7. Lukas H. Computational Thermodynamics: The Calphad Method / H. Lukas, G. Suzana // Cambridge University Press. – 2007. – 324 p.
8. Ватолин Н.А. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Г.К. Моисеев, Б.Г. Трусов. – М.: Metallurgia, 1994. – 352 с.
9. Рыбенко И.А. Термодинамическое моделирование процессов в элементарных системах: монография. – Новокузнецк: изд. Центр СибГИУ, 2016. – 97 с.
10. Кичигина О.Ю. Восстановление никеля из его оксида углеродом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2010. – № 10. – С. 20-23.
11. Experimental study and thermodynamic modeling of the MgO-NiO-SiO₂ system / V. Prostavkova, Chen Jiang, Evgueni Jak, S.A. DecteroV // J. Chem. Thermodynamics. – 2013. – Vol. 62. – P. 43-55. DOI: 10.1016/j.jct.2013.02.019
12. Reduction of Fe and Ni in Fe-Ni-O system / Y. Zhang, W. Wei, X. Yang, F. Wei // J. Min. Metall. Sect. B-Metall. – 2013. – Vol. 49(1). – P. 13-20. DOI: 10.2298/JMMB120208038Z
13. Carbothermic reduction of nickeliferous laterite ores for nickel pig iron production in China: A Review / M. Rao,

G. Li, T. Jiang et al. // JOM. – 2015. – Vol. 65, No.11. – P. 1573-1583. DOI: 10.1007/s11837-013-0760-7

14. Effect of quaternary basicity on melting behavior and ferronickel particles growth of saprolitic laterite ores in Krupp-Renn process / G. Li, J. Luo, Z. Peng et al. // ISIJ Int. – 2015. – Vol. 55, No. 9. – P. 1828-1833. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2015-058

15. Каскин К.К. Непрерывный передел металлизированных и железорудных окатышей в руднотермической печи с получением полупродуктов // Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия". – 2012. – № 15. – С. 82-84.

16. Салина В.А. Изучение силикотермического способа получения комплексных никельхромсодержащих ферросплавов методом термодинамического моделирования / В.А. Салина, В.И. Жучков, О.В. Заякин // Наука и техника Казахстана. – 2017. – № 3-4. – С. 85-90.

17. Salina V.A. Thermodynamic simulation of the manufacture of Fe-Si-Ni-Cr alloys / V.A. Salina, V.I. Zhuchkov, O.V. Zayakin // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – No.2. – P. 162-164. DOI: 10.1134/S003602951902023X

18. Изучение процесса восстановления хрома из системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-MnO-Al}_2\text{O}_3$ кремнием ферросилиция методом термодинамического моделирования / В.А. Салина, А.В. Сычев, О.В. Заякин, В.И. Жучков // Бултеровские сообщения. – 2018. – Т. 56, № 12. – С. 131-135.

19. Salina V.A. Thermodynamic evaluation of the interphase distribution of elements in the chromium and nickel-containing system / V.A. Salina, O.V. Zayakin, V.I. Zhuchkov // Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists "FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development" (Ekaterinburg, 28-29 october, 2018). – Ekaterinburg, KnE Materials Science, 2019. – P. 126-133.

20. Kobatake H. Density and viscosity of ternary Cr-Fe-Ni liquid alloys / H. Kobatake, J. Brillo // J. Mater. Sci. – 2013. – Vol. 48, No.19. – P. 6818-6824. DOI: 10.1007/s10853-013-7487-2

21. Viscosities of Fe-Ni, Fe-Co and Ni-Co binary melts / Y. Sato, K. Sugisawa, D. Aoki, T. Yamamura // Meas. Sci. and Technol. – 2005. – Vol. 16, No. 2. – P. 363-371. DOI: 10.1088/0957-0233/16/2/006

22. Термодинамические константы веществ: справочник / Под ред. Глушко В.П. – М.: Наука, 1972. – Вып. VI. – 369 с.

23. Морачевский А.Г. Термодинамические расчеты в металлургии: справочник / А.Г. Морачевский, И.Б. Сладков. – М.: Металлургия, 1993. – 304 с.

