

Растворимость кислорода в цирконийсодержащих железоникелевых расплавах

В. Я. Дашевский, А. А. Александров, А. Г. Каневский, Л. И. Леонтьев

Впервые исследована растворимость кислорода в расплавах системы Fe – Ni, содержащих цирконий, на примере сплава Fe – 40% Ni. Показано, что раскислительная способность циркония в этом расплаве весьма высокая, однако она несколько ниже, чем в чистом железе. Это связано с тем, что по мере возрастания содержания никеля в расплаве силы связей циркония с основой расплава увеличиваются в гораздо большей степени ($\gamma_{\text{Zr(Fe)}}^{\circ} = 0,043$; $\gamma_{\text{Zr(Ni)}}^{\circ} = 0,00007$), чем ослабевают силы связей кислорода ($\gamma_{\text{O(Fe)}}^{\circ} = 0,0105$; $\gamma_{\text{O(Ni)}}^{\circ} = 0,357$). Определены значения константы равновесия реакции взаимодействия циркония и кислорода, растворенных в расплаве Fe – 40% Ni ($K_{\text{(Fe-40\%Ni)}} = 6,011 \cdot 10^{-7}$), и параметров взаимодействия, характеризующих эти растворы ($e_{\text{Zr}}^{\text{O}} = -7,16$; $e_{\text{O}}^{\text{Zr}} = -1,25$; $e_{\text{Zr}}^{\text{Zr}} = 2,16$).

Ключевые слова: расплавы системы Fe – Ni, раскисление, цирконий, термодинамический анализ, экспериментальные исследования.

The oxygen solubility in the zirconium-containing Fe – Ni melts has been first time experimentally studied at 1873 K using the Fe – 40% Ni alloy as an example. It is shown that the deoxidizing ability of zirconium in this melt is very high, but it is slightly lower than pure iron. This is due to the fact that, when the nickel content in melt increases, the bond strengths of zirconium with the melt base ($\gamma_{\text{Zr(Fe)}}^{\circ} = 0.043$; $\gamma_{\text{Zr(Ni)}}^{\circ} = 0.00007$) rise to a considerably greater degree than the bond strengths of oxygen weaken ($\gamma_{\text{O(Fe)}}^{\circ} = 0.0105$; $\gamma_{\text{O(Ni)}}^{\circ} = 0.357$). The equilibrium constant of interaction of zirconium and oxygen dissolved in the Fe – 40% Ni melt ($K_{\text{(Fe-40\%Ni)}} = 6,011 \cdot 10^{-7}$), and the interaction parameters characterizing these solutions ($e_{\text{Zr}}^{\text{O}} = -7.16$; $e_{\text{O}}^{\text{Zr}} = -1.25$; $e_{\text{Zr}}^{\text{Zr}} = 2.16$) were determined.

Keywords: melts of the Fe – Ni system, deoxidation, zirconium, thermodynamic analysis, experimental studies.

Введение

Сплавы на основе системы Fe – Ni широко используют в современной технике. Содержащийся в этих сплавах кислород снижает их служебные свойства. Физико-химические свойства растворов кислорода в расплавах железа и никеля изучены достаточно подробно. Термодинамические параметры, характеризующие эти растворы, отражены в справочной литературе [1, 2]. Однако, поскольку не наблюдается аддитивности свойств растворов кислорода в расплавах системы Fe – Ni относительно чистых железа и никеля, следует изучать термодинамические параметры растворов кислорода в железоникелевых сплавах, что позволит оптимизировать процессы получения этих сплавов.

При производстве прецизионных железоникелевых сплавов в качестве легирующего элемента используют цирконий. Этот элемент имеет более высокое сродство к кислороду, чем железо и никель. Если присаживать цирконий в не раскисленный расплав, значительная его часть может окислиться и быть потеряна. Следовательно, исследование термодинамики растворов кислорода в железоникелевых расплавах, содержащих цирконий, представляет как научный, так и практический интерес.

