

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ ПРИ БАРБОТАЖЕ ГАЗОМ-ВОССТАНОВИТЕЛЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ОКСИДНОГО РАСПЛАВА СООБЩЕНИЕ 3. РАЗДЕЛЕНИЕ ФЕРРОНИКЕЛЯ И ОКСИДНОГО РАСПЛАВА

*Вусихис А.С.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)*

*Леонтьев Л.И.<sup>2,3,4</sup>, д.т.н., академик, главный научный сотрудник (leo@imet.mplik.ru)*

*Ченцов В.П.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (vpc44@mail.ru)*

*Кудинов Д.З.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (d.kudinov@mail.ru)*

*Селиванов Е.Н.<sup>1</sup>, д.т.н., заведующий лабораторией пирометаллургии*

*цветных металлов (pcmlab@mail.ru1)*

<sup>1</sup> Институт металлургии УрО РАН

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

<sup>2</sup> Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 32а)

<sup>3</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

(119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

<sup>4</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Используя уравнения физико-химической гидродинамики и полученные ранее в результате измерений данные о поверхностных и межфазных свойствах металлических и оксидных расплавов, описаны условия формирования металлической фазы при барботаже расплава окисленной никелевой руды монооксидом углерода. Определены критические размеры газового пузыря  $R_{п,кр}$  и металлической капли  $r_{к,кр}$  движущихся в оксидном расплаве без дробления в температурном интервале от 1550 до 1750 °С. Обнаружено, что с температурой значения  $R_{п,кр}$  меняются незначительно и возрастают с  $6,35 \cdot 10^{-2}$  м (при 1550 °С) до  $6,58 \cdot 10^{-2}$  м (при 1750 °С), параметр  $r_{к,кр}$  зависит от состава капли и температуры и меняется от  $2,1 \cdot 10^{-3}$  до  $2,9 \cdot 10^{-3}$  м. Определены размеры капель металла, образующихся на единичном пузыре при восстановлении никеля и железа из оксидного расплава. По мере уменьшения содержания оксидов никеля и железа в расплаве с увеличением общего расхода СО происходит снижение содержания никеля в каплях ферроникеля с 89 до 18 %, а их диаметры уменьшаются с  $1,4 \cdot 10^{-3}$  до  $8,0 \cdot 10^{-4}$  м. При этом масса капли снижается с  $9,4 \cdot 10^{-5}$  до  $1,6 \cdot 10^{-5}$  кг. Выявлены условия всплывания системы газовый пузырь – капля металла от их размеров. Во всех интервалах температуры и содержания никеля система пузырь СО – капля металла начинает подниматься в оксидном расплаве при соотношении  $r_{к}/R_{п}$  менее 0,68 – 0,78. Для оценки стабильности системы пузырь СО – капля металла при вышеуказанных размерах пузыря и капли проведены расчеты параметров, определяющих их совместное движение. Показано, что отрыв капли металла от пузыря не возможен при условиях реализации процесса в пирометаллургических агрегатах. Описан процесс формирования металлической фазы в результате барботажного восстановления никеля и железа монооксидом углерода, который заключается в следующем. Взаимодействие оксидного расплава с газом сопровождается формированием капель металла, которые, закрепляясь на пузырях, двигаются к поверхности оксидного расплава. Первоначально формируется металл с содержанием 80 – 90 % Ni, а по мере уменьшения доли никеля в оксидном расплаве его содержание в каплях металла снижается до 20 %. На поверхности оксидного расплава капли металла сливаются и при достижении размера более  $5 \cdot 10^{-3}$  м они «прорывают» поверхность и опускаются на дно. В случае столкновения капли с поднимающимися навстречу системами пузырь – капля они могут как слиться с ними, так и обтекать их. При слиянии мелкие капли будут ассимилированы и подняты на поверхность. Сила отрыва капли от пузыря существенно превышает силу тяжести капель, поэтому система пузырь – капля металла стабильна при всех рассмотренных соотношениях их размеров.

**Ключевые слова:** металлическая фаза, оксидный расплав, газ-восстановитель, барботаж; газовый пузырь, капля металла, условия всплывания, коалесценция, критические размеры, поверхностные свойства, межфазное натяжение, расслаивание, коагуляция.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-12-960-965

В соответствии с ранее приведенными теоретическими выкладками [1] и результатами измерений поверхностных свойств расплавов [2] выполнены расчеты параметров, определяющих разделение ферроникеля и оксидного расплава в ходе барботажа газом-восстановителем (СО).

