

УДК 669.15-198

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ БАРБОТАЖА. СООБЩЕНИЕ 3. ВОССТАНОВИТЕЛЬ – КОНВЕРТИРОВАННЫЙ ГАЗ*

Вусихис А.С.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)
Леонтьев Л.И.^{2,3,4}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор, 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. Известный способ переработки окисленных никелевых руд включает подачу руды в противотоке с высокотемпературными отходящими газами, плавку в барботажной зоне двухзонной печи, подачу углеродсодержащего топлива и кислородсодержащего дутья и получение расплава, который восстанавливается твердым восстановителем в плазменной зоне при нагреве азотом. Основной недостаток этого способа – низкое содержание никеля в сплаве, наличие кремния, углерода, хрома и других примесей. Для повышения качества ферроникеля предложено в плазменной зоне использовать конвертированный природный газ, который при обработке плазмой будет являться не только теплоносителем, но и восстановителем. Методом термодинамического моделирования, в основе которого лежит допущение о том, что при барботаже ванны с расплавом состав газа в достигших поверхности всплывающих пузырях близок к равновесному, описаны процессы совместного восстановления никеля и железа в системе 1,8 % NiO – 17,4 % FeO – 13,5 % CaO – 1,9 % MgO – 58,0 % SiO₂ – 7,4 % Al₂O₃, близкой по составу к магнезиальным никелевым рудам. Газ-восстановитель получен в результате кислородной конверсии природного газа с коэффициентом расхода (α) 0,25, 0,35 и 0,50 (при температуре 1823 К). В результате проведенных расчетов выявлены зависимости содержания оксидов никеля и железа в силикатном расплаве, степени их восстановления, кратности шлака и содержания никеля в сплаве от общего расхода газа, определяемого как произведение количества газа в единичной порции на количество расчетных циклов, а также количества никеля и железа, восстановленных единичной порцией газа. Независимо от доли водорода и оксида углерода в исходных газах увеличение их расхода монотонно снижает содержание оксида никеля в расплаве, в то время как содержание оксида железа первоначально возрастает, а затем – снижается. При продувке расплава продуктами конверсии природного газа с $\alpha = 0,25$ процесс восстановления протекает за счет водорода, влияние СО незначительно. Расход 54 м³/т газа позволяет достигнуть степени восстановления никеля 98,5 %, содержания оксида никеля в расплаве 0,028 %, кратности шлака 46 единиц. При одинаковом расходе газа с увеличением в исходной смеси долей СО₂ и Н₂О за счет повышения α ухудшаются показатели восстановления металлов из расплава: значения C_{NiO} и C_{FeO} и кратность шлака повышаются, а степени восстановления никеля и железа снижаются. Сравнение результатов с ранее полученными данными по восстановлению металлов из аналогичных расплавов оксидом углерода и водородом показало, что большей эффективностью обладает водород, несколько хуже показатели при использовании конвертированного газа с $\alpha = 0,25$. Восстановление никеля конвертированным газом ($\alpha = 0,35$) до степени восстановления 88 %, что соответствует его расходу 60 м³/т, происходит более эффективно, чем чистым СО. Однако конечные степени восстановления при использовании конвертированного газа достигают 90 %, в то время как при использовании СО приближаются к 100 %.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-957-962

ВВЕДЕНИЕ

Широко известная в металлургии технология плавки в жидкой ванне [1 – 4], в основе которой лежат бар-

ботажные процессы, может быть применена при получении ферроникеля из окисленных никелевых руд. На базе этой технологии разработан ряд способов, в которых плавление шихты и восстановление металлов из оксидного расплава разделены во времени и месте реализации [5 – 10]. В частности, предложен способ

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

переработки окисленных никелевых руд, включающий подачу руды в противотоке с высокотемпературными отходящими газами, плавку в барботажной зоне двухзонной печи с подачей углеродсодержащего топлива и кислородсодержащего дутья с получением расплава, который восстанавливается твердым восстановителем в плазменной зоне [11]. Основной недостаток способа – состав ферроникеля близок по составу к сплаву, полученному в электропечи [12, 13]: низкое содержание никеля, наличие кремния, углерода, хрома и других примесей.

