

УДК 669.243.3:532.6

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ ПРИ БАРБОТАЖЕ ГАЗОМ-ВОССТАНОВИТЕЛЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ОКСИДНОГО РАСПЛАВА СООБЩЕНИЕ 2. ПЛОТНОСТЬ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

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)

Ченцов В.П.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (vpc44@mail.ru)

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

Селиванов Е.Н.¹, д.т.н., зав. 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 пр., 32а)

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

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

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

Аннотация. Методом лежащей капли измерены плотность и поверхностное натяжение расплавов ферроникеля (0 – 100 % Ni) и окисленной никелевой руды (% (по массе): 14,8 Fe_{общ}; 7,1 FeO; 13,2 Fe₂O₃; 1,4 CaO; 16,2 MgO; 54,5 SiO₂; 4,8 Al₂O₃; 1,5 NiO; 1,2 Cr₂O₃), а также межфазное натяжение на их границе в интервале температур 1550 – 1750 °С. В этих интервалах плотность сплавов меняется от 7700 до 6900 кг/м³, поверхностное натяжение – от 1770 до 1570 мДж/м², межфазное натяжение – от 1650 до 1450 мДж/м², плотность оксидного расплава – от 2250 до 1750 кг/м³, поверхностное натяжение – от 310 до 290 мДж/м². Полученные результаты хорошо сходятся с литературными данными. Представлены функциональные зависимости, связывающие плотность, поверхностное и межфазное натяжение с температурой и составом расплавов. Зависимость плотности сплавов от температуры и содержания никеля отвечает уравнению первого порядка. Аналогичный вид имеет зависимость поверхностного и межфазного натяжения от температуры, в то время как от содержания никеля соответствует уравнению второго порядка. Плотность и поверхностное натяжение оксидного расплава линейно меняется от температуры. Полученные результаты предполагаются использовать для описания процессов формирования металлической фазы при барботаже оксидного расплава монооксидом углерода.

Ключевые слова: металлическая фаза, оксидный расплав, поверхностные свойства, межфазное натяжение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-48-53

Известно большое количество работ, посвященных изучению поверхностных свойств металлических расплавов, в том числе системы Fe–Ni в широком интервале составов [1 – 6]. Физико-химические свойства силикатных систем хорошо известны [7 – 11], но данные о поверхностных свойствах расплавов, отвечающих составам окисленных никелевых руд, требуют уточнения. В рамках настоящей работы измерены величины плотности, поверхностного и межфазного натяжения металлического (ферроникеля) и оксидного (окисленной никелевой руды) расплавов в интервале температур 1550 – 1750 °С, необходимые для расчетов движения газа и металла при барботаже.

Измерение плотности и поверхностного натяжения расплавов проводили методом лежащей капли [12 – 14],

в котором капля рассматривается как симметричное тело вращения с вертикальной осью Z, совпадающей с направлением силы тяжести (рис. 1). Совокупность точек на поверхности капли отражается уравнением Лапласа

$$z = a^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где a – капиллярная постоянная, характерная для каждой жидкости; R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны капли в точке A, имеющей координаты z и x и лежащей на поверхности капли.

Однозначного решения уравнения (1) не существует, однако оно может быть получено численными методами для заданной степени точности. Зная координаты

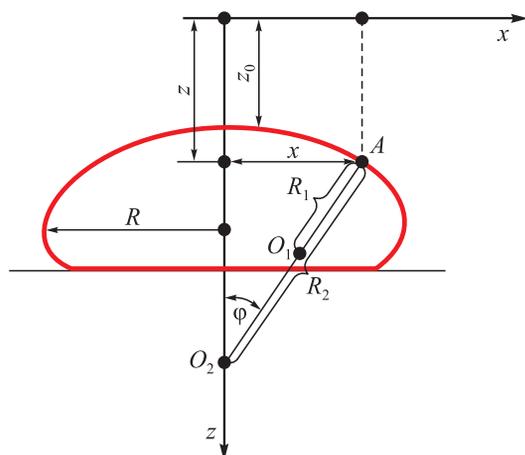


Рис. 1. Схема капли

Fig. 1. Drop scheme

всех точек на поверхности капли, определяют ее объем (V). Разность плотностей жидкости и термодинамически равновесной с ней газовой фазы ($\Delta\rho$) рассчитывают по уравнению

$$\Delta\rho = m/V, \quad (2)$$

где m – масса капли.

