

УДК 669.014

## ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ Ni–Co, СОДЕРЖАЩИХ КРЕМНИЙ\*

*Александров А.А.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (a.a.aleksandrov@gmail.com)*

*Дашевский В.Я.<sup>1,2</sup>, д.т.н., профессор кафедры энергоэффективных  
и ресурсосберегающих промышленных технологий, зав. лабораторией (vdashev@imet.ac.ru)*

<sup>1</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

**Аннотация.** Проведен термодинамический анализ растворов кислорода в расплавах системы Ni–Co, содержащих кремний. Определены константа равновесия реакции раскисления никель-кобальтовых расплавов кремнием, коэффициенты активности при бесконечном разбавлении и параметры взаимодействия в расплавах различного состава. Рассчитаны зависимости растворимости кислорода в изученных расплавах от содержания кобальта и кремния. Раскислительная способность кремния снижается по мере увеличения содержания кобальта в расплаве. В сплавах Ni–Co, содержащих более 20 % кобальта, при содержании кремния менее 0,2 % раскислительная способность кремния практически одинаковая. При содержании кремния более 2 % раскислительная способность кремния снижается тем больше, чем выше содержание кобальта в сплавах.

**Ключевые слова:** система Ni–Co, расплавы, кремний, кислород, термодинамический анализ.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-2-163-167

Сплавы на основе системы Ni–Co широко используют в современной технике [1, 2]. Одной из вредных примесей в этих сплавах является кислород, который находится в металле как в растворенном виде, так и в виде неметаллических включений. Получение готового металла с минимальной концентрацией кислорода является одной из главных задач процесса выплавки этих сплавов.

Одним из наиболее часто применяемых раскислителей, а также легирующих для сплавов на основе системы Ni–Co является кремний. Для практики производства этих сплавов представляет значительный интерес изучение влияния кремния на растворимость кислорода в них. Наличие данных о термодинамике растворов кислорода в жидких никеле, кобальте и их сплавах [3 – 5] позволяет оценить влияние кремния на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Co.

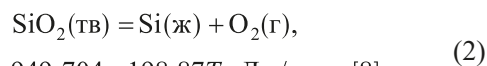
При раскислении никель-кобальтовых расплавов кремнием в зависимости от содержания кремния в расплаве продуктом реакции могут быть оксиды: SiO<sub>2</sub> и (Ni, Co)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> [6, 7]. Как показал термодинамический расчет, при содержаниях кремния выше 2·10<sup>-5</sup> % при 1873 К образуется оксид SiO<sub>2</sub>. Поэтому в настоящей работе реакция образования оксида (Ni, Co)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> не рассматривается.

Реакция раскисления расплавов системы Ni–Co кремнием



$$K_{(1)} = \frac{([\% \text{Si}] f_{\text{Si}})([\% \text{O}] f_{\text{O}})^2}{a_{\text{SiO}_2}} \quad (1a)$$

может быть представлена как сумма реакций



$$\Delta G_{(2)}^\circ = 949\,704 - 198,87T, \text{ Дж/моль [8];}$$



$$\Delta G_{(3)}^\circ = RT \ln \left( \frac{\gamma_{\text{Si}(\text{Ni-Co})}^\circ M_{\text{Ni-Co}}}{100 M_{\text{Si}}} \right); \quad (3)$$



$$\Delta G_{(4)}^\circ = 2RT \ln \left( \frac{\gamma_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^\circ M_{\text{Ni-Co}}}{100 M_{\text{O}}} \right), \quad (4)$$

где  $\gamma_{i(\text{Ni-Co})}^\circ$  – коэффициент активности компонента  $i$  в расплаве при бесконечном разбавлении;  $M_i$  – молекулярная масса компонента  $i$ .

В качестве стандартного состояния для кремния и кислорода, растворенных в никель-кобальтовом расплаве, выбран обладающий свойствами идеального разбавленного раствора 1 %-ный раствор.

