



Оригинальная статья

УДК 669.89.66-971.546.442

DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-268-277

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2298>

ТЕРМОДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ

Н. Ф. Якушевич, Е. В. Протопопов, М. В. Темлянцева,
В. В. Павлов, А. Н. Абина, О. В. Бивол

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. На основе диаграмм состояния двухкомпонентных силикатных систем $\text{SrO}-\text{SiO}_2$, $\text{BaO}-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ определены активности компонентов в инвариантных (эвтектических и монотектических) точках рассматриваемых систем. Процессы кристаллизации в инвариантных эвтектических точках l_1 и l_2 рассматриваются как химические реакции $j_{e1}(\text{KSiO}_2(\text{ж}) + l\text{MeO}(\text{ж})) \rightarrow \text{CSiO}_2(\text{тв}) + a(\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$, $j_{e2}(\text{mSiO}_2(\text{ж}) + n\text{MeO}(\text{ж})) \rightarrow (\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв}) + b(2\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$, для которых определяются значения ΔG_T° и константы равновесия. При заданных температурах и известных значениях активностей компонентов в равновесных с шлаком металлических расплавах определены значения a_{MeO} в шлаках. В гомогенных шлаковых расплавах активности оксидов щелочноземельных металлов (ЩЗМ) определялись из констант равновесных реакций восстановления этих металлов из шлаков кремнием железокремниевых металлических расплавов. В области гомогенных шлаковых расплавов построены зависимости $a_{\text{SiO}_2} = f(x_{\text{SiO}_2})$ при температурах 1600 и 1700 °С, а при использовании данных по активностям ЩЗМ (Sr, Ba, Ca) в металлических высококремнистых расплавах определены зависимости $\lg a_{(\text{SrO})} = f(x_{\text{SiO}_2}, x_{\text{Si}})$ при 1493 °С и $\lg a_{(\text{BaO})} = f(x_{\text{SiO}_2}, x_{\text{Si}})$ при 1450 °С. На трехпараметрической диаграмме в координатах $a_{[\text{Si}]} - a_{(\text{SiO}_2)} - a_{(\text{MeO})}$ (для щелочноземельных металлов) построены зависимости $a_{(\text{SrO})} = f(a_{[\text{Si}]}, a_{(\text{SiO}_2)})$ при 1493 °С и $a_{(\text{BaO})} = f(a_{[\text{Si}]}, a_{(\text{SiO}_2)})$ при 1450 °С. Показано, что низкие равновесные значения $a_{(\text{SrO})}$ и $a_{(\text{BaO})}$, $\lg a_{(\text{SrO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]}) \leq (-4)$ и $\lg a_{(\text{BaO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]}) \leq (-3)$, могут достигаться при равновесных значениях активности кремния в металлических расплавах $a_{[\text{Si}]} > 0,5$ при восстановлении стронция и $a_{[\text{Si}]} > 0,7$ при восстановлении бария.

Ключевые слова: щелочноземельные металлы (ЩЗМ), оксиды ЩЗМ, активности оксидов ЩЗМ, активности оксидов в шлаковых расплавах

Для цитирования: Якушевич Н.Ф., Протопопов Е.В., Темлянцева М.В., Павлов В.В., Абина А.Н., Бивол О.В. Термодинамика восстановления щелочноземельных металлов из шлаковых расплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 268–277. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-268-277>

Original article

THERMODYNAMICS OF ALKALINE-EARTH METALS REDUCTION FROM SLAG MELTS

N. F. Yakushevich, E. V. Protopopov, M. V. Temlyantsev,
V. V. Pavlov, A. N. Abina, O. V. Bivol

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Based on the state diagrams of two-component silicate systems $\text{SrO}-\text{SiO}_2$, $\text{BaO}-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{SiO}_2$, the authors have determined the activity of components in invariant (eutectic and monotectic) points of the systems under consideration. Crystallization processes at invariant eutectic points l_1 and l_2 are considered as chemical reactions $j_{e1}(\text{KSiO}_2(l) + l\text{MeO}(l)) \rightarrow \text{CSiO}_2(\text{sol}) + a(\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{sol})$, $j_{e2}(\text{mSiO}_2(l) + n\text{MeO}(l)) \rightarrow (\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{sol}) + b(2\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{sol})$, for which the values ΔG_T° and the equilibrium constants were established. The values of a_{MeO} in the slags were determined at given temperatures and known values of the component activities in metal melts in equilibrium with slag. In homogeneous slag melts, the activity of alkaline-earth metal (AEM) oxides was defined from the constants of equilibrium reactions of reduction of these metals from slags by silicon of iron-silicon metal melts. In the zone of homogeneous slag melts, the dependences $a_{\text{SiO}_2} = f(x_{\text{SiO}_2})$ were constructed at temperatures of 1600 and 1700 °C, and when using data on the activities of AEM (Sr, Ba, Ca) in metallic high-silicon melts, the dependences $\lg a_{(\text{SrO})} = f(x_{\text{SiO}_2}, x_{\text{Si}})$ at 1493 °C and $\lg a_{(\text{BaO})} = f(x_{\text{SiO}_2}, x_{\text{Si}})$ at 1450 °C were determined. On a three-parameter diagram in coordinates $a_{[\text{Si}]} - a_{(\text{SiO}_2)} - a_{(\text{MeO})}$ (for AEM), the dependences $a_{(\text{SrO})} = f(a_{[\text{Si}]}, a_{(\text{SiO}_2)})$ at 1493 °C and $a_{(\text{BaO})} = f(a_{[\text{Si}]}, a_{(\text{SiO}_2)})$ at 1450 °C were constructed. It is shown that low equilibrium values of $a_{(\text{SrO})}$ and $a_{(\text{BaO})}$, $\lg a_{(\text{SrO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]}) \leq (-4)$ and $\lg a_{(\text{BaO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]}) \leq (-3)$, can be achieved at equilibrium values of silicon activity in metal melts $a_{[\text{Si}]} > 0,5$ during strontium reduction and $a_{[\text{Si}]} > 0,7$ during barium reduction.

Keywords: alkaline-earth metals (AEM), AEM oxides, activity of AEM oxides, activity of oxides in slag melts

For citation: Yakushevich N.F., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Pavlov V.V., Abina A.N., Bivol O.V. Thermodynamics of alkaline-earth metals reduction from slag melts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 268–277. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-268-277>

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] сделана термодинамическая оценка возможности восстановления щелочноземельных металлов (ЩЗМ) из оксидов (CaO, BaO, SrO) углеродом, кремнием, алюминием. Показано, что в присутствии растворителя (кремния, алюминия) процессы восстановления ЩЗМ углеродом могут осуществляться при температурах 1600–1800 °С. Однако в технологической практике для получения сплавов и лигатур с ЩЗМ в руднотермических электропечах в присутствии в качестве растворителя кремния (например, при плавке ферросилиция, силикокальция, силикобария) образуются шлаковые расплавы, в которых коэффициент активности оксидов ЩЗМ снижается на порядки (для CaO – в 10–100 раз [2, 3]), что может значительно снизить эффективность процессов восстановления.

