

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ БАРБОТАЖА. СООБЩЕНИЕ 2. ВОССТАНОВИТЕЛЬ – СМЕСЬ $H_2 - H_2O^*$

Вусихис А.С.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)

Леонтьев Л.И.^{2,3,4}, д.т.н., академик, главный научный сотрудник (leo@imet.mplik.ru)

Кудинов Д.З.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (d.kudinov@mail.ru)

*Селиванов Е.Н.¹, д.т.н., заведующий лабораторией пирометаллургии
цветных металлов (pcmlab@mail.ru)*

¹ Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 32а)

³ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

(119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 49)

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4)

Аннотация. В черной и цветной металлургии разработан ряд технологий, в основе которых лежат барботажные процессы. Для прогнозирования параметров плавки, включающей восстановление металлов из оксидного расплава газом-восстановителем в барботируемом слое в промышленных агрегатах, предложена методика термодинамического моделирования, в основе которой лежит расчет равновесия в системе оксидный расплав – металл – газ. Оригинальность методики состоит в том, что равновесие определяют для каждой единичной порции газа, вводимой в рабочее тело, при содержаниях оксидов восстанавливаемых металлов в каждом последующем расчетном цикле, равных равновесным в предыдущем. Для анализа взята оксидная система 1,8 % NiO – 17,4 % FeO – 13,5 % CaO – 1,9 % MgO – 58,0 % SiO₂ – 7,4 % Al₂O₃, по содержанию компонентов близкая к составу окисленной никелевой руды. Соотношение H₂O/H₂ в газовой смеси варьировали в пределах 0 – 1,0. В зависимости от количества и состава газа, введенного в рабочее тело, оценивали содержание оксидов никеля и железа в расплаве (1823 К), определяли количество и состав образующегося металла (ферроникеля), а также показатели (кратность шлака, степени восстановления металлов), важные при реализации процесса в промышленных условиях. Увеличение расхода водорода монотонно снижает содержание оксида никеля в расплаве, в то время как содержание оксида железа первоначально возрастает, а затем – снижается. При введении H₂ в количестве около 50 м³/т расплава содержание оксида никеля в нем снижается до 0,017 %, а оксида железа до 16,7 %. Образующийся ферроникель содержит 61 % никеля, кратность шлака составляет 42 единицы. Дальнейшее увеличение расхода H₂ ведет к предпочтительному восстановлению железа. Повышение соотношения H₂O/H₂ ухудшает показатели восстановления металлов из расплава: уменьшается степень восстановления никеля и железа, увеличивается содержание никеля в сплаве и кратность шлака. Однако даже при соотношении H₂/H₂O равном 1,0, что соответствует содержанию 50,0 % H₂O в смеси газов, процесс восстановления не прекращается. Для сравнения в работе приведены данные по изменению содержания оксидов никеля и железа при восстановлении металлов из аналогичных расплавов монооксидом углерода. При степени восстановления никеля 98 % показатели близки в случае использования как H₂, так и СО. Однако для их достижения водорода требуется в 2,5 раза, а смеси, в которой H₂O/H₂ = 0,11 (90 % H₂), – в 1,36 раз меньше, чем монооксида углерода.

Ключевые слова: методика, термодинамическое моделирование, кинетика, восстановительный газ, барботаж, многокомпонентный оксидный расплав, водород.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-794-799

В черной и цветной металлургии разработан ряд технологий, в основе которых лежат барботажные процессы, Ромелт, Ванюкова, Hismelt, Ausmelt, Isasmelt [1 – 7] и их модификации [8 – 14]. Отличия последних технологий заключаются в том, что процессы плавления шихты и восстановления металлов из оксидного расплава разделены во времени и пространстве.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН по теме № 0396-2015-0082.

Для прогнозирования параметров плавки, включающей восстановление металлов из оксидного расплава газом-восстановителем в барботируемом слое в промышленных агрегатах, ранее предложена методика теоретических расчетов с применением методов термодинамического моделирования (ТДМ) [15]. Методологию ТДМ используют для решения различных теоретических и прикладных задач [16], в частности, совершенствования технологий [17 – 20] в металлургии.

