

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 621.746.58 + 669.33

DOI: 10.14529/met180103

КЛАССИФИКАЦИЯ СПЛАВОВ СИЛИКОКАЛЬЦИЙБАРИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Б.Ф. Белов¹, А.Я. Бабанин², В.В. Белоусов³, И.В. Рябчиков⁴, В.А. Голубцов⁴

¹ ООО «Центр металлургических исследований «Сатурн», г. Донецк, ДНР,

² Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, ДНР,

³ Донецкий национальный университет, г. Донецк, ДНР,

⁴ ООО НПП «Технология», г. Челябинск, Россия

Представлены результаты исследования сплавов силикокальцийбария на предмет определения в них первичных, промежуточных, эвтектических и базовых фаз и их действие на сталь в процессе ее внепечной обработки. Впервые построена полигональная диаграмма состояния системы Si–Ca–Ba, позволяющая производить системную классификацию сплавов силикокальцийбария. Представлен механизм образования первичных неметаллических включений при раскислении стали сплавами бария с образованием силикатов или оксидов кальцийбария и предложен механизм их модифицирования в глобулярные эвтектического состава типа ранкинит. Выполнен сопоставительный анализ эффективности раскисления стали сплавами кремния, кальция, бария.

Ключевые слова: сплав силикокальцийбария, полигональная диаграмма состояния, механизм образования, первичные и модифицированные неметаллические включения.

1. Классификация сплавов системы Si–Ca–Ba

Для ковшовой обработки стали применяют двойные и тройные сплавы щелочноземельных металлов [1], в которых содержание бария регламентирует ТУ 0832000-006-311780390-2001 до 30,0 %.

Системным классификатором комплексных сплавов является полигональная диаграмма состояния (ПДС) тройной системы Si–Ca–Ba, которая не изучена и является предметом настоящей работы.

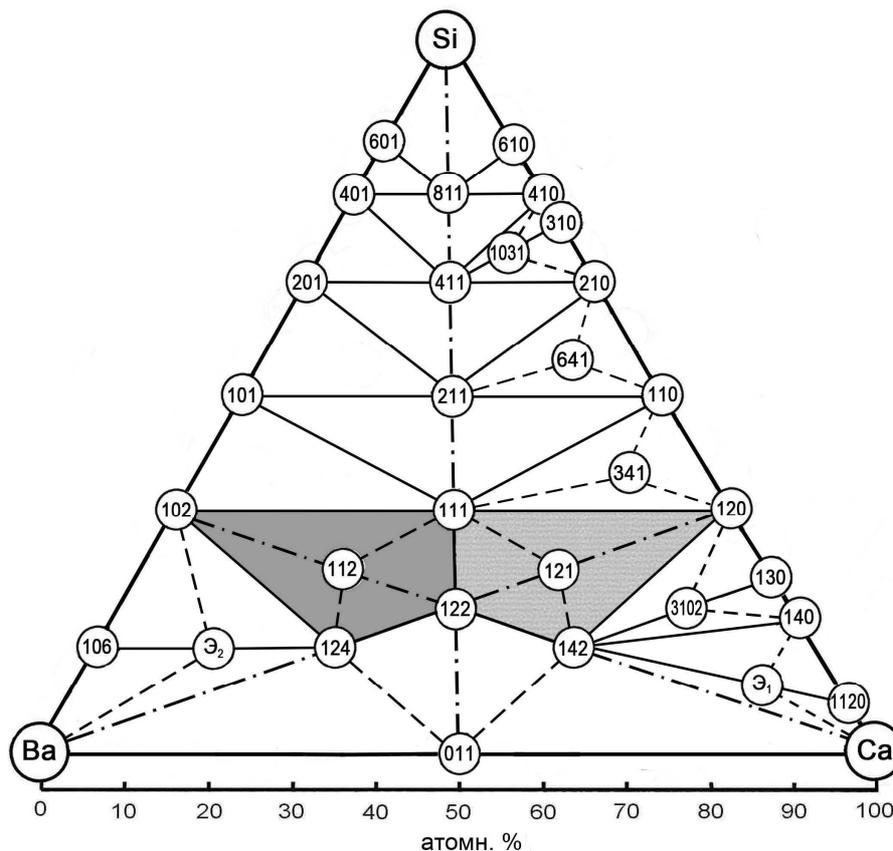
На рисунке представлена ПДС Si–Ca–Ba, построенная графоаналитическим методом (ПДС-метод, [2]) во всем интервале концентраций твердых и жидких исходных компонентов на базе бинарных систем Si–Ca [3], Si–Ba [4] и Ca–Ba [5].

