

УДК 669.014

ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ Fe–Co–Cr, СОДЕРЖАЩИХ КРЕМНИЙ*

Александров А.А.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (a.a.aleksandrov@gmail.com)
Дашевский В.Я.^{1,2}, д.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих
промышленных технологий, зав. лабораторией (vdashev@imet.ac.ru)
Леонтьев Л.И.^{1,2,3}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор
(lleontev@imet.ac.ru; leo@presidium.ras.ru)

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

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

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

³ Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 14)

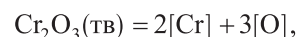
Аннотация. Проведен термодинамический анализ влияния кремния на растворимость кислорода в расплавах системы Fe–Co–Cr при 1873 К. Кремний в расплавах системы Fe–Co–Cr обладает достаточно высокой раскислительной способностью. При малых содержаниях кремний практически не влияет на концентрацию кислорода, которая определяется содержанием хрома. При более высоком содержании кремния после смены механизма процесса взаимодействия хрома и кремния с кислородом, когда уже кремний определяет растворимость кислорода в расплаве, концентрация кислорода снижается.

Ключевые слова: система Fe–Co–Cr, кремний, расплавы, кислород, растворимость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-657-661

В современной технике в качестве магнитотвердых материалов и при изготовлении нагревателей для обработки подземных пластов при добыче углеводородов нашли широкое применение сплавы системы Fe–Co–Cr [1 – 3]. Одной из вредных примесей в этих сплавах является кислород, присутствие которого приводит к снижению физико-механических и служебных свойств сплавов. При выплавке этих сплавов в качестве раскислителя и легирующего элемента используют кремний. Изучение физико-химических свойств растворов кислорода в расплавах системы Fe–Co–Cr–Si имеет не только теоретическое, но и существенное практическое значение, поскольку позволит оптимизировать процессы получения этих сплавов. Наличие данных о термодинамике растворов кислорода в жидких железе и кобальте [4, 5] позволяет оценить влияние хрома и кремния на растворимость кислорода в расплавах системы Fe–Co–Cr–Si.

В расплавах системы Fe–Co–Cr при содержании хрома выше 2,0 – 2,5 % (в зависимости от содержания кобальта) продуктом реакции взаимодействия хрома с кислородом, содержащимся в расплаве, является оксид Cr₂O₃ [6]



$$K_{\text{Cr}} = \frac{([\% \text{Cr}] f_{\text{Cr}})^2 ([\% \text{O}] f_{\text{O}})^3}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}. \quad (1)$$

Концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием хрома в расплаве, для реакции (1) можно рассчитать по уравнению

$$\lg [\% \text{O}]_{\text{Cr}} = \frac{1}{3} \left\{ \lg K_{\text{Cr}} + \lg a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - 2 \lg [\% \text{Cr}] - \right. \\ \left. - [2e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Cr}}] [\% \text{Cr}] - [3e_{\text{O}}^{\text{O}} + 2e_{\text{Cr}}^{\text{O}}] [\% \text{O}] - \right. \\ \left. - 3r_{\text{O}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2 \right\}, \quad (2)$$

где e_i^j – параметр взаимодействия первого порядка; r_i^j – параметр взаимодействия второго порядка при выражении концентрации компонентов в массовых процентах.

Поскольку оксид Cr₂O₃ при 1873 К находится в твердом состоянии ($T_{\text{пл}} = 2603 \text{ К}$ [7]), $a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 1$. Величину [% O] в правой части уравнения можно выразить через отношение $\left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 f_{\text{O}}^3} \right)^{1/3}$. При [% O] → 0 справедливо $f_{\text{O}} \rightarrow 1$. В связи с малостью величины [% O] можно принять $\left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 f_{\text{O}}^3} \right)^{1/3} \approx \left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2} \right)^{1/3}$. Та-

* Работа выполнялась по государственному заданию № 007-00129-18-00.