Для повышения качества ферроникеля предлагается в плазменной зоне использовать конвертированный природный газ, который при обработке плазмой будет являться не только теплоносителем, но и восстановителем [14], так как в результате барботажа оксидного расплава восстановительными газами получают богатый ферроникель без вредных примесей [15].

Ранее методом термодинамического моделирования, в основе которого лежит допущение о том, что при барботаже глубокой ванны с расплавом состав газа во всплывающих пузырях, достигших поверхности, близок к равновесному [16], описаны процессы совместного восстановления никеля и железа в системе, близкой по составу к магнизальным никелевым рудам, смесями $\text{CO}-\text{CO}_2$ [17] и $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$ [18]. В результате проведенных расчетов выявлены зависимости содержания оксидов никеля (C_{NiO}) и железа (C_{FeO}), степени их восстановления (φ_{Ni} и φ_{Fe}), кратности шлака и содержания никеля в сплаве (C_{Ni}) в силикатном расплаве от общего расхода газа (M_r , моль), определяемого как произведение количества газа в единичной порции (m_r , моль) на количество циклов (k), а также количества никеля (n_{Ni}) и железа (n_{Fe}), восстановленных одной порцией газа, и содержания газов в единичной порции от номера цикла (Z).

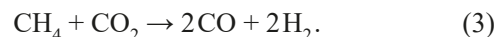
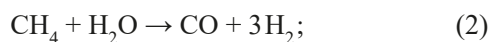
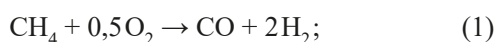
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе приведены результаты моделирования процесса совместного восстановления никеля и железа из силикатного расплава конвертированным газом разного состава.

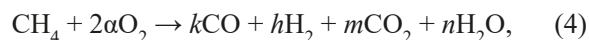
Процессы конверсии природного газа широко известны [19, 20].

По используемому окислителю выделяют следующие варианты получения конвертированных газов: кислородная конверсия, конверсия водяным паром, углекислотная конверсия.

Окисление метана (основного компонента углеводородных газов) при получении конвертированного газа протекает по следующим основным суммарным реакциям:



Для анализа выбран процесс кислородной конверсии как наименее энергетически затратный. В основу процесса положена реакция



где α – коэффициент расхода, определяемый как отношение количества кислорода, поданного на окисление углеводородов, к его количеству, необходимому для полного окисления метана до CO_2 и H_2O по реакции $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$; k , h , m и n – коэффициенты, определяющие количество газов при окислении CH_4 при заданном значении α .

Термодинамическое моделирование проведено при температуре 1823 К, давлении 0,1 МПа, газовая фаза – конвертированный газ. Результаты приведены ниже:

Газ	α	Содержание, % (объем.)			
		CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O
1	0,25	33,1	0	66,3	0
2	0,35	30,9	2,4	55,8	10,9
3	0,50	26,3	6,9	40,4	26,4

Количество газа в единичном цикле расчетов – 1 моль, а компонентов в исходном оксидном расплаве: 1 моль NiO, 10 моль FeO, 40 моль SiO₂, 3 моль Al₂O₃, 10 моль CaO, 2 моль MgO.

Анализ полученных данных показывает, что в ходе барботажа содержание оксида никеля в расплаве монотонно уменьшается, а степень восстановления увеличивается независимо от доли водорода и оксида углерода CO в исходных газах, используемых для расчетов (рис. 1). Если восстановление металлов вести смесью $\text{CO} + \text{H}_2$, то с увеличением расхода газа содержание оксида никеля в расплаве монотонно уменьшается практически до нуля. При наличии в исходной смеси CO_2 и H_2O равновесные значения C_{NiO} повышаются, а степени восстановления снижаются.