Данные по активностям компонентов в шлаковых расплавах, содержащих BaO, SrO, отсутствуют даже для простых бинарных систем (BaO–SiO₂, SrO–SiO₂) и, тем более, для более сложных трех-четырёхкомпонентных расплавов (CaO–BaO–SrO–SiO₂–...), образующихся, например, при переработке карбонатитовых барий-стронциевых концентратов, содержащих до 25 % CaO, до 18 % BaO, до 9 % SrO, до 30 % SiO₂, до 23 % CO₂.

ТЕРМОДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ

ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

ИЗ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ

Диаграммы состояния бинарных систем CaO–SiO₂ [4, 5], SrO–SiO₂ [5–10], BaO–SiO₂ [6, 8, 9] с учетом исследований тройных систем CaO–SrO–SiO₂, SrO–BaO–TiO₂, SrO–BaO–Ti₂O, CaO–SiO₂–Al₂O₃ [11–15] представлены на рис. 1. Видно, что строение (и, очевидно, свойства расплавов) данных систем в значительной степени аналогичны. Во всех системах образуются конгруэнтно плавящиеся тугоплавкие силикаты ЩЗМ типа 2MeO·SiO₂: 2CaO·SiO₂ ($t_m = 2130$ °С), 2SrO·SiO₂ (~1800 °С), 2BaO·SiO₂ (1760 °С) и моносилкаты CaO·SiO₂ (1544 °С), SrO·SiO₂ (1578 °С), BaO·SiO₂ (1604 °С), образующие достаточно легкоплавкие эвтектики e_1 (1436 °С, 1358 °С, 1410 °С (для BaO·2SiO₂)) и e_2 (1460 °С, 1550 °С, 1560 °С).

Области гомогенных расплавов при температурах 1600–1700 °С лежат между линиями ликвидуса, ограничивающими двухфазные области ж + MeO·SiO₂(ТВ)_B (или ж + 2MeO·SiO₂) и ж + SiO₂(ТВ) (кристобалит, тридимит). Это предопределяет ход изотерм активностей компонентов на диаграмме, представленной

на рис. 2 в координатах $x_{\text{SiO}_2} - a_{\text{SiO}_2}$ при температурах 1600–1700 °С. Знакопеременный по отношению к закону Рауля ход изотерм активностей позволяет достаточно точно фиксировать точку их пересечения с линией закона Рауля ($a_{\text{SiO}_2} = x_{\text{SiO}_2}$; $y_{\text{SiO}_2} = 1$): точки C_1 , C_2 на изотермах активностей системы CaO–SiO₂; точки S_1 , S_2 – на изотермах активностей системы SrO–SiO₂ и точки B_1 , B_2 – на изотермах активностей системы BaO–SiO₂.

В области гомогенных расплавов диаграмм состояния систем SrO–SiO₂, BaO–SiO₂ и CaO–SiO₂ (рис. 1, а–в) нанесены линии изоактивностей диоксида кремния, построенные по изображенным на рис. 2 изотермам.

Значения активностей оксидов ЩЗМ в эвтектических точках трехфазных инвариантных равновесий в системе SrO–SiO₂

$$e_1(\text{ж}_{e_1} + \text{SiO}_2(\text{ТВ}) + \text{SrO} \cdot \text{SiO}_2(\text{ТВ})), \\ t_{e_1} = 1358 \text{ °С}, x_{\text{SiO}_2} \approx 0,68;$$

$$e_2(\text{ж}_{e_2} + 2\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2(\text{ТВ}) + \text{SrO} \cdot \text{SiO}_2(\text{ТВ})), \\ t_{e_1} = 1550 \text{ °С}, x_{\text{SiO}_2} \approx 0,485,$$

в системе BaO–SiO₂

$$e_1(\text{ж}_{e_1} + \text{SiO}_2(\text{ТВ}) + \text{BaO} \cdot 2\text{SiO}_2(\text{ТВ})), \\ t_{e_1} = 1374 \text{ °С}, x_{\text{SiO}_2} \approx 0,74;$$

$$e_2(\text{ж}_{e_2} + 2\text{BaO} \cdot 3\text{SiO}_2(\text{ТВ}) + \text{BaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{ТВ})), \\ t_{e_2} = 1410 \text{ °С}, x_{\text{SiO}_2} \approx 0,58;$$

$$e_3(\text{ж}_{e_3} + \text{BaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{ТВ}) + 2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{ТВ})), \\ t_{e_3} = 1560 \text{ °С}, x_{\text{SiO}_2} \approx 0,485$$

определялись из констант равновесия эвтектических реакций кристаллизации [15]. Например, для реакции эвтектической кристаллизации расплава состава e_2 системы SrO–SiO₂ (1)

$$0,48\text{SiO}_2(\text{ж}) + 0,52\text{SrO}(\text{ж}) = 0,04(2\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2) + \\ + 0,44(\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2); \\ \Delta G_{(1)1823 \text{ К}}^\circ = 0,04\Delta G_{1823 \text{ К}}^\circ(2\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2) + \\ + 0,44\Delta G_{1823 \text{ К}}^\circ(\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2); \\ \lg K_{(1)1923} = -\frac{\Delta G_{1823 \text{ К}}^\circ}{19,14 \cdot 1023} = 2,0; \\ \Delta G_{(1)1823}^\circ = -69\,550 \text{ Дж}; K_{(1)} = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,48} a_{\text{SrO}}^{0,52}}.$$