кая замена не вносит заметной погрешности в расчеты [8]. В этом случае уравнение (2) примет вид

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = \frac{1}{3} \left\{ \lg K_{\text{Cr}} - 2 \lg[\% \text{Cr}] - \right. \\ \left. - [2e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Cr}}][\% \text{Cr}] - [3e_{\text{O}}^{\text{O}} + 2e_{\text{Cr}}^{\text{O}}] \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2} \right)^{1/3} - 3r_{\text{O}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2 \right\}. \quad (2a)$$

В сплавах Fe–Co–Cr–Si при низких содержаниях кремния в расплаве хром может быть более сильным раскислителем. В этом случае уравнение (2a) примет вид

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Si}} = \frac{1}{3} \left\{ \lg K_{\text{Cr}} - \lg[\% \text{Cr}] - \right. \\ \left. - [2e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Cr}}][\% \text{Cr}] - [2e_{\text{Cr}}^{\text{Si}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Si}}][\% \text{Si}] - \right. \\ \left. - [3e_{\text{O}}^{\text{O}} + 2e_{\text{Cr}}^{\text{O}}] \left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2} \right)^{1/3} - 3r_{\text{O}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2 \right\} = \\ = \lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} - \left[\frac{2}{3} e_{\text{Cr}}^{\text{Si}} + e_{\text{O}}^{\text{Si}} \right] [\% \text{Si}]. \quad (3)$$

Продуктом реакции при раскислении кремнием расплавов Fe–Co–Cr при более высоких его содержаниях в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, является оксид SiO₂. Взаимодействие кремния с кислородом описывается реакцией

$$\text{SiO}_2(\text{тв}) = [\text{Si}] + 2[\text{O}], \\ K_{\text{Si}} = \frac{([\% \text{Si}] f_{\text{Si}})([\% \text{O}] f_{\text{O}})^2}{a_{\text{SiO}_2}}. \quad (4)$$

Значения констант равновесия реакций раскисления расплавов Fe – 10 % Co и Fe – 20 % Co и параметров взаимодействия при 1873 К

Equilibrium constants for deoxidation reactions of Fe – 10 % Co, Fe – 20 % Co melts and interaction parameters at 1873 K

Параметр (оксид)	Fe	Fe – 10 % Co	Fe – 20 % Co	Co
$\lg K_{\text{Cr}} (\text{Cr}_2\text{O}_3)$	–3,9070 [6]	–3,8430	–3,911	–7,0290 [6]
$\lg K_{\text{Si}} (\text{SiO}_2)$	–4,6430 [9]	–4,7830	–4,9480	–7,2040 [9]
e_{O}^{O}	–0,1700 [4]	–0,1550	–0,1390	0 [5]
$e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}}$	0 [4]	0	0	0 [8]
e_{O}^{Cr}	–0,0520 [4]	–0,0540	–0,0550	–0,0700 [5]
e_{Cr}^{O}	–0,1780 [4]	–0,1840	–0,1890	–0,2400 [5]
$e_{\text{Si}}^{\text{Si}}$	0,1030 [4]	0,0980	0,0930	0,0500 [5]
$e_{\text{Cr}}^{\text{Si}}$	–0,0040 [4]	–0,0020	$-4 \cdot 10^{-5}$	0,0176 [10]
$e_{\text{Si}}^{\text{Cr}}$	–0,0003 [4]	0,0008	0,0019	0,0115 [10]
e_{O}^{Si}	–0,0660 [4]	–0,0790	–0,0920	–0,2060 [8]
e_{Si}^{O}	–0,1190 [4]	–0,1410	–0,1640	–0,3650 [8]
r_{O}^{Cr}	$5,758 \cdot 10^{-4}$ [4]	$5,259 \cdot 10^{-4}$	$4,745 \cdot 10^{-4}$	0 [5]

Концентрация кислорода, равновесная с заданным содержанием кремния, может быть рассчитана по уравнению

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Si+Cr}} = \frac{1}{2} \left\{ \lg K_{\text{Si}} + \lg a_{\text{SiO}_2} - \lg[\% \text{Si}] - \right. \\ \left. - [e_{\text{Si}}^{\text{Si}} + 2e_{\text{O}}^{\text{Si}}][\% \text{Si}] - [e_{\text{Si}}^{\text{Cr}} + 2e_{\text{O}}^{\text{Cr}}][\% \text{Cr}] - \right. \\ \left. - [2e_{\text{O}}^{\text{O}} + e_{\text{Si}}^{\text{O}}] \left(\frac{K_{\text{Si}}}{[\% \text{Si}] f_{\text{Si}}} \right)^{1/2} - 2r_{\text{O}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2 \right\}. \quad (5)$$

Совместное решение уравнений (3) и (5) позволяет определить содержание кремния, при котором происходит смена механизма процесса раскисления. Такой подход носит, естественно, формальный характер, так как смена механизма процесса раскисления происходит в некотором интервале содержаний кремния.