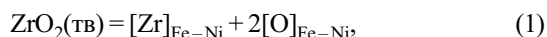
Растворимость кислорода в железоникелевых сплавах, содержащих цирконий, ранее не изучали. Проведенные нами исследования [3] термодинамики растворов кислорода в железоникелевых сплавах, содержащих хром, марганец, ванадий, кремний, углерод, титан и алюминий, показали, что раство-

римность кислорода в этих сплавах может существенно отличаться от растворимости в чистых железе и никеле в связи с изменением сил связей элемента-раскислителя и кислорода с основой расплава.

Цель работы — исследование растворимости кислорода в расплавах системы железо — никель, содержащих цирконий.

Термодинамический анализ

Процесс взаимодействия циркония с кислородом в расплавах системы Fe — Ni может быть описан реакцией



константа равновесия реакции (1) выражается как

$$K_{(1)} = \frac{([\% \text{Zr}] \cdot f_{\text{Zr}})([\% \text{O}] \cdot f_{\text{O}})^2}{a_{\text{ZrO}_2}}, \quad (1a)$$

где f_i — коэффициент активности при выражении концентрации компонентов в масс. %; a_{ZrO_2} — активность ZrO_2 .

Термодинамика растворов кислорода в расплавах железа, содержащего цирконий, изучена в значительном числе работ, результаты которых приведены в справочнике [1], однако данные этих работ не всегда удовлетворительно согласуются между собой. Справочник [1] в качестве наиболее достоверных рекомендует результаты работы [4], в которой получены следующие значения параметров, характеризующих реакцию (1) и растворы циркония в жидком железе:

логарифм константы равновесия реакции (1)

$$\lg K_{(1)(\text{Fe})} = -\frac{57000}{T} + 21,8,$$

энергия Гиббса реакции (1)

$$\Delta G_{(1)(\text{Fe})}^\circ = 1090000 - 417T, \text{ Дж/моль},$$

$$e_{\text{Zr}(\text{Fe})}^\circ = -12; e_{\text{O}(\text{Fe})}^\circ = -2,1; e_{\text{Zr}(\text{Fe})}^{\text{Zr}} = 0,$$

где e_i^j — параметр взаимодействия первого порядка при выражении концентрации компонентов в масс. %.

В работе [4] определена зависимость растворимости кислорода в жидком железе от содержания циркония всего лишь для 4-х весьма низких содержаний циркония ($7 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3} \% \text{ Zr}$) (рис. 1), что затрудняет экстраполяцию полученной зависимости на более широкий диапазон содержаний циркония. В последнее время вновь исследована зависимость растворимости кислорода в жидком железе от содержания циркония [5]. Изученный интервал

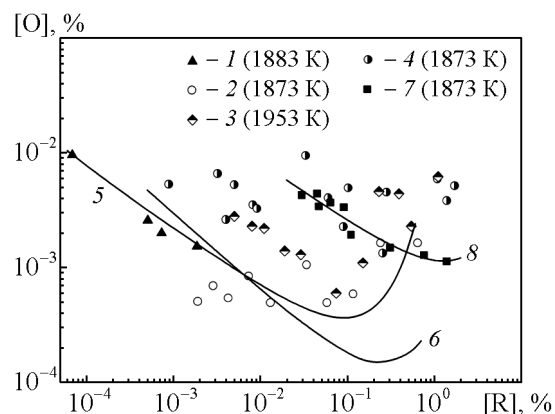


Рис. 1. Зависимость равновесной концентрации кислорода в чистом железе (1 – 6) и в расплаве Fe – 40% Ni (7, 8) от содержания циркония (1 – 5, 7, 8) и алюминия (6). По данным: 1 – [4]; 2 – [5]; 3 – [6]; 4 – [7]; 5 – уравнение (4); 6 – 1873 K [1]; 7 – настоящего исследования; 8 – уравнение (5).

содержаний циркония в этой работе существенно шире ($2 \cdot 10^{-3} - 0,65 \% \text{ Zr}$) (рис. 1).