Содержание оксида железа в расплаве сначала возрастает, проходит через максимум, а затем снижается (рис. 2). Константы равновесия реакций восстановления никеля водородом и оксидом углерода CO многократно больше, чем для железа. Количество металлического никеля (n_{Ni})₁, образованного в ходе взаимодействия его оксида с единичной порцией газа, на порядок выше этих значений для железа (n_{Fe})₁. В результате содержание оксида никеля в системе уменьшается, а оксида железа незначительно возрастает. В дальнейшем значения n_{Ni} с ростом расхода газа монотонно уменьшаются, а n_{Fe} – проходят через максимум. Поэтому изменение значений C_{NiO} происходит монотонно, а C_{FeO} – проходит через максимум. Количество восстановленных никеля и железа при обработке расплава единичной порцией газа меняются симбатно.

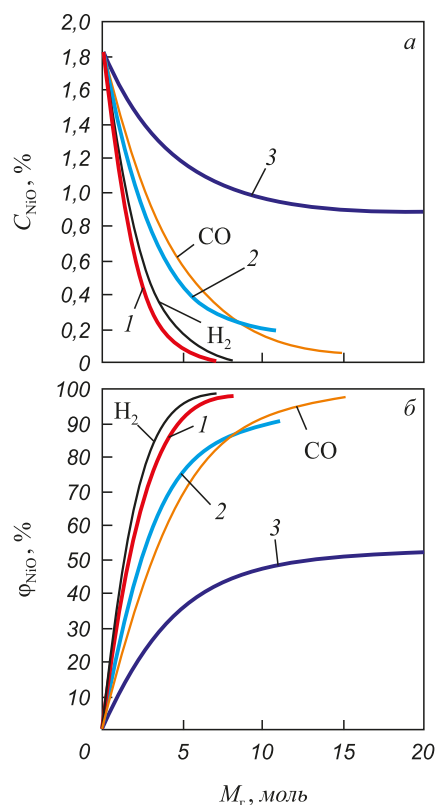


Рис. 1. Изменение содержания оксида никеля (а) и степени его восстановления (б) в расплаве в зависимости от общего расхода газа (здесь и далее номера кривых по таблице, CO [9], H₂ [10])

Fig. 1. Change in content of nickel oxide (a) and degree of its reduction (b) in the melt depending on total gas consumption (hereinafter, numbers of curves as are in the Table, CO [9], H₂ [10])

Параметры, соответствующие завершающему циклу расчетов ($Z_{\max}$) при различных составах конвертированного газа

Parameters corresponding to the final calculation cycle ($Z_{\max}$) at different composition of the converted gas

Показатель	Значение показателя для газа		
	1	2	3
$Z_{\max}$	8	11	21
M_r , моль	8	11	21
C_{NiO} , % (по массе)	0,028	0,177	0,884
C_{FeO} , % (по массе)	16,89	17,29	17,44
V , м ³ /т	54,0	74,7	142,5
H_2^* , %	58,80	53,45	38,47
H_2O^* , %	8,30	13,21	28,19
CO^* , %	32,10	31,40	28,08
CO_2^* , %	1,16	1,97	5,24
Кратность шлака	46	59	97
C_{Ni} , %	65,3	78,1	87,6
ϕ_{Ni} , %	98,5	90,4	51,7
ϕ_{Fe} , %	5,50	2,70	0,77

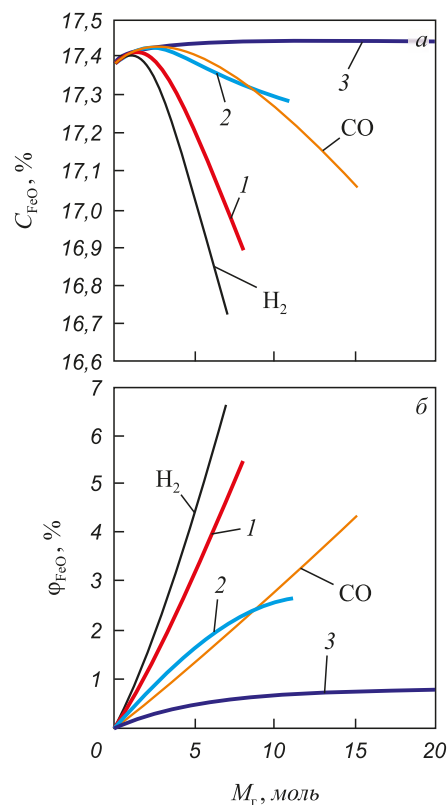


Рис. 2. Изменение содержания оксида железа (а) и степени его восстановления (б) в расплаве в зависимости от общего расхода газа