Поскольку плотность расплава многократно превышает плотность газа, с большой степенью точности эту величину можно считать плотностью расплава. Поверхностное натяжение (σ) вычисляют по выражению

$$\sigma = a^2\Delta\rho g, \quad (3)$$

где a^2 – капиллярная постоянная.

В используемом методе измерений образцы металлических сплавов помещали на подложку из химически чистых оксидов алюминия или бериллия. Центральное сферическое углубление подложки позволяло увеличить объем исследуемого образца, что повышает точность измерений.

Для определения межфазного натяжения на границе оксидного и металлического расплавов использована методика [7], по которой в кольцевую канавку помещали металлический, а по центру – оксидный расплав (рис. 2). Вычисления межфазного натяжения проводили по формуле

$$\sigma_{12} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \Theta_{12}}, \quad (4)$$

где σ_{12} – межфазное натяжение на границе раздела расплавов; σ_1 и σ_2 – значения поверхностного натяжения металлического и оксидного расплавов; Θ_{12} – межфазный угол, образованный касательными к профилю ($\alpha + \beta$) межфазных поверхностей в точке контакта.

Экспериментальная установка для измерения свойств расплавов [14] (рис. 3) изготовлена из нержавеющей стали в виде горизонтальной цилиндрической вакуумной камеры. Внутри расположен вольфрамовый нагреватель и система коаксиальных цилиндрических молибденовых тепловых экранов. Вакуумная печь имеет водяное охлаждение. Визуализацию капли вели цифровой фотокамерой высокого разрешения, обмер капли и обработку данных – по разработанной программе на РС.

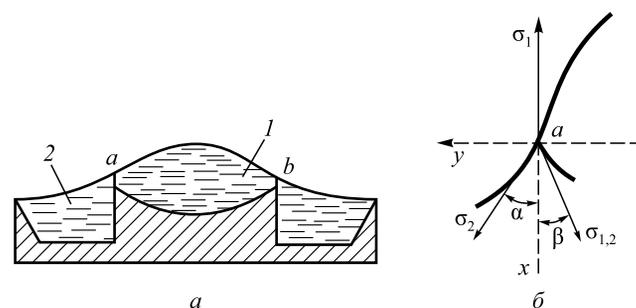


Рис. 2. Схема расположения (а) и контакта (б) оксидного (1) и металлического (2) расплавов при измерении межфазного натяжения

Fig. 2. Scheme of oxide (1) and metallic (2) melts disposal (a). Diagram of contacting phases (b)

Измерения проведены в среде очищенного гелия. Сплавы железо–никель (от 0 до 100 % Ni) готовили из карбонильного железа и никеля Н0 чистотой 99,99 %. Образцы выплавляли при 1600 °С в алундовых тиглях в среде гелия. Оксидные расплавы готовили из силикатно-никелевой руды, которую спрессовывали в таблетки диаметром 12 мм и высотой 5 мм.

Измерения проведены в среде очищенного гелия. Сплавы железо–никель (от 0 до 100 % Ni) готовили из карбонильного железа и никеля Н0 чистотой 99,99 %. Образцы выплавляли при 1600 °С в алундовых тиглях в среде гелия. Оксидные расплавы готовили из силикатно-никелевой руды, которую спрессовывали в таблетки диаметром 12 мм и высотой 5 мм.

Таблетки устанавливали на молибденовую шайбу, а затем на подложку из карбонитрида бора, что предотвращало растекание капли при плавлении. Для экспериментов взята исходная руда, содержащая, % (по массе): 12,8 Fe_{общ}; 6,2 FeO; 11,5 Fe₂O₃; 1,2 CaO; 14,0 MgO; 47,2 SiO₂; 4,1 Al₂O₃; 1,3 NiO; 1,10 Cr₂O₃, потери при прокаливании 10,4. После расплавления оксидный расплав содержал, % (по массе): 14,8 Fe_{общ}; 7,1 FeO; 13,2 Fe₂O₃; 1,4 CaO; 16,2 MgO; 54,5 SiO₂; 4,8 Al₂O₃; 1,5 NiO; 1,2 Cr₂O₃.