Как видно из приведенных на рис. 1 данных, результаты работ [4, 5] хорошо дополняют друг друга. На рис. 1 представлены также приведенные в справочнике [1] данные работ [6, 7], экспериментальные результаты которых близки к рекомендуемым, однако определенная в этих работах раскислительная способность циркония в железе несколько ниже, чем в работах [4, 5].

Концентрация кислорода в расплаве, равновесная с заданным содержанием циркония, может быть рассчитана по уравнению

$$\begin{aligned} \lg [\% \text{O}]_{\text{Fe-Ni}} = & \frac{1}{2} \left\{ \lg K_{(1)} + \lg a_{\text{ZrO}_2} - \lg [\% \text{Zr}] - \right. \\ & - \left[e_{\text{Zr}(\text{Fe-Ni})}^{\text{Zr}} + 2e_{\text{O}(\text{Fe-Ni})}^{\text{Zr}} \right] [\% \text{Zr}] - \\ & \left. - \left[2e_{\text{O}(\text{Fe-Ni})}^{\text{O}} + e_{\text{Zr}(\text{Fe-Ni})}^{\text{O}} \right] [\% \text{O}] \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Оксид ZrO_2 при 1873 K твердый ($T_{\text{пл}} = 2953 \text{ K}$), поэтому $a_{\text{ZrO}_2} = 1$. Величину $[\% \text{O}]$ в правой части уравнения (2) в связи с ее малостью можно выразить через отношение $(K_{(1)}/[\% \text{Zr}])^{1/2}$, если принять в уравнении (1a), что $f_{\text{Zr}} \approx 1$ и $f_{\text{O}} \approx 1$. Такая замена не вносит заметной погрешности в расчеты [8]. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\lg [\% \text{O}]_{\text{Fe-Ni}} = \frac{1}{2} \left\{ \lg K_{(1)} - \lg [\% \text{Zr}] - \right.$$

$$-\left[e_{\text{Zr}}^{\text{Zr}}(\text{Fe-Ni}) + 2e_{\text{O}}^{\text{Zr}}(\text{Fe-Ni})\right][\% \text{Zr}] - \left[2e_{\text{O}}^{\text{O}}(\text{Fe-Ni}) + e_{\text{Zr}}^{\text{O}}(\text{Fe-Ni})\right]\left(\frac{K_{(1)}}{[\% \text{Zr}]}\right)^{1/2} \quad (2a)$$

или в общем виде

$$\lg [\% \text{O}]_{\text{Fe-Ni}} = A - \frac{1}{2} \lg [\% \text{Zr}] + B[\% \text{Zr}] + \frac{C}{[\% \text{Zr}]^{1/2}}. \quad (3)$$

Поскольку, как указано выше, результаты работ [4, 5] достаточно хорошо дополняют друг друга, перспективно совместно обработать экспериментальные данные этих работ по уравнению (3), что позволит получить термодинамические параметры системы Fe – Zr – O в более широком диапазоне содержаний циркония. Обработка была проведена методом регрессионного анализа с помощью программы Quattro Pro. Получены следующие значения коэффициентов в этом уравнении (коэффициент детерминации $R^2 = 0,72$)

$$\lg [\% \text{O}]_{\text{Fe}} = -4,179 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{Zr}] + 2,418[\% \text{Zr}] + \frac{0,680 \cdot 10^{-3}}{[\% \text{Zr}]^{1/2}}. \quad (4)$$

На рис. 1 уравнение (4) представлено кривой 5. В уравнении (3)

$$A = \frac{1}{2} \lg K_{(1)};$$

$$B = -\frac{1}{2} \left[e_{\text{Zr}}^{\text{Zr}}(\text{Fe-Ni}) + 2e_{\text{O}}^{\text{Zr}}(\text{Fe-Ni}) \right];$$

$$C = -\frac{1}{2} \left[2e_{\text{O}}^{\text{O}}(\text{Fe-Ni}) + e_{\text{Zr}}^{\text{O}}(\text{Fe-Ni}) \right] (K_{(1)})^{1/2}.$$