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

Общее количество металла, восстановленного единичной порцией газа, как сумма $(n_{Ni})_1$ и $(n_{Fe})_1$ в первом цикле имеет максимальное значение, по мере развития процесса – уменьшается. Соответственно, первоначально в отходящем газе доли CO и H₂ минимальны, в дальнейшем увеличиваются и приближаются к пределу (рис. 3).

Содержание никеля в образующемся металлическом сплаве монотонно уменьшается по мере увеличения количества введенного в систему газа M_r (рис. 4). Это связано с тем, что по мере развития процесса восстановления значения n_{Ni} уменьшаются, а значения n_{Fe} остаются на том же уровне. В определенный момент восстановление никеля практически полностью завершается, в то время как железо продолжает восстанавливаться. В приведенных расчетах при ϕ_{Ni} , близком к 98,5 %, величина ϕ_{Fe} не превышает 6,0 % (рис. 1, 2). Лишь после полного восстановления никеля происходит восстановление железа, что сопровождается увеличением его доли в сплаве.

По мере уменьшения значений C_{NiO} доли водорода и оксида углерода, расходуемых на взаимодействие с оксидом железа, увеличиваются.

Кратность шлака как отношение количеств оксидного расплава и металла составляет порядка 45 единиц (рис. 4). Это означает, что доля металла в системе по

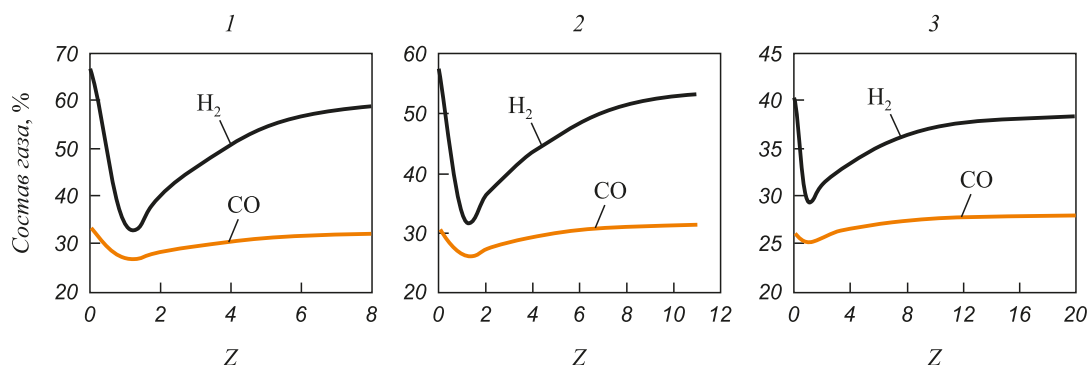


Рис. 3. Изменение содержаний H_2 и CO в единичной порции по циклам обработки расплава газами 1 – 3 (по таблице)

Fig. 3. Changes in content of H_2 and CO in single portion by cycles of melt treatment with gases 1 – 3 (according to the Table)

завершению процесса для представленных значений M_T не превышает 2 %.

На рис. 1, 2 и 4 для сравнения представлены значения C_{NiO} , C_{FeO} , C_{Ni} , соответствующие восстановлению железа и никеля водородом и оксидом углерода CO [9, 10]. Из представленных данных следует, что более эффективно восстановление металлов чистым водородом.

Параметры системы, соответствующие завершающему циклу расчетов (Z_{max}) при различных составах конвертированного газа, представлены в таблице.