В работах [21 – 23] указанная методика была применена для оценки влияния температуры на восстановление никеля, железа водородом из оксидных расплавов систем $B_2O_3-CaO-NiO$, $B_2O_3-CaO-FeO$, $B_2O_3-CaO-FeO-NiO$. В работе [24] приведены результаты моделирования процесса совместного восстановления никеля и железа в системе, близкой по составу к магнетитным никелевым рудам, смесью $CO-CO_2$.

В настоящей работе приведены результаты термодинамического моделирования процесса восстановления никеля и железа из силикатного расплава с использованием смесей H_2-H_2O .

Термодинамическое моделирование проведено в условиях, аналогичных представленным в работе [24]: температура 1823 К, давление 0,1 МПа, соотношения H_2O/H_2 в пределах от 0 до 1,0 (в приведенных данных и на рисунках номера кривых совпадают). Состав газов приведен ниже:

Образец газа	Содержание, % (объем.)		
	H_2	H_2O	H_2O/H_2
1	100	0	0
2	90	10	0,11
3	80	20	0,25
4	70	30	0,43
5	60	40	0,67
6	50	50	1,00

Количество газа в единичном цикле расчетов принято равным 1 моль, а компонентов исходного оксидного расплава: 1 моль NiO , 10 моль FeO , 40 моль SiO_2 , 3 моль Al_2O_3 , 10 моль CaO , 2 моль MgO .

Термодинамические расчеты позволили выявить следующие зависимости:

- содержания оксидов никеля (C_{NiO}) и железа (C_{FeO}) в силикатном расплаве от общего расхода газа (M_r , моль), определяемого как произведение количества газа в единичной порции (m_r , моль) на количество расчетных циклов (k);

- количества никеля (n_{Ni} , моль) и железа (n_{Fe} , моль), восстановленных одной порцией газа, от номера расчетного цикла (Z);

- степени восстановления никеля (φ_{Ni}) и железа (φ_{Fe}) как отношения количеств элементов в металлическом состоянии к их общему количеству в системе $\left(\varphi_{Me} = \frac{n_{Me}}{n_{Me} + n_{MeO}} \cdot 100 \% \right)$ от общего расхода газа;

- кратности шлака – отношение массы оксидного расплава ($m_{ш}$) к массе металла (m_{Me}) от общего расхода газа;

- содержания никеля в сплаве (C_{Ni} , % (по массе)) от общего расхода газа;

- содержания H_2 в единичной порции (% (объем.)) от номера расчетного цикла.

Анализ полученных данных показывает, что в ходе восстановления содержание оксида никеля в распла-

ве монотонно уменьшается, а степень восстановления увеличивается независимо от доли водорода в исходном газе. При равных расходах газа чем меньше в нем содержание водорода, тем выше значение C_{NiO} в расплаве и ниже степень восстановления (рис. 1). Если водорода в газе более 90 %, то оксид никеля восстанавливается практически полностью ($\varphi_{Ni} = 99$ %), а при содержании водорода 50 % – степень восстановления не превышает 28 %. В последнем случае содержание оксида никеля в расплаве близко к 1,3 %.

Содержание оксида железа в расплаве первоначально возрастает, проходит через максимум, а затем снижается (рис. 2).