С учетом численных значений коэффициентов в уравнении (4), значения $e_{\text{O}}^{\text{O}}(\text{Fe}) = -0,17$ [1] и того факта, что $\varepsilon_{\text{Zr}}^{\text{O}} = \varepsilon_{\text{O}}^{\text{Zr}}$ (где ε_i^j — параметр взаимодействия первого порядка при выражении концентрации компонентов в мольных долях), получим:

$$e_{\text{Zr}}^{\text{O}}(\text{Fe}) = -20,21; e_{\text{O}}^{\text{Zr}}(\text{Fe}) = -3,54; e_{\text{Zr}}^{\text{Zr}}(\text{Fe}) = 2,25;$$

$$\lg K_{(1)(\text{Fe})} = -8,359; K_{(1)(\text{Fe})} = 4,379 \cdot 10^{-9};$$

откуда $\Delta G_{(1)(\text{Fe})}^\circ = 299726$ Дж/моль.

На рис. 1 приведена также зависимость растворимости кислорода в расплавах железа от содержания

алюминия по данным [1] при 1873 К (кривая 6). Как видно из рис. 1, при содержаниях циркония до ~0,006% он обладает чуть более высокой раскислительной способностью, чем алюминий; при более высоких содержаниях циркония раскислительная способность алюминия выше, чем циркония.

Эксперимент

Эксперименты проводили в печи с индукционным нагревом, питаемой от высокочастотного генератора (400 кГц) мощностью 10 кВт·А (рис. 2). В качестве шихты использовали карбонильное железо (99,99%), электролитический никель (99,99%) и иодидный цирконий (99,9%). Масса шихты составляла ~100 г. Навеску металла, содержащую компоненты в соотношении, отвечающему по составу исследуемому сплаву, помещали в тигель из ZrO_2 , который устанавливали во внешний защитный тигель из Al_2O_3 . Шихту загружали в плавильную камеру и расплавляли в атмосфере Ar – H_2 . Водород и аргон предварительно проходили систему очистки от примесей кислорода, водяного пара, сернистых соединений, органики, механических и других примесей. Расход аргона составлял 150 мл/мин, а водорода — 50 мл/мин. После расплавления металла подачу водорода прекращали

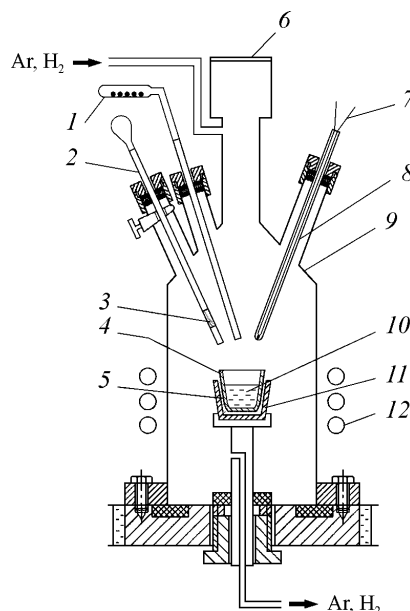


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — устройство для ввода добавок, 2 — устройство для отбора проб, 3 — кристаллизатор, 4 — тигель из ZrO_2 , 5 — засыпка из Al_2O_3 , 6 — смотровое окно, 7 — термопара, 8 — защитная кварцевая трубка, 9 — кварцевая реакция камера, 10 — расплав, 11 — тигель из Al_2O_3 , 12 — индуктор.

и плавку вели в атмосфере аргона (расход — 150 мл/мин) при температуре 1873 К. Добавки циркония вводили в жидкий металл без нарушения герметичности печи, а затем расплав выдерживали при заданной температуре до равновесия в атмосфере Ar. Температуру измеряли термопарой Pt–6% Rh / Pt–30% Rh.

