



Оригинальная статья

УДК 669.18+669.046.55+669.017.3+544.015.4

DOI 10.17073/0368-0797-2021-6-413-419



ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ, РЕАЛИЗУЮЩИЕСЯ ПРИ РАСКИСЛЕНИИ СИЛИКОСТРОНЦИЕМ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО РАСПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Л. А. Макровец¹, О. В. Самойлова¹, Г. Г. Михайлов¹, И. В. Бакин^{1,2}¹ Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)² ООО НПФ Технология (Россия, 454901, Челябинск, п. Водрем 40, 25)

Аннотация. В настоящее время для повышения качества металла, в особенности низколегированного, применяют технологии внепечной обработки стали с использованием комплексных сплавов, в состав которых входят помимо кремния щелочноземельные металлы. Изучение влияния добавок стронция на процессы раскисления и модифицирования жидкой стали является одним из перспективных направлений исследования в области металлургических технологий. Проведено термодинамическое моделирование фазовых равновесий в расплаве системы Fe–Sr–Si–C–O с использованием методики построения поверхности растворимости компонентов в металле. Поверхность растворимости определяет границы стабильности образующихся при раскислении неметаллических фаз в зависимости от состава жидкого металла исследуемой системы. Расчет был проведен с использованием констант равновесия реакций, протекающих в расплаве при раскислении, а также параметров взаимодействия первого порядка (по Вагнеру) элементов в жидком железе. Активности компонентов оксидного расплава определяли с использованием теории субрегулярных ионных растворов. Активности газовой фазы рассчитывали с учетом парциальных давлений. Моделирование проводили для двух температур (1550 и 1600 °C) для фиксированных концентраций углерода (0 (отсутствие углерода в жидком железе) и 0,1 % (низкоуглеродистый металлический расплав)). Показано, что в сравнении с кремнием стронций является более сильным раскислителем в жидком металле. По результатам моделирования в качестве основных оксидных фаз в продуктах раскисления должны быть жидкие оксидные неметаллические включения переменного состава или орто- и метасиликаты стронция Sr₂SiO₄ и SrSiO₃ (при увеличении концентрации стронция). Снижение температуры жидкого металла приводит к некоторым изменениям в фазообразовании (становится возможным образование силиката SrSiO₃).

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, система Fe–Sr–Si–C–O, фазовые равновесия, раскисление стали, стронций, кремний

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011.

Для цитирования: Макровец Л.А., Самойлова О.В., Михайлов Г.Г., Бакин И.В. Фазовые равновесия, реализующиеся при раскислении силикостронцием низкоуглеродистого расплава на основе железа // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 413–419.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-413-419>

Original article

PHASE EQUILIBRIUM OCCURRING DURING LOW-CARBON IRON-BASED MELT DEOXIDATION WITH SILICOSTRONTIUM

L. A. Makrovets¹, O. V. SamoiloVA¹, G. G. Mikhailov¹, I. V. Bakin^{1,2}¹ South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)² LLC RPE Technology (25 Vodrem Vil. – 40, Chelyabinsk 454901, Russian Federation)

Abstract. At the moment, to improve quality of metal (especially low-alloyed), out-of-furnace steel processing technologies are used with complex alloys utilization, which include alkaline earth metals (ALM) in addition to silicon. Study of strontium additives effect on deoxidation and liquid steel modification processes is one of the promising areas of research in field of metallurgical technologies. Thermodynamic modeling of phase equilibria in Fe–Sr–Si–C–O system melt was carried out using method of constructing surface of components solubility in metal. Solubility surface determines stability limits of non-metallic phases formed during deoxidation, depending on composition of liquid metal of the studied system. The calculation was carried out using equilibrium constants of reactions occurring in the melt during deoxidation, as well as the first-order interaction parameters (according to Wagner) of elements in liquid iron. Activity of the oxide melt components was determined using theory of subregular ionic solutions. Activity of the gas phase was calculated taking into account partial pressures. Simulations were performed for two temperatures (1550 and 1600 °C) for fixed carbon concentrations (0 (no carbon in liquid iron) and 0.1 % (low-carbon metal melt)). It has been shown that, in comparison with silicon, strontium is stronger deoxidizing agent in liquid metal. According to the simulation results, liquid oxide non-metallic inclusions of variable composition or strontium ortho- and metasilicates Sr₂SiO₄ and SrSiO₃ (with an increase in strontium

concentration) should be the main oxide phases in deoxidation products. Decrease in the temperature of liquid metal leads to changes in phase formation (formation of SrSiO_3 silicate becomes possible).

Keywords: thermodynamic modeling, Fe–Sr–Si–C–O system, phase equilibrium, steel deoxidation, strontium, silicon

Funding: The work was supported by the Government of the Russian Federation (Resolution No. 211 of March 16, 2013), agreement No. 02.A03.21.0011.