В бинарной системе Ca–Ba твердые и жидкие компоненты взаимно растворяются [6]. Максимальная взаимная растворимость кальция и бария определена на ПДС Si–Ca–Ba в точке пересечения лучевой системы из Si-вершины треугольника и бинарной системы Ca–Ba, в которой существует жидкий раствор

при 605 °С, отвечающий стехиометрическому составу CaBa (22,6/77,4) [5], на базе которого образуются метастабильные сплавы.

ПДС Si–Ca–Ba включает 15 промежуточных фаз: 6 первичных, 2 эвтектических и 7 базовых. Первичные фазы расположены в зоне центрального треугольника, образованного линейными системами бинарных первичных промежуточных фаз. Зона первичных промежуточных фаз SiBa₂–SiCa₂–CaBa разделяет концентрационное поле общего треугольника на три зоны у каждой его вершины. Зона сплавов на базе кремния: SiBa₂(102)–Si–SiCa₂(120), зона кальция: SiBa₂(102)–Ca–CaBa(011) и зона бария: CaBa(011)–Ba–SiBa₂(102). В этих зонах находятся вторичные промежуточные фазы – базовые и эвтектические сплавы. Здесь трехзначные цифры обозначают стехиометрические коэффициенты интерметаллидов: первые цифры – Si, вторые – Ca, третьи – Ba.

Базовые сплавы на основе кремния регламентируют содержание бария до 30,0 %. К таким сплавам относятся сплавы в треугольных зонах системы Si–Ca, отвечающие стехиометрическому составу интерметаллидов



Полигональная диаграмма системы Si–Ca–Ba

Si₁₀Ca₃Ba, Si₆Ca₄Ba, Si₃Ca₄Ba и др., на базе которых образуются твердые растворы переменного состава, определяющие марку сплава С50К25Ba25, С35К30Ba35 и др.

Классификация сплавов силикокальцийбария приведена в табл. 1, которая включает химические реакции образования промежуточных фаз в линейных и триангуляционных системах, химический и стехиометрический состав интерметаллидов, плотность, температуры ликвидуса, рассчитанные аддитивно по температурам плавления исходных компонентов в химических реакциях, маркировку сплавов. Сплавы содержат (масс. %): (5–75) кремния + (5–65) кальция + (20–90) бария, плотность и температура ликвидуса которых соответственно изменяется в пределах 1,71–3,45 г/см³ и 600–1250 °С.

2. Механизм образования и модифицирования неметаллических включений

При ковшевой обработке сталь доводят до марочного состава и формируют заданный тип неметаллических включений (состав, количество) за сет нормированного расхода и

состава присадочных материалов (ферросплавы, лигатуры, шлакообразующие, флюсы).

В качестве присадочных материалов использованы сплавы силикокальцийбарий – С55К10Ba35 (Si₈CaBa), силикокальций – СК30 (Si₃Ca); силикобарий – CaBa35 (Si₁₂Ba), кальцийбарий – КBa35 (Ca₆Ba), ферросилиций – ФС65 (FeSi₄) и известь – (CaO)_{ТШС}. Здесь и далее в скобках обозначены стехиометрический состав фазы, на базе которой образуется твёрдый раствор, отвечающий составу сплава. (CaO)_{ТШС} – известь как компонент твёрдых шлаковых смесей. Бинарные сплавы содержат базовые компоненты тройного сплава – кремний, кальций, барий.

Механизм образования первичных неметаллических включений (ПНВ) силикатов или оксидов кальцийбария, а также их модифицирования (МНВ) в глобулярные эвтектического состава типа ранкинит, исследованы методом стохастического анализа [7] путём последовательного ряда структурно-химических реакций рафинирования. Стехиометрический состав ранкинита 3(CaO + BaO)2SiO₂ с основностью $B = CaO + BaO/SiO_2 < 2,0$ и температурой ликвидуса менее 1400 °С [8].