При проведении предварительных экспериментов путем отбора проб через каждые 5 мин, которые анализировали на содержание циркония и кислорода, было показано, что система выходит на состояние равновесия через 18–20 мин после введения добавки циркония [9]. В последующих экспериментах для надежности достижения состояния равновесия время выдержки расплава после ввода добавки циркония составляло ~30 мин. После достижения состояния равновесия из расплава отбирали пробу, которую анализировали на содержание компонентов.

Анализ проб металла на содержание кислорода проводили на газоанализаторе фирмы LECO модели TC-600 (точность определения $\pm 5 \cdot 10^{-5}\%$), а на содержание циркония и никеля — на последовательном атомно-эмиссионном спектрометре с индукционной плазмой фирмы Horiba Jobin Yvon модели ULTIMA 2 (точность определения $\pm 0,001\%$).

Результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные результаты приведены в таблице и на рис. 1. Сравнение литературных данных по раскислительной способности циркония в расплавах чистого железа и экспериментальных результатов, приведенных на рис. 1, показывает, что раскислительная способность циркония в расплаве Fe–40% Ni несколько ниже, чем в чистом железе. Это связано с тем, что по мере возрастания содержания никеля в расплаве силы связей циркония с основной расплава увеличиваются в гораздо большей степени ($\gamma_{Zr(Fe)}^0 = 0,043$ [1]; $\gamma_{Zr(Ni)}^0 = 0,00007$ [2]), чем ослабевают силы связей кислорода ($\gamma_{O(Fe)}^0 = 0,0105$ [10]; $\gamma_{O(Ni)}^0 = 0,357$ [10]).

Экспериментальные данные были обработаны по уравнению (3) методом регрессионного анализа с помощью программы Quattro Pro. Получены следующие значения коэффициентов в этом уравнении (коэффициент детерминации $R^2 = 0,81$)

$$\lg [\%O]_{Fe-40\%Ni} = -3,111 - \frac{1}{2} \lg [\%Zr] + 0,172 [\%Zr] + \frac{2,860 \cdot 10^{-3}}{[\%Zr]^{1/2}}. \quad (5)$$

На рис. 1 уравнение (5) представлено кривой 8. С учетом численных значений коэффициентов в уравнении (5) и значения $e_{O(Fe-40\%Ni)}^0 = -0,104$ [3] для сплава Fe–40% Ni при 1873 К получили:

$$e_{Zr(Fe-40\%Ni)}^O = -7,16;$$

$$e_{O(Fe-40\%Ni)}^{Zr} = -1,25;$$

$$e_{Zr(Fe-40\%Ni)}^{Zr} = 2,16;$$

$$\lg K_{(1)(Fe-40\%Ni)} = -6,221;$$

$$K_{(1)(Fe-40\%Ni)} = 6,011 \cdot 10^{-7};$$

$$\Delta G_{(1)(Fe-40\%Ni)}^0 = 223078 \text{ Дж/моль}.$$

Приведенные в таблице значения величины $K_{(1)(Fe-40\%Ni)}$ для каждого эксперимента рассчитаны с использованием полученных значений параметров взаимодействия.

Таблица

Химический состав экспериментальных сплавов при 1873 К, масс. %

[Ni], %	[Zr], %	[O], %	$\lg K_{(1)(Fe-40\%Ni)}$	$K_{(1)(Fe-40\%Ni)}$
40,5	0,030	0,00427	-6,304	$4,97 \cdot 10^{-7}$
40,2	0,045	0,00439	-6,110	$7,77 \cdot 10^{-7}$
40,6	0,047	0,00341	-6,304	$4,97 \cdot 10^{-7}$
40,2	0,064	0,00368	-6,111	$7,74 \cdot 10^{-7}$
40,5	0,091	0,00335	-6,047	$8,98 \cdot 10^{-7}$
40,5	0,110	0,00193	-6,439	$3,64 \cdot 10^{-7}$
38,2	0,310	0,00149	-6,280	$5,25 \cdot 10^{-7}$
38,8	0,760	0,00128	-6,175	$6,68 \cdot 10^{-7}$
38,9	1,390	0,00113	-6,236	$5,81 \cdot 10^{-7}$