Это объясняется большей скоростью и полнотой восстановления никеля по сравнению с железом по реакции:



Равновесный состав оксидного расплава, газа и металла определяется константами равновесия реакции (K_p). Поскольку $K_{pNi} \gg K_{pFe}$, то, несмотря на большее содержание в исходном силикатном расплаве оксида железа FeO в сравнении с содержанием оксида никеля

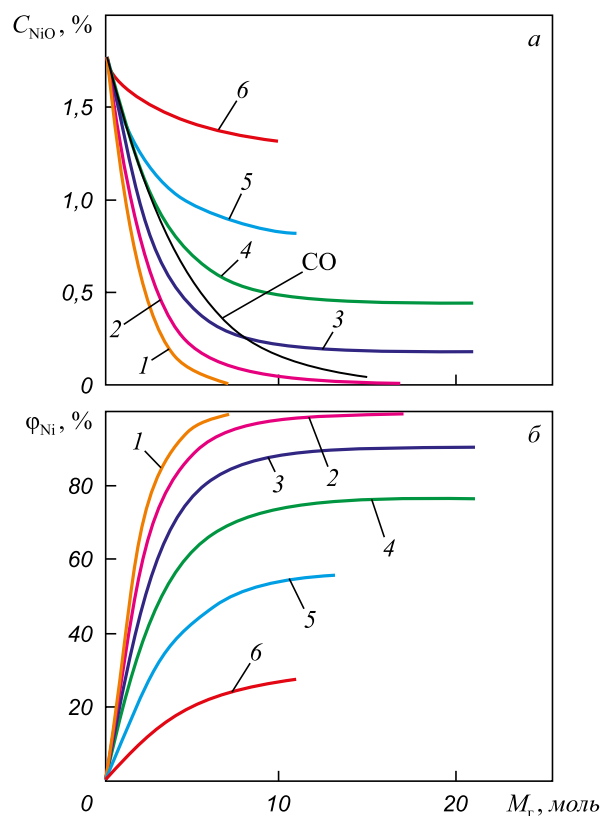


Рис. 1. Изменение содержания оксида никеля в расплаве (а) и степени его восстановления (б) от общего расхода газа (значения для CO приведены по данным работы [24])

Fig. 1. Change of nickel oxide content in the melt (a) and its reduction degree (b) with increase of total gas consumption (values for CO – according to the data [14])

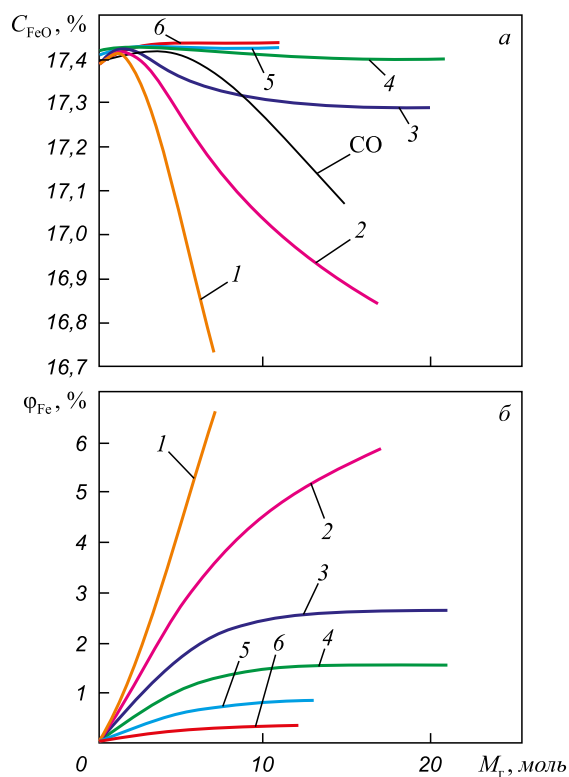


Рис. 2. Изменение содержания оксида железа (а) и степени его восстановления (б) от общего расхода газа

Fig. 2. Change of iron oxide content in the melt (a) and its reduction degree (b) with increase of total gas consumption

NiO, количество никеля (n_{Ni})₁, восстановленного в первом цикле единичной порцией газа, на порядок выше этих значений для железа (n_{Fe})₁. В результате содержание оксида никеля в расплаве уменьшается, а оксида железа – незначительно возрастает. В дальнейшем с ростом расхода газа значения n_{Ni} монотонно уменьшаются, а n_{Fe} проходят через максимум. Соответственно, значения C_{NiO} меняются монотонно, а C_{FeO} – проходят через максимум.