Для расплавов системы Fe–Co–Cr из всего многообразия их составов можно выделить два наиболее часто встречающихся состава основы сплавов: Fe – 10 % Co – 10 % Cr и Fe – 20 % Co – 25 % Cr [1 – 3]. Рассмотрена зависимость растворимости кислорода в этих сплавах от содержания хрома и кремния. Значения констант равновесия реакции раскисления хромом и кремнием железокобальтовых сплавов, содержащих 10 и 20 % Co, а также значения параметров взаимодействия, характеризующие растворы кислорода в этих расплавах, приведены в таблице. Данные для сплавов Fe – 10 % Co и Fe – 20 % Co рассчитаны по методике, описанной в работах [6, 9].

В расплавах Fe – 10 % Co и Fe – 20 % Co при 1873 К растворимость кислорода составляет 0,21 и 0,19 % соответственно [11]. Равновесная концентрация кислорода в расплавах Fe – 10 % Co – 10 % Cr и Fe – 20 % Co –

– 25 % Cr, рассчитанная по уравнению (2a) с учетом значений величины константы равновесия реакции (1) и параметров взаимодействия (см. таблицу), составляет:

для сплава Fe – 10 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = -1,281 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Cr}] + 0,0536[\% \text{Cr}] + \frac{1,450 \cdot 10^{-2}}{[\% \text{Cr}]^{2/3}} - 5,259 \cdot 10^{-4} [\% \text{Cr}]^2 = -1,461, \\ [\text{O}] = 3,462 \cdot 10^{-2} \%;$$

для сплава Fe – 20 % Co – 25 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = -1,304 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Cr}] + 0,0553[\% \text{Cr}] + \frac{1,318 \cdot 10^{-2}}{[\% \text{Cr}]^{2/3}} - 4,745 \cdot 10^{-4} [\% \text{Cr}]^2 = -1,147, \\ [\text{O}] = 7,123 \cdot 10^{-2} \%.$$

При раскислении расплавов Fe – 10 % Co – 10 % Cr и Fe – 20 % Co – 25 % Cr кремнием при весьма низких его содержаниях, когда хром является более сильным раскислителем, концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием хрома и кремния, можно рассчитать по уравнению (3). С учетом значений параметров взаимодействия (см. таблицу) уравнение (3) примет следующий вид:

для сплава Fe – 10 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Si}} = -1,461 + 0,080[\% \text{Si}];$$

для сплава Fe – 20 % Co – 25 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Si}} = -1,147 + 0,092[\% \text{Si}].$$

При более высоких содержаниях кремния в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием кремния и хрома, в зависимости от содержания кремния можно рассчитать по уравнению (5). Оксид SiO_2 при 1873 К твердый ($T_{\text{пл}} = 1999 \text{ К}$ [12]), поэтому $a_{\text{SiO}_2} = 1$. С учетом величины константы равновесия реакции раскисления кремнием и параметров взаимодействия (см. таблицу) уравнение (5) примет вид:

для сплава Fe – 10 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Si+Cr}} = -1,911 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] + 0,030[\% \text{Si}] + \frac{9,152 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}};$$

для сплава Fe – 20 % Co – 25 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Si+Cr}} = -1,411 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] + 0,045[\% \text{Si}] + \frac{7,419 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}}.$$

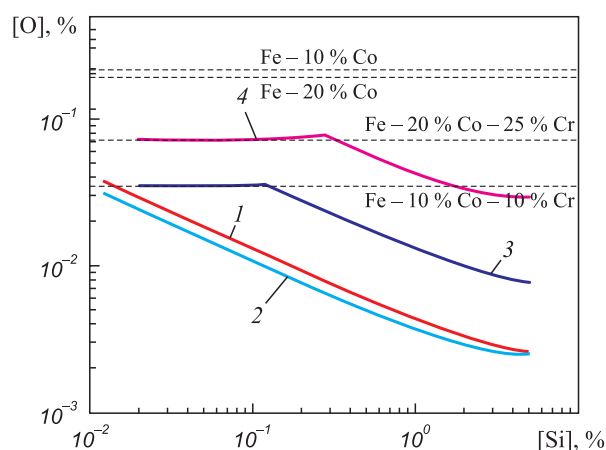
Решая совместно уравнения (3) и (5), можно определить содержание кремния $[\% \text{Si}]^*$, при котором происходит смена механизма реакции раскисления: $[\text{Si}]^* = 0,126 \%$ для сплава Fe – 10 % Co – 10 % Cr; $[\text{Si}]^* = 0,297 \%$ для сплава Fe – 20 % Co – 25 % Cr.