For citation: Makrovets L.A., Samoilova O.V., Mikhailov G.G., Bakin I.V. Phase equilibrium occurring during low-carbon iron-based melt deoxidation with silicostrontium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 413–419. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-413-419>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в научной литературе активно обсуждается влияние добавок стронция на процессы раскисления и модифицирования жидкой стали, и, как следствие, на качество выпускаемой металлопродукции. Стронций в составе барий- и кальцийсодержащих лигатур оказывает модифицирующее действие, благодаря чему снижается показатель загрязненности неметаллическими включениями, обеспечивается высокий уровень их глобуляризации, при этом фиксируется измельчение структуры металла и увеличиваются показатели механических характеристик отливок [1 – 5]. Стронций может оказывать модифицирующее действие и в составе карбонатов щелочноземельных металлов [6, 7]. В работах [8 – 11] рассмотрена возможность использования стронция в качестве раскисляющего агента наряду с кальцием и алюминием. Так, согласно выводам из работы [8] при использовании стронцийсодержащих модификаторов должен измениться фазовый состав образующихся в стали неметаллических включений от алюминатов кальция к стронцийсодержащим оксидным фазам. Это особенно актуально для низкоуглеродистых (в том числе и трубных) сталей, так как включения алюминатов кальция в таких сталях рассматриваются специалистами как нежелательные неметаллические включения [12, 13].

Следует отметить, что в настоящее время термодинамические аспекты взаимодействия стронция с кислородом в многокомпонентных расплавах на основе железа практически не изучены. Ранее в работе [14] были построены диаграммы стабильности фаз в системах Fe–Sr–O и Fe–Mg–Sr–O. Образование неметаллических включений в системе Fe–Mg–Sr–O возможно в результате взаимодействия расплава как с футеровкой, так и со шлаками, в которые для повышения основности зачастую добавляют магниезиальные флюсы. Дальнейшие исследования посвящены моделированию фазовых равновесий в системах, образующихся непосредственно в процессе раскисляющей и модифицирующей обработки стали стронцийсодержащими сплавами.

Целью настоящей работы является термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системах Fe–Sr–Si–O и Fe–Sr–Si–C–O ([C] = 0,1 % (здесь и далее по массе)) при температурах 1550 и 1600 °С.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в настоящей работе проводили с использованием методики построения поверхности растворимости компонентов в металле (ПРKM), которая представляет собой диаграмму, определяющую концентрационные области стабильности фаз в жидком металле. Подробно методика моделирования ПРKM описана в работе [15]. При расчете исследуемых систем использовали данные по константам равновесия протекающих в металлическом расплаве реакций (табл. 1). При этом активности оксидного расплава, находящегося в равновесии с металлическим, определяли с использованием теории субрегулярных ионных растворов, энергетические параметры которой приведены в табл. 2. Активности металлического расплава рассчитывали с использованием параметров взаимодействия первого порядка по Вагнеру (табл. 3), активности чистых твердых веществ принимали равными единице, активности газовой фазы рассчитывали через парциальные давления.

Концентрацию кремния варьировали от 10^{-6} до 1 %, концентрацию стронция изменяли от 10^{-6} % до предельной растворимости стронция в жидком железе, которая не превышает 0,008 % [14, 24, 25]. При расчетах составов газовой фазы общее давление ($P_{\text{общ}}$) в системе принимали 101,3 кПа (1 атм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 приведены результаты моделирования фазовых равновесий в виде поверхности растворимости компонентов в металле для систем Fe–Sr–Si–O и Fe–Sr–Si–C–O. В области I определены составы жидкого металла, в равновесии с которым в качестве продукта раскисления будут находиться жидкие оксидные неметаллические включения переменного состава (О.р. – оксидный расплав FeO, SrO, SiO_2), в области II – твердый оксид SiO_2 , в области III – твердый оксид SrO, в областях IV и V – ортосиликат Sr_2SiO_4 и метасиликат SrSiO_3 , в области VI – газообразный стронций, в области VII – газовая фаза {CO, CO_2 , Sr} с преобладанием в составе оксида углерода CO, в области VIII – газовая фаза {Sr, CO, CO_2 } с преобладанием в составе газообразного стронция, в области IX – газовая фаза {CO, CO_2 , Sr} переменного состава.