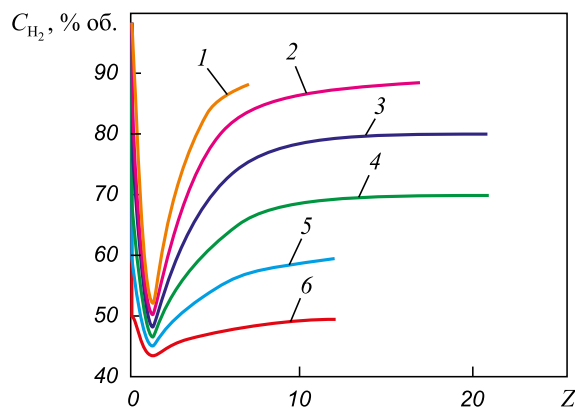


Рис. 3. Изменение содержания H₂ в единичной порции газа в зависимости от номера расчетного цикла

Fig. 3. Change of H₂ content in a single gas portion with increase of the cycle number

Общее количество металла, восстановленного единичной порцией газа, в первом цикле имеет максимальное значение, а по мере развития процесса – уменьшается. Поэтому первоначально в отходящем газе доля водорода H₂ минимальна, в дальнейшем – увеличивается и приближается к пределу (рис. 3).

Содержание никеля в образующемся металлическом сплаве монотонно уменьшается по мере роста M_T (рис. 4). Это связано с первоначальным развитием процесса восстановления никеля и превалированием значений n_{Ni} над n_{Fe} . Однако после снижения C_{NiO} и практически полного перехода никеля в металл, процессы восстановления железа продолжают, что влияет на величины C_{FeO} . В приведенных расчетах при значении ϕ_{Ni} , близком к 99 %, величина ϕ_{Fe} не превышает 6,0 % (рис. 1, 2).

По мере уменьшения C_{NiO} доля водорода, расходуемого на взаимодействие с оксидом железа, увеличивается. При этом кратность шлака составляет не менее 60 единиц (рис. 4). Это означает, что доля металла в системе по завершению восстановления не превышает 2 %. Лишь после полного восстановления никеля развивается восстановление железа, что сопровождается увеличением его доли в сплаве.

Варьирование соотношения H₂O/H₂ в исходной смеси влияет на содержание оксида никеля в силикатном

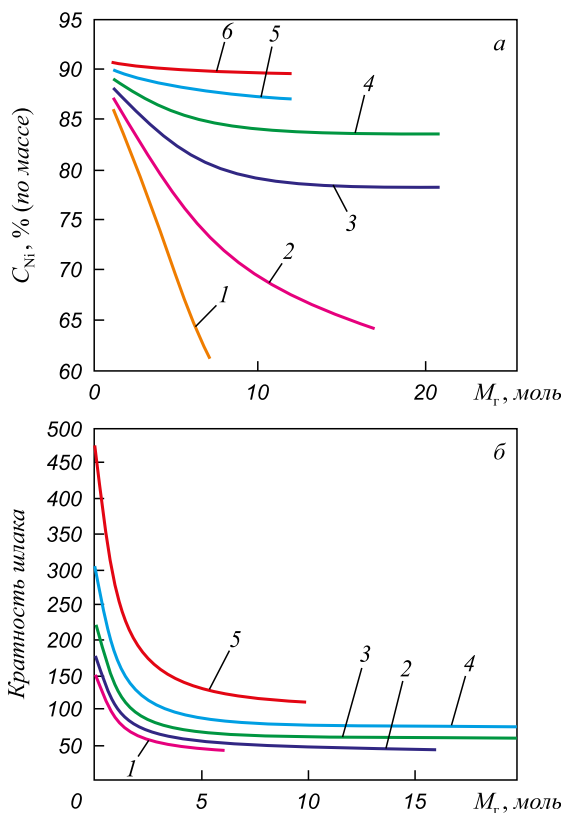


Рис. 4. Изменение содержания никеля в сплаве (а) и кратности шлака (б) от общего расхода газа

Fig. 4. Change of nickel content in the alloy (a) and of relation between slag and metal (b) with increase of total gas consumption

расплаве даже при равных количествах введенного в систему газа. Так, содержание никеля в сплаве, кратность шлака увеличиваются, а доля H_2 в отходящем газе, степени восстановления железа и никеля, количества никеля и железа, восстановленных одной порцией газа, уменьшаются. По мере увеличения общего расхода газа величины указанных параметров приближаются к предельным значениям, соответствующим равновесию с исходной смесью.