В барботажных процессах предельный размер пузыря газа, всплывающего без дробления в жидкости, зависит от ее поверхностного натяжения ( $\sigma_{шд}$ ) и плотности ( $\rho_{шд}$ ), а также от плотности газа ( $\rho_r$ ). В соответствии с теоретическими выкладками [1] с использованием данных о поверхностных свойствах и плотностях метал-

лических железо-никелевых (0 – 100 % Ni) [2] и оксидного рудного расплава проведены расчеты изменения критического радиуса пузыря  $R_{п.кр}$  монооксида углерода в температурном интервале от 1550 до 1750 °С. Как следует из полученных данных (рис. 1), с температурой величина  $R_{п}$  меняется незначительно и возрастает с  $6,35 \cdot 10^{-2}$  м (при 1550 °С) до  $6,58 \cdot 10^{-2}$  м (при 1750 °С).

Газовая флотация частиц металла в оксидном расплаве происходит, если сила опускания капли ( $F_k$ ) меньше подъемной силы ( $F_{п}$ ) пузыря ( $F_k < F_{п}$ ), при этом  $\frac{r_k}{R_{п}} < \left( \frac{\rho_{шл}}{\rho_{ме} - \rho_{шл}} \right)^{1/3}$ . В рассматриваемом случае при контакте капли ферроникеля с пузырем CO–CO<sub>2</sub> это соотношение зависит от содержания никеля в сплаве и температуры (рис. 2).

Во всех интервалах температуры и содержания никеля система пузырь – капля металла начинает подниматься в оксидном расплаве при соотношении  $r_k/R_{п} = 0,68 - 0,78$ . Никель как металл, обладающий большей плотностью, начинает всплывать при соотношении  $r_k/R_{п} \approx 0,74$  (при 1550 °С). С увеличением

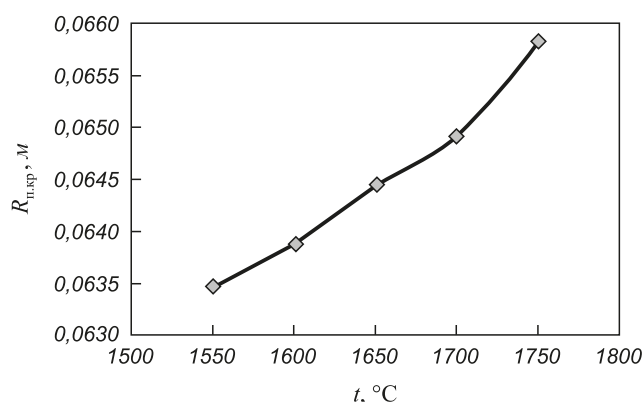


Рис. 1. Изменение критического радиуса пузыря от температуры

Fig. 1. Temperature dependence of bubble critical radius

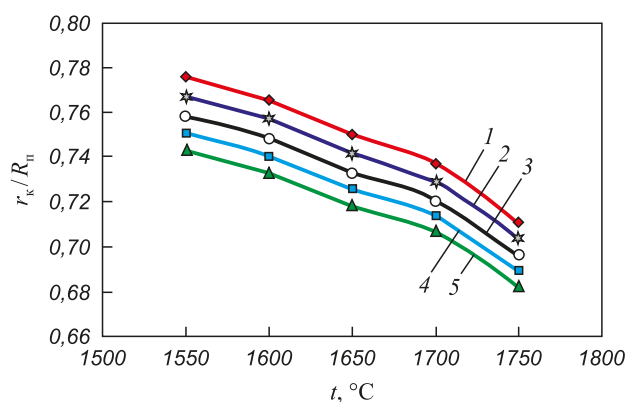


Рис. 2. Влияние температуры на соотношение  $r_k/R_{п}$  при содержании никеля в сплаве 0 (1), 25 % (2), 50 % (3), 75 % (4), 100 % (5)

Fig. 2. Temperature dependence of  $r_k/R_{п}$  ratio (Nickel content in alloy: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5), mas. %)

содержания железа в сплаве его плотность уменьшается, поэтому капля поднимаемого на поверхность металла может быть более крупная, и для железа имеем  $r_k/R_{п} = 0,78$ . Уменьшение плотности шлака с ростом температуры происходит интенсивнее, чем металла [2], поэтому в рассматриваемой системе возможна флотация только более мелких капель.