Таблица 1

Классификация сплавов силикокальцийбария

№ п/п	Линейные и триангуляционные системы	Химические реакции	Стехиометрический состав	Усл. обозначения	Химический состав, масс./ат. %			ρ , г/см ³	$T_{л}$, °С	Марочный состав
					Fe	Si	Ba			
Первичные сплавы										
1	SiBa ₂ -SiCa ₂	SiBa ₂ + SiCa ₂ ↔ Si ₂ Ca ₂ Ba ₂	SiCaBa	1.1.1	13,73/3,3	19,5/33,3	66,8/33,3	3,13	1145	C15K20Ba65
2	SiBa ₂ -CaBa	SiBa ₂ + 2(CaBa) ↔ SiCa ₂ Ba ₄	SiCa ₂ Ba ₄	1.2.4	4,3/14,4	12,2/28,6	83,5/57,0	3,43	875	C5K10Ba85
3	CaBa-SiCa ₂	2(CaBa) + SiCa ₂ ↔ SiCa ₄ Ba ₂	SiCa ₄ Ba ₂	1.4.2	6,0/14,1	34,6/57,2	59,4/28,7	2,91	690	C5K35Ba60
4	Ca-SiBa ₂	Ca + SiBa ₂ ↔ SiCaBa ₂	SiCaBa ₂	1.1.2	8,2/25,0	11,7/25,0	80,1/50,0	3,38	1160	C10K10Ba80
5	Ba-SiCa ₂	Ba + SiCa ₂ ↔ SiCa ₂ Ba	SiCa ₂ Ba	1.2.1	11,4/25,0	32,7/50,0	55,9/25,0	2,87	840	C10K35Ba55
6	SiBa ₂ -SiCa ₂ -CaBa	SiBa ₂ + SiCa ₂ + CaBa ↔ SiCa ₂ Ba ₂	SiCa ₂ Ba ₂	1.2.2	7,4/20,0	20,9/40,0	71,7/20,0	3,19	860	C10K20Ba70
Сплавы на основе кремния										
1	SiBa-SiCa	SiBa + SiCa ↔ Si ₂ CaBa	Si ₂ CaBa	2.1.1	24,0/50,0	17,2/25,0	58,8/25,0	3,03	1070	C25K15Ba60
2	Si ₂ Ba-Si ₂ Ca	Si ₂ Ba + Si ₂ Ca ↔ Si ₄ CaBa	Si ₄ CaBa	4.1.1	38,8/66,7	13,8/16,7	47,4/16,7	2,89	1130	C40K15Ba45
3	Si ₄ Ba-Si ₄ Ca	Si ₄ Ba + Si ₄ Ca ↔ Si ₈ CaBa	Si ₈ CaBa	8.1.1	55,98/0,0	10,0/10,0	34,1/10,0	2,74	1120	C55K10Ba35
4	Si ₄ CaBa-Si ₃ Ca	Si ₄ CaBa + 2(Si ₃ Ca) ↔ Si ₁₀ Ca ₃ Ba	Si ₁₀ Ca ₃ Ba	10.3.1	52,2/71,6	22,3/21,3	25,5/7,1	2,51	1100	C50K25Ba25
5	Si ₂ CaBa-Si ₂ Ca-SiCa	Si ₂ CaBa + Si ₂ Ca + 2(SiCa) ↔ Si ₆ Ca ₄ Ba	Si ₆ Ca ₄ Ba	6.4.1	36,1/54,5	34,5/36,4	29,4/9,1	2,48	1050	C35K35Ba30
6	SiCaBa-SiCa-SiCa ₂	SiCaBa + SiCa + SiCa ₂ ↔ Si ₃ Ca ₄ Ba	Si ₃ Ca ₄ Ba	3.4.1	22,0/37,5	42,0/50,0	36,0/12,5	2,51	1120	C20K45Ba35
Сплавы на основе кальция										
1	SiCa ₄ Ba ₂ -SiCa ₃	SiCa ₄ Ba ₂ + 2(SiCa ₃) ↔ Si ₃ Ca ₁₀ Ba ₂	Si ₃ Ca ₁₀ Ba ₂	3.10.2	11,0/20,0	52,8/66,8	36,2/13,2	2,43	850	C10K50Ba40
2	SiCa ₄ Ba ₂ -SiCa _{1,2}	SiCa ₄ Ba ₂ + SiCa _{1,2} ↔ Si ₂ Ca ₁₆ Ba ₂	SiCa ₈ Ba	1.8.1 (Э1)	5,8/11,1	66,0/88,9	28,2/11,1	2,21	650	C5K65Ba30
Сплавы на основе бария										
1	SiCa ₂ Ba ₄ -SiBa ₆	SiCa ₂ Ba ₄ + SiBa ₆ ↔ Si ₂ Ca ₂ Ba ₁₀	SiCaBa ₅	1.1.5 (Э ₂)	3,7/14,0	5,3/14,0	91,0/72,0	3,59	550	C5K5Ba90

Примечания: трехзначные числа – стехиометрические коэффициенты тройных интерметаллидов: первые цифры – кремний, вторые – кальций, третьи – барий; $T_{л}$, °С – температура ликвидус, ρ , г/см³ – плотность; марочный состав, масс. %: С – кремний, К – кальций, Ба – барий.