Как показали измерения (рис. 4), плотность (ρ_1) расплавов Fe–Ni зависит от содержания никеля и температуры. В частности, она уменьшается с ростом температуры и содержания железа в сплаве.

Для железа и никеля экспериментальные данные с высокой точностью ($R^2 - 0,999$) соответствуют уравнениям:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Fe}} &= 6996 - 0,83(t - 1550); \\ \rho_{\text{Ni}} &= 7666 - 0,87(t - 1550). \end{aligned} \quad (5)$$

По литературным данным [10] плотности (кг/м³) железа и никеля меняются с температурой по уравнениям:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Fe}} &= (7050 \pm 7) - (0,72 \pm 0,017)(t - 1534); \\ \rho_{\text{Ni}} &= 7780 - 6,6(t - 1453). \end{aligned} \quad (6)$$

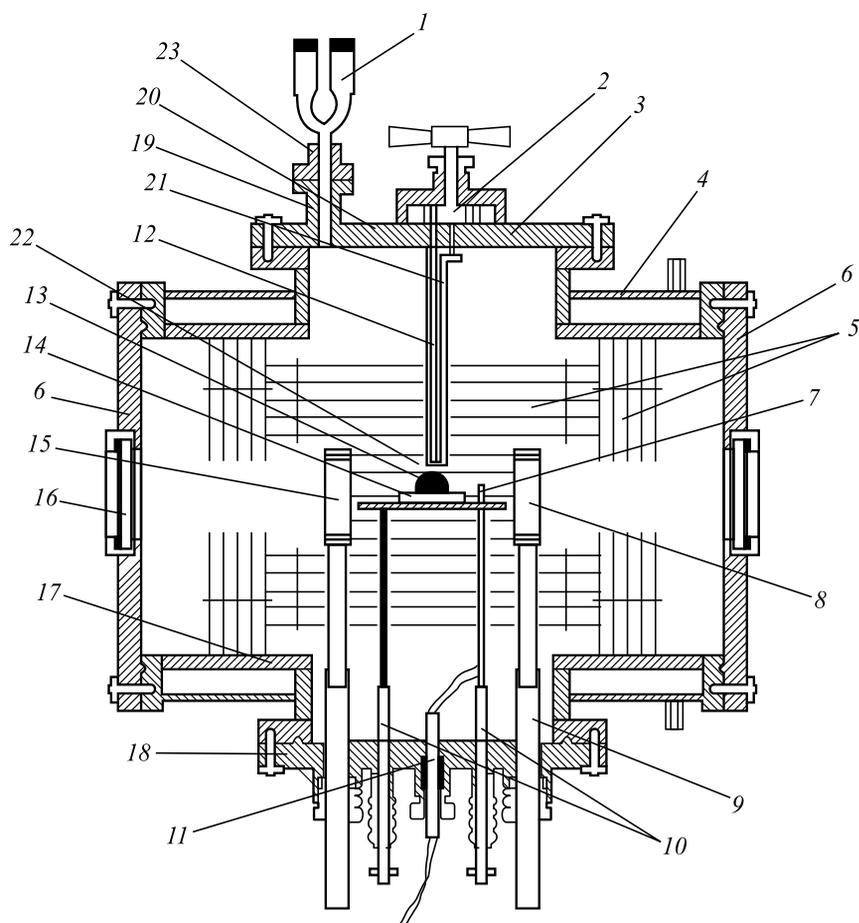


Рис. 3. Схема установки:

1 – датчик вакуума; 2 – барабан дозатора; 3 – верхний фланец; 4 – кожух водяного охлаждения; 5 – система тепловых экранов; 6 – боковые фланцы; 7 – термопара; 8 – нагреватель; 9 – токоввод; 10 – вакуумные и механические вводы; 11 – термопарный ввод; 12 – спускная трубка; 13 – капля металла; 14 – подложка; 15 – столик; 16 – кварцевое стекло; 17 – корпус вакуумной печи; 18 – нижний фланец; 19 – шестерня; 20 – шток; 21 – пружина; 22 – алундовый затвор; 23 – корпус дозатора