Выносимые с газовыми пузырями на поверхность оксидного расплава мелкие капли металла могут осесть на дно в случае превышения их массы над силами поверхностного натяжения шлака. Ранее [3, 4] применительно к восстановительно-сульфидирующей шахтной плавке окисленных никелевых руд определены масса и диаметр капель штейна, способных «прорвать» поверхность шлакового расплава, которые составили 0,35 г и  $5 \cdot 10^{-3}$  м соответственно. Поскольку плотность металла в 1,5 – 2,0 раза выше плотности штейна, эти величины в рассматриваемом случае составляют 0,35 г и  $4 \cdot 10^{-3}$  м.

Критический радиус  $r_{к.кр}$  капли металла, оседающей в оксидном расплаве без дробления, зависит от ее состава и температуры. Значения  $r_{к.кр}$  в интервале 1550 – 1750 °С для сплавов с содержанием никеля от 0 до 100 % представлены на рис. 3.

Критический радиус капли прямо пропорционален межфазному натяжению на границе металлического и оксидного расплава и обратно пропорционален плотности металла. Поскольку межфазное натяжение металла с ростом концентрации никеля в сплаве и увеличением температуры уменьшается быстрее его плотности, снижается и величина критического радиуса капли. Во всем интервале температур и составов значение  $r_{к.кр}$  меняется от  $2,1 \cdot 10^{-3}$  до  $2,9 \cdot 10^{-3}$  м. Эти значения близки к радиусу капли, «прорывающей» поверхность шлака.

Для описания барботажных процессов восстановления оксидных расплава газом-восстановителем предложена модель, позволяющая, не прибегая к экспериментам, с помощью расчетов термодинамического равновесия описать кинетику бар-

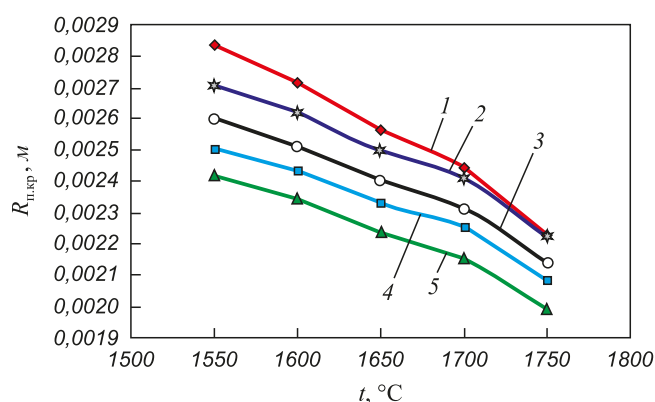


Рис. 3. Зависимость критического радиуса капли от температуры для сплавов с 0 (1), 25 % (2), 50 % (3), 75 % (4), 100 % (5) Ni

Fig. 3. Temperature dependence of drop critical radius (Nickel content in alloy: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5), mas. %)

ботажа оксидного расплава различными восстановительными газами [4]. Модель апробирована на системе NiO–FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–CaO–Mg–CO–CO<sub>2</sub>. Сравнительный анализ расчетных [5] и экспериментальных [6, 7] данных показал, что предложенная методика может быть использована при качественном анализе процессов взаимодействия многокомпонентных оксидных расплавов с газами-восстановителями различного состава.

Согласно расчетам [5], в ходе восстановления оксидного расплава (1550 °С), первоначально содержащего 1 моль NiO (1,8 % по массе) и 10 молей FeO (17,4 % по массе), монооксидом углерода при температуре 1550 °С содержание оксида никеля в оксидном расплаве уменьшается до 0,04 %, а оксида железа – до 17,0 % (рис. 4). Доля никеля, перешедшего в металлическую фазу, возрастает до 97,8 %, а железа до 4,4 % (рис. 5).

Полученные данные использованы для оценки размеров единичной капли, ее массы и состава при восстановлении металла единичным пузырем монооксида

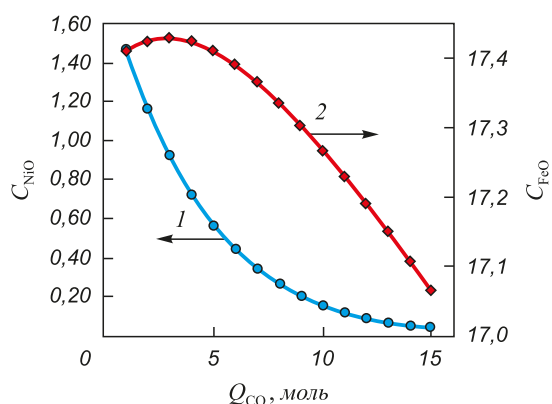


Рис. 4. Изменение содержания оксидов никеля (1) и железа (2) в расплаве от количества введенного монооксида углерода ( $Q_{CO}$ )