Параметры системы, соответствующие последнему циклу расчетов (Z_{max}) при различных значениях доли H_2O в исходной газовой смеси, представлены в таблице.

На рис. 1, 2 и в приведенных данных для сравнения показано изменение параметров восстановления металлов из аналогичных расплавов монооксидом углерода [24]. Параметры процесса восстановления приведены ниже:

Параметр	Значение параметра		
	CO	H_2	H_2
Газ			
C_r , % (объем.)	100	100	90
φ_{Ni} , %	97,80	98,09	98,10
V , м ³ /т	102	41	75
C_{NiO} , % (по массе)	0,050	0,035	0,035
C_{FeO} , % (по массе)	17,06	16,9	17,00
C_b^* , %	96,30	87,05	87,12
C_{vo}^* , %	3,70	12,95	12,88
Кратность шлака	41	42	47
C_{Ni} , %	70,3	65,0	68,3
φ_{Fe} , %	4,4	5,6	4,8

При степени восстановления никеля около 98 % остальные показатели так же близки, однако для их достижения водорода требуется в 2,5 раза, а смеси, в которой $H_2O/H_2 = 0,11$ ($H_2 - 90\%$), в 1,36 раз меньше, чем оксида углерода CO.

Выводы. Показатели восстановления никеля и железа из силикатного расплава определяются как содержанием оксидов металлов в расплаве, так и составом газа-восстановителя. При использовании чистого водорода никель восстанавливается практически на 100 %, а степень восстановления железа можно регулировать путем варьирования общего расхода газа. Небольшое (до 10 %) количество H_2O в газовой смеси мало влияет на показатели восстановления никеля и железа из оксидного расплава. Однако дальнейшее уменьшение доли водорода в газе ведет к деградации восстановительных процессов. Восстановление никеля и железа водородом эффективнее, чем оксидом углерода CO.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Роменец В.А., Валавин В.С., Усачев А.Б. Процесс Ромелт / Под общ. ред. В.А. Роменца. – М.: Руда и металлы, 2005. – 399 с.
2. Ванюков А.В., Быстров В.П., Васкевич А.Д. Плавка в жидкой ванне / Под ред. А.В. Ванюкова. – М.: Metallurgia, 1986. – 259 с.
3. Автогенные процессы в цветной металлургии / В.В. Мечев, В.П. Быстров, А.В. Тарасов и др. – М.: Metallurgia, 1991. – 413 с.
4. Extractive Metallurgy of Copper / Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport. – Elsevier, Fifth Edition, 2011. – 481 p.
5. Vignes A. Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes ISTE Ltd. – John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 352 p.
6. Bakker M.L., Nikolic S., Mackey P.J. ISASMELT TSL – Applications for nickel // Mineral Eng. (An International Journal

Параметры, соответствующие завершающему циклу расчетов (Z_{max}) при различных долях H_2O в исходной газовой смеси (1823 К)

Parameters corresponding to the final calculation cycle (Z_{max}) for various proportion of H_2O in the initial gas mixture (1823 K)