2.1. Силикокальцийбарий (С55К10Ба35)



Из реакции (3) следует, что при расходе 1,0 кг/т сплава удаляется 718,0 ppm кислорода с образованием 3,2 кг/т МНВ, содержащего (масс. %): 38,4 SiO₂ + 49,4 CaO + 12,2 BaO при основности $B = (\text{CaO} + \text{BaO}) / \text{SiO}_2 = 1,6$ после присадки извести в количестве 1,41 кг/т.

Силикатная фаза – ПНВ основностью $\leq 0,5$ является стекловидным образованием типа кварцевого стекла с высокой вязкостью, которая в присутствии извести – (CaO)_{ТШС} превращается в жидкотекучее состояние с образованием модифицированных глобулярных неметаллических включений (МНВ), отвечающих составу типа ранкинита – 2SiO₂3(CaO + BaO).

2.2. Силикокальций (С70К30)



Из реакции (6) следует, что при расходе сплава в количестве 1,0 кг/т удаляется кислорода ($\Delta[\text{O}]$, ppm) 903,2 ppm с образованием 3,5 кг/т МНВ, содержащих (масс. %) 41,7 SiO₂ + 58,3 CaO при основности $B = 1,4$ после присадки извести в количестве 1,58 кг/т.

2.3. Силикобарий (С70Ба30)



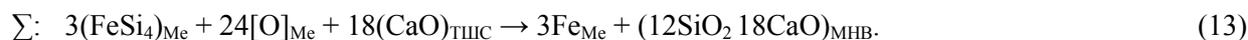
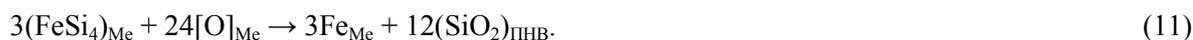
Из реакции (9) следует, что при расходе 1,0 кг/т сплава удаляется 846 ppm кислорода с образованием 3,9 кг/т МНВ, содержащих (масс. %) 39,4 SiO₂ + 52,2 CaO + 8,4 BaO при основности $B = 1,53$ после присадки 2,0 кг/т извести.

2.4. Кальцийбарий (К65Ба35)



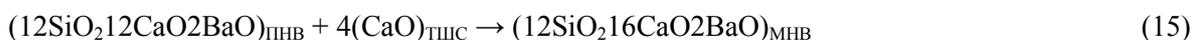
Из реакции (10) следует, что при расходе сплава 1,0 кг/т удаляется 97,1 ppm кислорода с образованием 1,3 кг/т ПНВ, содержащих (масс. %) 68,7 CaO + 31,3 BaO.

2.5. Ферросилиций (ФС65)



Из реакции (13) следует, что при расходе 1,0 кг/т сплава ФС65 $\Delta[\text{O}]_{\text{Me}} = 762,0$ ppm, количество (CaO)_{ТШС} = 2,0 кг/т и МНВ = 3,43 кг/т.

2.6. K65Ba35+ФC65



Из реакции (16) следует, что при суммарном расходе сплавов в количестве 1,0 кг/т, содержащих (масс. %) 60,0 K65Ba35 + 40,0 ФC65, удаляется кислорода $\Delta[\text{O}]_{\text{Me}} = 483,3$ ppm и после присадки извести в качестве 0,18 кг/т образуются МНВ-ранкинит в количестве 1,53 кг/т, содержащий (масс. %) 37,2 SiO₂ + 46,6 CaO + 15,9 BaO с основностью $B = 1,67$. Глубина раскисления является средней величиной от исходных сплавов.

3. Анализ эффективности раскисления стали

В табл. 2 приведён сопоставительный анализ эффективности раскисления стали сплавами кремния, кальция, бария при их расходе в количестве 1,0 кг/т.