Fig. 4. Nickel (1) and iron (2) oxide dependence on injected carbon monoxide ( $Q_{CO}$ )

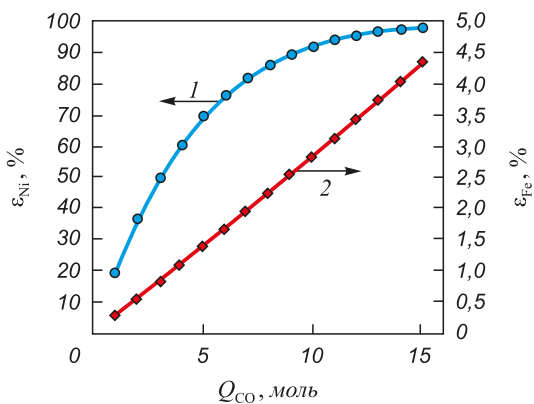


Рис. 5. Изменение доли ( $\epsilon$ , %) восстановленных никеля (1) и железа (2) от количества введенного монооксида углерода ( $Q_{CO}$ )

Fig. 5. Quantity dependence of reduced nickel (1) and iron (2) on injected carbon monoxide ( $Q_{CO}$ ) quantity

да углерода, радиус которого равен предельному  $R_{II}$ , всплывающему в расплаве без дробления. Значение  $R_{II}$  составляет  $6,35 \cdot 10^{-2}$  м, объем  $1,07 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Пузырь такого объема содержит  $7,06 \cdot 10^{-2}$  моля CO, поскольку при температуре 1550 °С плотность CO = 0,174 кг/м<sup>3</sup>. Изменение радиуса такой капли и ее состава в зависимости от общего расхода газа представлено на рис. 6. Радиус капли металла, восстановленного единичным газовым пузырем, до равновесного содержания CO–CO<sub>2</sub>, меняется с  $1,4 \cdot 10^{-3}$  до  $8,0 \cdot 10^{-4}$  м при изменении содержания никеля в капле ферроникеля с 89 до 18 %. При этом масса капли снижается с  $9,4 \cdot 10^{-5}$  до  $1,6 \cdot 10^{-5}$  кг.

Для оценки стабильности системы пузырек CO – капля металла при вышеуказанных размерах пузыря и капли проведены расчеты параметров, определяющих их совместное движение. Результаты расчетов углов  $\Theta$ , радиусов капли  $r_k$  и пузыря  $R_{II}$  и их соотношений  $r_k/R_{II}$ , определяющих размыкание системы, а также сил отрыва как алгебраической суммы сил тяжести капли  $F_g$ , поверхностного натяжения  $F_\sigma$ , приведены в табл. 1. Размеры газового пузыря, сил поверхностного натяжения  $F_\sigma$  и соотношений  $F_g/F_\sigma$  при радиусе капли  $r_k = 2,4 \cdot 10^{-3}$  м и ее силе тяжести  $3,1 \cdot 10^{-4}$  Н приведены в табл. 2.

Как видно из приведенных данных, отрыв капли металла от пузыря невозможен при условиях реализации процесса в пирометаллургических агрегатах. При значениях  $R_{II}$  и  $r_k$  меньше критических и любом соотношении их размеров в условиях движения вверх системы пузырек CO – капля металла в оксидном расплаве отделения капли от пузыря не происходит.

С учетом полученных данных процесс формирования металлической фазы при восстановлении никеля и железа из оксидного расплава руды монооксидом углерода в режиме барботажа представлен рядом последовательных процессов (рис. 7). Первоначально происходит восстановление металлов (Ni и Fe), которые образуют каплю, закрепленную на поверхности пузыря

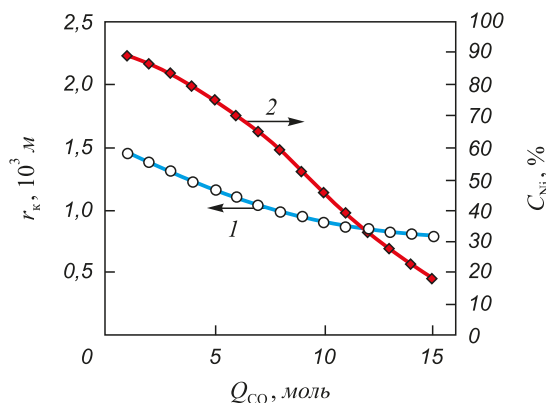


Рис. 6. Изменение радиуса капли металла, восстановленного единичным пузырем монооксида углерода (1), и содержания никеля в капле (2) от параметра ( $Q_{CO}$ )