Fig. 3. Installation outline:

1 – vacuum sensor; 2 – dosing unit barrel; 3 – upper collet; 4 – water cooling cover; 5 – thermal screens system; 6 – flank collets; 7 – thermocouple; 8 – heater; 9 – current lead; 10 – vacuum mechanical lead; 11 – thermocouple lead; 12 – loading tube; 13 – drop of melt; 14 – substrate; 15 – specimen table; 16 – quartz glass; 17 – vacuum furnace body; 18 – bottom collet; 19 – gear; 20 – molybdenum rod; 21 – spring; 22 – alundum shutter; 23 – dosing unit body

Высокая сходимость литературных и полученных в настоящей работе результатов указывает на надежность выбранной методики и полученных данных. Плотность железоникелевых сплавов в диапазоне содержаний никеля (C_{Ni}) от 0 до 100 % и интервале температур 1550 – 1750 °C отвечает уравнению ($R^2 = 0,998$)

$$\rho_1 = [6996 + 6,7(C_{Ni})] - [0,83 + 0,0004(C_{Ni})](t - 1550). \quad (7)$$

На рис. 5 представлена зависимость поверхностного натяжения (σ_1) сплава от температуры при различном содержании никеля. Поверхностное натяжение сплавов уменьшается с ростом температуры. В никельсодержащих сплавах температурный коэффициент изменения поверхностного натяжения для сплавов и никеля равен 0,2–0,3, в то время для чистого железа он достигает 1,01 мДж/м²·град.

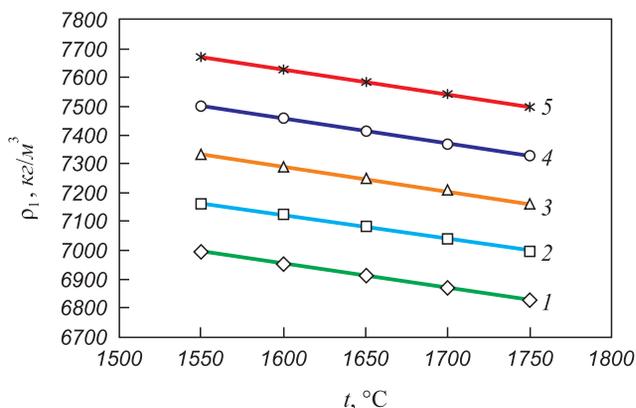


Рис. 4. Зависимость плотности (ρ_1) железоникелевого расплава от температуры и содержания Ni, %: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5)

Fig. 4. Temperature dependence of iron-nickel melt density of an alloy: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5) % Ni

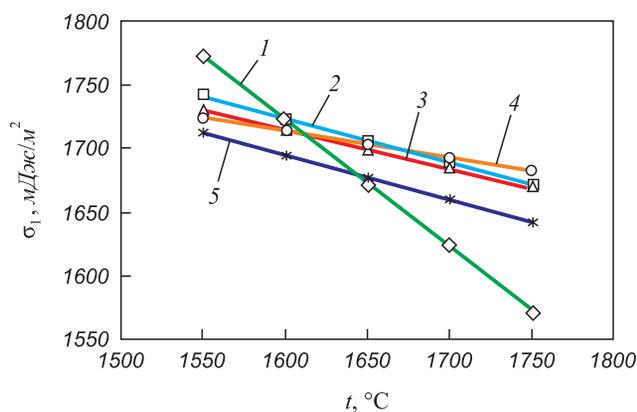


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения (σ_1) железоникелевого расплава от температуры и содержания никеля, %: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5)

Fig. 5. Temperature dependence of iron-nickel melt surface tension of an alloy: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5) % Ni

По экспериментальным данным установлены следующие функциональные зависимости для железа и никеля ($R^2 - 0,999$):

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Fe}} &= 1773 - 1,01(t - 1550); \\ \sigma_{\text{Ni}} &= 1713 - 0,364(t - 1550).\end{aligned}\quad (8)$$

По литературным данным [10] величины σ_{Fe} и σ_{Ni} меняются с температурой в соответствии с уравнениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Fe}} &= (1856 \pm 2,3) - (0,23 \pm 0,02)(t - 1534); \\ \sigma_{\text{Ni}} &= 1745 - 0,34(t - 1500).\end{aligned}\quad (9)$$

Сравнение указывает на близость измеренных значений σ_{Ni} с литературными данными. Экспериментальные величины σ_{Fe} несколько ниже приведенных в литературе, что может быть связано с отсутствием контроля над содержанием кислорода в сплаве.

