

Физическая химия и физика металлургических систем

УДК 669.04:544.44

DOI: 10.14529/met210301

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ Fe–Sr–Ba–O–C

Г.Г. Михайлов¹, Л.А. Макровец¹, И.В. Бакин²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² ООО НПП Технология, г. Челябинск, Россия

В данной работе выполнено термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системе Fe–Sr–Ba–O–C, построены поверхности растворимости компонентов в жидком металле. Изучено влияние температуры (1550 и 1600 °С) и содержания углерода ($[C] = 0; 0,1$ мас. %) на строение ПРКМ. При проведении расчетов использовали теорию субрегулярных ионных растворов для расчета активностей компонентов оксидного расплава, теорию регулярных ионных растворов для расчета активности компонентов твердого раствора оксидов, параметры взаимодействия первого порядка для расчета активностей компонентов металлического расплава. Термодинамический анализ показал, что наиболее вероятными продуктами реакции раскисления расплава барием и стронцием являются твердые растворы $[SrO, BaO]$. Из расчетов видно, что барий практически не участвует в процессе раскисления (содержание BaO в твердом растворе колеблется от 10^{-2} до 10^{-3} , а в оксидном расплаве – сотые доли). Низкая растворимость стронция и особенно бария в жидком железе предопределяет невысокую раскисляющую и высокую модифицирующую способность комплекса Ba–Sr. В дальнейшем необходимо проводить исследование поведения этих элементов в сочетании с кальцием, алюминием и кремнием.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, фазовые равновесия, моделирование, барий, стронций, система Fe–Sr–Ba–O–C.

Свойства материалов, применяемых для рафинирования и модифицирования расплавов металлов, оказывают определяющее влияние на структуру и свойства стали ответственного назначения [1–4]. Но в металлургической литературе отсутствуют строгие методы формирования комплексных возможностей повышения качества металлов: прочности, ударной вязкости, коррозионной стойкости при повышенных и пониженных температурах, износостойкости и прокаливаемости. В настоящее время усилия технологов направлены на исследование процессов микровоздействия на металл материалов, содержащих комплекс высокоактивных элементов. К ним относятся сплавы, вводимые в металл фактически без изменения химического состава стали во время рафинирования и модифицирования стали [4, 5]. В состав таких активных комплексов входят прежде всего кальций и кальцийсодержащие сплавы [6], комплексные сплавы, содержащие щелочноземельные металлы [7–13]. Применение таких модифицирующих сплавов позволило повысить прочность, коррозион-

ную стойкость и ударную вязкость как при низких, так и при высоких эксплуатационно доступных температурах, при этом отмечается оваллизация неметаллических включений, уменьшение их размеров и объема [4, 14–16]. Можно отметить также, что изучение влияния ЦЗМ на качество стали практически не затронуло проблему влияния стронция на процессы рафинирования и модифицирования расплава. Действие стронция, по имеющимся в литературе сведениям, уменьшает размеры и количество неметаллических включений и глобуляризует образующуюся их форму. Применение комплексных сплавов, содержащих барий, позволило получить положительный эффект при выплавке рельсовой и трубной сталей [4, 17]. Необходимо найти способ описания морфологических и структурных мотивов формирования неметаллических включений при раскислении и микролегировании сплавов комплексами активных элементов, включающих стронций и барий [18].

Ранее на основании имеющихся экспериментальных данных нами были построены

поверхности растворимости компонентов в металле (ПРКМ) для простейших систем Fe–Sr–O [19] и Fe–Ba–O. Для построения ПРКМ системы Fe–Sr–Ba–O нужно опираться уже на диаграмму состояния FeO–SrO–BaO [20], приведенную на рис. 1. Эта диаграмма представляет собой тройную оксидную систему FeO–SrO–BaO с неограниченной растворимостью в твердом и жидком состояниях. Видно, что при температуре 1600 °С в равновесии с жидким металлом могут находиться оксидный расплав (FeO, SrO, BaO) переменного состава и твердый раствор оксидов [SrO, BaO]. Также необходимо учитывать наличие газообразного стронция [19], а в присутствии углерода – еще и газообразных CO и CO₂ [21].

При проведении расчетов использовали:

1. Энергетические параметры теории субрегулярных ионных растворов [21] для расчета активностей компонентов оксидного расплава [20].