Fig. 6. Drop radius of metal reduced by single CO bubble (1) and nickel content (2) dependence on injected carbon monoxide ( $Q_{CO}$ ) quantity

## Параметры формирования системы пузырь СО – капля металла

Table 1. Parameters of bubble CO – a drop of metal system formation

Параметр	Значение параметра						
	30	35	40	45	50	55	65
$\Theta$ , град	30	35	40	45	50	55	65
$r_k/R_n$	0,066	0,23	0,37	0,48	0,58	0,65	0,74
$r_k, 10^3$ м	7,9	8,5	9,1	9,771	10,4	11,1	12,8
$R_n, 10^3$ м	119	37,0	24,9	20,4	18,2	17,0	17,2
$F_g = F_\sigma$ , Н	0,011	0,014	0,017	0,021	0,025	0,031	0,046

## Условия движения системы пузырь СО – капля металла

Table 2. The motion conditions of the bubble CO – a drop of metal

Параметр	Значение параметра						
	0,066	0,23	0,37	0,48	0,58	0,65	0,74
$r_k/r_n$	0,066	0,23	0,37	0,48	0,58	0,65	0,74
$F_\sigma$ , Н	0,0033	0,0038	0,0044	0,0051	0,0058	0,0066	0,0087
$R_n, 10^3$ м	38,1	10,4	6,6	5,0	4,2	3,7	3,2
$F_g/F_\sigma$	0,09	0,08	0,07	0,06	0,053	0,047	0,035

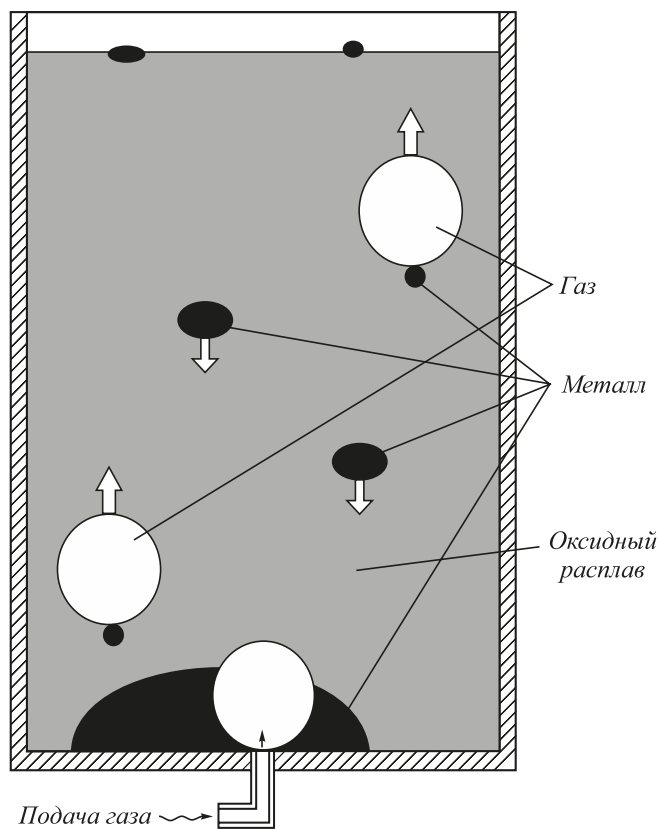


Рис. 7. Схема процесса формирования металлической фазы при барботаже оксидного расплава монооксидом углерода

Fig. 7. Scheme of metallic phase formation in barbotage process of oxide melt by CO

газа. Система пузырь СО – капля металла движется к поверхности оксидного расплава. Капли металла имеют относительно большой размер  $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  м и содержат более 70 % никеля (рис. 6). На поверхности расплава газовый пузырь разрушается, капли металла укрупняются до размера  $r_k \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, «прорывают» поверхность и оседают на дно. В случае столкновения капли с поднимающимися навстречу системами пузырь – капля они могут как слиться с ними, так и обтекать их. При слиянии мелкие капли будут ассимилированы и подняты на поверхность. Сила отрыва капли от пузыря существенно превышает силу тяжести капель, поэтому система пузырь – капля металла стабильна при всех рассмотренных соотношениях их размеров. На начальной стадии восстановления на дно оседают капли с повышенным (более 70 %) содержанием никеля. В ходе восстановления размер всплывающих капель падает и к завершению процесса восстановления никеля их радиус составляет  $7 \cdot 10^{-4}$  м, а содержание никеля уменьшается до 20 %. При взаимодействии с монооксидом углерода первым восстанавливается никель (рис. 5), а по мере снижения его содержания в оксидном расплаве (рис. 4) восстанавливается железо.