Параметр	Значение параметра					
	0	0,11	0,25	0,43	0,67	1,00
H_2O/H_2	0	0,11	0,25	0,43	0,67	1,00
H_2O , %	0	10	20	30	40	50
Z_{max}	7	17	21	21	11	10
V , м ³ /т	48	115	205	205	75	68
M_r , моль	7	17	21	21	11	10
C_{NiO} , % (по массе)	0,0170	0,0013	0,0180	0,4400	0,8170	1,3200
C_{FeO} , % (по массе)	16,72	16,84	17,29	17,4	17,44	17,43
H_2^* , %	88,3	88,4	80,0	70,0	59,0	49,3
H_2O^* , %	11,70	11,6	20,00	30,00	41,00	50,70
Кратность шлака	42,00	44,00	59,65	75,90	110,00	225,00
C_{Ni} , %	61,08	64,0,	78,26	83,59	87,12	89,55
φ_{Ni} , %	99,10	99,30	90,15	76,02	55,38	28,23
φ_{Fe} , %	6,65	5,88	2,64	1,57	0,86	0,35

- Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy). 2011. Vol. 24. No. 7. P. 610 – 619.
7. Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S. ISACONVERT TM – continuous converting of nickel/PGM mattes // Alvear G.R.F.J.S.Afr. Inst. Mining and Met. 2011. Vol. 111. No. 10. P. 285 – 294.
 8. Ковган П.А., Волков В.А., Козырев В.В. и др. Экологически чистая технология бескоксовой плавки окисленных никелевых руд // Цветная металлургия. 1994. № 11-12. С. 16 – 17.
 9. Лазарев В.И., Лазарев В.И., Спесивцев А.В., Быстров В.П. Развитие плавки Ванюкова с обеднением шлаков // Цветные металлы. 2000. № 6. С. 33 – 36.
 10. Ковган П.А., Абуов М.Г., Едильбаев А.И. Перспективные технологии переработки бедных окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 43 – 45.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Роменец В.А., Валавин В.С., Похвиснев Ю.В. Технологическая оценка реализации процесса Ромелт в классическом и двухзонном вариантах // Металлург. 2014. № 1. С. 45 – 50.
 14. Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Нурлан Г.Б., Сейткулова Ж.Б. Исследование поведения цветных металлов, железа и мышьяка при восстановительном обеднении богатых по меди шлаков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 1 (часть 4). С. 486 – 491.
 15. Вусихис А.С., Дмитриев А.Н. Исследование процессов восстановления оксидов металлов из расплава газом-восстановителем в барботируемом слое // Вестник УГТУ-УПИ. 2004. № 15 (45). Ч. 1. С. 93 – 95.
 16. Моисеев Г.К., Вяткин Г.П. Термодинамическое моделирование в неорганических системах: Учебное пособие. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 1999. – 256 с.
 17. Sohn H.Y. Process Modeling in Non-Ferrous Metallurgy. – In book: Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Ed. by S. Seetharaman. Chapter 2.4. – Oxford: Elsevier Ltd., 2014. P. 701 – 838.
 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 // Miner. Eng. An International Journal Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2013. Vol. 54. P. 52 – 62.
 19. Комков А.А., Ладыго Е.А., Быстров В.П. Термодинамический анализ процесса восстановительного обеднения шлаков, богатых по меди и никелю // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2002. № 4. С. 7 – 14.
 20. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective carbothermic reduction of electric arc furnace dust // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 150. P. 265 – 278.
 21. Вусихис А.С., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И. Моделирование кинетики восстановления никеля из многокомпонентного оксидного расплава водородом в барботируемом слое // ЖФХ. 2008. Т. 82. № 11. С. 2035 – 2038.
 22. Dmitriev A.N., Vusikhis A.S., Sitnikov V.A., etc. Thermodynamic modeling of iron oxide reduction by hydrogen from the B₂O₃-CaO-FeO melt in bubbled layer. // Israel Journal of Chemistry. 2007. Vol. 47. No. 3-4. P. 299 – 302.
 23. Вусихис А.С., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И. Моделирование кинетики совместного восстановления железа и никеля из многокомпонентного оксидного расплава водородом в барботируемом слое // ЖФХ. 2008. Т. 82. № 11. С. 2030 – 2034.
 24. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Особенности восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава в процессе барботажа. Сообщение 1. Восстановитель – смесь CO – CO₂ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 731 – 736.