2. Активности компонентов твердого раствора оксидов рассчитывали с применением

теории регулярных ионных растворов [21] ($Q_{12} = 3150$ Дж/моль) [20].

3. Активности компонентов металлического расплава рассчитывали с применением параметров взаимодействия первого порядка (табл. 1).

4. Значения констант равновесия реакций, протекающих в системе (табл. 2).

На рис. 2 приведены изотермические сечения ПРКМ системы Fe–Sr–Ba–O при общем давлении 1 атм. В области I нанесены составы жидкого металла, равновесного с оксидным расплавом (FeO, SrO, BaO) переменного состава, в области II – с твердым раствором оксидов на основе оксида стронция. На линии *ab* нанесены составы жидкого металла, равновесного с двумя оксидными фазами (жидким и твердым растворами оксидов). Линия *cd* – это проекция области III (газообразный стронций) на плоскость рисунка. Тонкими линиями показаны изокислородные сечения в логарифмической шкале.

Снижение температуры на 50 градусов (см. рис. 2б) практически не изменяет строе-

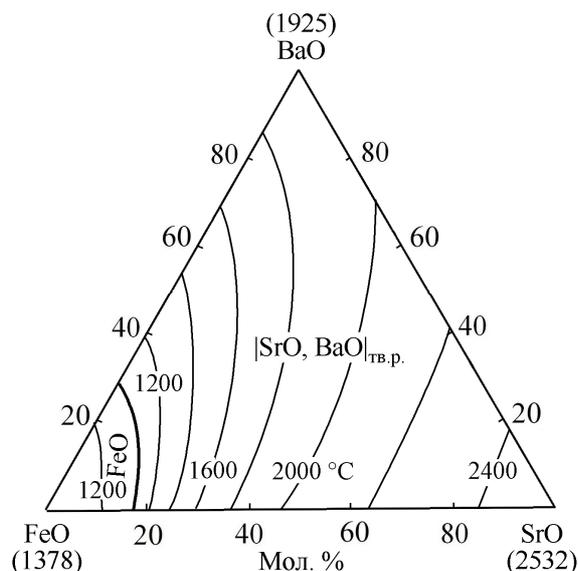


Рис. 1. Диаграмма состояния системы FeO–SrO–BaO [20]

Таблица 1

Параметры взаимодействия компонентов жидкого железа (e_i^j) при 1600 °С

$i \backslash j$	Sr	Ba	O	C
Sr	0 [19]	0	-3,94 [19]	0
Ba	0	0	-5,58*	-0,068 [21]
O	-0,72 [19]	-0,65*	-0,2 [22]	-0,45 [22]
C	0	-0,006 [23]	-0,34 [22]	+0,14 [22]

* Данная работа.

Таблица 2

Температурные зависимости константы равновесия химических реакций, протекающих в металлическом расплаве системы Fe–Sr–Ba–O–C

Химическая реакция	$\lg K = -A/T + B$	Источник
$(\text{FeO}) = [\text{Fe}] + [\text{O}]$	$-6320/T + 4,734$	[21]
$(\text{SrO}) = [\text{Sr}] + [\text{O}]$	$-25\,571/T + 9,493$	[19]
$(\text{BaO}) = [\text{Ba}] + [\text{O}]$	$-20\,382/T + 7,357$	*
$[\text{FeO}]_{\text{тв.р.}} = [\text{Fe}] + [\text{O}]$	$-8069/T + 5,800$	[21]
$[\text{SrO}]_{\text{тв.р.}} = [\text{Sr}] + [\text{O}]$	$-29\,800/T + 11,000$	[19]
$[\text{BaO}]_{\text{тв.р.}} = [\text{Ba}] + [\text{O}]$	$-23\,400/T + 8,730$	*
$\{\text{Sr}\} = [\text{Sr}]$	$1870/T - 3,650$	[19]
$\{\text{CO}\} = [\text{C}] + [\text{O}]$	$-1168/T - 2,070$	[24]
$\{\text{CO}_2\} = [\text{C}] + 2[\text{O}]$	$-9616/T + 2,510$	[24]

* Данная работа.

