

УДК 669.014

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА РАСТВОРИМОСТЬ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ Ni–Co–Cr

**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 влияния кремния на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr при 1873 К. Кремний в расплавах системы Ni–Co–Cr при малых его содержаниях 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. Однако раскислительная способность кремния в расплавах системы Ni–Co–Cr при повышенных его содержаниях значительно ниже, чем в расплавах системы Ni–Co.

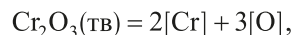
**Ключевые слова:** система Ni–Co–Cr, расплавы, кремний, кислород, растворимость.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-3-241-245

В современной технике нашли широкое применение сплавы системы Ni–Co–Cr в качестве жаропрочных. Одной из вредных примесей в них является кислород. Присутствие кислорода приводит к снижению физико-механических и служебных свойств сплавов. При их выплавке в качестве раскислителя и легирующего элемента используют кремний [1–3]. Изучение физико-химических свойств растворов кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr–Si имеет не только теоретическое, но существенное практическое значение, поскольку дает возможность оптимизировать процессы получения этих сплавов. Наличие данных о термодинамике растворов кислорода в жидких никеле и кобальте [4, 5] позволяет оценить влияние хрома и кремния на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr–Si.

Из компонентов основы сплава хром обладает значительно большим сродством к кислороду, чем никель и кобальт [6]. В расплавах системы Ni–Co–Cr при содержании хрома выше 0,01–0,16 % (в зависимости от содержания кобальта) продуктом реакции взаимодействия хрома с кислородом является оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [7]. Поскольку растворимость кислорода в расплаве контролирует хром, то при содержании хрома больше ~0,2 % оксидная фаза над расплавом системы Ni–Co–Cr насыщена по отношению к  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и содержит только оксид хрома.

Взаимодействие хрома и кислорода в расплаве может быть описано реакцией



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

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

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

где  $e_i^j$  – параметр взаимодействия первого порядка, а  $r_i^j$  – параметр взаимодействия второго порядка при выражении концентрации компонентов в массовых процентах. Поскольку оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при 1873 К твердый ( $T_{\text{пл}} = 2603 \text{ К}$  [8]),  $a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 1$ , принимаем в качестве стандартного состояния чистый твердый компонент оксид хрома при температуре расплава.

Величину  $[\% \text{O}]$  в правой части уравнения (2) можно выразить через отношение  $\left( \frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 f_{\text{O}}^3} \right)^{1/3}$ .

При  $[\% \text{O}] \rightarrow 0$  коэффициент активности  $f_{\text{O}} \rightarrow 1$ . В связи с малостью величины  $[\% \text{O}]$  можно принять  $\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 f_{\text{O}}^3} \approx \frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2}$ . Такая замена не вносит за-

<sup>\*</sup> Работа выполнена по государственному заданию № 007-00129-18-00.

метной погрешности в расчеты [6]. Тогда 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 системы Ni–Co–Cr, содержащих кремний, растворимость кислорода в расплаве контролируют хром и кремний. Кремний обладает значительно большим сродством к кислороду, чем хром [6]. Однако при весьма низких содержаниях кремния в расплавах хром при высоких его содержаниях является более сильным раскислителем. Принимаем, что в этом случае оксидная фаза насыщена по отношению к оксиду хрома и содержит только оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , хотя в действительности в оксидной фазе может присутствовать в том или ином количестве оксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Данное допущение не оказывает заметного влияния на результаты расчета. Такой подход обоснован и описан в работе [6].

Концентрацию кислорода в расплаве, равновесную с хромом и кремнием в случае весьма низких содержаниях кремния, можно рассчитать по уравнению

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

Продуктом реакции при раскислении кремнием расплавов Ni–Co–Cr при более высоких его содержаниях в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, является оксид  $\text{SiO}_2$  [9]. Взаимодействие кремния с кислородом описывается реакцией

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

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

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

Поскольку оксид  $\text{SiO}_2$  при 1873 К твердый ( $T_{\text{пл}} = 1999 \text{ К}$  [10]),  $a_{\text{SiO}_2} = 1$ , принимаем в качестве стандартного состояния чистый твердый компонент оксид кремния при температуре расплава.

Смена механизма реакции раскисления происходит в условной точке при содержании кремния, определяемом уравнениями (3) и (5). Такой подход носит, естественно, формальный характер, так как смена механизма процесса раскисления происходит в некотором интервале содержаний кремния. Принимаем, что после этой условной точки оксидная фаза насыщена по отношению к оксиду кремния и содержит только оксид  $\text{SiO}_2$ , хотя в действительности в зависимости от содержания кремния в расплаве в оксидной фазе может присутствовать в том или ином количестве оксид хрома. Данное допущение не оказывает заметного влияния на результаты расчета, как это обосновано и описано в работе [6].