При продувке расплава продуктами конверсии природного газа при $\alpha = 0,25$ процесс восстановления в основном осуществляется за счет водорода, влияние CO незначительно. Восстановление никеля конвертированным газом ($\alpha = 0,35$) до ϕ_{Ni} около 88 % (что соответствует расходу около $60 \text{ м}^3/\text{т}$) происходит более эффективно, чем чистого CO . Одинаковые показатели в первом случае достигаются при меньшем расходе газа-восстановителя, чем во втором. Дальнейшее увеличение расхода газа-восстановителя приводит к обратному эффекту. Оксид углерода CO восстанавливает лучше. Степень восстановления никеля может достигать почти 100 %, а в случае использования конвертированного газа с $\alpha = 0,35$ едва превысит 90 %.

Выводы

В зависимости от поставленной цели в качестве восстановительного газа может быть использован конвертированный газ различного состава, для получения которого могут быть применены различные виды твердого, жидкого или газообразного топлива. Хотя наиболее эффективно восстановление металлов из оксидных расплавов с использованием водорода, но перспективы массового использования такого газа весьма ограничены. Чем больше коэффициент расхода α , тем меньше показатели степени восстановления. Полученные сведения важны для описания термоэкстракционных процессов, связанных с периодическим выводом металлической фазы и непрерывным выводом газов.

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. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков, В.П. Быстров, А.Д. Васкевич и др. – М.: Металлургия, 1988. – 208 с.
3. 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.
4. Лазарев В.И., Спесивцев А.В., Быстров В.П., Ладин Н.А., Зайцев В.И. Развитие плавки Ванюкова с обеднением шлаков // Цветные металлы. 2000. № 6. С. 33 – 36.

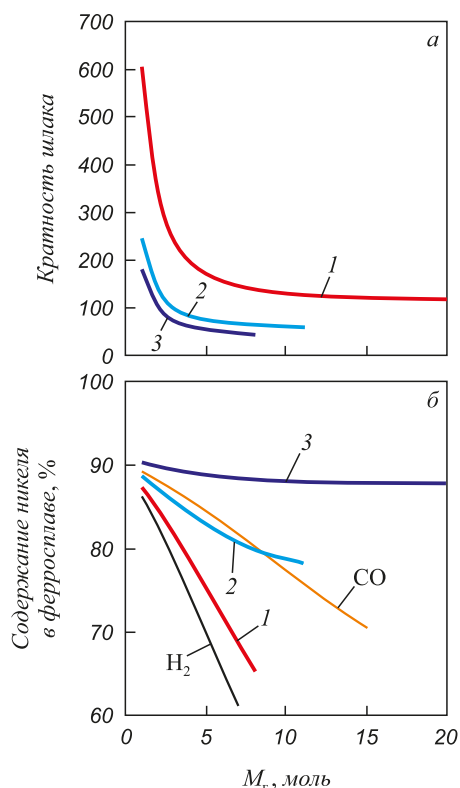


Рис. 4. Изменение кратности шлака (а) и содержания никеля в сплаве (б) в зависимости от расхода газа

Fig. 4. Change in slag ratio (a) and nickel content in the alloy (b) depending on gas consumption