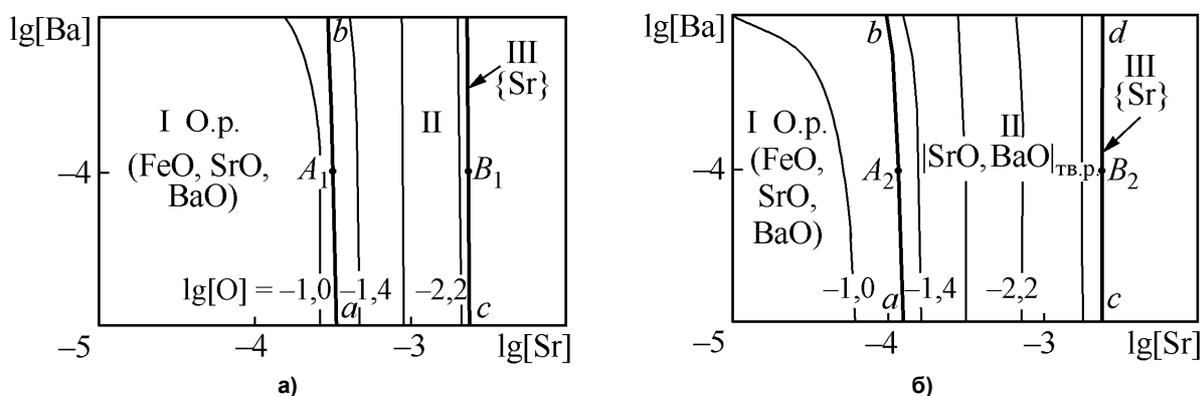


Рис. 2. ПРКМ системы Fe–Sr–Ba–O, $P_{\text{общ}} = 1$ атм: а) $t = 1600$ °С, б) $t = 1550$ °С

Таблица 3

Составы жидкого металла и равновесных фаз при концентрации бария $[\text{Ba}] = 10^{-4}$ мас. % (рис. 2)

Точка	$\lg[\text{Sr}]$	$\lg[\text{O}]$	$x_{(\text{Fe}^{2+})}$	$x_{(\text{Sr}^{2+})}$	$x_{(\text{Ba}^{2+})}$	$x_{ \text{SrO} }$	$x_{ \text{BaO} }$
Равновесие «жидкий металл – оксидный расплав – твердый раствор», линия <i>ab</i>							
Точка A_1	-3,499	-1,032	0,6836	0,3014	0,0151	0,9871	0,0129
Точка A_2	-3,916	-1,120	0,6872	0,2833	0,0295	0,9718	0,0282
Равновесие «жидкий металл – твердый раствор – газообразный стронций», линия <i>cd</i>							
Точка B_1	-2,630	-2,257	–	–	–	0,9996	0,0024
Точка B_2	-2,616	-2,721	–	–	–	0,9981	0,0019

ние ПРКМ, но приводит к некоторому снижению минимальной концентрации кислорода и расширению составов жидкого металла, равновесного с твердым раствором оксидов.

В табл. 3 приведены составы жидкого металла и равновесных фаз при содержании бария $[\text{Ba}] = 10^{-4}$ мас. % (точки A_1, A_2, B_1, B_2 на рис. 2). Из табл. 3 видно, что барий практически не участвует в процессе раскисления (содержание оксида бария в твердом растворе колеблется от 10^{-2} до 10^{-3} , а в оксидном расплаве – сотые доли).

На рис. 3 приведены изотермические сечения ПРКМ системы Fe–Sr–Ba–O–C при $[\text{C}] = 0,1$ мас. %. Из рис. 3 а видно, что при 1600 °С в интервале исследуемых концентраций бария и стронция возможно образование только газовой фазы V $\{\text{CO}, \text{CO}_2, \text{Sr}\}$ переменного состава (область IV), в которой давление CO меняется от 0,98 до 0,05 атм (при изменении содержания стронция от 10^{-5} до $2,5 \cdot 10^{-3}$ мас. %), а давление стронция – от $5 \cdot 10^{-3}$ до 0,995 атм.