Для расплавов системы Ni–Co–Cr из всего многообразия их составов можно выделить три наиболее часто встречающихся состава основы сплавов: Ni – 10 % Co – 10 % Cr; Ni – 15 % Co – 15 % Cr и Ni – 20 % Co – 20 % Cr [1 – 3]. Рассмотрим зависимость растворимости кислорода в этих сплавах от содержания хрома и кремния. Значения констант равновесия реакции раскисления хромом и кремнием никель-кобальтовых сплавов, содержащих 10, 15 и 20 % Co, а также значения параметров взаимодействия, характеризующие растворы кислорода в этих расплавах, приведены в таблице. Данные для сплавов Ni – 10 % Co, Ni – 15 % Co и Ni – 20 % Co рассчитаны по методике, описанной в работе [15].

В расплавах Ni – 10 % Co, Ni – 15 % Co и Ni – 20 % Co при 1873 К растворимость кислорода составляет 0,51; 0,48 и 0,44 % соответственно [15]. Равновесная концентрация кислорода в расплавах Ni – 10 % Co – 10 % Cr, Ni – 15 % Co – 15 % Cr и Ni – 20 % Co – 20 % Cr, рассчитанная по уравнению (2a) с учетом значений величины константы равновесия реакции (1) и параметров взаимодействия (см. таблицу), составляет:

– для сплава Ni – 10 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = -2,545 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Cr}] + 0,137[\% \text{Cr}] + \\ + \frac{9,020 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Cr}]^{2/3}} - 2,176 \cdot 10^{-3} [\% \text{Cr}]^2 = -2,058, \\ [\text{O}] = 0,875 \cdot 10^{-2} \%;$$

**Значения констант равновесия реакций раскисления расплавов Ni – 10 % Co, Ni – 15 % Co, Ni – 20 % Co и параметров взаимодействия при 1873 К**

**Table 1. Equilibrium constants for deoxidation reactions of Ni – 10 % Co; Ni – 15 % Co, Ni – 20 % Co melts and interaction parameters at 1873 K**

Параметр (оксид)	Ni	Ni – 10 % Co	Ni – 15 % Co	Ni – 20 % Co	Co
$\lg K_{Cr} (Cr_2O_3)$	–7,753 [7]	–7,634	–7,577	–7,522	–7,029 [7]
$\lg K_{Si} (SiO_2)$	–6,563 [9]	–6,489	–6,464	–6,446	–6,435 [9]
$e_O^O$	0 [4]	0	0	0	0 [5]
$e_{Cr}^{Cr}$	0,0083 [4]	0,0075	0,0071	0,0067	0 [5]
$e_O^{Cr}$	–0,150 [11]	–0,142	–0,138	–0,134	–0,07 [5]
$e_{Cr}^O$	–0,500 [11]	–0,474	–0,461	–0,448	–0,24 [5]
$e_{Si}^{Si}$	0,190 [12]	0,176	0,169	0,162	0,05 [5]
$e_{Cr}^{Si}$	0,0154 [13]	0,0156	0,0157	0,0158	0,0176 [14]
$e_{Si}^{Cr}$	0,0103 [13]	0,0104	0,0105	0,0105	0,0115 [14]
$e_O^{Si}$	–0,065 [12]	–0,079	–0,086	–0,093	–0,206 [6]
$e_{Si}^O$	–0,110 [12]	–0,135	–0,148	–0,161	–0,365 [6]
$r_O^{Cr}$	$2,415 \cdot 10^{-3}$ [11]	$2,176 \cdot 10^{-3}$	$2,057 \cdot 10^{-3}$	$1,937 \cdot 10^{-3}$	0 [5]

– для сплава Ni – 15 % Co – 15 % Cr

$$\lg [\% O]_{Cr} = -2,526 - \frac{2}{3} \lg [\% Cr] + 0,133 [\% Cr] + \\ + \frac{9,165 \cdot 10^{-4}}{[\% Cr]^{2/3}} - 2,057 \cdot 10^{-3} [\% Cr]^2 = -1,772, \\ [O] = 1,691 \cdot 10^{-2} \%;$$

– для сплава Ni – 20 % Co – 20 % Cr

$$\lg [\% O]_{Cr} = -2,508 - \frac{2}{3} \lg [\% Cr] + 0,130 [\% Cr] + \\ + \frac{9,290 \cdot 10^{-4}}{[\% Cr]^{2/3}} - 1,937 \cdot 10^{-3} [\% Cr]^2 = -1,556, \\ [O] = 2,778 \cdot 10^{-2} \%;$$

При раскислении расплавов Ni – 10 % Co – 10 % Cr, Ni – 15 % Co – 15 % Cr и Ni – 20 % Co – 20 % 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 вид:

– для сплава Ni – 10 % Co – 10 % Cr

$$\lg [\% O]_{Cr+Si} = -2,058 + 0,069 [\% Si];$$

– для сплава Ni – 15 % Co – 15 % Cr

$$\lg [\% O]_{Cr+Si} = -1,772 + 0,076 [\% Si];$$

– для сплава Ni – 20 % Co – 20 % Cr

$$\lg [\% O]_{Cr+Si} = -1,556 + 0,082 [\% Si].$$

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). С учетом величины константы равновесия реакции раскисления кремнием и параметров взаимодействия (см. таблицу) уравнение (5) примет вид:

– для сплава Ni – 10 % Co – 10 % Cr

$$\lg [\% O]_{Si+Cr} = -2,094 - \frac{1}{2} \lg [\% Si] - \\ - 0,009 [\% Si] + \frac{0,385 \cdot 10^{-4}}{[\% Si]^{1/2}};$$

– для сплава Ni – 15 % Co – 15 % Cr

$$\lg [\% O]_{Si+Cr} = -1,702 - \frac{1}{2} \lg [\% Si] + \\ + 0,0014 [\% Si] + \frac{0,434 \cdot 10^{-4}}{[\% Si]^{1/2}};$$

– для сплава Ni – 20 % Co – 20 % Cr

$$\lg [\% O]_{Si+Cr} = -1,421 - \frac{1}{2} \lg [\% Si] + \\ + 0,012 [\% Si] + \frac{0,481 \cdot 10^{-4}}{[\% Si]^{1/2}}.$$

Решая совместно уравнения (3) и (5), можно определить содержание кремния [% Si]\*, при котором происходит смена механизма реакции раскисления:

- для сплава Ni – 10 % Co – 10 % Cr [% Si]\* = 0,85 %;
- для сплава Ni – 15 % Co – 15 % Cr [% Si]\* = 1,38 %;
- для сплава Ni – 20 % Co – 20 % Cr [% Si]\* = 1,86 %.

Рассчитанные по уравнениям (3) и (5) равновесные концентрации кислорода в расплавах Ni – 10 % Co – 10 % Cr, Ni – 15 % Co – 15 % Cr и Ni – 20 % Co – 20 % Cr при 1873 К приведены на рисунке в сравнении с данными о растворимости кислорода в расплавах систем Ni–Co [15] и Ni–Co–Si [9]. Растворимость кислорода в расплавах систем Ni–Co и Ni–Co–Cr показана штриховыми линиями. Зависимость концентрации кислорода от содержания кремния для сплавов Ni – 10 % Co, Ni – 15 % Co и Ni – 20 % Co при 1873 К может быть описана уравнениями [9]:

$$\begin{aligned} \lg[\% \text{O}]_{\text{Ni} - 10 \% \text{Co}} &= -3,245 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] - \\ &- 0,009[\% \text{Si}] + \frac{0,385 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}}; \\ \lg[\% \text{O}]_{\text{Ni} - 15 \% \text{Co}} &= -3,232 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] + \\ &+ 0,0014[\% \text{Si}] + \frac{0,434 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}}; \\ \lg[\% \text{O}]_{\text{Ni} - 20 \% \text{Co}} &= -3,223 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Si}] + \\ &+ 0,012[\% \text{Si}] + \frac{0,481 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Si}]^{1/2}}. \end{aligned}$$

Как видно из приведенных на рисунке данных, кремний при малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr. Дальнейшее повышение содержания кремния выше 0,85 – 1,86 % (в зависимости от состава сплава) приводит к снижению концентрации кислорода в расплаве. Однако раскислительная способность кремния в расплавах системы Ni–Co–Cr значительно ниже, чем в расплавах системы Ni–Co. Это можно объяснить тем, что хром при высоком его содержании, как это имеет место в изучаемых сплавах, существенно понижает активность кислорода в расплаве и в гораздо меньшей степени повышает активность кремния (см. таблицу). Поскольку раскислительная способность кремния в никеле выше, чем в кобальте, то смена механизма реакции раскисления происходит при более высоких содержаниях кремния с ростом содержания кобальта в расплавах.

Полученные результаты позволяют заключить, что кремний в расплавах системы Ni–Co–Cr даже при повышенных его содержаниях является слабым раскислителем.