Поступила 11 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 794–799.

THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM MULTICOMPONENT SILICATE MELT IN BUBBLING PROCESS. REPORT 2. REDUCING AGENT – A MIXTURE OF H₂ – H₂O

A.S. Vusikhis¹, L.I. Leont'ev^{2,3,4}, D.Z. Kudinov¹, E.N. Selivanov¹

¹Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

³Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow, Russia

⁴National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. A number of technologies in ferrous and non-ferrous metallurgy are based on bubbling processes. For prediction of melting parameters including the reduction of metals from oxide melt by a reducing gas in a bubbling layer in industrial aggregates, a thermodynamic modeling technique is proposed based on calculation of the equilibrium in oxide-melt-metal-gas system. Originality of the technique is that equilibrium is determined for each unit dose of gas introduced into the working body, with the contents of oxides of metals being reduced in each subsequent design cycle equal to the equilibrium in the previous one. For the analysis NiO (1.8 %) – FeO (17.4 %) – CaO (13.5 %) –

– MgO (1.9 %) – SiO₂ (58.0 %) – Al₂O₃ (7.4 %) oxide system was taken, closely corresponding to composition of oxidized nickel ore. The ratio of H₂O/H₂ in gas mixture varies between 0 and 1.0. (1823 K), amount and composition of formed metal (ferronickel), as well as the indices (the ratio of slag and metal, the degree of reduction of metals) are important in implementation of the process under commodity conditions. The increase in hydrogen consumption monotonously reduces the content of nickel oxide in the melt, while the content of iron oxide initially increases, and then decreases. When H₂ is introduced in an amount of about 50 m³ per ton of the melt, the content of nickel oxide in it is reduced to 0.017 %, and of iron oxide to 16.7 %. Resulting ferronickel contains 61 % Ni, ratio of slag and metal – 42 units. Further increase in H₂ consumption leads to preferential iron reduction. An increase in H₂O/H₂ ratio worsens the results of reduction of metals from the melt: decrease in degree of reduction of nickel and iron, increase in nickel content in the alloy, and the ratio of slag and metal. However, even with a H₂/H₂O ratio of 1.0, which corresponds to 50 % of H₂O in the gas mixture, reduction process does not stop. For comparison, the work presents data on change in content of nickel and iron oxides, when metals are restored from similar melts with carbon monoxide. At a nickel recovery rate of 98 %, indicators are close in case of using both H₂ and CO. However, to achieve them, it is required 2.5 times

less hydrogen, and 1.36 times less mixture in which $H_2O/H_2 = 0.11$ ($H_2 - 90\%$) than carbon monoxide.

Keywords: technique, thermodynamic modeling, kinetics, reducing gases, bubbling processing, multicomponent oxide melts, hydrogen.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-794-799