При снижении температуры (см. рис. 3б)

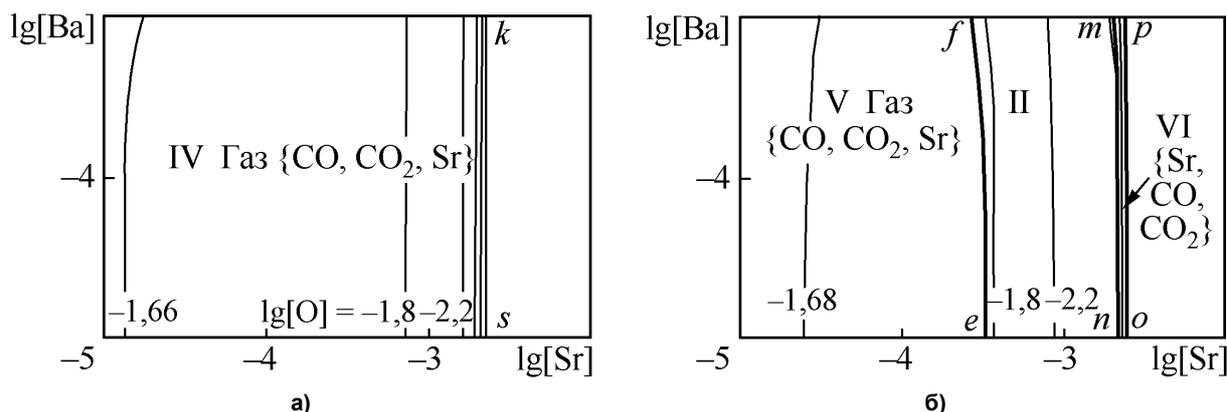


Рис. 3. ПКМ системы Fe–Sr–Ba–O–C, [C] = 0,1 мас. %, $P_{\text{общ}} = 1$ атм: а) $t = 1600$ °С, б) $t = 1550$ °С

становится возможным образование твердого раствора оксидов на основе оксида стронция в узком интервале концентраций стронция – от $3 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ мас. %. На рис. 3б так же наблюдаются две области составов жидкого металла, равновесного с газовыми фазами: область V – на основе CO ($p_{\text{CO}} = 0,87$), с присутствием газообразного стронция ($p_{\text{Sr}} = 0,11$) и со следами CO₂ ($p_{\text{CO}_2} = 0,02$ атм), область VI – на основе Sr ($p_{\text{Sr}} = 0,88$), с присутствием газообразного CO ($p_{\text{CO}} = 0,11$) и со следами CO₂ ($p_{\text{CO}_2} = 2 \cdot 10^{-4}$ атм). Область VI имеет небольшой наклон (в отличие от области III на рис. 2), в ней сливаются несколько изокислородных линий.

Выводы

1. Проведено термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системах Fe–Sr–Ba–O и Fe–Sr–Ba–O–C, построены по-

верхности растворимости компонентов в жидком металле. Изучено влияние температуры и содержания углерода на строение ПКМ.

2. Расчеты показывают, что наиболее вероятными продуктами реакции раскисления расплава железа барием и стронцием являются твердые растворы |SrO, BaO| на основе оксида стронция.

3. Низкая растворимость стронция и особенно бария в жидком железе предопределяет невысокую раскисляющую и высокую модифицирующую способность комплекса Ba–Sr.

4. Экспериментально полученные данные [14] об эффективности рафинирующего воздействия комплексных сплавов сложного состава, содержащих барий и стронций, определяют необходимость исследования поведения этих элементов в сочетании с кальцием, алюминием и кремнием.

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

Литература

1. Рябчиков, И.В. Структура и свойства быстроохлаждаемых модификаторов / И.В. Рябчиков, В.Д. Поволоцкий, Н.М. Соловьев // *Литейное производство*. – 1994. – № 7. – С. 4–7.
2. Производство классифицированного по крупности ферросилиция с барием / И.В. Рябчиков, В.Н. Чуватин, А.А. Парфенов, В.Д. Поволоцкий // *Новая технология и техническое перевооружение ферросплавного производства*. – Челябинск: Металлургия, 1989. – С. 21–28.
3. Рябчиков, И.В. О качественных характеристиках модификаторов / И.В. Рябчиков, А.Г. Панов, А.Э. Корниенко // *Сталь*. – 2007. – № 6 – С. 18–22.
4. Рябчиков, И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов / И.В. Рябчиков. – М.: ЭКОМЕТ, 2008. – 400 с.
5. Олетт, М. Влияние добавок кальция, магния или РЗМ на чистоту стали / М. Олетт, С. Гателье // *Чистая сталь: сб. науч. тр.* – М.: Металлургия, 1987. – С. 128–143.
6. Белов, Б.Ф. Оптимизация химического состава кальцийсодержащих ферросплавов для рационального микролегирования стали / Б.Ф. Белов, А.И. Троцан, П.П. Харлашин // *Современные*

проблемы электрометаллургии стали. XI Международная конференция. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – С. 137–138.