Данные о поверхностном натяжении (σ_1 , мДж/м²) железоникелевых расплавов в диапазоне содержаний никеля (C_{Ni}) от 0 до 100 % и интервале температур 1550 – 1750 °C обобщены уравнением ($R^2 - 0,998$)

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= [0,0059C_{\text{Ni}}^2 - 1,1432C_{\text{Ni}} + 1770] - \\ &- [0,0002C_{\text{Ni}}^2 - 0,024C_{\text{Ni}} + 0,96](t - 1550).\end{aligned}\quad (10)$$

Значения поверхностного натяжения (σ_2) и плотности (ρ_2) оксидного расплава (рис. 6) существенно ниже, чем для металлического расплава и близки к данным, полученным для подобных систем [5, 7].

Изменения плотности (ρ_2 , кг/м³) и поверхностного натяжения (σ_2 , мДж/м²) оксидного расплава подчиняются уравнениям:

$$\rho_2 = 2247 - 2,1(t - 1550); \quad (11)$$

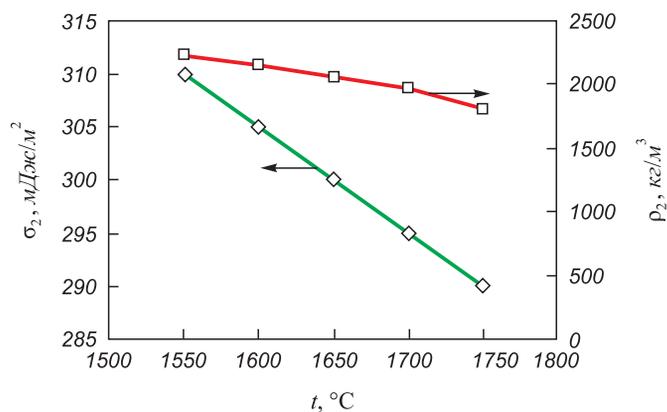


Рис. 6. Зависимость поверхностного натяжения (σ_2) и плотности (ρ_2) оксидного расплава от температуры

Fig. 6. Temperature dependence of oxide melt surface tension (σ_2) and density (ρ_2)

$$\sigma_2 = 310 - 0,1(t - 1550).\quad (12)$$

Межфазное натяжение (σ_{12} , мДж/м²) на границе металлический сплав – оксидный расплав уменьшается с температурой и содержанием никеля (рис. 7). Для оценки межфазного натяжения на границе железоникелевый – оксидный расплав предложено уравнение ($R^2 - 0,998$)

$$\begin{aligned}\sigma_{12} &= [0,0069C_{\text{Ni}}^2 - 1,2727C_{\text{Ni}} + 1650] - \\ &- [0,0002C_{\text{Ni}}^2 - 0,024C_{\text{Ni}} + 0,96](t - 1550).\end{aligned}\quad (13)$$

Так же как и поверхностное натяжение, межфазное натяжение линейно меняется с температурой и квадратично с содержанием никеля в сплаве.

Выводы. Измерены плотности, поверхностные и межфазные натяжения ферроникеля и расплава окисленной

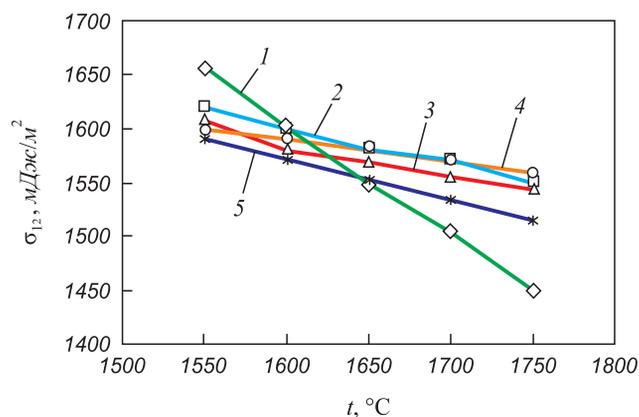


Рис. 7. Зависимость межфазного натяжения (σ_{12}) на границе железоникелевый – оксидный расплав от температуры и содержания никеля, %: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5) % Ni