REFERENCES

- Romenets V.A., Valavin V.S., Usachev A.B. *Protsess Romelt* [Romelt Process]. Romenets V.A. ed. Moscow: Ruda i metall, 2005, 399 p. (In Russ.).
- Vanyukov A.V., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath]. Vanyukov A.V. ed. Moscow: Metallurgiya, 1986, 259 p. (In Russ.).
- Mechev V.V., Bystrov V.P., Tarasov A.V. etc. *Avtogennyye protsessy v tsvetnoi metallurgii* [Autogenous processes in non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 413 p. (In Russ.).
- Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport. *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier, 2011, 481 p.
- Vignes A. *Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes* ISTE Ltd. John Wiley & Sons, Inc., 2011, 352 p.
- Bakker M.L., Nikolic S., Mackey P.J. ISASMELT™ TSL – Applications for nickel. *Mineral Eng. (An International Journal Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy)*. 2011, vol. 24, no. 7, pp. 610–619.
- Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S. ISACONVERT™ – continuous converting of nickel/PGM mattes. *Alvear G.R.F.J.S.Afr. Inst. Mining and Met.* 2011, vol. 111, no. 10, pp. 285–294.
- Kovgan P.A., Volkov V.A., Kozyrev V.V. etc. Environmentally friendly technology of non-coke melting of oxidized nickel ores. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1994, no. 11-12, pp. 16–17. (In Russ.).
- Lazarev V.I., Lazarev V.I., Spesivtsev A.V., Bystrov V.P. Development of Vanyukov smelting with depletion of slag. *Tsvetnye metall.* 2000, no. 6, pp. 33–36. (In Russ.).
- Kovgan P.A., Abuov M.G., Edil'baev A.I. Perspective technologies of processing of poor oxidized nickel ores. *Tsvetnye metall.* 2008, no. 2, pp. 43–45. (In Russ.).
- Tsymbolov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., Kudabaev E.A., Golovlev Yu.I. Analysis of various variants of the technological scheme of processing of oxidized nickel ore into ferronickel with the use of two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metall.* 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
- Bystrov V.P., Fedorov A.N., Shchelkunov V.V., Bystrov S.V. Use of Vanyukov process for the processing of oxidized nickel ores. *Tsvetnye metall.* 2011, no. 8-9, pp. 155–158. (In Russ.).
- Romenets V.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V. Technological assessment of the Romelt process in the classic and two-zone variants. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 1-2, pp. 20–27.
- Dosmukhamedov N.K., Zholdasbai E.E., Nurlan G.B., Seitkulova Zh.B. Study of the behavior of non-ferrous metals, iron and arsenic in reducing depletion of copper-rich slag. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016, no. 1 (p. 4), pp. 486–491. (In Russ.).
- Vusikhis A.S., Dmitriev A.N. Investigation of the processes of reduction of metal oxides from the melt by reducing gas in the bubbled layer. *Vestnik UGTU-UPI*. 2004, no. 15 (45), Part 1, pp. 93–95. (In Russ.).
- Moiseev G.K., Vyatkin G.P. *Termodinamicheskoe modelirovanie v neorganicheskikh sistemakh: Uchebnoe posobie* [Thermodynamic modeling in inorganic systems]. Chelyabinsk: YuUrGU, 1999, 256 p. (In Russ.).
- Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*. Ed. by S. Seetharaman. Chapter 2.4. Oxford: Elsevier Ltd., 2014, pp. 701–838.
- 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. *Miner. Eng. An International Journal Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2013, vol. 54, pp. 52–62.
- Komkov A.A., Ladygo E.A., Bystrov V.P. Thermodynamic analysis of reducing depletion of slags rich in copper and nickel. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2002, no. 4, pp. 7–14. (In Russ.).
- Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective carbothermic reduction of electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 150, pp. 265–278.
- Vusikhis A.S., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I. Modeling of the kinetics of reduction of nickel from multicomponent oxide melt with hydrogen in barotrauma layer. *Journal of physical chemistry*. 2008, vol. 82, no. 11, pp. 2035–2038.
- Dmitriev A.N., Vusikhis A.S., Sitnikov V.A., etc. Thermodynamic modeling of iron oxide reduction by hydrogen from the B_2O_3 -CaO-FeO melt in bubbled layer. *Israel Journal of Chemistry*. 2007, vol. 47, no. 3-4, pp. 299–302.
- Vusikhis A.S., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I. Modeling of kinetics of joint reduction of iron and nickel from multicomponent oxide melt by hydrogen in the bubbled layer. *Journal of physical chemistry*. 2008, vol. 82, no. 11, pp. 2030–2034.
- Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from multicomponent silicate melt in bubbling process. Report 1. Reducing agent – a mixture of CO – CO₂. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 731–736. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed within the framework of the state task of the IMET UrB RAS on the topic no. 0396-2015-0082.

Information about the authors:

A.S. Vusikhis, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (vas58@mail.ru)

L.I. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher (leo@imet.mplik.ru)

D.Z. Kudinov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (d.kudinov@mail.ru)

E.N. Selivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (pcmlab@mail.ru)

Received July 11, 2017