Рассчитанные по уравнениям (3) и (5) равновесные концентрации кислорода в расплавах Fe – 10 % Co – 10 % Cr и Fe – 20 % Co – 25 % Cr при 1873 К приведены на рисунке в сравнении с данными о растворимости кислорода в расплавах систем Fe–Co [11] и Fe–Co–Si [9] (растворимость кислорода в расплавах систем Fe–Co и Fe–Co–Cr показана штриховыми линиями). Зависимость концентрации кислорода от содержания кремния для сплавов Fe – 10 % Co и Fe – 20 % Co при 1873 К может быть описана уравнениями [9]:

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Fe-10\%Co}} = -2,391 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] + 0,030[\% \text{Si}] + \frac{9,152 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}};$$

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Fe-20\%Co}} = -2,471 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] + 0,045[\% \text{Si}] + \frac{7,419 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}}.$$

Как видно из приведенных данных, кремний при малых содержаниях практически не влияет на концент-



Зависимость концентрации кислорода от содержания кремния в расплавах Fe – 10 % Co – Si (1), Fe – 20 % Co – Si (2), Fe – 10 % Co – 10 % Cr – Si (3) и Fe – 20 % Co – 25 % Cr – Si (4) при 1873 К

Dependence of oxygen concentration on silicon content in Fe – 10 % Co – Si (1), Fe – 20 % Co – Si (2), Fe – 10 % Co – 10 % Cr – Si (3), Fe – 20 % Co – 25 % Cr – Si (4) melts at 1873 K

рацию кислорода в расплавах системы Fe–Co–Cr. Дальнейшее повышение содержания кремния приводит к снижению концентрации кислорода в расплаве. Кремний обладает достаточно высокой раскислительной способностью в расплавах системы Fe–Co–Cr. Однако раскислительная способность кремния в расплавах системы Fe–Co–Cr ниже, чем в расплавах системы Fe–Co. Это можно объяснить тем, что хром при высоком его содержании, как это имеет место в изучаемых сплавах, значительно понижает активность кислорода в расплаве и в гораздо меньшей степени повышает активность кремния (см. таблицу).

Выводы. Кремний в расплавах системы Fe–Co–Cr обладает достаточно высокой раскислительной способностью. При малых содержаниях кремний практически не влияет на концентрацию кислорода, которая определяется содержанием хрома. При более высоком содержании кремния после смены механизма процесса взаимодействия хрома и кремния с кислородом, когда уже кремний определяет растворимость кислорода в расплаве, концентрация кислорода снижается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Korznikova G.F. Effect of the Mode of Hot Deformation on the Structure and Properties of Magnetically Hard Alloys of the Fe–Cr–Co System // *Met. Sci. Heat Treat.* 2006. Vol. 48. No. 1–2. P. 76–80.
2. Korneva A., Bieda M., Korznikowa G., Sztwiertnia K., Korznikow A. Microstructure and some properties of FeCr25Co15 alloy

subjected to plastic deformation by complex load // *Int. J. Mater. Res. (Z. Metallkd.)*. 2008. Vol. 99. No. 9. P. 991–998.