Fig. 7. Temperature dependence of interfacial tension (σ_{12}) on the iron – oxide melts boundary for nickel content: 0 (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5) % Ni

никелевой руды в интервале температур 1550 – 1750 °С. Данные обобщены в виде функциональных зависимостей, связывающих плотности, поверхностные и межфазные натяжения с температурой и составом.

Полученные результаты могут быть использованы для описания процессов формирования металлической фазы при барботаже расплава окисленной никелевой руды монооксидом углерода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вертман А.А., Самарин А.М. Методы исследования свойств металлических расплавов. – М.: Наука, 1969. – 197 с.
2. Попель С.И., Щергин Л.М., Царевский Б.В. Температурная зависимость плотностей и поверхностного натяжения расплавов железо – никель // Журнал физической химии. 1969. Т. 43. № 9. С. 2365 – 2368.
3. Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы): Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.
4. Туркдоган Е.Т. Физическая химия высокотемпературных процессов. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
5. Физическая химия неорганических материалов. Т. 2. Поверхностное натяжение и термодинамика металлических расплавов: Сб. науч. тр. / В.Н. Еременко, М.И. Иванов, Г.М. Лукашенко и др. – Киев: Наукова думка, 1988. – 328 с.
6. Островский О.И., Григорян В.А., Вишкарев А.Ф. Свойства металлических расплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 304 с.
7. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах. – М.: Металлургия, 1994. – 440 с.
8. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1969. – 408 с.
9. Атлас шлаков: Справ. изд. / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
10. Строение и свойства расплавленных оксидов / В.М. Денисов, Н.В. Белоусова, С.А. Истомин и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 500 с.
11. Нестеренко С.В., Овчинников Н.А., Хоменко В.М. Физические свойства металлургических шлаков: Справ. изд. – Донецк: Донеччина, 2001. – 224 с.
12. Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г. Физико-химические методы исследования металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1988. – 512 с.
13. Тавадзе Ф.Н., Хантадзе Д.В., Оникашвили Э.Г. Расчет поверхностного натяжения жидкости по форме лежащей капли // Журнал физической химии. 1970. Т. 44. № 11/12. С. 2910 – 2912.
14. Chentsov V.P., Shevchenko V.G., Mozgowski A.G., Pokrasin M.A. Density and surface tension of heavy liquid-metal coolants: gallium and indium // Inorganic Materials: Applied Research, Materials of power engineering and radiation-resistant materials. 2011. Vol. 2. No. 5. P. 468 – 473.

Поступила 30 июня 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 1, pp. 48–53.

METALLIC PHASE FORMING IN BARBOTAGE OF MULTICOMPONENT OXIDE MELT BY REDUCTION GAS. REPORT 2. DENSITY AND SURFACE PROPERTIES

A.S. Vusikhis¹, L.I. Leont'ev^{2,3,4}, V.P. Chentsov¹, 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, RAS, Moscow, Russia

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

Abstract. Density and surface tension of ferronickel and oxidized Nickel ore melts are measured. Interfacial tension at this phases border at the 0 – 100 mas. % of nickel content in the metal phase and temperature range 1550 – 1750 °C is measured as well. Experimental results are generalized in the form of functional dependencies relating density, surface and interfacial tension with temperature and composition. The obtained data may be used for metallic phase formation processes analysis at the barbotage treatment of oxidized Nickel ore by carbon monoxide. Density and surface tension of the molten ferronickel (0 – 100 % Ni), and oxidized nickel ore melts (mas. %: 14.8 Fe_{total}, 7.1 FeO, 13.2 Fe₂O₃, 1.4 CaO, 16.2 MgO, 54.5 SiO₂, 4.8 Al₂O₃, 1.5 NiO, 1.2 Cr₂O₃) are measured by the of sessile drop method as well as the interfacial tension at the interface boundary in the 1550 – 1750 °C temperature interval. This alloys density varies from 7700 to 6900 kg/m³, oxide melt density – from 2250 to 1750 kg/m², surface tension – from 310 to 290 mJ/m². Obtained results agree well with the literature data. Functional temperature and concentration dependencies of density, surface and interfacial tension of the melts are presented. Temperature and concentration dependencies of the alloys meet first order equations. Similar form has temperature dependence