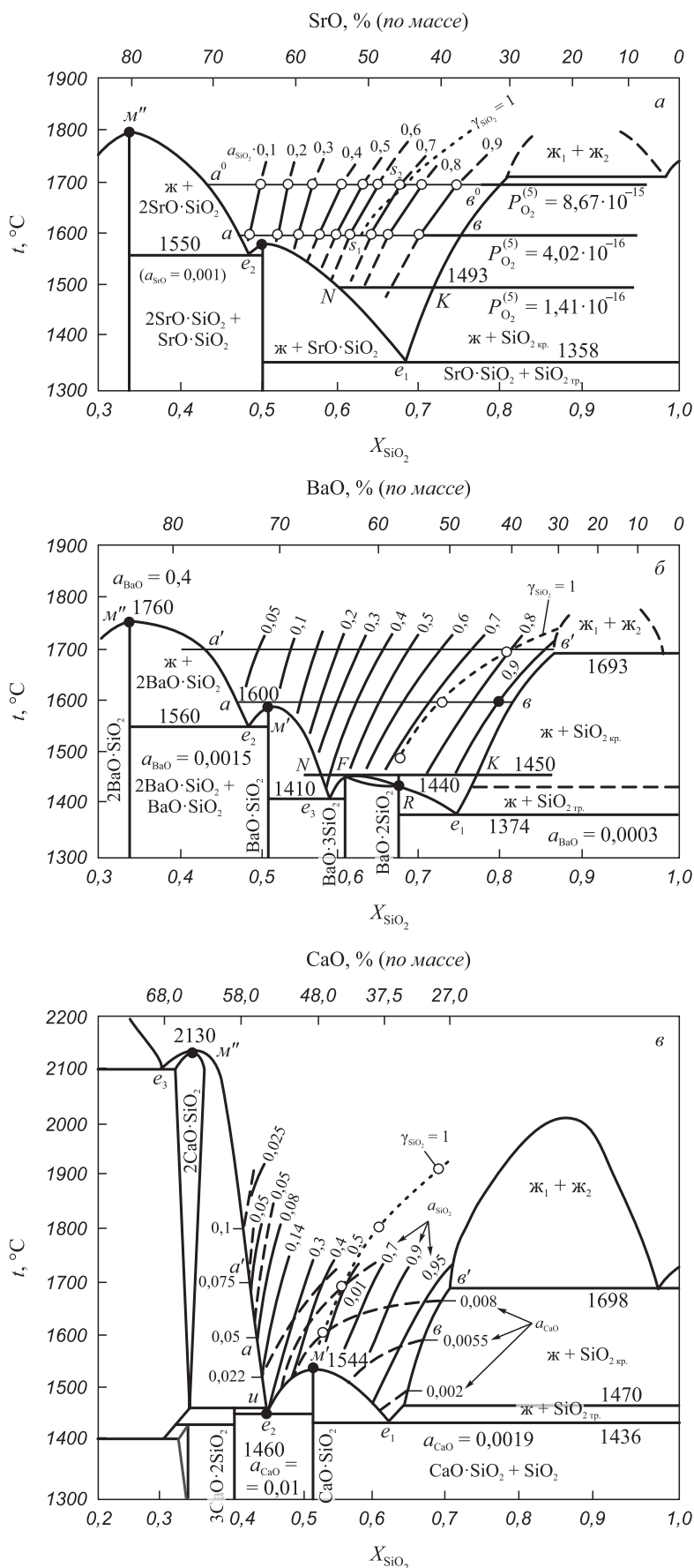


Рис. 1. Диаграммы состояния систем $\text{SrO} - \text{SiO}_2$ (*a*), $\text{BaO} - \text{SiO}_2$ (*б*), $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ (*в*)

Fig. 1. State diagrams of the systems $\text{SrO} - \text{SiO}_2$ (*a*), $\text{BaO} - \text{SiO}_2$ (*б*), $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ (*в*)

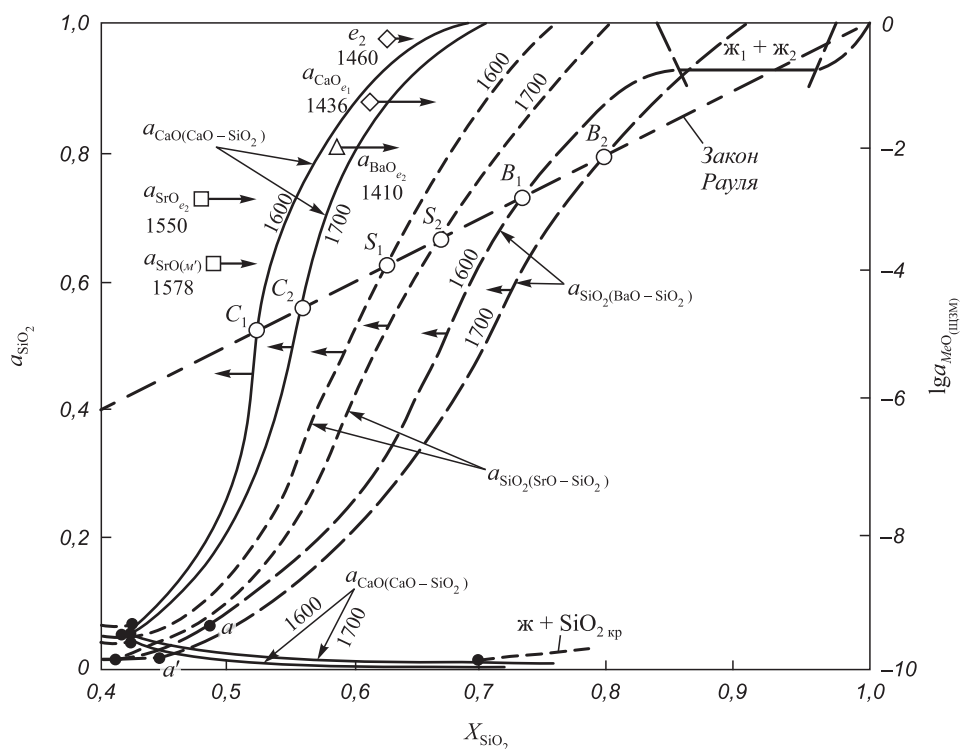


Рис. 2. Активности компонентов в расплавах систем $\text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{BaO} - \text{SiO}_2$ и $\text{SrO} - \text{SiO}_2$: Δ , $\square$, $\diamond$ – расчетные значения $\lg a(\text{BaO}, \text{SrO}, \text{CaO})$ в точках инвариантных равновесий e_1 , e_2 , m'

Fig. 2. Activity of components in the melts of $\text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{BaO} - \text{SiO}_2$ and $\text{SrO} - \text{SiO}_2$ systems: Δ , $\square$, $\diamond$ – calculated values of $\lg a(\text{BaO}, \text{SrO}, \text{CaO})$ at the points of invariant equilibria e_1 , e_2 , m'

Приняв по экстраполированным (рис. 1, а) значениям активности SiO_2 в точке e_2 $a_{\text{SiO}_2} \approx 0,11$, можно определить значения активности SrO

$$\lg a_{\text{SrO}} = -1,94 \lg K_{(1)} + 0,9 = -2,97; a_{\text{SrO}(e_2)} = 0,001.$$

Использованные в работе значения $\Delta G^\circ = f(T)$ для силикатов ЩЗМ приведены в табл. 1.