5. 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.
6. Федоров А.Н., Комков А.А., Бруэк В.Н., Гнусков Н.А., Крыжановский А.П. Освоение процесса Ванюкова для переработки окисленных никелевых руд на Южно-уральском никелевом комбинате // Цветные металлы. 2007. № 12. С. 33 – 37.
7. Ковган П.А., Абуов М.Г., Едильбаев А.И. Перспективные технологии переработки бедных окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 43 – 45.
8. Цымбулов Л.Б., Князев М.В., Цемехман Л.Ш., Кудобаев Е.А., Головлен 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.
9. 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.
10. Пахомов Р.А., Старых Р.В. Особенности плавки окисленных никелевых руд в агрегате барботажного типа. I. Термодинамический анализ плавки // Металлы. 2015. № 5. С. 3 – 14.
11. Пат. № 2064516 РФ. Способ переработки окисленных никелевых руд / Ковган П.А., Рогов П.В., Муфтахов А.С., Волков В.А., Козырев В.В., Барсуков В.В.; заявл. 13.07.1994.
12. Грань Н.И., Онищин Б.П., Майзель Е.И. Электроплавка окисленных никелевых руд. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
13. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнейерсон Я.М. Никель. В 3 т. Т. 2. – М.: ООО Наука и Технология, 2001. – 468 с.
14. Жиров Д.М. Применение плазменно-дугового жидкофазного восстановления металлов газами для переработки комплексного сырья // Современная электрометаллургия. 2011. № 3. С. 24 – 27.
15. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
16. 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.
17. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Особенности восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава при барботаже. Сообщение 1. Восстановитель – смесь CO – CO₂ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 731 – 736.
18. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Особенности восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава при барботаже. Сообщение 2. Восстановитель – смесь H₂ – H₂O // Изв. вуз. Черная металлургия. Т. 61. № 10. С. 794 – 799.
19. Кутепов А.Н., Бондарева Т.И., Беренгартен Т.И. Общая химическая технология. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 405 с.
20. Арутюнов В.С. Окислительная конверсия природного газа. – М.: Красанд, 2011. – 590 с.

Поступила 1 ноября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 957–962.

THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM MULTICOMPONENT SILICATE MELT IN BUBBLING PROCESS. REPORT 3. CONVERTED GAS AS A REDUCING AGENT

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

¹ Institute of Metallurgy of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia

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

³ Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences, Moscow, Russia

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

Abstract. Common method of oxidized nickel ores processing includes ore feeding in countercurrent with high-temperature waste gases, melting in bubbling zone of a two-zone furnace, supplying carbonaceous fuel and oxygen-containing blasting to produce melt that is reduced by solid reducing agent in plasma zone when heated with nitrogen. The main disadvantages of this method are low nickel content in alloy and presence of silicon, carbon, chromium and other impurities. To improve quality of ferronickel, it is proposed to use converted natural gas in plasma zone, which, when processed by plasma, is not only a heat carrier, but also a reducing agent. The method is based on assumption that at melt bubbling, composition of gas in bubbles that reached bath surface is close to equilibrium. Gas-reducing agent is obtained by oxygen conversion of natural gas with ratio α equal to 0.25; 0.35 and 0.50 respectively ($T = 1823$ K). Based on calculations, dependencies of content of nickel and iron oxides in silicate melt, degree of their reduction, ratio of slag and metal and nickel content in the alloy on total gas flow determined as the product of the gas amount in a single batch and the number of calculation cycles, as well as the amount of nickel and iron, reduced by a single portion of gas are revealed. Regardless of

proportion of hydrogen and carbon monoxide in source gases, increase in their consumption monotonously reduces content of nickel oxide in the melt, while content of iron oxide initially increases, and then decreases. When melt is blown with natural gas conversion products with $\alpha = 0.25$, reduction process takes place due to hydrogen, effect of CO is insignificant. Flow rate of 54 m³/t of gas allows to achieve 98.5 % degree of nickel reduction, content of nickel oxide in melt is 0.028 %, ratio of slag and metal is 46 units. At equal gas consumption, with increase in proportions of CO₂ and H₂O in the initial mixture, by increasing α , values of metals reduction from melt deteriorate: values of C_{NiO} and C_{FeO} and ratio of slag and metal increase, and degree of nickel and iron reduction decreases. Comparison of results with previously obtained data on metals reduction from similar melts by carbon monoxide and hydrogen has shown that hydrogen has greater efficiency, somewhat worse results are demonstrated when converted gas with $\alpha = 0.25$ is applied. Nickel reduction by converted gas ($\alpha = 0.35$) to reduction rate of 88 %, which corresponds to its consumption of 60 m³/t, is more effective than by pure CO. However, final values of degree of reduction using converted gas reach 90 %, while for CO they approach 100 %.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-957-962

REFERENCES

1. Romenets V.A., Valavin V.S., Usachev A.B. *Protsess Romelt*. Romenets V.A. ed. Moscow: Ruda i metall, 2005, 399 p. (In Russ.)
2. Vanyukov A.V., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. etc. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 208 p. (In Russ.)