of surface and interfacial tension, while concentration dependence on nickel corresponds to the second order equation. The density and surface tension of the oxide melt meet linearly temperature dependence. The obtained results are supposed to use for description of metal phase formation in barbotage process of oxide melt by carbon monoxide.

Keywords: metallic phase, oxide melt, surface properties, interfacial tension.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-48-53

REFERENCES

1. Vertman A.A., Samarin A.M. *Metody issledovaniya svoystv metallicheskikh rasplavov* [Methods of investigation of metal melts properties]. Moscow: Nauka, 1969, 197 p. (In Russ.).
2. Popel' S.I., Shchergin L.M., Tsarevskii B.V. Temperature dependence of the density and surface tension of iron-nickel melts. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1969, vol. 43, no. 9, pp. 2365–2368. (In Russ.).
3. Nizhenko V.I., Floka L.I. *Poverkhnostnoe natyazhenie zhidkikh metallov i spлавov (odno-i dvukhkomponentnye sistemy): Spravochnik* [Surface tension of liquid metals and alloys (one- and two-component systems): Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 208 p. (In Russ.).
4. Turkdogan E.T. *Physical chemistry of high-temperature processes*. Academic Press, 1980. 447 p. (Russ. ed. Turkdogan E.T. *Fizicheskaya khimiya vysokotemperaturnykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 344 p.).
5. Eremenko V.N., Ivanov M.I., Lukashenko G.M., Martsenyuk P.S., Nizhenko V.I., Khilya G.P. *Fizicheskaya khimiya neorganicheskikh materialov. Tom 2. Poverkhnostnoe natyazhenie i termodinamika metallicheskikh rasplavov. Sb. nauch. tr.* [Physical chemistry of inorganic materials. Vol. 2. Surface tension and thermodynamics

- of metal melts. Coll. of sci. papers]. Kiev: Naukova dumka, 1988, 328 p. (In Russ.).
6. Ostrovskii O.I., Grigoryan V.A., Vishkarev A.F. *Svoistva metallicheskikh rasplavov* [Properties of metallic melts]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 304 p. (In Russ.).
 7. Popel' S.I. *Poverkhnostnye yavleniya v rasplavakh* [Surface phenomena in melts]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 440 p. (In Russ.).
 8. 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.).
 9. *Schlackenatlas*. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Verlag Stahleisen. 1981, 282 p. (Russ.ed.: *Atlas shlakov. Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1985, 208 p.).
 10. Denisov V.M., Belousova N.V., Istomin S.A., Bakhvalov S.G., Pastukhov E.A. *Stroenie i svoistva rasplavlennykh oksidov* [Structure and properties of the molten oxides]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1999, 500 p. (In Russ.).
 11. Nesterenko S.V., Ovchinnikov N.A., Khomenko V.M. *Fizicheskie svoistva metallurgicheskikh shlakov. Spravochnoe izdanie* [Physical properties of metallurgical slags. Reference ed.]. Donetsk, Donechchina, 2001, 224 p. (In Russ.).
 12. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya metallurgicheskikh protsessov* [Physical and chemical methods of the investigation of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 512 p. (In Russ.).
 13. Tavazde F.N., Khantadze D.V., Onikashvili E.G. Calculation of liquid surface tension by the shape of lying drop. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1970, vol. 44, no. 11/12, pp. 2910–2912. (In Russ.).
 14. Chentsov V.P., Shevchenko V.G., Mozgovoii A.G., Pokrasin M.A. Density and surface tension of heavy liquid-metal coolants: gallium and indium. *Inorganic Materials: Applied Research, Materials of power engineering and radiation-resistant materials*. 2011, vol. 2, no. 5, pp. 468–473.

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 June 30, 2016