В результате аналогичных расчетов для точек инвариантных равновесий систем $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, выполненных по методике работы [16] с ис-

Т а б л и ц а 1

Энергия Гиббса $\Delta G^\circ = f(T)$ образования оксидов из элементов и силикатов ЩЗМ из оксидов

Table 1. Gibbs energy $\Delta G^\circ = f(T)$ of oxides formation from elements and AEM silicates from oxides

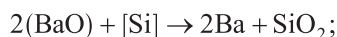
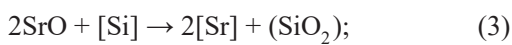
Силикат	$\Delta G^\circ = f(T)$, Дж	Источник
SiO_2	$-911\,700 + 196,65T$	[2]
SrO	$-721\,090 + 178T$	[2]
BaO	$-715\,000 + 180T$	[2]
CaO	$-795\,910 + 195,2T$	[2]
$\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$	$-148\,049 - 7,66T$	[6, 11]
$2\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$	$-214\,347 + 28,91T$	[6, 11]
$\text{BaO} \cdot 2\text{SiO}_2$	$-156\,871 + 68,226T$	[6, 7]
$2\text{BaO} \cdot 3\text{SiO}_2$	$-334\,850 + 0,0154T$	расчет
$\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$	$-177\,980 + 13,043T$	[6, 15]
$2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$	$-302\,070 + 0,056T$	[6]
$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$-83\,300 - 3,43T$	[2, 4]
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$-144\,460 - 13,98T$	[2, 4]

пользованием исходных термодинамических данных $\Delta G^\circ = f(T)$, которые представлены в табл. 1, получены в реперных точках значения $a_{\text{MeO}_{\text{ШЗМ}}}$, обозначенные также на рис. 2.

Для двухфазных равновесий $\text{ж} + \text{MeO} \cdot \text{SiO}_2(\text{тв})$ (т. m'), $\text{ж} + 2\text{MeO} \cdot \text{SiO}_2(\text{тв})$ (т. m'')) также можно рассчитать значения a_{MeO} , например, для точки m' системы $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$ процесс кристаллизации (плавления) силиката $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$ описывается реакцией

$$\begin{aligned} 0,5(\text{SiO}_2)(\text{ж}) + 0,5(\text{SrO})(\text{ж}) &= 0,5(\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв}); \\ \Delta G_{(2)1851}^\circ &= -81\,113 \text{ Дж}; a_{\text{SiO}_2} = 0,2; \\ \lg K_2 &= -\frac{-81\,113}{19,14 \cdot 1851} = 2,209; \\ K_{(2)1851} &= 194,7; K_{(2)} = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,5} a_{\text{SrO}}^{0,5}}; \\ \lg a_{\text{SrO}} &= -\lg a_{\text{SiO}_2} - 2 \lg K_{(2)} = 0,7 - 4,578 = -3,878; \\ a_{\text{SrO}} &= 1,32 \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (2)$$

Равновесные параметры гомогенного однофазного шлакового расплава можно оценить применительно к процессу углеродосиликотермического восстановления из констант равновесия реакций:



$$K_{(3)} = \frac{a_{[\text{Sr}]}^2 a_{(\text{SiO}_2)}}{a_{(\text{SrO})}^2 a_{[\text{Si}]}}, K_{(4)} = \frac{a_{[\text{Ba}]}^2 a_{(\text{SiO}_2)}}{a_{(\text{BaO})}^2 a_{[\text{Si}]}}, \quad (4)$$

$$\lg a_{(\text{SrO})} = \lg a_{[\text{Sr}]} + \frac{1}{2} \lg a_{(\text{SiO}_2)} - \frac{1}{2} \lg a_{[\text{Si}]} - \frac{1}{2} \lg K_{(3)};$$

$$\lg a_{(\text{BaO})} = \lg a_{[\text{Ba}]} + \frac{1}{2} \lg a_{(\text{SiO}_2)} - \frac{1}{2} \lg a_{[\text{Si}]} - \frac{1}{2} \lg K_{(4)}.$$

В высококремнистых сплавах ($\text{Si} > 50\%$ (по массе)) значения активности кремния близки к равновесным для реакции (3), в железокремнистых сплавах при $1600 - 1700^\circ\text{C}$ $a_{\text{Si}} \approx 0,6 \div 0,8$ [8]. Область гомогенных шлаковых расплавов при этих температурах простирается в интервале концентраций $x_{(\text{SiO}_2)} = 0,60 \div 0,72$ ($54 - 39\%$ (по массе) SrO ; $a_{\text{SiO}_2} = 0,7 \div 1,0$).

Значения $\lg K_{(3)}$ и $\lg K_{(4)}$ определяются из уравнений

$$\lg K_{(3)} = \frac{-\Delta G_{(3)}^\circ}{2,303RT}; \lg K_{(4)} = \frac{-\Delta G_{(4)}^\circ}{2,303RT};$$

$$\Delta G_{(3)}^\circ = \Delta G_{\text{SiO}_2}^\circ - 2\Delta G_{\text{SrO}}^\circ; \Delta G_{(4)}^\circ = \Delta G_{\text{SiO}_2}^\circ - 2\Delta G_{\text{BaO}}^\circ.$$

В работе [1] с использованием результатов исследований [17, 18] определены значения a_{Sr} при 1493°C как функции концентрации кремния в сплаве $a_{[\text{Sr}]} = f(x_{[\text{Si}]})$ при $x_{[\text{Si}]} = 0 \div 0,5$ и $a_{[\text{Ba}]}$ при 1450°C и $x_{\text{Si}} = 0 \div 0,3$.

Зависимости изменения $\lg a_{(\text{SrO})} = f(x_{(\text{SiO}_2)}, x_{[\text{Si}]})$ и $\lg a_{(\text{BaO})} = f(x_{(\text{SiO}_2)}, x_{[\text{Si}]})$ представлены на рис. 3, 4.

Расчетные значения активностей кремния в металлических расплавах качественно согласуются с результатами исследований в работах [20–26], активностей SiO_2 в шлаковых расплавах систем $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ и $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ в работах [4, 26], равновесных значений активностей компонентов в системах металл–шлак в работах [3, 20, 27, 28].

Из приведенных на рис. 4 зависимостей видно, что значения a_{BaO} в шлаковых расплавах в широком диапазоне составов ($a_{\text{SiO}_2} = 0,3 \div 0,8$) имеют положительные отклонения от закона Рауля ($\lg a_{(\text{BaO})} = +3,5$) при активности кремния в металле $a_{[\text{Si}]} = 0,51$ и в шлаке $a_{(\text{SiO}_2)} = 0,8$ (координаты точек $1-1'-1''-1'''$), снижаясь до значений $\lg a_{\text{BaO}} = +2,5$ при повышении активности кремния до значений $a_{\text{Si}} \approx 0,7$ и понижении активности кремнезема в шлаке до значений $a_{\text{SiO}_2} \approx 0,3$. При более высоких значениях активностей кремния в металле ($a_{\text{Si}} > 0,7$) равновесные значения a_{BaO} в шлаке резко снижаются до значений $\lg a_{\text{BaO}} = -3,3$ (при $a_{(\text{SiO}_2)} \approx 0,8$ и $a_{\text{Si}} \geq 0,8$) и $\lg a_{\text{BaO}} = -4,0$ (при $a_{(\text{SiO}_2)} = 0,3$ и $a_{\text{Si}} = 0,81$).