Полученная зависимость растворимости кислорода от содержания циркония в расплаве Fe–40% Ni при 1873 К приведена на рис. 3 в сравнении с аналогичными данными о зависимости растворимости кислорода в этом расплаве от содержания хрома [11], марганца [12], ванадия [13], кремния [12], углерода [14], титана [15] и алюминия [16]. Как видно из приведенных данных, из изученных элементов наибольшей раскислительной способностью обладает алюминий, меньшая, но достаточно высокая раскислительная способность у циркония. В порядке убывания раскислительной способности остальные элементы можно расположить в ряд: титан, углерод, кремний, марганец, ванадий, хром. Горизонтальной линией на рис. 3 показана растворимость кислорода в расплаве Fe–40% Ni, равная 0,17% [17].

Кривые растворимости кислорода в железо-никелевых расплавах, содержащих цирконий, проходят через минимум. Содержания элемента-раскис-

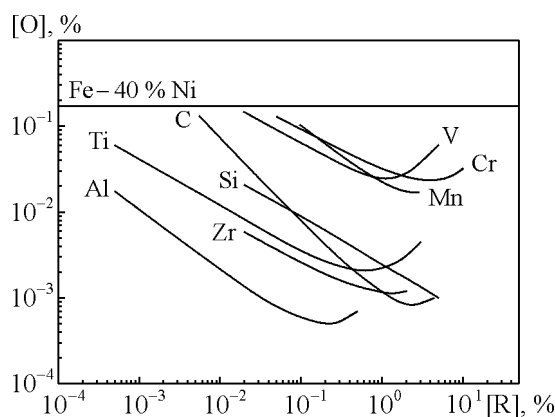


Рис. 3. Зависимость растворимости кислорода от содержания элемента-раскислителя R в расплаве Fe – 40% Ni при 1873 К.

лителя, которым соответствуют минимальные концентрации кислорода ($[R]^*$), могут быть определены по уравнению [18]

$$[\%R]^* = -\frac{1}{2,3} \cdot \frac{x}{x e_R^R + y e_O^R}, \quad (6)$$

где m и n — коэффициенты в формуле оксида R_mO_n .

В случае оксида циркония ZrO_2 уравнение (6) примет вид

$$[\%Zr]^* = -\frac{1}{2,3} \cdot \frac{1}{e_{Zr}^{Zr} + 2e_O^{Zr}}. \quad (6a)$$

Ниже приведены рассчитанные по уравнению (6a) значения содержания циркония в точках минимума и соответствующие им минимальные концентрации кислорода:

Ni, %	0	40
$[\%Zr]^*$	0,09	1,28
$[\%O]_{\min}$	0,00037	0,00114

Выводы

Экспериментально исследована растворимость кислорода в железоникелевых сплавах, содержащих цирконий, на примере сплава Fe – 40% Ni при 1873 К. Показано, что цирконий весьма существенно снижает растворимость кислорода в этом расплаве. Определены значение константы равновесия реакции взаимодействия циркония и кислорода, растворенных в расплаве Fe – 40% Ni ($\lg K_{(1)(Fe-40\%Ni)} = -6,221$), энергия Гиббса этой реакции ($\Delta G_{(1)(Fe-40\%Ni)}^\circ = 223078$ Дж/моль) и параметры взаимодействия, характеризующие эти растворы ($e_{Zr(Fe-40\%Ni)}^O = -7,16$; $e_{O(Fe-40\%Ni)}^{Zr} = -1,25$; $e_{Zr(Fe-40\%Ni)}^{Zr} = 2,16$).