Константы равновесия химических реакций, протекающих в металлическом расплаве системы Fe–Sr–Si–C–O

Table 1. Equilibrium constants of chemical reactions occurring in metal melt of Fe–Sr–Si–C–O system

Химическая реакция	Выражение согласно закону действующих масс	Температурная зависимость lg K
(FeO) = [Fe] + [O]	$K_{(FeO)} = \frac{a_{[Fe]}a_{[O]}}{a_{(FeO)}} = \frac{[Fe]f_{[O]}[O]}{\gamma_{(Fe^{2+})}x_{(Fe^{2+})}}$	$\frac{-6320}{T} + 4,734 [15]$
(SrO) = [Sr] + [O]	$K_{(SrO)} = \frac{a_{[Sr]}a_{[O]}}{a_{(SrO)}} = \frac{f_{[Sr]}[Sr]f_{[O]}[O]}{\gamma_{(Sr^{2+})}x_{(Sr^{2+})}}$	$\frac{-25\,571}{T} + 9,493 [14]$
(SiO ₂) = [Si] + 2[O]	$K_{(SiO_2)} = \frac{a_{[Si]}a_{[O]}^2}{a_{(SiO_2)}} = \frac{f_{[Si]}[Si]f_{[O]}^2[O]^2}{\gamma_{(Si^{4+})}x_{(Si^{4+})}}$	$\frac{-30\,698}{T} + 11,798$
SrO = [Sr] + [O]	$K_{ SrO } = a_{[Sr]}a_{[O]} = f_{[Sr]}[Sr]f_{[O]}[O]$	$\frac{-29\,800}{T} + 11,000 [14]$
SiO ₂ = [Si] + 2[O]	$K_{ SiO_2 } = a_{[Si]}a_{[O]}^2 = f_{[Si]}[Si]f_{[O]}^2[O]^2$	$\frac{-31\,100}{T} + 12,000 [15]$
Sr ₃ SiO ₅ = 3[Sr] + [Si] + 5[O]	$K_{ Sr_3SiO_5 } = a_{[Sr]}^3a_{[Si]}a_{[O]}^5 = f_{[Sr]}^3[Sr]^3f_{[Si]}[Si]f_{[O]}^5[O]^5$	$\frac{-116\,901}{T} + 40,533$
Sr ₂ SiO ₄ = 2[Sr] + [Si] + 4[O]	$K_{ Sr_2SiO_4 } = a_{[Sr]}^2a_{[Si]}a_{[O]}^4 = f_{[Sr]}^2[Sr]^2f_{[Si]}[Si]f_{[O]}^4[O]^4$	$\frac{-90\,698}{T} + 31,204$
SrSiO ₃ = [Sr] + [Si] + 3[O]	$K_{ SrSiO_3 } = a_{[Sr]}a_{[Si]}a_{[O]}^3 = f_{[Sr]}[Sr]f_{[Si]}[Si]f_{[O]}^3[O]^3$	$\frac{-64\,402}{T} + 23,081$
{Sr} = [Sr]	$K_{\{Sr\}} = \frac{a_{[Sr]}}{p_{\{Sr\}}} = \frac{f_{[Sr]}[Sr]}{p_{\{Sr\}}}$	$\frac{1870}{T} - 3,650 [14]$
{CO} = [C] + [O]	$K_{\{CO\}} = \frac{a_{[C]}a_{[O]}}{p_{\{CO\}}} = \frac{f_{[C]}[C]f_{[O]}[O]}{p_{\{CO\}}}$	$\frac{-1168}{T} - 2,070 [16]$
{CO ₂ } = [C] + 2[O]	$K_{\{CO_2\}} = \frac{a_{[C]}a_{[O]}^2}{p_{\{CO_2\}}} = \frac{f_{[C]}[C]f_{[O]}^2[O]^2}{p_{\{CO_2\}}}$	$\frac{-9616}{T} + 2,510 [16]$

П р и м е ч а н и е. В круглых скобках представлены компоненты оксидного расплава, в квадратных – металлического расплава; в прямых скобках указаны твердые соединения, в фигурных скобках – газовая фаза.

Энергетические параметры теории субрегулярных ионных растворов для оксидного расплава [17]

Table 2. Energy parameters of the theory of subregular ionic solutions for oxide melt according to [17]

Система	Энергетические параметры Q_{ijk} , Дж/моль		
FeO–SrO	$Q_{1112} = -71\,828$	$Q_{1122} = -22\,026$	$Q_{1222} = -20\,905$
FeO–SiO ₂	$Q_{1113} = +2000$	$Q_{1133} = -35\,000$	$Q_{1333} = +60\,000$
SrO–SiO ₂	$Q_{2223} = -165\,338$	$Q_{2233} = -379\,887$	$Q_{2333} = -25\,369$
FeO–SrO–SiO ₂	$Q_{1123} = -240\,990$	$Q_{1223} = -380\,450$	$Q_{1233} = -201\,502$