**Выводы.** При барботажном восстановлении никеля и железа монооксидом углерода формируются капли металла, которые двигаются к поверхности оксидного расплава совместно с пузырями газа. На поверхности капли металла, размер которых зависит от размера единичного пузыря, сливаются и опускаются на дно.

В первоначальный период может быть сформирована металлическая донная фаза с 70 – 80 % Ni, которая в дальнейшем разубоживается металлом с меньшим содержанием никеля.

Предложенная методика позволяет оценить параметры барботажных процессов (Ромел, Ausmelt, Sirosmelt, Ванюкова и т.п.), используемых в черной [8 – 11] и цветной [12 – 21] металлургии, и повысить эффективность их использования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вусихис А.С., Ченцов В.П., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Формирование металлической фазы при барботаже газом-восстановителем многокомпонентного оксидного расплава. Сообщение 1. Теоретические основы процесса // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 9. С. 639 – 644.
2. Вусихис А.С., Ченцов В.П., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Формирование металлической фазы при барботаже газом-восстановителем многокомпонентного оксидного расплава. Сообщение 2. Плотность и поверхностные свойства // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. № 1. С. 48 – 54.
3. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1969. – 408 с.
4. Шмонин Ю.Б. Пирометаллургическое обеднение шлаков цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1981. – 132 с.
5. 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 // The Third International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel, 2004.
6. Шаврин С.В., Захаров И.Н., Ипатов В.В. Кинетические закономерности восстановления шлака газом // Изв. АН СССР. Металлургия и горное дело. 1964. № 3. С. 22 – 31.
7. Крашеников М.В., Леонтьев Л.И. Математическая модель процесса получения ферроникеля при продувке оксидного расплава восстановительным газом // Расплавы. 2001. № 2. С. 37 – 41.
8. Роменец В.А. Процесс жидкофазного восстановления железа: разработка и реализация // Сталь. 1990. № 8. С. 20 – 27.
9. Роменец В.А., Вегман Е.Ф., Сакир Н.Ф. Процесс жидкофазного восстановления // Изв. вуз. Черная металлургия. 1993. № 7. С. 9 – 19.
10. Бондаренко Б.И., Шаповалов В.А., Гармаш Н.И. Теория и технология бескоксовой металлургии. – Киев: Наукова думка, 2003. – 538 с.
11. Роменец В.А., Вадавин В.С., Усачев А.Б. Процесс Ромелт. – М.: МИСиС, Изд. дом «Руда и Металлы», 2005. – 399 с.
12. Ежов Е.И., Вернер Б.Ф., Рыжов О.А. и др. Плавка окисленной никелевой руды на ферроникель в печи с погруженным факелом: Тр. ин-та Гипроникель. – Л.: изд. ин-та Гипроникель, 1977. Вып. 3 (67). С. 30 – 35.
13. Русаков М.Р., Востриков Г.В., Пинин Л.Н., Садовникова Е.А. Новые методы обеднения конвертерных и печных шлаков с использованием газообразных и жидких восстановителей и электроэнергии: Тр. ин-та Гипроникель. – Л.: изд. ин-та Гипроникель, 1979. С. 8 – 15.
14. Ежов Е.И., Вернер Б.Ф., Рыжов О.А. и др. Бескоксая плавка никельсодержащего сырья в агрегатах с погруженным факелом // Цветные металлы. 1984. № 8. С. 33 – 36.
15. Русаков М.Р. Обеднение шлаковых расплавок продувкой восстановительными газами // Цветные металлы. 1985. № 3. С. 40 – 42.
16. Ванюков А.В., Быстров В.П. Плавка в жидкой ванне. – М.: Металлургия, 1988. – 208 с.
17. Автогенные процессы в цветной металлургии / В.В. Мечев, В.П. Быстров, А.В. Тарасов, А.В. Гречко, Э.Н. Мазурук. – М.: Металлургия, 1991. – 416 с.
18. Рыжов О.А., Вигдорчик Е.М., Мосиондз К.И. и др. Новый процесс плавки окисленных никелевых руд в двухзонном агрегате // Цветные металлы. 1992. № 6. С. 19 – 21.
19. Ковган П.А., Абуов М.Г., Едильбаев А.И. Перспективные технологии переработки бедных окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 43 – 45.
20. Цымбулов Л.Б., Князев М.В., Цемехман Л.Ш. и др. Анализ различных вариантов технологической схемы переработки окисленных никелевых руд на ферроникель с применением двухзонной печи Ванюкова // Цветные металлы. 2010. № 10. С. 15 – 21.
21. 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.