Зависимости a_{SrO} имеют максимальные значения ($\lg a_{(\text{SrO})} = -1,3$ при $a_{(\text{SiO}_2)} = 0,8$) – точки $4-4'-4''-4'''$, снижаясь до значений $\lg a_{(\text{SrO})} = -2,0$ при $a_{[\text{Si}]} = 0,42$ и $a_{(\text{SiO}_2)} = 0,1$. При повышении активности кремния (и, соответственно, концентрации кремния в металлическом расплаве) активности $a_{(\text{SrO})}$ ступенчато снижаются до значений $\lg a_{(\text{SrO})} \approx -5,5$ при $a_{(\text{SiO}_2)} = 0,8$ и $a_{[\text{Si}]} = 0,89$.

Такой ход кривых зависимостей активностей $a_{\text{BaO}} = f(a_{[\text{Si}]}, a_{(\text{SiO}_2)})$ и $a_{\text{SrO}} = f(a_{[\text{Si}]}, a_{(\text{SiO}_2)})$ позволяет

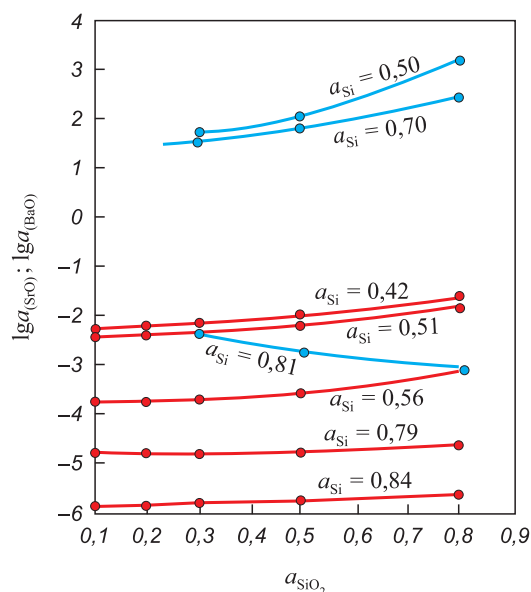


Рис. 3. Зависимости $\lg a_{(\text{SrO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]})$ при 1493°C (—●—) и $\lg a_{(\text{BaO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]})$ при 1450°C (—●—)

Fig. 3. Dependencies $\lg a_{(\text{SrO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]})$ at 1493°C (—●—) and $\lg a_{(\text{BaO})} = f(a_{(\text{SiO}_2)}, a_{[\text{Si}]})$ at 1450°C (—●—)

Таблица 2

Параметры инвариантных равновесий в бинарных системах SrO – SiO₂, BaO – SiO₂, CaO – SiO₂

Table 2. Parameters of invariant equilibria in binary systems SrO – SiO₂, BaO – SiO₂, CaO – SiO₂

Сис-тема	Точки составов	T, К	Состав жидкой фазы		Реакция	ΔG° , кДж	K_p	a_{SiO_2}	a_{CaO}	a_{BaO}	a_{SrO}
			x_{SiO_2}	SiO_2 , % (по массе)							
SrO – SiO ₂	e_1	1631	0,670	53,0	$0,67\text{SiO}_2 + 0,33\text{SrO} = 0,34\text{SiO}_2(\text{тв}) + 0,33(\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–37,30	$K = \frac{1}{a_{\text{SrO}}^{0,32}} = 15,66$	1,000			$1 \cdot 10^{-8}$
	e_2	1823	0,480	34,5	$0,48\text{SiO}_2 + 0,52\text{SrO} = 0,04(\text{SiO}_2 \cdot 2\text{SrO})(\text{тв}) + 0,44(\text{SiO}_2 \cdot \text{SrO})(\text{тв})$	–69,55	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,48} a_{\text{SrO}}^{0,52}} = 1,99$	0,100			$1 \cdot 10^{-4}$
	$m'(\text{SrO} - \text{SiO}_2)$	1851	0,500	38,0	$0,5(\text{SiO}_2)(\text{ж}) + 0,5(\text{SrO})(\text{ж}) = 0,5(\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	+71,00	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,5} a_{\text{SrO}}^{0,5}} = 0,01$	0,200			$3 \cdot 10^{-5}$
	$m''(2\text{SrO} - \text{SiO}_2)$	2073	0,330	20,0	$0,33(\text{SiO}_2)(\text{ж}) + 0,66(\text{SrO})(\text{ж}) = 0,33(2\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–165,00	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,37} a_{\text{SrO}}^{0,67}} = 1,01$	~0,001			$1,5 \cdot 10^{-3}$
	e_1	1647	0,750	50,0	$0,75\text{SiO}_2 + 0,25\text{BaO} = 0,25\text{SiO}_2(\text{трил}) + 0,25(\text{BaO} \cdot 2\text{SiO}_2)(\text{тв})$	–27,3	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,79} a_{\text{BaO}}^{0,25}} = 7,34$	0,310		$3,43 \cdot 10^{-4}$	
BaO – SiO ₂	e_2	1683	0,580	65,0	$0,58\text{SiO}_2 + 0,42\text{BaO} = 0,1(\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв}) + 0,16(2\text{BaO} \cdot 3\text{SiO}_2)(\text{тв})$	–68,97	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,58} a_{\text{BaO}}^{0,42}} = 138,00$	0,450		$2,42 \cdot 10^{-5}$	
	e_3	1823	0,480	27,0	$0,48\text{SiO}_2 + 0,52\text{BaO} = 0,44(\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2) + 0,04(2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–69,58	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,48} a_{\text{BaO}}^{0,52}} = 100,00$	0,080		$1,46 \cdot 10^{-3}$	
	$m'(\text{BaO} - \text{SiO}_2)$	1873	0,500	30,0	$0,5\text{SiO}_2 + 0,5\text{BaO} = 0,5(\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–76,77	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,5} a_{\text{BaO}}^{0,5}} = 138,40$	0,090		$6,5 \cdot 10^{-4}$	
	$m''(2\text{BaO} - \text{SiO}_2)$	2033	0,333	17,0	$0,333\text{SiO}_2 + 0,667\text{BaO} = 0,333(2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–10,11	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,33} a_{\text{BaO}}^{0,667}} = 1,82$	0,010 – 0,005		0,4	
	e_1	1709	0,610	64,0	$0,61\text{SiO}_2 + 0,39\text{CaO} = 0,39(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв}) + 0,22\text{SiO}_2(\text{трил})$	–161,41	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,61} a_{\text{CaO}}^{0,39}} = 3,53$	1,000	0,0019		
CaO – SiO ₂	e_2	1733	0,440	45,5	$0,44\text{SiO}_2 + 0,56\text{CaO} = 0,2(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв}) + 0,12(3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2)(\text{тв})$	–115,66	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,44} a_{\text{CaO}}^{0,56}} = 3,48$	0,200	0,0100		
	$m'(\text{CaO} - \text{SiO}_2)$	1817	0,500	52,0	$0,5\text{SiO}_2 + 0,5\text{CaO} = 0,5(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–44,77	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,5} a_{\text{CaO}}^{0,5}} = 1,28$	0,500	0,0070		
	$m''(2\text{CaO} - \text{SiO}_2)$	2403	0,330	35,0	$0,333\text{SiO}_2 + 0,666\text{CaO} = 0,333(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)(\text{тв})$	–45,77	$K = \frac{1}{a_{\text{SiO}_2}^{0,333} a_{\text{CaO}}^{0,666}} = 1,00$	0,001			