По данным проведенного моделирования образование силиката Sr₃SiO₅ термодинамически маловероятно. Образование оксида кремния в качестве продукта раскисления возможно лишь при низких концентрациях стронция и, наоборот, образование оксида стронция возможно лишь при малых концентрациях кремния в жидком металле. В качестве основных оксидных фаз

в продуктах раскисления должны быть или жидкие оксидные неметаллические включения переменного состава, или силикаты стронция Sr₂SiO₄ и SrSiO₃ (при увеличении концентрации стронция). При снижении температуры жидкого металла происходят некоторые изменения в фазообразовании: образование силиката SrSiO₃ при температуре 1600 °С термодинамически

Параметры взаимодействия e_i^j первого порядка в жидком железе при температуре 1600 °С

Table 3. First-order interaction parameters e_i^j in liquid iron at temperature of 1600 °С

Элемент <i>i</i>	Элемент <i>j</i>			
	Sr	Si	O	C
Sr	0 [14]	0	-3,940 [14]	0
Si	0	+0,132 [18]	-0,230 [19]	+0,180 [20, 21]
O	-0,720 [14]	-0,131 [19, 22]	-0,200 [23]	-0,450 [23]
C	0	+0,077	-0,340 [23]	+0,140 [23]

маловероятно, но при температуре 1550 °С область существования рассматриваемого силиката проявляется на поверхности растворимости. Также при понижении температуры расширяются границы существования фаз Sr_2SiO_4 и SrO.

Как следует из сравнения рис. 1 и 2, присутствие в системе 0,1 % углерода значительно изменяет картину фазовых равновесий и смещает концентрационные области возможности образования конденсированных фаз в сторону больших концентраций, расширяя области составов металла, равновесного с газовыми фазами (рис. 2, области VII и IX). Таким образом, углерод в исследуемой системе

Fe–Sr–Si–C–O может принимать участие в процессе раскисления с образованием газообразных продуктов взаимодействия. При снижении температуры до 1550 °С (перед началом кристаллизации) становится возможным образование оксида стронция и метасиликата стронция $SrSiO_3$ в качестве неметаллических включений (рис. 2, б).

Состав газовой фазы в области IX (рис. 2, а) меняется от $p_{\{CO\}} = 0,9834$, $p_{\{CO_2\}} = 0,0162$, $p_{\{Sr\}} = 0,0003$ атм (в равновесии с SiO_2) до $p_{\{CO\}} = 0,0604$, $p_{\{CO_2\}} = 0,0001$, $p_{\{Sr\}} = 0,9395$ атм (в равновесии с Sr_2SiO_4). В области IX при концентрациях $[Si] = 5 \cdot 10^{-4}$, $[Sr] = 1,2 \cdot 10^{-3}$, $[O] = 0,01$ % в равновесии с соединением Sr_2SiO_4 на-