DOI: 10.24892/RIJIE/20200103

The Study of the Nickel and Iron Reduction Silicothermic Process by Thermodynamic Simulation

Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V.

Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Yekaterinburg, Russian Federation
valentina_salina@mail.ru

Abstract. The results of studying the effect of silicon concentration of ferrosilicon: FeSi5 (5% Si), FeSi20 (20% Si), FeSi35 (35% Si), FeSi50 (50% Si), FeSi65 (65% Si) on the degree of nickel (η_{Ni}) and iron (η_{Fe}) reduction of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-NiO-P}_2\text{O}_5$ multicomponent oxide system at a temperature of 1500 °C by thermodynamic simulation are given. The HSC Chemistry 6.12 software package developed by Outokumpu (Finland) was used for the simulation. The chemical compounds Ni_3Si and Ni_5Si_2 with the corresponding thermodynamic characteristics are entered into the database. The calculations were performed by the "Equilibrium Compositions" subroutine at a gas pressure of 1 atm, containing 2.24 m³ N₂ as a neutral additive. The obtained modeling results indicate the thermodynamic possibility of nickel and iron reduction from the $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-NiO-P}_2\text{O}_5$ oxide system by silicon of ferrosilicon. The degree of iron reduction increases from 88.8 to 91.4% with an increase in the silicon concentration of ferrosilicon [Si]_{FeSi} from 5 to 65%. The degree of nickel reduction with an increase in the silicon concentration of ferrosilicon remains almost unchanged and amounts to 99.8-99.7%. The degree of use of silicon is 92.1-94.5%. The chemical composition of the complex alloy – ferrosiliconnickel is determined. The obtained simulation results can be

used to develop the technology for producing ferrosiliconnickel from nickel ore by silicothermic method.

Keywords: oxide system, thermodynamic simulations, nickel ore, ferrosilicon, degree of reduction, complex alloy.

REFERENCES

1. Ryss M.A. *Proizvodstvo ferrosplavov* [Ferroalloy production], Moscow, Metallurgy, 1985, 344 p. (in Russ.)
2. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Metallurgiya khroma* [Metallurgy of chromium], Moscow, Moscow "Elise", 1999, 582 p. (in Russ.)
3. Zayakin O.V., Statnykh R.N., Zhuchkov V.I. Study of the possibility of obtaining non-decomposing slag during low-carbon ferrochrome production, *Metallurgist*, 2019, vol. 62, no. 9-10, pp. 875-881. DOI: 10.1007/s11015-019-00744-8
4. <https://ussa.su/news/1898>, 2019 (accessed 17.05.2019).
5. Zhuchkov V.I., Leontiev L.I., Selivanov E.N. et al. Prospects for the production of stainless steel using domestic chromium and nickel ferroalloys [Perspektivy proizvodstva

nerzhavayushchey stali s ispol'zovaniem otechestvennykh khromovykh i nikelovykh ferrosplavov], *Trudy "Covremennyye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineral'nogo i tekhnogenogo syr'ya"* [Proc. "Modern trends in the theory and practice of mining and processing of mineral and technogenic raw materials"], Yekaterinburg, 2014, vol. 2, pp. 210-215. (in Russ.)

6. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database, Pori, Outokumpu research OY, 2002.

7. Lukas H., Suzana G. Computational Thermodynamics: The Calphad Method, Cambridge University Press, 2007, 324 p.

8. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Cowards B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems], Moscow, Metallurgy, 1994, 352 p. (in Russ.)

9. Rybenko I.A. *Termodinamicheskoe modelirovanie protsessov v elementarnykh sistemakh: monografiya* [Thermodynamic modeling of processes in elementary systems: monograph], Novokuznetsk, ed. Center SibGIU, 2016, 97 p. (in Russ.)

10. Kichigina O.Yu. Reduction of Nickel from its Oxide by Carbon [Vosstanovlenie nikelya iz ego oksida uglerodom], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy], 2010, no. 10, pp. 20-23. (in Russ.)