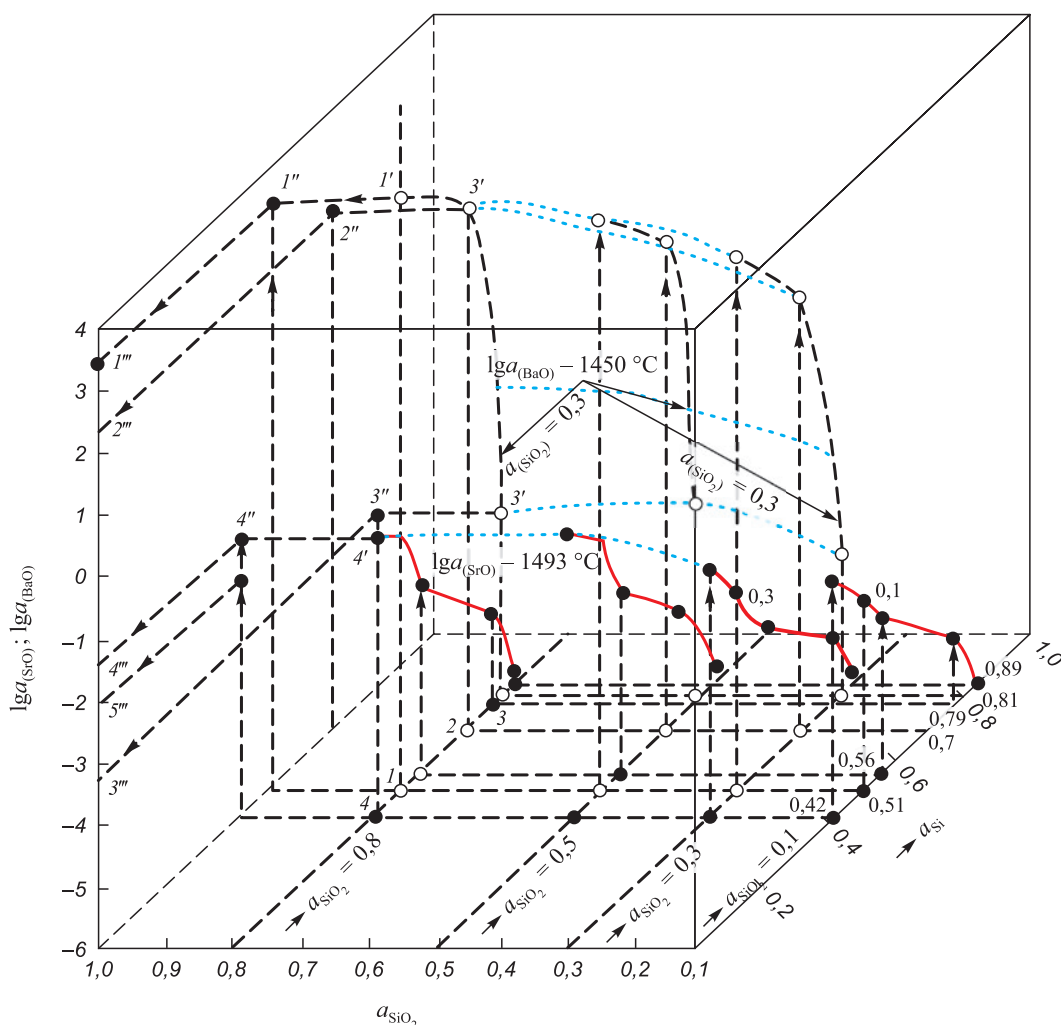


Рис. 4. Изменение активностей $a_{(\text{BaO})}$ и $a_{(\text{SrO})}$ в шлаковых расплавах в зависимости от активности кремнезема $a_{(\text{SiO}_2)}$ и кремния $a_{[\text{Si}]}$ в равновесных шлаковых и металлических расплавах

Fig. 4. Change of $a_{(\text{BaO})}$ and $a_{(\text{SrO})}$ activities in slag melts depending on the activities of silica $a_{(\text{SiO}_2)}$ and silicon $a_{[\text{Si}]}$ in equilibrium slag and metal melts

считать, что наиболее эффективное восстановление оксидов ЦЗМ из шлаковых расплавов осуществляется при значениях $a_{[\text{Si}]} > 0,8$ как из кислых шлаков ($a_{(\text{SiO}_2)} \approx 0,5 \div 0,8$), так и из шлаков с высокой основностью ($a_{(\text{SiO}_2)} \approx 0,1 \div 0,5$), при этом достигаются минимальные значения активностей a_{SrO} и a_{BaO} и, соответственно, концентраций оксидов бария и стронция.

Восстановление оксида стронция может осуществляться более эффективно, чем оксида бария. Вероятно, отмеченные соотношения могут существенно изменяться при более высоких температурах.

Выводы

Определены зависимости $a_{(\text{SiO}_2)} = f(x_{\text{SiO}_2})$ в шлаковых расплавах систем $\text{SrO}-\text{SiO}_2$, $\text{BaO}-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ при температурах 1600 и 1700 °С.

В точках инвариантных состояний (эвтектик и монотектик) рассчитаны активности компонентов шлаковых расплавов. В гомогенных шлаковых расплавах определены активности $a_{(\text{SrO})} = f(x_{(\text{SiO}_2)}, x_{[\text{Si}]})$ при 1493 °С и $a_{(\text{BaO})} = f(x_{(\text{SiO}_2)}, x_{[\text{Si}]})$ при 1450 °С.