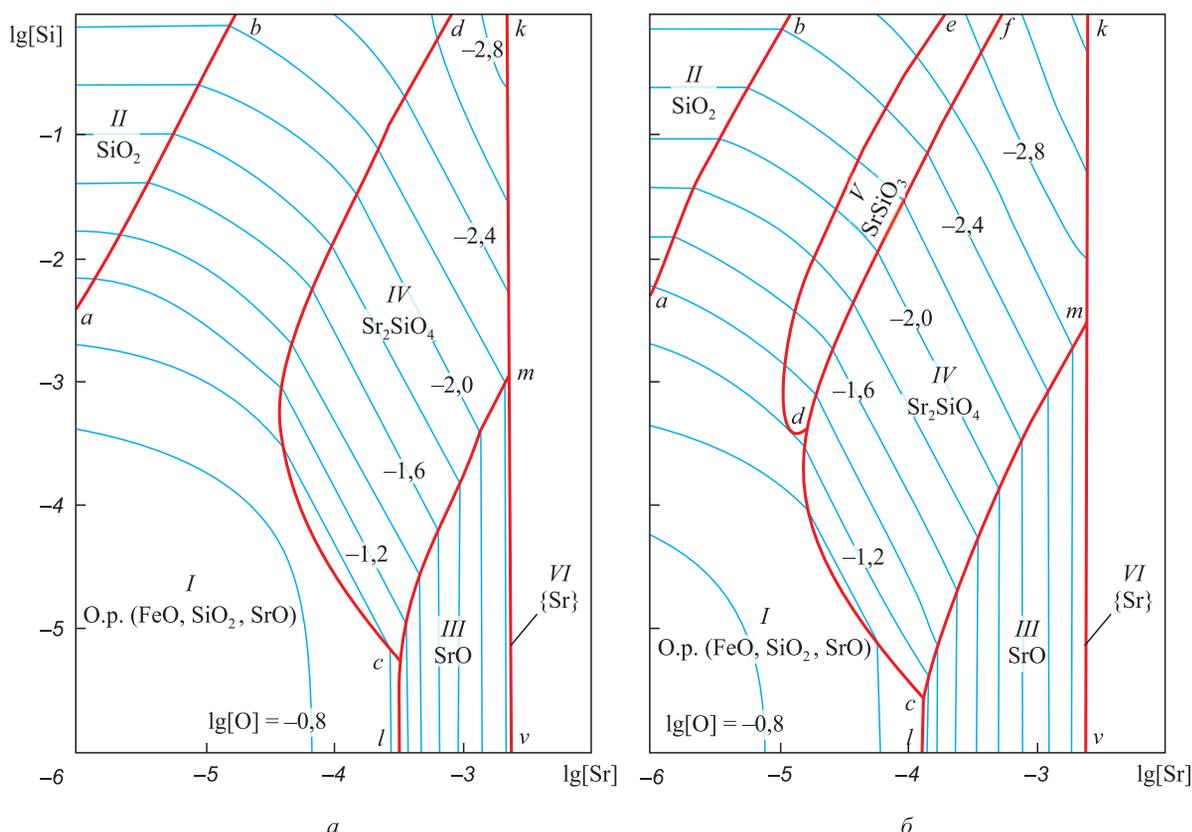


Рис. 1. Фазовые равновесия в системе Fe–Sr–Si–O при $P_{\text{общ}} = 1$ атм и температурах 1600 °С (а) и 1550 °С (б)

Fig. 1. Phase equilibria in Fe–Sr–Si–O system at $P_{\text{tot}} = 1$ atm and temperature of 1600 (a) and 1550 °С (б)

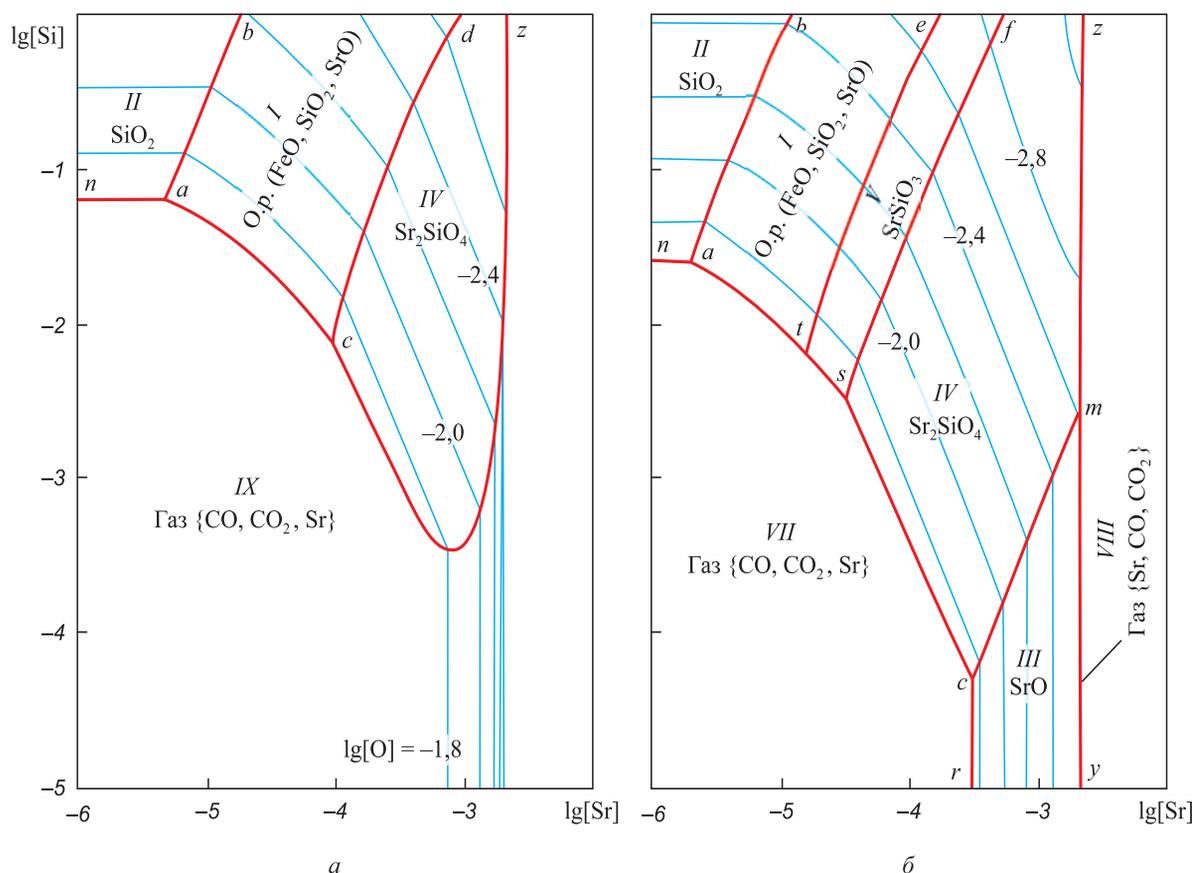


Рис. 2. Фазовые равновесия в системе Fe–Sr–Si–C–O при $P_{\text{общ}} = 1$ атм, концентрации $[\text{C}] = 0,1\%$ и температурах $1600\text{ }^\circ\text{C}$ (а) и $1550\text{ }^\circ\text{C}$ (б)