7. Ферросплавы с редкоземельными и щелочноземельными металлами / И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Н.П. Лякишев, А.С. Дубровин. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.

8. Критерии оценки качества раскислителей и модификаторов для стали / И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Р.Г. Усманов и др. // *Сталь*. – 2015. – № 2. – С. 24–27.

9. Модификатор для внепечной обработки стали, содержащий щелочноземельные металлы / И.Б. Проворова, Е.В. Розенберг, К.Э. Барановский и др. // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2 (83). – С. 14–18.

10. Раскисляющие и модифицирующие свойства щелочноземельных металлов в составе сплавов ферроалюмосиликокальция и ферросиликобария / А.Э. Ильясов, С.Н. Шаркаев, А.Б. Ахметов и др. // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – № 9. – С. 58–64. DOI: 10.32339/0135-5910-2018-9-58-64

11. Скок, Ю.Я. Исследование раскислительной способности комплексных сплавов, содержащих ЩЗМ и РЗМ / Ю.Я. Скок // *Процессы литья*. – 2010. – № 3 (81). – С. 8–12.

12. Шагалов, В.Л. Формирование структуры низколегированной стали, модифицированной РЗМ и ЩЗМ / В.Л. Шагалов, В.В. Хлынов, Г.Н. Калмыков // *Сталь*. – 1983. – № 2. – С. 23–24.

13. Агеев, Ю.А. Исследование растворимости щелочноземельных металлов в жидком железе и сплавах на его основе / Ю.А. Агеев, С.А. Арчугов // *Журнал физической химии*. – 1985. – Т. LIX, № 4. – С. 838–841.

14. Промышленные испытания микрокристаллических комплексных модификаторов с щелочноземельными металлами при выплавке трубной стали / И.В. Бакин, А.Н. Шаповалов, М.С. Кузнецов и др. // *Сталь*. – 2020. – № 11. – С. 21–25.

15. Аксельрод, А.Е. Влияние обработки редко- и щелочноземельными металлами на неметаллические включения, дендритную структуру и характер разрушения литых низкоуглеродистых сталей / А.Е. Аксельрод, В.В. Попов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1986. – № 12. – С. 59–64.

16. Голубцов, В.А. Неметаллические включения – модифицирование – качество металла / В.А. Голубцов, И.В. Рябчиков, С.И. Сумин // *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXIV Уральской школы металловедов-термистов (19–23 марта 2018 года, Магнитогорск) / отв. ред. М.В. Чукин, А.Н. Емельюшин*. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – С. 222–229.

17. Эффективность нанотехнологий модифицирования рельсовой стали барием // А.А. Дерябин, В.В. Павлов, В.В. Могильный и др. // *Сталь*. – 2007. – № 11. – С. 134–141.

18. Ивакин, В.Л. Новая технология повышения качества металлов и сплавов барий-стронциевым карбонатом / В.Л. Ивакин, С.С. Черняк, Д.Ю. Пимнев. – Иркутск, 2004. – 123 с.

19. Термодинамический анализ раскислительной способности стронция в жидком железе: диаграмма стабильности фаз в системах Fe–Sr–O и Fe–Mg–Sr–O / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макроец, О.В. Самойлова, И.В. Бакин // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2019. – Т. 75, № 12. – С. 1366–1372. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-12-1366-1372

20. Самойлова, О.В. Фазовая диаграмма системы FeO–SrO–BaO / О.В. Самойлова, Л.А. Макроец, И.В. Бакин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 5–11. DOI: 10.14529/met200301

21. Михайлов, Г.Г. Термодинамика металлургических процессов и систем / Г.Г. Михайлов, Б.И. Леонович, Ю.С. Кузнецов. – М.: Издат. Дом МИСус, 2009. – 520 с.