Минимальные значения активностей оксидов $a_{(\text{SrO})}$ и $a_{(\text{BaO})}$ могут достигаться при высоких значениях активностей кремния в металлическом расплаве ($a_{[\text{Si}]} \geq 0,7$; $\lg a_{(\text{SrO})} \approx -5,0$; $\lg a_{(\text{BaO})} \approx -4,0$). В этих условиях восстановление (довосстановление) стронция и бария осуществляется, в основном, кремнием, при этом неизбежно повышается концентрация диоксида кремния в шлаке. При низких содержаниях кремния в металле ($a_{[\text{Si}]} \approx 0,5 \div 0,6$) восстановление оксидов стронция и бария осуществляется, в основном, углеродом, а кремний выполняет роль растворителя ЦЗМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Якушевич Н.Ф., Протопопов Е.В., Темлянцева М.В., Павлов В.В., Абина А.А., Кузнецова О.В. Термодинамика восстановления щелочноземельных металлов и оксидов и условия кристаллизации сплавов в системе Fe – Si – Me (ЩЗМ) // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 2. С. 5–15.
2. Эллотт Д., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавления процессов / Пер. с англ. С.Н. Расиной; под ред. Ю.Л. Плинера, Н.С. Смирнова. М.: Металлургия, 1969. 252 с.
3. Якушевич Н.Ф., Галевский Г.В. Взаимодействие углерода с оксидами кальция, кремния, алюминия. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 1999. 250 с.
4. Атлас шлаков. Справочник. М.: Металлургия, 1985. 208 с.
5. Рябчиков И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. М.: Экомет, 2008. 400 с.
6. Кожевников Г.Н., Зайко В.П., Рысс М.А. Электротермия лигатур щелочноземельных металлов с кремнием. М.: Наука, 1978. 224 с.
7. Зубов В.Л., Гасик М.И. Электрометаллургия ферросилиция. Днепропетровск: Системные технологии, 2002. 704 с.
8. Li M., Li L., Zhang B., Li Q., Wu W., Zou Z. Numerical analysis of the particle-induced effect on gas flow in a supersonic powder-laden oxygen jet // Metallurgical and Materials Transactions B. 2020. Vol. 51. No. 4. P. 1718–1730.
<http://doi.org/10.1007/s11663-020-01855-3>
9. Wang B., Shen S., Ruan Y., Cheng S., Peng W., Zhang J. Simulation of gas-liquid two-phase flow in metallurgical process // Acta Metallurgica Sinica. 2020. Vol. 56. No. 4. P. 619–632.
<http://doi.org/10.11900/0412.1961.2019.00385>
10. Barella S., Mapelli C., Mombelli D., Gruttadauria A., Laghi E., Ancona V., Valentino G. Model for the final decarburisation of the steel bath through a self-bubbling effect // Ironmaking and Steelmaking. 2019. Vol. 46. No. 8. P. 721–724.
<http://doi.org/10.1080/03019233.2017.1405179>
11. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. No. 6. P. 563–568.
<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/V118N6A1>
12. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Zhdanov A.V. Utilization of sub-standard and offgrade raw materials for chromium and manganese ferroalloys production // Proceedings of the 12th Int. Ferroalloys Congress: Sustainable Future. INFACON 2010. Helsinki, Finland: Outotec Oyj, 2010. P. 311–315.
13. Irons G.A., Tong X.-P. Treatment of steel with alkaline-earth elements // ISIJ International. 1995. Vol. 35. No. 7. P. 838–844.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.838>
14. Bakin I.V., Mikhailov G.G., Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Dresvyankina L.E. Methods for improving the efficiency of steel modifying // Material Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 215–222.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.215>
15. Якушевич Н.Ф., Полях О.А., Галевский Г.В., Тяжина А.А. Анализ фазово-химических равновесий в системе расплав (Fe–Si–C) – шлак (CaO–Al₂O₃–SiO₂) – газ (O₂–SiO–CO) // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 5. С. 316–321.
<https://doi.org/10.15825/0368-0797-2015-5-316-321>
16. Якушевич Н.Ф., Кондратьев Д.В. Термодинамика первичных шлаков в системе CaO–Al₂O₃–SiO₂ // Известия вузов. Черная металлургия. 2000. Т. 43. № 2. С. 4–9.
17. Есин Ю.О., Сандаков В.Н., Гельд П.В. и др. Энтальпии смешения жидких кремния и бария при 1723 К // Журнал прикладной химии. 1973. Т. 46. № 11. С. 2402–2405.
1. Yakushevich N.F., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Pavlov V.V., Abina A.A., Kuznetsova O.V. Thermodynamics of alkaline-earth metals reduction from oxides and conditions of alloys crystallization in the system Fe – Si – Me (AEM). *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2020, no. 2, pp. 5–15. (In Russ.).
2. Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Thermochemistry for Steel-making*. Addison – Wesley Inc. 1963. (Russ. ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p.).
3. Yakushevich N.F., Galevskii G.V. *Interaction of Carbon with Calcium Oxide, Silicon, Aluminum*. Novokuznetsk: izd. SibSIU, 1999, 250 p. (In Russ.).
4. *Schlackenatlas*. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahleisen, 1981, 282 p. (Russ. ed.: *Atlas shlakov. Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1985, 208 p.).
5. Ryabchikov I.V. *Modifiers and Technologies of Extra-Furnace Processing of Iron-Carbon Alloys*. Moscow: Ekomet, 2008, 400 p. (In Russ.).
6. Kozhevnikov G.N., Zaiko V.P., Ryss M.A. *Electrothermy of Ligatures of Alkaline-Earth Metals with Silicon*. Moscow: Nauka, 1978, 224 p. (In Russ.).
7. Zubov V.L., Gasik M.I. *Electrometallurgy of Ferrosilicon*. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2002, 704 p. (In Russ.).
8. Li M., Li L., Zhang B., Li Q., Wu W., Zou Z. Numerical analysis of the particle-induced effect on gas flow in a supersonic powder-laden oxygen jet. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020, vol. 51, no. 4, pp. 1718–1730.
<http://doi.org/10.1007/s11663-020-01855-3>
9. Wang B., Shen S., Ruan Y., Cheng S., Peng W., Zhang J. Simulation of gas-liquid two-phase flow in metallurgical process. *Acta Metallurgica Sinica*. 2020, vol. 56, no. 4, pp. 619–632.
<http://doi.org/10.11900/0412.1961.2019.00385>
10. Barella S., Mapelli C., Mombelli D., Gruttadauria A., Laghi E., Ancona V., Valentino G. Model for the final decarburisation of the steel bath through a self-bubbling effect. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019, vol. 46, no. 8, pp. 721–724.
<http://doi.org/10.1080/03019233.2017.1405179>
11. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 6, pp. 563–568.
<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/V118N6A1>
12. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Zhdanov A.V. Utilization of sub-standard and offgrade raw materials for chromium and manganese ferroalloys production. In: *Proceedings of the 12th Int. Ferroalloys Congress: Sustainable Future. INFACON 2010*. Helsinki, Finland: Outotec Oyj, 2010, pp. 311–315.
13. Irons G.A., Tong X.-P. Treatment of steel with alkaline-earth elements. *ISIJ International*. 1995, vol. 35, no. 7, pp. 838–844.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.838>
14. Bakin I.V., Mikhailov G.G., Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Dresvyankina L.E. Methods for improving the efficiency of steel modifying. *Material Science Forum*. 2019, vol. 946, pp. 215–222.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.215>
15. Yakushevich N.F., Polyakh O.A., Galevskii G.V., Tyazhina A.A. Phase and chemical equilibria in melt (Fe–Si–C)–slag (CaO–Al₂O₃–SiO₂)–gas (O₂–SiO–CO) system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 316–321. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15825/0368-0797-2015-5-316-321>
16. Yakushevich N.F., Kondrat'ev D.V. Thermodynamics of first slag in CaO–Al₂O₃–SiO₂ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2000, vol. 43, no. 2, pp. 4–9. (In Russ.).
17. Esin Yu.O., Sandakov V.N., Gel'd P.V., etc. Enthalpies of mixing liquid silicon and barium at 1723 K. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 1973, vol. 46, no. 11, pp. 2402–2405. (In Russ.).