Поступила 1 июля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 12, pp. 960–965.

## METALLIC PHASE FORMING IN BARBOTAGE OF MULTICOMPONENT OXIDE MELT BY REDUCTION GAS REPORT 3. FERRONICKEL AND OXIDE MELT SEPARATION

A.S. Vusikhis<sup>1</sup>, L.I. Leont'ev<sup>2,3,4</sup>, V.P. Chentsov<sup>1</sup>, D.Z. Kudinov<sup>1</sup>, E.N. Selivanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

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

<sup>3</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow, Russia

<sup>4</sup>National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** Using the equations of physico-chemical hydrodynamics and the data obtained earlier on the surface and interfacial properties of metallic and oxide melts, conditions for the formation of the metallic phase during bubbling of the oxidized nickel ore melt by carbon

monoxide are described. Critical dimensions of the gas bubble ( $R_b$ )<sub>cr</sub> and the metal droplet ( $r_d$ )<sub>cr</sub> are determined, moving in the oxide melt without crushing in the temperature range from 1550 to 1750 °C. It was found that the value of ( $R_b$ )<sub>cr</sub> varies with temperature and increases from  $6.35 \cdot 10^{-2}$  m (1550 °C) to  $6.58 \cdot 10^{-2}$  m (1750 °C), ( $r_d$ )<sub>cr</sub> depends on composition of the droplet and temperature and varies from  $2.1 \cdot 10^{-3}$  m to  $2.9 \cdot 10^{-3}$  m. The size of metal droplets formed on a single bubble is determined upon reduction of nickel and iron from the oxide melt. As the content of nickel and iron oxides decreases in the melt with an increase in the total CO flow rate, nickel content in ferrometal drops decreases from 89 to 18 %, and their diameters decrease from  $1.4 \cdot 10^{-3}$  m to  $8.0 \cdot 10^{-4}$  m. In this case, mass of the drop decreases from  $9.4 \cdot 10^{-5}$  to  $1.6 \cdot 10^{-5}$  kg. The conditions for emergence of the "gas bubble – a drop of metal" system from their dimensions are revealed. In all intervals of temperature and nickel content, the "bubble CO – a drop of metal" system begins to rise in the oxide melt at a ratio  $r_k/R_n$



of less than 0.68–0.78. To assess the stability of the “bubble CO – drop of metal” system at the above bubble and droplet sizes, calculations of the parameters determining their joint motion were carried out. It is shown that the separation of a drop of metal from a bubble is not possible under the conditions of the process in pyrometallurgical aggregates. The process of metal phase formation as a result of barbotage reduction of nickel and iron by carbon monoxide is described, which consists in the following. The interaction of the oxide melt with the gas is accompanied by formation of metal droplets, which are fixed to the bubbles moving to the surface of the oxide melt. Initially, a metal with content of 80–90 % Ni is formed, and as the proportion of nickel in the oxide melt decreases, its content in the metal drops is reduced to 20 %. On the surface of the oxide melt, the metal droplets merge, when they reach a size of more than  $5 \cdot 10^{-3}$  m, they “break through” the surface and descend to the bottom. In the case of a collision of a drop with the “bubble-drop” systems approaching them, they can how to merge with them, and flow around them. At the confluence, small drops will be assimilated and raised to the surface. The force of separation of the droplet from the bubble is substantially greater than the gravity of the droplets, so the bubble-drop system of the metal is stable for all considered ratios of their sizes.