Fig. 2. Phase equilibria in Fe–Sr–Si–C–O system at $P_{\text{tot}} = 1$ atm, $[\text{C}] = 0.1\%$ and temperature of 1600 (a) and $1550\text{ }^\circ\text{C}$ (b)

ходится газовая фаза с равными парциальными давлениями CO и газообразного стронция: $p_{\{\text{CO}\}} = 0,498$, $p_{\{\text{Sr}\}} = 0,498$, $p_{\{\text{CO}_2\}} = 0,004$ атм.

Минимальная концентрация кислорода (порядка 0,001 %) достигается в области IV (область равновесия жидкого металла с ортосиликатом стронция Sr_2SiO_4) при концентрации стронция 0,001 % (близкой к пределам его растворимости в жидком железе) и достаточно высокой концентрации кремния (около 1 %). Это указывает на то, что стронций является более сильным раскислителем по сравнению с кремнием.

В отсутствие углерода (рис. 1) в исследуемой системе реализуется комплексный механизм раскисления в достаточно широкой области составов жидкого металла. Углерод может взаимодействовать с растворенным в железе кислородом (рис. 2) до концентраций стронция 0,0003 – 0,0008 % и до концентраций кремния в 0,031 – 0,079 %. При значимых концентрациях стронция и кремния в жидком низкоуглеродистом металле также будет реализовываться комплексный механизм

раскисления с образованием оксидных соединений кремния и стронция.

Выводы

На основании проведенного моделирования определена картина фазовых равновесий при раскислении низкоуглеродистых металлических расплавов силикостронцием. Установлено, что углерод может взаимодействовать с растворенным в железе кислородом с образованием газовой фазы до концентраций стронция 0,0003 – 0,0008 % и до концентраций кремния 0,031 – 0,079 %. При значимых концентрациях стронция и кремния в металлическом расплаве реализуется комплексный механизм раскисления. В качестве основных оксидных фаз при этом в продуктах раскисления должны быть или жидкие оксидные неметаллические включения переменного состава, или (при увеличении концентрации стронция) орто- и метасиликаты стронция Sr_2SiO_4 и SrSiO_3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Скок Ю.Я. Исследование раскислительной способности комплексных сплавов, содержащих ЩЗМ и РЗМ // Процессы литья. 2010. Т. 81. № 3. С. 8–12.
1. Skok Yu.Ya. Investigation of deoxidizing ability of complex alloys containing alkaline earth metals and rare earth metals. *Protsessy lit'ya*. 2010, vol. 81, no. 3, pp. 8–12. (In Russ.).