18. Есин Ю.О., Колесников С.П., Баев В.М. и др. Энтальпия образования сплавов стронция с кремнием // Журнал физической химии. 1979. Т. 53. № 6. С. 1624–1625.
19. Turkdogan E.T. Physicochemical properties of slags and glasses // The Metal Soc. 1983. Vol. 10. No. 4. P. 113–117.
20. Григорьев Ю.В., Рябчиков И.В., Рошин В.Е. Термодинамический анализ совместного восстановления кремния и бария углеродом // Известия вузов. Черная металлургия. 2005. Т. 48. № 7. С. 3–5.
21. Schei A., Tuset J.K., Tveit H. Production of High Silicon Alloys. Trondheim, Norway: Tapir Academic Press, 1998. 363 p.
22. Wang J., Mao Yu. Slag Figures. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989. P. 44–60.
23. Breitzmann M., Engell H.-J., Janke D. Refining of steel melts using alkaline earth metals // Steel Research. 1988. Vol. 59. No. 7. P. 289–294. <https://doi.org/10.1002/srin.198801505>
24. Li S., Cheng G., Yang L., Chen L., Yan Q., Li C. A thermodynamic model to desing the equilibrium slag compositions during electroslag remelting process: Description and verification // ISIJ International. 2017. Vol. 57. No. 4. P. 713–722. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-655>
25. Hou D., Jiang Z.H., Dong Y.W., Gong W., Cao Y.L., Cao H. Effect of slag composition on the oxidation kinetics of alloying elements during electroslag remelting of stainless steel: Part-I. Mass-transfer model // ISIJ International. 2017. Vol. 57. No. 8. P. 1400–1409. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-147>
26. Ozturk B., Fruehan R.J. Activity of silica in calcium-aluminate based slags // Metallurgical Transactions B. 1987. Vol. 18. No. 4. P. 746–751. <https://doi.org/10.1007/BF02672895>
27. Weiss T., Schwerdfeger K. Chemical equilibria between silicon and slag melts // Metallurgical and Materials Transactions B. 1994. Vol. 25. No. 4. P. 497–504. <https://doi.org/10.1007/BF02650071>
28. Zhang X.-B., Jiang G.C., Xu K.D. Prediction of component activities of quaternary systems using the sub-regular solution model // Acta Metallurgica Sinica. 1992. Vol. 5b. No. 6. P. 476 – 482.
18. Esin Yu.O., Kolesnikov S.P., Baev V.M., etc. Enthalpy of formation of strontium-silicon alloys. Zhurnal fizicheskoi khimii. 1979, vol. 53, no. 6, pp. 1624–1625. (In Russ.).
19. Turkdogan E.T. Physicochemical properties of slags and glasses. The Metal Soc. 1983, vol. 10, no. 4, pp. 113–117.
20. Grigor'ev Yu.V., Ryabchikov I.V., Roshchin V.E. Thermodynamic analysis of the co-reduction of silicon and barium with carbon. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2005, vol. 48, no. 7, pp. 3–5. (In Russ.).
21. Schei A., Tuset J.K., Tveit H. Production of High Silicon Alloys. Trondheim, Norway: Tapir Academic Press, 1998, 363 p.
22. Wang J., Mao Yu. Slag Figures. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989, pp. 44–60.
23. Breitzmann M., Engell H.-J., Janke D. Refining of steel melts using alkaline earth metals. Steel Research. 1988, vol. 59, no. 7, pp. 289–294. <https://doi.org/10.1002/srin.198801505>
24. Li S., Cheng G., Yang L., Chen L., Yan Q., Li C. A thermodynamic model to desing the equilibrium slag compositions during electroslag remelting process: Description and verification. ISIJ International. 2017, vol. 57, no. 4, pp. 713–722. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-655>
25. Hou D., Jiang Z.H., Dong Y.W., Gong W., Cao Y.L., Cao H. Effect of slag composition on the oxidation kinetics of alloying elements during electroslag remelting of stainless steel: Part-I. Mass-transfer model. ISIJ International. 2017, vol. 57, no. 8, pp. 1400–1409. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-147>
26. Ozturk B., Fruehan R.J. Activity of silica in calcium-aluminate based slags. Metallurgical Transactions B. 1987, vol. 18, no. 4, pp. 746–751. <https://doi.org/10.1007/BF02672895>
27. Weiss T., Schwerdfeger K. Chemical equilibria between silicon and slag melts. Metallurgical and Materials Transactions B. 1994, vol. 25, no. 4, pp. 497–504. <https://doi.org/10.1007/BF02650071>
28. Zhang X.-B., Jiang G.C., Xu K.D. Prediction of component activities of quaternary systems using the sub-regular solution model. Acta Metallurgica Sinica. 1992, vol. 5b, no. 6, pp. 476 – 482.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Филиппович Якушевич, д.т.н., профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, проректор по учебной и воспитательной работе, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Вячеслав Владимирович Павлов, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: maxtroshkin93@gmail.com

Анастасия Александровна Абина, аспирант кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

Ольга Владимировна Бивол, аспирант кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: kuznetsova_ov@sibsiu.ru

Nikolai F. Yakushevich, Dr. Sci. (Eng.), Prof.-Consultant of the Chair of Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Educational and Tutorial Work, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Vyacheslav V. Pavlov, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: maxtroshkin93@gmail.com

Anastasiya A. Abina, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

Ol'ga V. Bivol, Postgraduate of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University
E-mail: kuznetsova_ov@sibsiu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. Ф. Якушевич – научное руководство, обсуждение результатов, написание статьи.

Е. В. Протопопов – анализ результатов исследования, написание статьи.

М. В. Темлянцева – разработка концепции научного исследования.

В. В. Павлов – обзор публикаций по теме статьи, написание статьи, построение диаграмм состояния, оформление статьи.

А. Н. Абина – проведение термодинамических расчетов, обработка экспериментальных данных.

О. В. Бивол – построение диаграмм состояния, анализ полученных результатов.

N. F. Yakushevich – scientific guidance, discussion of the results, writing the article.

E. V. Protopopov – analysis of the research results, writing the article.

M. V. Temlyantseva – formation of the concept of scientific research.

V. V. Pavlov – review of publications on the article topic, writing the article, construction of the state diagrams, formatting of the article.

A. N. Abina – performance of thermodynamic calculations, processing of the experimental data.

O. V. Bivol – construction of the state diagrams, analysis of the research results.

Поступила в редакцию 16.12.2021

После доработки 15.03.2022

Принята к публикации 15.03.2022

Received 16.12.2021

Revised 15.03.2022

Accepted 15.03.2022