**Keywords:** metallic phase, oxide melt, reduction gas, bubbling process, barbotage, gas bubble, metal drop, separation, surface properties, coalescence, critical dimensions, interfacial tension, carbon monoxide, liquation, coagulation.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-12-960-965

#### REFERENCES

- Vusikhis A.S., Chentsov V.P., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Metallic phase forming in barbotage of multicomponent oxide melt by reduction gas. Report 1. Theoretical basis of the process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 9, pp. 639–644. (In Russ.).
- Vusikhis A.S., Chentsov V.P., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Metallic phase forming in barbotage of multicomponent oxide melt by reduction gas. Report 2. Density and surface properties. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, no. 1, pp. 48–54. (In Russ.).
- Vanyukov A.V., Zaitsev V.Ya. *Shlaki i shteyny tsvetnoi metallurgii* [Slags and mattes of non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 408 p. (In Russ.).
- Shmonin Yu.B. *Pirometallurgicheskoe obednenie shlakov tsvetnoi metallurgii* [Pyrometallurgical depletion of slags of non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 132 p. (In Russ.).
- Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leont'ev 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. *The Third International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004)*, Ariel, Israel, 2004.
- Shavrin S.V., Zakharov I.N., Ipatov V.V. Kinetic regularities of slag reduction with gas. *Izv. AN SSSR. Metallurgiya i gornoe delo*. 1964, no. 3, pp. 22–31. (In Russ.).
- Krashennikov M.V., Leont'ev L.I. Mathematical model of the process of obtaining ferronickel at oxide melt blowing with a reducing gas. *Rasplavy*. 2001, no. 2, pp. 37–41. (In Russ.).
- Romenets V.A. Process of liquid-phase reduction of iron: development and realization. *Stal'*. 1990, no. 8, pp. 20–27. (In Russ.).
- Romenets V.A., Vegman E.F., Sakir N.F. Process of liquid-phase reduction. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1993, no. 7, pp. 9–19. (In Russ.).
- Bondarenko B.I., Shapovalov V.A., Garmash N.I. *Teoriya i tekhnologiya beskoksovoi metallurgii* [Theory and technology of non-coke metallurgy]. Kiev: Naukova dumka, 2003, 538 p. (In Russ.).
- Romenets V.A., Vadavin V.S., Usachev A.B. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Moscow: MISiS, ID Ruda i Metally, 2005, 399 p. (In Russ.).
- Ezhov E.I., Verner B.F., Ryzhov O.A. etc. Melting of oxidized nickel ore to ferronickel in a furnace with a submerged torch. In: *Tr. in-ta Gipronikel'* [Gipronickel Institute Proceedings]. Leningrad: izd. in-ta Gipronikel', 1977, vol. 3 (67), pp. 30–35. (In Russ.).
- Rusakov M.R., Vostrikov G.V., Pinin L.N., Sadovnikova E.A. New methods of depletion of converter and furnace slag using gaseous and liquid reducing agents and electric power. In: *Tr. in-ta Gipronikel'* [Gipronickel Institute Proceedings]. Leningrad: izd. in-ta Gipronikel', 1979, pp. 8–15. (In Russ.).
- Ezhov E.I., Verner B.F., Ryzhov O.A. etc. Non-coke melting of nickel-containing raw materials in submerged torch units. *Tsvetnye metally*. 1984, no. 8, pp. 33–36. (In Russ.).
- Rusakov M.R. Degradation of slag melts by purging with reducing gases. *Tsvetnye metally*. 1985, no. 3, pp. 40–42. (In Russ.).
- Vanyukov A.V., Bystrov V.P. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 208 p. (In Russ.).
- Mechev V.V., Bystrov V.P., Tarasov A.V., Grechko A.V., Mazuruk E.N. *Avtogennyye protsessy v tsvetnoi metallurgii* [Autogenous processes in non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 416 p. (In Russ.).
- Ryzhov O.A., Vigdorchik E.M., Mosiondz K.I. etc. New process for melting oxidized nickel ores in a two-zone aggregate. *Tsvetnye metally*. 1992, no. 6, pp. 19–21. (In Russ.).
- Kovgan P.A., Abuov M.G., Edil'baev A.I. Perspective technologies for processing of poor oxidized nickel ores. *Tsvetnye metally*. 2008, no. 2, pp. 43–45. (In Russ.).
- Tsymbolov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh. etc. Analysis of various variants of technological scheme for oxidized nickel ores processing into ferronickel using a two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metally*. 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
- Pakhomov R.A., Starykh R.V. Features of oxidized nickel ores melting in a bubbling type unit. I. Thermodynamic analysis of melting. *Metally*. 2015, no. 5, pp. 3–14. (In Russ.).

#### 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)

**V.P. Chentsov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (vpc44@mail.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 1, 2016