3. Пат. 2441138 РФ. Коррекция композиций сплавов для достижения выбранных свойств в нагревателях с ограничением температуры / Дж.М. Вайтек, М.П. Брейди, Дж.А. Хортон Мл.; заявл. 27.05.2010; опубл. 27.01.2012. Бюл. № 3.
4. *Steelmaking Data Sourcebook*. – N.Y.-Tokyo: Gordon & Breach Science Publ., 1988. – 325 p.
5. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of dilute liquid cobalt alloys // *Canadian Metallurgical quarterly*. 1976. Vol. 15. No. 2. P. 123–127.
6. Александров А.А., Дашевский В.Я., Линчевский Б.В. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих хром // *Металлы*. 2014. № 5. С. 3–9.
7. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Металлургия хрома. – М.: ЭЛИЗ, 1999. – 582 с.
8. Куликов И.С. Раскисление металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
9. Александров А.А., Дашевский В.Я. Растворимость кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих кремний // *Металлы*. 2013. № 6. С. 21–25.
10. Белянчиков Л.Н. Оценка параметров взаимодействия, коэффициентов активности и теплот растворения элементов в сплавах на основе кобальта методом пересчета с их значений в сплавах железа // *Электрометаллургия*. 2009. № 4. С. 16–22.
11. Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах систем Fe – Ni, Fe – Co и Co – Ni // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. № 1. С. 54–60.
12. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов. – М.: ЭЛИЗ, 2005. – 448 с.

Поступила 28 июня 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 8, pp. 657–661.

THERMODYNAMICS OF OXYGEN SOLUTIONS IN SILICON-CONTAINING Fe–Co–Cr MELTS

A.A. Aleksandrov¹, V.Ya. Dashevskii^{1,2}, L.I. Leont'ev^{1,2,3}

¹Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

²National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

³Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

Abstract. Thermodynamic analysis of the effect of silicon on the solubility of oxygen in Fe–Co–Cr melts has been carried out at 1873 K. Silicon has a sufficiently high deoxidizing ability in Fe–Co–Cr melts. Silicon at low contents practically does not affect the concentration of oxygen in the melt, which is determined by the chromium content. With a higher content of silicon after changing the mechanism of interaction process of chromium and silicon with oxygen, when silicon already determines the solubility of oxygen in the melt, the oxygen concentration decreases.

Keywords: Fe–Co–Cr system, silicon, melts, oxygen, solubility.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-657-661

REFERENCES

1. Korznikova G.F. Effect of the mode of hot deformation on the structure and properties of magnetically hard alloys of the Fe–Cr–Co system. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 1–2, pp. 76–80.

2. Korneva A., Bieda M., Korznikowa G., Sztwiertnia K., Korznikow A. Microstructure and some properties of FeCr25Co15 alloy subjected to plastic deformation by complex load. *Int. J. Mater. Res. (Z. Metallkd.)*. 2008, vol. 99, no. 9, pp. 991–998.

3. Vaitek D.M., Breidi M.P., Khorton D.A. (Jr.) *Korreksiya kompozitsii splavov dlya dostizheniya vybrannykh svoystv v nagrevatelyakh s ogranicheniem temperatury* [Correction of alloy composition to reach selected properties in heaters with limited temperature]. Patent RF no. 2441138. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 3. (In Russ.).
4. *Steelmaking Data Sourcebook*. N.Y.-Tokyo: Gordon & Breach Science Publ., 1988, 325 p.
5. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of dilute liquid cobalt alloys. *Canadian Metallurgical quarterly*. 1976, vol. 15, no. 2, pp. 123–127.
6. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Linchevskii B.V. Thermodynamics of the oxygen solutions in chromium-containing melts of the Fe–Co system. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 9, pp. 681–687.
7. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Metallurgiya khroma* [Metallurgy of chromium]. Moscow: ELIZ, 1999, 582 p. (In Russ.).
8. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Metals deoxidation]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 504 p. (In Russ.).
9. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Oxygen solubility in silicon-containing Fe–Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, no. 11, pp. 825–829.
10. Belyanchikov L.N. Estimation of interaction parameters, activity coefficients and heats of dissolution of elements in cobalt-based al-

loys by the method of conversion from their values in iron alloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 4, pp. 16–22. (In Russ.).

11. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in the Fe – Ni, Fe – Co and Ni – Co melts. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 1, pp. 54–60. (In Russ.).
12. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov* [Physical chemistry and technology of electroferroalloys]. Moscow: ELIZ, 2005, 448 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was carried out according to the state assignment no. 007-00129-18-00.

Information about the authors:

A.A. Alexandrov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(a.a.aleksandrov@gmail.com)

V.Ya. Dashevskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, Head of the Laboratory (vdashev@imet.ac.ru)

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

Received June 28, 2018