2. Дерябин А.А., Берестов Е.Ю. О механизме модифицирования стали щелочноземельными металлами // *Электротеталлургия*. 2008. № 6. С. 35–38.
3. 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>
4. 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>
5. Проворова И.Б., Розенберг Е.В., Барановский К.Э., Волосатиков В.И., Розум В.А., Карась А.Н., Чернявский М.С. Модификатор для внепечной обработки стали, содержащий щелочноземельные металлы // *Литье и металлургия*. 2016. Т. 83. № 2. С. 14–18.
6. Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Дмитриенко В.И., Платонов М.А. Модифицирование стали барием и стронцием // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 12. С. 871–876. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-12-871-876>
7. Maitra S., Chakrabarty N., Pramanik J. Decomposition kinetics of alkaline earth carbonates by integral approximation method // *Cerâmica*. 2008. Vol. 54. P. 268–272. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000300001>
8. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Усманов Р.Г., Голубцов В.А., Милоц В.Г. Критерии оценки качества раскислителей и модификаторов для стали // *Сталь*. 2015. № 2. С. 24–27.
9. Рябчиков И.В., Панов А.Г., Корниенко А.Э. О качественных характеристиках модификаторов // *Сталь*. 2007. № 6. С. 18–23.
10. Bakin I.V., Mikhailov G.G., Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Dresvyankina L.E. Methods for improving the efficiency of steel modifying // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 215–222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.215>
11. Бакин И.В., Шабурова Н.А., Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Белов Б.Ф., Михайлов Г.Г., Сенин А.В. Экспериментальное исследование рафинирования и модифицирования стали сплавами Si–Ca, Si–Sr и Si–Ba // *Сталь*. 2019. № 8. С. 14–18.
12. Kim W.K., Koh S.U., Yang B.Y., Kim K.Y. Effect of environmental and metallurgical factors on hydrogen induced cracking of HSLA steels // *Corrosion Science*. 2008. Vol. 50. P. 3336–3342. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.030>
13. Sidorova E., Karasev A.V., Kuznetsov D., Jönsson P.G. Modification of non-metallic inclusions in oil-pipeline steels by Ca-treatment // *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 4. P. 391. <https://doi.org/10.3390/met9040391>
14. Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Самойлова О.В., Бакин И.В. Термодинамический анализ раскислительной способности стронция в жидком железе: диаграмма стабильности фаз в системах Fe – Sr – O и Fe – Mg – Sr – O // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 12. С. 1366–1373. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-12-1366-1372>
15. Михайлов Г.Г., Леонович Б.И., Кузнецов Ю.С. Термодинамика металлургических процессов и систем. М.: ИД МИСиС, 2009. 520 с.
16. Fuwa T., Chipman J. The carbon – oxygen equilibria in liquid iron // *Transactions of AIME*. 1960. Vol. 218. P. 887–891.
17. Самойлова О.В., Макровец Л.А., Бакин И.В. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в оксидной системе FeO – SrO – SiO₂ // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2019. Т. 19. № 4. С. 10–18.
18. Li J., Cheng G. Effect of CaO – MgO – SiO₂ – Al₂O₃ – TiO₂ slags with different CaF₂ contents on inclusions in Ti-stabilized 20Cr stainless steel // *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. No. 11. P. 2013–2023. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-277>
19. Li S., Cheng G., Yang L., Chen L., Yan Q., Li C. A thermodynamic model to design the equilibrium slag compositions during electro-
2. Deryabin A.A., Berestov E.Yu. On the mechanism of steel modification with alkaline-earth metals. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 6, pp. 35–38. (In Russ.).
3. 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>
4. 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>
5. Provorova I.B., Rozenberg E.V., Baranovskii K.E., Volosatnikov V.I., Rozum V.A., Karas' A.N., Chernyavskii M.S. Modifier for steel out-of-furnace treatment containing alkaline earth metals. *Lit'e i metallurgiya*. 2016, vol. 83, no. 2, pp. 14–18. (In Russ.).
6. Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I., Dmitrienko V.I., Platonov M.A. Modification of steel by barium and strontium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 12, pp. 871–876. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-12-871-876>
7. Maitra S., Chakrabarty N., Pramanik J. Decomposition kinetics of alkaline earth carbonates by integral approximation method. *Cerâmica*. 2008, vol. 54, pp. 268–272. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000300001>
8. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Usmanov R.G., Golubtsov V.A., Milyuts V.G. Assessing the quality of reducing and modifying agents for steel. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no 2, pp. 137–140. <https://doi.org/10.3103/S0967091215020138>
9. Ryabchikov I.V., Panov A.G., Kornienko A.E. Characteristics of modifiers. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no 6, pp. 516–521. <https://doi.org/10.3103/S0967091207060113>
10. Bakin I.V., Mikhailov G.G., Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Dresvyankina L.E. Methods for improving the efficiency of steel modifying. *Materials Science Forum*. 2019, vol. 946, pp. 215–222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.215>
11. Bakin I.V., Shaburova N.A., Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Belov B.F., Mikhailov G.G., Senin A.V. Experimental Study of Refining and Modification of Steel with Si–Ca, Si–Sr, and Si–Ba Alloys. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, pp. 543–547. <https://doi.org/10.3103/S0967091219080023>
12. Kim W.K., Koh S.U., Yang B.Y., Kim K.Y. Effect of environmental and metallurgical factors on hydrogen induced cracking of HSLA steels. *Corrosion Science*. 2008, vol. 50, pp. 3336–3342. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.030>
13. Sidorova E., Karasev A.V., Kuznetsov D., Jönsson P.G. Modification of non-metallic inclusions in oil-pipeline steels by Ca-treatment. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 4, pp. 391. <https://doi.org/10.3390/met9040391>
14. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Samoilova O.V., Bakin I.V. Thermodynamic analysis of deoxidizing ability of strontium in liquid iron: Phase stability diagram IN Fe – Sr – O and Fe – Mg – Sr – O systems. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019, vol. 75, no. 12, pp. 1366–1373. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-12-1366-1372>
15. Mikhailov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S. *Thermodynamics of Metallurgical Processes and Systems*. Moscow: NUST “MISIS”, 2009, 520 p. (In Russ.).
16. Fuwa T., Chipman J. The carbon – oxygen equilibria in liquid iron. *Transactions of AIME*. 1960, vol. 218, pp. 887–891.
17. Samoilova O.V., Makrovets L.A., Bakin I.V. Thermodynamic modeling of phase equilibria in FeO – SrO – SiO₂ oxide system. *Vestnik YuUrGU. Seriya “Metallurgiya”*. 2019, vol. 19, no. 4, pp. 10–18. (In Russ.).
18. Li J., Cheng G. Effect of CaO – MgO – SiO₂ – Al₂O₃ – TiO₂ slags with different CaF₂ contents on inclusions in Ti-stabilized 20Cr stainless steel. *ISIJ International*. 2019, vol. 59, no. 11, pp. 2013–2023. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-277>
19. Li S., Cheng G., Yang L., Chen L., Yan Q., Li C. A Thermodynamic model to design the equilibrium slag compositions during electro-