22. Sigworth, G.K. *The Thermodynamics of Liquid Dilute Iron Alloys* / G.K. Sigworth, J.F. Elliott // *Metal Science*. – 1974. – Vol. 8. – P. 298–310.

23. Song, B. *Solubility of Ba in Liquid Iron and Interaction Effect of the Third Elements* / B. Song, Q. Han, C. Zhang // *Journal of University of Science and Technology Beijing*. – 2000. – Vol. 7, no. 2. – P. 82–85.

24. Fuwa, T. *The Carbon–Oxygen Equilibria in Liquid Iron* / T. Fuwa, J. Chipman // *Trans. AIME*. – 1960. – Vol. 218. – P. 887–891.

Михайлов Геннадий Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; mikhailovgg@susu.ru.

Макровец Лариса Александровна, инженер кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; makrovetsla@susu.ru.

Бакин Игорь Валерьевич, начальник отдела инновации, модернизации и технического развития, ООО НПП Технология, г. Челябинск; igor.npp.bakin@gmail.com.

Поступила в редакцию 9 июля 2021 г.

DOI: 10.14529/met210301

PHASE EQUILIBRIA IN THE Fe–Sr–Ba–O–C SYSTEM

G.G. Mikhailov¹, mikhailovgg@susu.ru,
L.A. Makrovets¹, makrovetsla@susu.ru,
I.V. Bakin², igor.npp.bakin@gmail.com

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² NPP Technology LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

In this work, thermodynamic modeling of phase equilibria in the Fe–Sr–Ba–O–C system is carried out. The surfaces of solubility of the components in the liquid metal are plotted. The effect of temperature (1550 and 1600 °C) and carbon content ([C] = 0; 0.1 wt. %) on the structure of the solubility surface of metal components (SSSM) has been studied. In carrying out the calculations, we used the theory of subregular ionic solutions to calculate the activities of the components of the oxide melt, the theory of regular ionic solutions to calculate the activity of the components of the solid solution of oxides, and the first-order interaction parameters to calculate the activities of the components of the metal melt. Thermodynamic analysis showed that the most probable products of the deoxidation reaction of the melt with barium and strontium are solid solutions [SrO, BaO]. The calculations show that barium practically does not participate in the deoxidation process (the content of BaO in the solid solution ranges from 10⁻² to 10⁻³, and in the oxide melt – hundredths). The low solubility of strontium and, especially, barium in liquid iron predetermines the low deoxidizing and high modifying ability of the Ba–Sr complex. In the future, it is necessary to conduct a study of the behaviour of these elements in combination with calcium, aluminium and silicon.

Keywords: thermodynamic modeling, phase equilibria, modeling, barium, strontium, Fe–Sr–Ba–O–C system.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract No. 02.A03.21.0011.

References

1. Ryabchikov I.V., Povolotskiy V.D., Soloviev N.M. [Structure and properties of fast-cooling modifiers]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1994, vol. 7, pp. 4–7. (in Russ.)
2. Ryabchikov I.V., Chuvatin V.N., Parfenov A.A., Povolotskiy V.D. [Production of size-classified ferrosilicon with barium]. *New technology and technical re-equipment of ferroalloy production*. Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., 1989, pp. 21–28. (in Russ.)
3. Ryabchikov I.V., Panov A.G., Kornienko A.E. Characteristics of modifiers. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no 6, pp. 516–521.
4. Ryabchikov I.V. *Modifikatory i tekhnologii vnepechnoy obrabotki zhelezouglerodistykh splavov* [Modifiers and technologies for out-of-furnace treatment of iron-carbon alloys]. Moscow, EKOMET Publ., 2008. 400 p.