**Выводы.** Кремний в расплавах системы Ni–Co–Cr при малых его содержаниях практически не влияет на

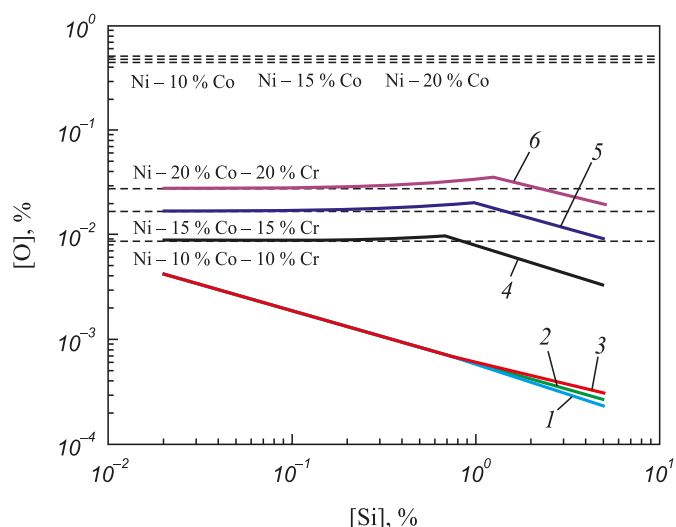


Рис. 1. Зависимость концентрации кислорода от содержания кремния в расплавах  
Ni – 10 % Co – Si (1), Ni – 15 % Co – Si (2), Ni – 20 % Co – Si (3),  
Ni – 10 % Co – 10 % Cr – Si (4), Ni – 15 % Co – 15 % Cr – Si (5)  
и Ni – 20 % Co – 20 % Cr – Si (6) при 1873 К

Fig. 1. Dependence of oxygen concentration on silicon content in  
Ni – 10 % Co – Si (1), Ni – 15 % Co – Si (2), Ni – 20 % Co – Si (3),  
Ni – 10 % Co – 10 % Cr – Si (4), Ni – 15 % Co – 15 % Cr – Si (5)  
and Ni – 20 % Co – 20 % Cr – Si (6) melts at 1873 K

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. Однако раскислительная способность кремния в расплавах системы Ni–Co–Cr при повышенных его содержаниях значительно ниже, чем в расплавах системы Ni–Co.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Часть 1 // Материаловедение. 1997. № 4. С. 32 – 39.
2. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. Cambridge: University Press, 2006. – 372 p.
3. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). – М.: Наука и технологии, 2013. – 264 с.
4. 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.
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. Куликов И.С. Раскисление металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
7. Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni-Co, содержащих хром // Металлы. 2016. № 4. С. 71 – 78.
8. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Металлургия хрома. – М.: ЭЛИЗ, 1999. – 582 с.

9. Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni–Co, содержащих кремний // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 2. С. 163 – 166.
10. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов. – М.: ЭЛИЗ, 2005. – 448 с.
11. Дашевский В.Я., Григорович К.В., Красовский П.В. и др. Термодинамика растворов кислорода в расплавах Ni–Cr // Доклады академии наук. 1998. Т. 359. № 2. С. 212 – 213.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

Поступила в редакцию 30 ноября 2018 г.

После доработки 30 ноября 2018 г.

Принята к публикации 29 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 3, pp. 241–245.

## EFFECT OF SILICON ON THE OXYGEN SOLUBILITY IN Ni–Co–Cr 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 the effect of silicon on the solubility of oxygen in Ni–Co–Cr melts has been carried out at 1873 K. Silicon at low contents practically does not affect the concentration of oxygen in Ni–Co–Cr melts, which is determined by the chromium content. With a higher content of silicon after changing the interaction mechanism of chromium and silicon with oxygen, when silicon already determines the solubility of oxygen in the melt, the oxygen concentration decreases. However, the deoxidizing ability of silicon at elevated contents in Ni–Co–Cr melts is much lower than in Ni–Co melts.

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

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-3-241-245

### REFERENCES

1. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nickel superalloys for casting blades with directional and single-crystal structure. Part I. *Materialovedenie*. 1997, no. 4, pp. 32–39. (In Russ.).
2. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006, 372 p.
3. 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.).
4. 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.
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. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Deoxidation of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 504 p. (In Russ.).
7. 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.
8. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Metallurgiya khroma* [Metallurgy of chromium]. Moscow: ELIZ, 1999, 582 p. (In Russ.).
9. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in the silicon-containing Ni–Co melts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. (In Russ.).
10. Lyakishev H.P., Gasik M.I. *Fizikohimiya i tehnologiya elektroferrosplavov* [Physicochemistry and technology of electroferroalloys]. Moscow: ELIZ, 2005, 448 p. (In Russ.).
11. Dashevskii V.Ya., Grigorovich K.V., Krasovskii P.V., Makarova N.N., Kashin V.I. Thermodynamics of oxygen solution in Ni–Cr melts. *Doklady Akademii Nauk*. 1998, vol. 359, no. 2, pp. 212–213. (In Russ.).
12. 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.
13. 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.).
14. 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.).
15. 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.).

**Funding.** This work was carried out according to 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 November 30, 2018

Accepted January 29, 2019