11. Prostakova V., Chen Jiang, Evgueni Jak, Decterov S.A. Experimental study and thermodynamic modeling of the MgO-NiO-SiO₂ system, *J. Chem. Thermodynamics*, 2013, vol. 62, pp. 43-55. DOI: 10.1016/j.jct.2013.02.019

12. Zhang Y., Wei W., Yang X., Wei F. Reduction of Fe and Ni in Fe-Ni-O system, *J. Min. Metall. Sect. B-Metall*, 2013, vol. 49(1), pp. 13-20. DOI: 10.2298/JMMB120208038Z

13. M. Rao, G. Li, T. Jiang et al. Carbothermic reduction of nickeliferous laterite ores for nickel pig iron production in China: a review, *JOM*, 2015, vol. 65, no.11, pp. 1573-1583. DOI: 10.1007/s11837-013-0760-7

14. Li G., Luo J., Peng Z. et al. Effect of quaternary basicity on melting behavior and ferronickel particles growth of saprolitic laterite ores in Krupp-Renn process, *ISIJ Int.*, 2015, vol. 55, no.9, pp. 1828-1833. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2015-058

15. Kaskin K.K. Continuous remelting of metallized iron ore pellets in an ore-thermal furnace for obtaining the semi-product material [Nepreryvnyy pereplav metallizovannykh i zhelezorudnykh okatyshey v rudnotermicheskoy pechi s polu-

cheniem poluproduktov], *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"* [Bulletin of SUSU. Series "Metallurgy"], 2012, no. 15, pp. 82-84. (in Russ.)

16. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Study of a silicothermic method of complex nickel chrome-containing ferroalloys production by the thermodynamic modeling method [Izuchenie silikotermicheskogo sposoba polucheniya kompleksnykh nikel'khromsoderzhashchikh ferrosplavov metodom termodinamicheskogo modelirovaniya], *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and technology of Kazakhstan], 2017, no. 3-4, pp. 85-90. (in Russ.)

17. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Thermodynamic simulation of the manufacture of Fe-Si-Ni-Cr alloys, *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2019. – No.2. – P. 162-164. DOI: 10.1134/S003602951902023X

18. Salina V.A., Sychev A.V., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Study of the chromium recovery process from the system CaO-SiO₂-Cr₂O₃-FeO-MgO-MnO-Al₂O₃ silicon ferrosilicon by thermodynamic modeling [Izuchenie protsessa vosstanovleniya khroma iz sistemy CaO-SiO₂-Cr₂O₃-FeO-MgO-MnO-Al₂O₃ kremniem ferrosilitsiya metodom termodinamicheskogo modelirovaniya], *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerov Communications], 2018, vol. 56, no. 12, pp. 131-135. (in Russ.)

19. Salina V.A., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Thermodynamic evaluation of the interphase distribution of elements in the chromium and nickel-containing system, *Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists "FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development"*, Ekaterinburg, KnE Materials Science, 2019, pp. 126-133.

20. Kobatake H., Brillo J. Density and viscosity of ternary Cr-Fe-Ni liquid alloys, *J. Mater. Sci.*, 2013, vol. 48, no.19, pp. 6818-6824. DOI: 10.1007/s10853-013-7487-2

21. Sato Y., Sugisawa K., Aoki D., Yamamura T. Viscosities of Fe-Ni, Fe-Co and Ni-Co binary melts, *Meas. Sci. and Technol.*, 2005, vol. 16, no. 2, pp. 363-371. DOI: 10.1088/0957-0233/16/2/006

22. Glushko V.P. (ed.) *Termodinamicheskie konstanty veshchestv: cpravochnik* [Thermodynamic constants of substances: reference book], Moscow, Nauka, 1972, is. VI, 369 p. (in Russ.)

23. Morachevsky A.G., Sweeties I.B. *Termodinamicheskie raschety v metallurgii: spravochnik* [Thermodynamic calculations in metallurgy: reference book], Moscow, Metallurgy, 1993, 304 p. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Салина В.А. Изучение силикотермического процесса восстановления никеля и железа методом термодинамического моделирования / В.А. Салина, В.И. Жучков, О.В. Заякин // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2020. – Т.8, №1. – С. 16-20. DOI: 10.24892/RIJE/20200103

Reference to article

Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. The study of the nickel and iron reduction silicothermic process by thermodynamic simulation, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2020, vol.8, no.1, pp. 16-20. DOI: 10.24892/RIJE/20200103