Для расплавов системы Ni–Co значения коэффициента активности  $\gamma_{i(\text{Ni-Co})}^\circ$  рассчитывали по уравнению [9]

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

$$\ln \gamma_{i(\text{Ni}-\text{Co})}^{\circ} = X_{\text{Ni}} \ln \gamma_{i(\text{Ni})}^{\circ} + X_{\text{Co}} \ln \gamma_{i(\text{Co})}^{\circ} + X_{\text{Ni}} X_{\text{Co}} \times \\ \times \left[ X_{\text{Co}} \left( \ln \gamma_{i(\text{Co})}^{\circ} - \ln \gamma_{i(\text{Ni})}^{\circ} + \varepsilon_{i(\text{Co})}^{\text{Ni}} \right) + \right. \\ \left. + X_{\text{Ni}} \left( \ln \gamma_{i(\text{Ni})}^{\circ} - \ln \gamma_{i(\text{Co})}^{\circ} + \varepsilon_{i(\text{Ni})}^{\text{Co}} \right) \right],$$

а значения молекулярной массы по формуле

$$M_{\text{Ni}-\text{Co}} = M_{\text{Ni}} X_{\text{Ni}} + M_{\text{Co}} X_{\text{Co}}.$$

Рассчитанные значения константы равновесия реакции (1), значения коэффициентов активности  $\gamma_{\text{Si}}^{\circ}$  и  $\gamma_{\text{O}}^{\circ}$  для никеля и кобальта и рассчитанные для никель-кобальтовых сплавов при 1873 К приведены в таблице. В расчетах величин  $\gamma_{\text{Si}}^{\circ}$  и  $\gamma_{\text{O}}^{\circ}$  использовали следующие значения параметров взаимодействия:  $\varepsilon_{\text{Si}(\text{Ni})}^{\text{Co}} = 0,207$  [10];  $\varepsilon_{\text{Si}(\text{Co})}^{\text{Ni}} = 0,575$  [11];  $\varepsilon_{\text{O}(\text{Ni})}^{\text{Co}} = -1,159$  [12];  $\varepsilon_{\text{O}(\text{Co})}^{\text{Ni}} = 0,164$  [12].

Уравнение (1а) можно записать в следующем виде:

$$\lg K_{(1)} = \lg [\% \text{ Si}] + \lg f_{\text{Si}} + 2 \lg [\% \text{ O}] + 2 \lg f_{\text{O}} - \lg a_{\text{SiO}_2} = \\ = \lg [\% \text{ Si}] + e_{\text{Si}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{Si}} [\% \text{ Si}] + e_{\text{Si}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{O}} [\% \text{ O}] + \\ + 2 \lg [\% \text{ O}] + 2 \left( e_{\text{O}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{O}} [\% \text{ O}] + e_{\text{O}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{Si}} [\% \text{ Si}] \right) - \lg a_{\text{SiO}_2},$$

что позволяет получить уравнение для расчета концентрации кислорода в расплаве, равновесной с заданным содержанием кремния,

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

Оксид  $\text{SiO}_2$  при 1873 К находится в твердом состоянии ( $T_{\text{пл}} = 1999$  К [14]), поэтому  $a_{\text{SiO}_2} = 1$ . Величину  $[\% \text{ O}]$  в правой части уравнения (5) можно выразить через отношение  $\left( \frac{K_{(1)}}{[\% \text{ Si}] f_{\text{Si}} f_{\text{O}}^2} \right)^{1/2}$ . При  $[\% \text{ O}] \rightarrow 0$   $f_{\text{O}} \rightarrow 1$ . В связи с малостью величины  $[\% \text{ O}]$  можно принять  $\left( \frac{K_{(1)}}{[\% \text{ Si}] f_{\text{Si}} f_{\text{O}}^2} \right)^{1/2} \approx \left( \frac{K_{(1)}}{[\% \text{ Si}] f_{\text{Si}}} \right)^{1/2}$ . Такая замена не вносит заметной погрешности в расчеты [8]. Тогда уравнение (5) примет вид

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Ni}-\text{Co}} = \frac{1}{2} \left\{ \lg K_{(1)} - \lg [\% \text{ Si}] - \right. \\ \left. - \left[ e_{\text{Si}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{Si}} + 2e_{\text{O}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{Si}} \right] [\% \text{ Si}] - \right. \\ \left. - \left[ 2e_{\text{O}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{O}} + e_{\text{Si}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{O}} \right] \left( \frac{K_{(1)}}{[\% \text{ Si}] f_{\text{Si}}} \right)^{1/2} \right\}. \quad (5a)$$

Равновесные концентрации кислорода в расплавах системы Ni–Co при различных содержаниях кремния

рассчитывали по уравнению (5а). Поскольку расплавы системы Ni–Co близки к идеальным [15], использованные в расчетах величины параметров взаимодействия для расплавов различного состава (см. таблицу) рассчитаны по уравнению [16]

$$\varepsilon_{i(\text{Ni}-\text{Co})}^j = \varepsilon_{i(\text{Ni})}^j X_{\text{Ni}} + \varepsilon_{i(\text{Co})}^j X_{\text{Co}}.$$

Полученные зависимости концентрации кислорода от содержания кремния в расплавах приведены ниже:

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Ni}} = -3,282 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{ Si}] - \\ - 0,030 [\% \text{ Si}] + \frac{0,288 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{ Si}]^{1/2}};$$

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Ni}-20\% \text{ Co}} = -3,223 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{ Si}] + \\ + 0,012 [\% \text{ Si}] + \frac{0,481 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{ Si}]^{1/2}};$$

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Ni}-40\% \text{ Co}} = -3,212 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{ Si}] + \\ + 0,054 [\% \text{ Si}] + \frac{0,649 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{ Si}]^{1/2}};$$

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Ni}-60\% \text{ Co}} = -3,224 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{ Si}] + \\ + 0,096 [\% \text{ Si}] + \frac{0,784 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{ Si}]^{1/2}};$$

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Ni}-80\% \text{ Co}} = -3,234 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{ Si}] + \\ + 0,139 [\% \text{ Si}] + \frac{0,914 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{ Si}]^{1/2}};$$

$$\lg [\% \text{ O}]_{\text{Co}} = -3,218 - \frac{1}{2} \lg [\% \text{ Si}] + \\ + 0,181 [\% \text{ Si}] + \frac{1,106 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{ Si}]^{1/2}}.$$

Зависимости равновесной концентрации кислорода от содержания в расплаве кремния и кобальта при 1873 К приведены на рисунке. В никель-кобальтовых расплавах кремний обладает значительной раскислительной способностью. По мере увеличения содержания кобальта в расплаве раскислительная способность кремния снижается. В сплавах Ni–Co, содержащих более 20 % кобальта, при содержании кремния менее 0,2 % раскислительная способность кремния практически одинаковая. При содержании кремния более 2 % раскислительная способность кремния снижается тем больше, чем выше содержание кобальта в сплавах. Это связано с тем, что в жидком никеле прочность связей

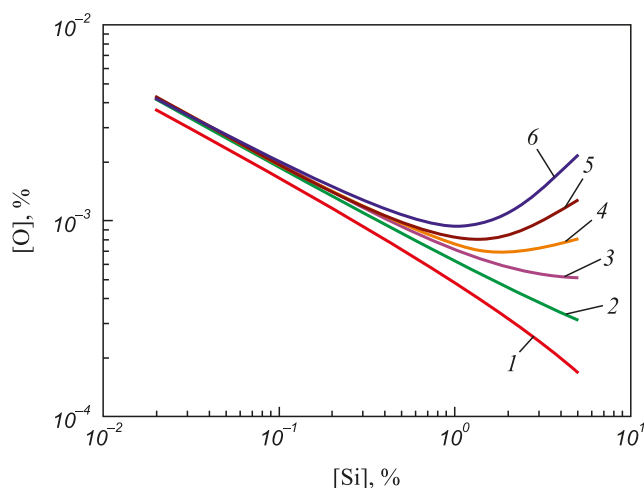
# Значения константы равновесия реакции (1), коэффициентов активности и параметров взаимодействия для расплавов системы Ni–Co при 1873 К

## Equilibrium constant for reaction (1), activity coefficients and interaction parameters for Ni–Co melts at 1873 K

Параметр	Значение параметра при содержании кобальта, %					
	0	20	40	60	80	100
$M_{\text{Ni-Co}}$	58,690	58,738	58,787	58,836	58,884	58,933
$X_{\text{Ni}}$	1	0,801	0,601	0,401	0,201	0
$X_{\text{Co}}$	0	0,199	0,399	0,599	0,799	1
$\lg K_{(1)}$	–6,563	–6,446	–6,424	–6,448	–6,469	–6,435
$\gamma_{\text{Si}}^{\circ}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$ [13]	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$ [12]
$\gamma_{\text{O}}^{\circ}$	0,337 [3]	0,271	0,224	0,191	0,171	0,161 [4]
$e_{\text{Si}}^{\text{Si}}$	0,190 [13]	0,162	0,134	0,106	0,078	0,050 [4]
$e_{\text{O}}^{\text{Si}}$	–0,065 [13]	–0,093	–0,121	–0,149	–0,178	–0,206 [8]
$e_{\text{Si}}^{\text{O}}$	–0,110 [13]	–0,161	–0,212	–0,263	–0,314	–0,365 [8]
$e_{\text{O}}^{\text{O}}$	0 [3]	0	0	0	0	0 [4]

кремния с основой ( $e_{\text{Si(Ni)}}^{\text{Si}} = 0,19$ ) существенно слабее, чем в жидком кобальте ( $e_{\text{Si(Co)}}^{\text{Si}} = 0,05$ ), а следовательно, минимум на кривых растворимости кислорода в случае чистого никеля и сплавов, богатых никелем, проявится при более высоких содержаниях кремния. Наличие в расплаве элемента-раскислителя (кремния), обладающего бóльшим сродством к кислороду, чем основа сплава, приводит к получению минимальной концентрации кислорода при определенном содержании элемента-раскислителя [17].