5. Olett M., Gatele S. Influence of calcium, magnesium or REM additives on steel purity. *Chistaya Steel*. Moscow, Metallurgy Publ., 1987, pp. 128–143. (in Russ.)
6. Belov B.F., Trotsan A.I., Kharlashin P.P. [Optimization of the chemical composition of calcium-containing ferroalloys for rational microalloying of steel]. *Modern problems of electrometallurgy of steel. XI International Conference*. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2001, pp. 137–138. (in Russ.)
7. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Lyakishev N.P., Dubrovin A.S. *Ferrosplavy s redkozemel'nymi i shchelochnozemel'nymi metallami* [Ferroalloys with rare-earth and alkaline-earth metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 272 p.
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. DOI: 10.3103/S0967091215020138
9. Provorova I.B., Rozenberg E.V., Baranowski K.E., Volosatnikov V.I., Rozum V.A., Karas' A.N., Chernyavski M.S. The Foundry Inoculant Containing Alkali-Earth Metal for Ladle Refining. *Foundry Production and Metallurgy*, 2016, no. 2 (83), pp. 14–18. (in Russ.)
10. Il'yasov A.E., Sharkaev S.N., Akhmetov A.B., Kusainova G.D., Yablonsky V.I. Deoxidizing and modifying properties of alkaline earth metals within ferroalumosilocalcium and ferrosilicobarium alloys. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 9, pp. 58–64. (in Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2018-9-58-64
11. Skok Yu.Ya. Study of the Deoxidizing Ability of Complex Alloys Containing Alkali-Earth and Rare-Earth Metals. *Casting Processes*, 2010, no. 3 (81), pp. 8–12. (in Russ.)
12. Shagalov V.L., Khlynov V.V., Kalmykov G.N. [Formation of the structure of low-alloy steel modified with REM and AEM]. *Steel*, 1983, vol. 2. pp. 23–24. (in Russ.)
13. Ageev Yu.A., Artchugov S.A. [Research of alkaline earth metals solubility in liquid iron and their base alloys]. *Journal of physical chemistry*, 1985, vol. LIX, no. 4, pp. 838–841. (in Russ.)
14. Bakin I.V., Shapovalov A.N., Kuznetsov M.S., Shaburova N.A., Usmanov R.G., Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Panov V.N. Industrial testing of microcrystalline complex modifiers with alkaline earth metals in pipe steel smelting. *Steel*, 2020, no. 11, pp. 21–25. (in Russ.)
15. Akselrod A.E., Popov V.V. [Influence of treatment with rare and alkaline earth metals on non-metallic inclusions, dendritic structure and the nature of destruction of cast low-carbon steels]. *Izv. Universities. Ferrous metallurgy*, 1986, vol. 12, pp. 59–64. (in Russ.)
16. Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Sumin S.I. [Non-metallic inclusions – modification – metal quality]. *Actual problems of physical metallurgy of steels and alloys: materials of the XXIV Ural school of metallurgists-thermists (March 19–23, 2018, Magnitogorsk)*. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2018, pp. 222–229. (in Russ.)
17. Deryabin A.A., Pavlov V.V., Mogilny V.V., Godik L.A., Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Gorkavenko V.V., Berestov E.Yu. [Effectiveness of nano-technologies of rail steel modifying with barium]. *Steel*, 2007, vol. 11, pp. 134–141. (in Russ.)
18. Ivakin V.L., Chernyak S.S., Pimnev D.Yu. *Novaya tekhnologiya povysheniya kachestva metallov i spлавov bariystrontsiyevym karbonatom* [New technology for improving the quality of metals and alloys with barium strontium carbonate]. Irkutsk, 2004. 123 p.
19. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Samoiloва 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. 1366–1372. (in Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2019-12-1366-1372
20. Samoiloва O.V., Makrovets L.A., Bakin I.V. A Phase Diagram of the FeO–SrO–BaO System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 5–11. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200301
21. Mikhailov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S. *Termodinamika metallurgicheskikh protsessov i sistem* [Thermodynamics of Metallurgical Processes and Systems]. Moscow, MISIS Publ., 2009. 520 p.
22. Sigworth G.K., Elliott J.F. The Thermodynamics of Liquid Dilute Iron Alloys. *Metal Science*, 1974, vol. 8, pp. 298–310.

23. Song B., Han Q., Zhang C. Solubility of Ba in Liquid Iron and Interaction Effect of the Third Elements. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2000, vol. 7, no. 2, pp. 82–85.

24. Fuwa T., Chipman J. The Carbon–Oxygen Equilibria in Liquid Iron. *Trans. AIME*, 1960, vol. 218, pp. 887–891.

Received 9 July 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Михайлов, Г.Г. Фазовые равновесия в системе Fe–Sr–Ba–O–C / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макровец, И.В. Бакин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 5–12. DOI: 10.14529/met210301

FOR CITATION

Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Bakin I.V. Phase Equilibria in the Fe–Sr–Ba–O–C System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210301