- slag remelting process: Description and verification // *ISIJ International*. 2017. Vol. 57. No. 4. P. 713–722.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-655>
20. *Steelmaking Data Sourcebook*, Japan Society for the Promotion of Science. The 19th Committee on Steelmaking. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1988. 325 p.
 21. 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-1 Mass-transfer model // *ISIJ International*. 2017. Vol. 57. No. 8. P. 1400–1409.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-147>
 22. Yoshioka T., Nakahata K., Kawamura T., Ohba Y. Factors to determine inclusion compositions in molten steel during the secondary refining process of case-hardening steel // *ISIJ International*. 2016. Vol. 56. No. 11. P. 1973–1981.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-324>
 23. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys // *Metal Science*. 1974. Vol. 8. P. 298–310.
<https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298>
 24. Куликов И.С. Раскисление железа щелочноземельными металлами // *Металлы*. 1985. № 6. С. 9–15.
 25. Ageev Yu.A., Archugov S.A. Исследование растворимости щелочноземельных металлов в жидком железе и сплавах на его основе // *Журнал физической химии*. 1985. Т. LIX. № 4. С. 838–841.
- slag remelting process: Description and verification. *ISIJ International*. 2017, vol. 57, no. 4, pp. 713–722.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-655>
20. *Steelmaking Data Sourcebook*. Japan Society for the Promotion of Science. The 19th Committee on Steelmaking. New York: Gordon and Breach Science Publ., 1988, 325 p.
 21. 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-1 Mass-transfer model. *ISIJ International*. 2017, vol. 57, no. 8, pp. 1400–1409.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-147>
 22. Yoshioka T., Nakahata K., Kawamura T., Ohba Y. Factors to determine inclusion compositions in molten steel during the secondary refining process of case-hardening steel. *ISIJ International*. 2016, vol. 56, no. 11, pp. 1973–1981.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-324>
 23. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys. *Metal Science*. 1974, vol. 8, pp. 298–310.
<https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298>
 24. Kulikov I.S. Iron deoxidation with alkaline earth metals. *Metally*. 1985, no. 6, pp. 9–15. (In Russ.).
 25. Ageev Yu.A., Archugov S.A. Study of alkaline earth metals solubility in liquid iron and iron-based alloys. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1985, vol. LIX, no. 4, pp. 838–841. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лариса Александровна Макровец, инженер кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет
ORCID: 0000-0001-8581-1475
E-mail: makrovetcla@susu.ru

Ольга Владимировна Самоилова, к.х.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет
ORCID: 0000-0002-9514-3201
E-mail: samoylova_o@mail.ru

Геннадий Георгиевич Михайлов, д.т.н., профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет
ORCID: 0000-0001-5535-4875
E-mail: mikhailovgg@susu.ru

Игорь Валерьевич Бакин, аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, начальник отдела инновации, модернизации и технического развития, ООО НПТ Технология
ORCID: 0000-0003-0825-717X
E-mail: igor.npp.bakin@gmail.com

Larisa A. Makrovets, Engineer of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
ORCID: 0000-0001-8581-1475
E-mail: makrovetcla@susu.ru

Olga V. SamoiloVA, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Assist. Prof. of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
ORCID: 0000-0002-9514-3201
E-mail: samoylova_o@mail.ru

Gennadii G. Mikhailov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
ORCID: 0000-0001-5535-4875
E-mail: mikhailovgg@susu.ru

Igor' V. Bakin, Postgraduate of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University, Head of the Division of Innovation, Modernization and Technical Development, LLC RPE Technology
ORCID: 0000-0003-0825-717X
E-mail: igor.npp.bakin@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2020
 После доработки 01.09.2020
 Принята к публикации 26.10.2020

Received 11.06.2020
 Revised 01.09.2020
 Accepted 26.10.2020