**Выводы.** В никель-кобальтовых расплавах кремний характеризуется высоким сродством к кислороду. Раскислительная способность кремния снижается по мере увеличения содержания кобальта в расплаве.



Зависимость концентрации кислорода от содержания кремния в расплавах системы Ni–Co при 1873 К при содержании кобальта, %:  
1 – 0; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100

Dependence of oxygen concentration on silicon content in Ni–Co melts at 1873 K at cobalt content at %:  
1 – 0; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100

В сплавах Ni–Co, содержащих более 20 % кобальта, при содержании кремния менее 0,2 % раскислительная способность кремния практически одинаковая. При содержании кремния более 2 % раскислительная способность кремния снижается тем больше, чем выше содержание кобальта в сплавах. Это связано с тем, что в жидком никеле прочность связей кремния с основой ( $e_{\text{Si(Ni)}}^{\text{Si}} = 0,19$ ) существенно слабее, чем в жидком кобальте ( $e_{\text{Si(Co)}}^{\text{Si}} = 0,05$ ), а следовательно, минимум на кривых растворимости кислорода в случае чистого никеля и сплавов, богатых никелем, проявится при более высоких содержаниях кремния.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. – Cambridge: University Press, 2006. – 372 p.
2. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). – М.: Наука и технологии, 2013. – 264 с.
3. Sigworth G.K., Elliott J.F., Vaughn G., Geiger G.H. The thermodynamics of dilute liquid nickel alloys // Metallurgical Soc. CIM. 1977. Annual Volume. P. 104 – 110.
4. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of dilute liquid cobalt alloys // Canadian Metallurgical quarterly. 1976. Vol. 15. No. 2. P. 123 – 127.
5. 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.
6. Woo D.-H., Lee H.-G., Jung I.-H. Thermodynamic modeling of the NiO-SiO<sub>2</sub>, MgO-NiO, CaO-NiO-SiO<sub>2</sub>, MgO-NiO-SiO<sub>2</sub>, CaO-MgO-NiO and CaO-MgO-NiO-SiO<sub>2</sub> systems // Journal of the European Ceramic Society. 2011. Vol. 31. No. 1-2. P. 43 – 59.
7. Jung I.-H., Decterov S.A., Pelton A.D. Thermodynamic modeling of the CoO-SiO<sub>2</sub> and CoO-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> systems // Int. J. Mat. Res. (Z. Metallkd.). 2007. Vol. 98. No. 9. P. 816 – 825.
8. Куликов И.С. Раскисление металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
9. Froberg M.G., Wang M. Thermodynamic properties of sulfur in liquid copper-antimony alloys at 1473 K // Z. Metallkd. 1990. Vol. 81. No. 7. S. 513 – 518.

10. Белянчиков Л.Н. Универсальная методика пересчета значений параметров взаимодействия элементов с одной основы сплава на другую на базе теории квазирегулярных растворов. Часть II. Оценка параметров взаимодействия элементов в никелевых сплавах // *Электрометаллургия*. 2009. № 2. С. 29 – 38.
11. 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.
12. Ishii F., Ban-ya S. Deoxidation Equilibrium of Silicon in Liquid Nickel-Copper and Nickel-Cobalt Alloys // *ISIJ International*. 1993. Vol. 33. No. 2. P. 245 – 250.
13. Ishii F., Ban-ya S. Deoxidation Equilibrium of Silicon in Liquid Nickel and Nickel-Iron Alloys // *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. No. 10. P. 1091 – 1096.

14. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов. – М.: Элиз, 2005. – 448 с.
15. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T. et al. Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys. – Ohio: Metals Park, Amer. Soc. Metals, 1973. – 1435 p.
16. Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni–Co, содержащих хром // *Металлы*. 2016. № 4. С. 71 – 78.
17. Аверин В.В. О минимуме на кривой растворимости кислорода в сложнелегированных расплавах // *Доклады АН СССР. Химическая технология*. 1977. Т. 232. № 1. С. 148 – 152.

Поступила в редакцию 30 ноября 2018 г.

После доработки 23 января 2019 г.

Принята к публикации 28 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 2, pp. 163–167.