Литература

1. Steelmaking Data Sourcebook. N.Y.-Tokyo: Gordon & Breach Science Publ., 1988, 325 p.
2. Sigworth G.K., Elliott J.F., Vaughn G., Geiger G.H. The thermodynamics of dilute liquid nickel alloys. Met. Soc. CIM. Ann.V, 1977, p. 104 – 110.
3. Дашевский В.Я. Физико-химические основы раскисления железоникелевых сплавов. М.: Физматлит, 2011, 152 с.
4. Kitamura O., Ban-ya S., Fuwa T. The second Japan – USSR joint symposium on physical chemistry of metallurgical processes. Special Report No. 10, Iron Steel Inst. Japan, 1969, p. 47 – 52.
5. Inoue R., Ariyama T., Suito H. Thermodynamics of zirconium deoxidation equilibrium in liquid iron by EMF measurements. ISIJ International, 2008, v. 48, no. 9, p. 1175 – 1181.
6. Fruehan R.J. The Effect of zirconium, cerium, and lanthanum on the solubility of oxygen in liquid iron. Met. Trans., 1974, v. 5B, p. 345 – 347.
7. Janke D., Fischer W.A. Desoxidationsgleichgewichte von titan, aluminium und zirkonium in eisenschmelzen bei 1600 °C. Arch. Eisenhüttenw., 1976, v. 47, p. 195 – 198.
8. Куликов И.С. Раскисление металлов. М.: Металлургия, 1975, 504 с.
9. Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Ni – Ti. Труды XII Российской конференции “Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов”. 22 – 26 сентября 2008 г., Екатеринбург: УрО РАН, 2008, т. 3, с. 129 – 132.
10. Chiang T., Chang Y.A. The activity coefficient of oxygen in binary liquid metal alloys. Metall. Trans., 1976, v. 7B, p. 453 – 457.
11. Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N., Grigorovitch K.V., Kashin V.I. Deoxidation equilibrium of chromium in liquid iron-nickel alloys. ISIJ International, 2005, v. 45, no. 12, p. 1783 – 1788.
12. Dashevskii V.Ya., Katsnelson A.M., Makarova N.N., Grigorovitch K.V., Kashin V.I. Deoxidation equilibrium of manganese and silicon in liquid iron-nickel alloy. ISIJ International, 2003, v. 43, no. 10, p. 1487 – 1494.
13. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation equilibrium of vanadium in the liquid iron-nickel melts. ISIJ International, 2009, v. 49, no. 2, p. 149 – 155.
14. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Solubility oxygen in carbon-containing Fe – Ni melts. Rare Metals, 2009, v. 28, Spec. Issue. October, p. 383 – 387.
15. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation equilibrium of titanium in the liquid iron-nickel melts. ISIJ International, 2010, v. 50, no. 1, p. 44 – 52.
16. Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovitch K.V., Kanevskii A.G., Kashin V.I. Deoxidation equilibrium of aluminum and silicon in the liquid iron-nickel alloys. ISIJ International, 2005, v. 45, no. 1, p. 8 – 11.

17. Дашевский В.Я., Макарова Н.Н., Григорович К.В., Кашин В.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах Fe – Ni. ДАН, 1997, т. 357, № 6, с. 789 – 791.
18. Аверин В.В. О минимуме на кривой растворимости кислорода в сложнолегированных расплавах. ДАН, 1977, т. 232, № 1, с. 148 – 152.

Статья поступила в редакцию 1.07.2013г.

Дашевский Вениамин Яковлевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), доктор технических наук, заведующий лабораторией, специалист в области физической химии металлических и оксидных высокотемпературных расплавов. E-mail: vdashev@imet.ac.ru.

Александров Александр Александрович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физической химии металлических и оксидных высокотемпературных расплавов. E-mail: a.a.aleksandrov@gmail.com.

Каневский Аким Горациевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физической химии металлических и оксидных высокотемпературных расплавов. E-mail: akannev@yandex.ru.

Леонтьев Леопольд Игоревич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), академик РАН, главный научный сотрудник, специалист в области физической химии металлических и оксидных высокотемпературных расплавов. E-mail: lleontev@imet.ac.ru.