3. 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.
 4. Lazarev V.I., Spesivtsev A.V., Bystrov V.P., Ladin N.A., Zaitsev V.I. Development of Vanyukov melting with slags depletion. *Tsvetnye metally*. 2000, no. 6, pp. 33-36. (In Russ.)
 5. Kovgan P.A., Volkov V.A., Kozyrev V.V. etc. Environment friendly technology for coke-free melting of oxidized nickel ores. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1994, no. 11-12, pp. 16-17. (In Russ.)
 6. Fedorov A.N., Komkov A.A., Bruke V.N., Gnuskov N.A., Kryzhanovskii A.P. Mastering Vanyukov Process for oxidized nickel ores processing at the South Ural Nickel Plant. *Tsvetnye metally*. 2007, no. 12, pp. 33-37. (In Russ.)
 7. Kovgan P.A., Abuov M.G., Edil'baev A.I. Promising technologies for processing of poor oxidized nickel ores. *Tsvetnye metally*. 2008, no. 2, pp. 43-45. (In Russ.)
 8. Tsybulov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhan L.Sh., Kudabaev E.A., Golovlev Yu.I. Analysis of various variants of technological scheme for oxidized nickel ores processing to ferronickel using Vanyukov two-zone furnace. *Tsvetnye metally*. 2010, no. 10, pp. 15-21. (In Russ.)
 9. Bystrov V.P., Fedorov A.N., Shchelkunov V.V., Bystrov S.V. Using Vanyukov process for oxidized nickel ores processing. *Tsvetnye metally*. 2011, no. 8-9, pp. 155-158. (In Russ.)
 10. Pakhomov R.A., Starykh R.V. Melting of oxidized nickel ores in a barbotage unit: I. Thermodynamic analysis of melting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 9, pp. 675-684.
 11. Kovgan P.A., Rogov P.V., Muftakhov A.S., Volkov V.A., Kozyrev V.V., Barsukov V.V. *Sposob pererabotki okislennykh nikelovykh rud* [Method of processing oxidized nickel ores]. Patent RF no. 2064516. (In Russ.)
 12. Gran' N.I., Onishchin B.P., Maizel' E.I. *Elektroplavka okislennykh nikelovykh rud* [Electrosmelting of oxidized nickel ores]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 248 p. (In Russ.)
 13. Reznik I.D., Ermakov G.P., Shneerson Ya.M. *Nikel'. V 3 t. T. 2* [Nickel. In 3 vols. Vol. 2]. Moscow: OOO Nauka i Tekhnologiya, 2001, 468 p. (In Russ.)
 14. Zhirov D.M. Application of plasma-arc liquid-phase reduction of metals with gases for recycling of complex raw materials. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2011, no. 3, pp. 24-27. (In Russ.)
 15. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pirometallurgicheskaya pererabotka kompleksnykh rud* [Pyrometallurgical processing of complex ores]. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.)
 16. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N. Investigation of processes of metal oxides reduction from the melt by reducing gas in bubbled layer. *Vestnik UGTU-UPI*. 2004, no. 15 (45), p. 1, pp. 93-95. (In Russ.)
 17. 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 bibling process. Report 1. Reducing agent – a mixture of CO – CO₂. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 731-736. (In Russ.)
 18. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Selivanov E.N. Osobennosti Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from multicomponent silicate melt in bibling process. Report 2. Reducing agent – a mixture of H₂ – H₂O. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2018, vol. 61, no. 10, pp. 794-799. (In Russ.)
 19. Kutepov A.N., Bondareva T.I., Berengarten T.I. *Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya* [General chemical technology]. Moscow: Akademkniga, 2004, 405 p. (In Russ.)
 20. Arutyunov V.S. *Okislitel'naya konversiya prirodnogo gaza* [Oxidative conversion of natural gas]. Moscow: Krasand, 2011, 590 p. (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 November 2, 2018