## THERMODYNAMICS OF THE OXYGEN SOLUTIONS IN SILICON-CONTAINING Ni–Co MELTS

A.A. Aleksandrov<sup>1</sup>, V.Ya. Dashevskii<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** Thermodynamic analysis of oxygen solutions in silicon-containing Ni–Co melts has been carried out. The equilibrium constant of interaction of silicon and oxygen dissolved in the nickel-cobalt melts, the activity coefficients at infinite dilution, and the interaction parameters characterizing these solutions were determined for melts of different composition. The dependences of the oxygen solubility on the contents of cobalt and silicon in the studied melts were calculated. With increasing cobalt content in melt deoxidation ability of silicon decreases. In Ni–Co alloys containing more than 20 % of cobalt, when the silicon content is less than 0.2 %, deoxidizing ability of silicon is almost the same. At silicon content more than 2 %, the higher is cobalt content in alloys, the more is decrease in deoxidizing ability of silicon.

**Keywords:** Ni–Co system, melts, silicon, oxygen, thermodynamic analysis.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-2-163-167

### REFERENCES

1. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006, 372 p.
2. Logunov A.V., Shmotin Yu.A. *Sovremennye zharoprochnye nikelovye splavy dlya diskovykh gazovykh turbin* [Modern heat-resistant nickel alloys for disk gas turbines]. Moscow, Nauka i tekhnologii, 2013, 264 p. (In Russ.).
3. Sigworth G.K., Elliott J.F., Vaughn G., Geiger G.H. The thermodynamics of dilute liquid nickel alloys. *Metallurgical Soc. CIM*. 1977, Annual Volume, pp. 104–110.
4. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of dilute liquid cobalt alloys. *Canadian Metallurgical quarterly*. 1976, vol. 15, no. 2, pp. 123–127.
5. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in Fe–Ni, Fe–Co and Co–Ni Melts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 1, pp. 54–60. (In Russ.).
6. Woo D.-H., Lee H.-G., Jung I.-H. Thermodynamic modeling of the NiO–SiO<sub>2</sub>, MgO–NiO, CaO–NiO–SiO<sub>2</sub>, MgO–NiO–SiO<sub>2</sub>, CaO–MgO–NiO and CaO–MgO–NiO–SiO<sub>2</sub> systems. *Journal of the European Ceramic Society*. 2011, vol. 31, no. 1-2, pp. 43–59.
7. Jung I.-H., Decterov S.A., Pelton A.D. Thermodynamic modeling of the CoO–SiO<sub>2</sub> and CoO–FeO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> systems. *Int. J. Mat. Res. (Z. Metallkd.)*. 2007, vol. 98, no. 9, pp. 816–825.

8. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Deoxidation of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 504 p. (In Russ.).
9. Froberg M.G., Wang M. Thermodynamic properties of sulfur in liquid copper-antimony alloys at 1473 K. *Z. Metallkd.* 1990, vol. 81, no. 7, pp. 513–518.
10. Belyanchikov L.N. Universal method for recalculating interaction parameters of elements in changing the matrix of alloys using the quasi-regular solution theory. II. Estimating the interaction parameters of elements in nickel-based alloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 2, pp. 29–38. (In Russ.).
11. Belyanchikov L.N. Estimating the interaction parameters, activity coefficients, and heats of solution of elements in cobalt-based alloys by recalculating their magnitudes for iron alloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 4, pp. 16–22. (In Russ.).
12. Ishii F., Ban-ya S. Deoxidation equilibrium of silicon in liquid nickel-copper and nickel-cobalt alloys. *ISIJ International*. 1993, vol. 33, no. 2, pp. 245–250.
13. Ishii F., Ban-ya S. Deoxidation equilibrium of silicon in liquid nickel and nickel-iron alloys. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 10, pp. 1091–1096.
14. Lyakishev H.P., Gasik M.I. *Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov* [Physical chemistry and technology of electroferroalloys]. Moscow: ELIZ, 2005, 448 p. (In Russ.).
15. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T. etc. *Selected values of the thermodynamic properties of binary alloys*. Ohio: Metals Park, Amer. Soc. Metals, 1973, 1435 p.
16. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in chromium-containing Ni–Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016, no. 7, pp. 642–648.
17. Aверин В.В. On the minimum in oxygen solubility curve of complex alloyed melts. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1977, vol. 232, no. 1, pp. 148–152. (In Russ.).

**Funding.** The work was performed in accordance with the state assignment No. 007-00129-18-00.

### Information about the authors:

A.A. Aleksandrov, 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)

Received November 30, 2018

Revised January 23, 2019

Accepted January 28, 2019