Сопоставительный анализ эффективности раскисления стали

Таблица 2

Сплавы	(CaO) _{ТШС} , кг/т	Δ[O], ppm	Модифицированные неметаллические включения				
			Химический состав, масс. %			Q, кг/т	B
			SiO ₂	CaO	BaO		
Силикокальций-барий (С55К10Ba35)	1,41	718,0	38,4	49,4	12,2	3,2	1,60
Силикокальций (С70К30)	1,58	903,2	41,7	58,3	–	3,5	1,40
Силикобарий (С70Ba30)	2,0	846,0	39,4	52,2	8,4	3,5	1,53
Кальцийбарий (K65Ba35)	–	297,1	–	68,7	31,3	1,3 (ПНВ)	–
Ферросилиций (ФC65)	2,0	762,0	41,7	58,3	–	3,43 (ПНВ)	1,40
ФC65 + K65Ba35	0,18	483,3	37,2	46,6	15,9	1,53	1,67

Примечания: Δ[O], ppm – количество удалённого кислорода; Q, кг/т – количество неметаллических включений (ПНВ и МНВ); $B = \text{CaO} + \text{BaO}/\text{SiO}_2$ – основность МНВ и ПНВ.

Из табл. 2 следует, что максимальная раскислительная способность (Δ[O]ppm) у сплавов силикокальция, минимальная – у сплавов кальцийбария, что связано с наличием кремния в сплаве.

Выбор марочного состава сплавов бария для ковшевой обработки стали зависит также от других параметров: расход извести, количество МНВ. Минимальное количество неметаллических включений образуется при использовании сплавов кальцийбария. Сплавы бария с кремнием и кальцием повышают чистоту стали за счет глобуляризации, измельчения и снижения количества неметаллических включений, обеспечивающих высокое качество металла [9, 10].

Полученные результаты исследований позволяют избрать оптимальный вариант технологии ковшевой обработки стали в зависимости от наличия и стоимости присадочных материалов.

Выводы

1. Построена неизвестная ранее полигональная диаграмма системы Si–Ca–Ba, служащая системным классификатором сплавов силикокальцийбария, включающая 15 промежуточных фаз интерметаллидов: первичных (6), эвтектических (2) и базовых (7).

2. Представлен механизм образования первичных неметаллических включений (ПНВ) при раскислении стали сплавами бария с образованием силикатов или твёрдофазных оксидов кальцийбария, а также механизм модифицирования ПНВ в глобулярные эвтектического состава типа ранкинита (МНВ).

3. Выполнен сопоставительный анализ эффективности раскисления стали сплавами кремния, кальция, бария, который представлен рядом активности (убывающий): СК30 → СБа35 → ФС65 → СКБа35 → КБа35.

Литература

1. Рябчиков, И.В. Кремнистые ферросплавы и модификаторы нового поколения. Производство и применение / И.В. Рябчиков, В.С. Мизин, И.И. Андреев. – Челябинск: ЮУрГУ. – 295 с.

2. UA № 48344 U. Метод побудови полігональних діаграмм стану потрійних металургійних систем / Б.Ф. Белов, А.І. Троцан, І.Д. Буга та інші. – Оубл. 18.03.2013.

3. UA № 89504 U, МПК: C21C 7/06, C22C 35/00. Сплав кремнію з кальцієм – силікокальцій для ківшевої обробки сталі / І.В. Паренчук, Б.Ф. Белов, А.І. Троцан, В.С. Кобець, О.С. Місюра. – Оубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

4. UA № 93964 U, МПК: C21C 7/00. Сплав кремнію з барієм – силікобарій – для обробки металургійних розплавів / І.В. Паренчук, Б.Ф. Белов, А.І. Троцан, В.С. Кобець. – Оубл. 27.10.2014, Бюл. № 20.

5. Структуры двойных сплавов. Справочник / М. Хансен и К. Андерко. – М., 1962. – Т. 1. – С. 291–292.

6. Вахабов, А.В. Систематизация видов взаимодействия в двойных системах на основе кальция, стронция, бария / А.В. Вахабов, В.Н. Вигдорович, Е.Д. Джурсаев // Обице закономерности в строении диаграмм состояния металлических систем. – М.: Наука, 1973. – С. 121–124.

7. UA № 54359 U. Аналіз стохастичних металургійних систем за допомогою балансових рівнянь сумарних структурно-хімічних реакцій / Б.Ф. Белов, А.І. Троцан, І.Л. Бродецький, Ф.С. Крейденко. – Оубл. 02.04.2014.

8. О строении шлаковых расплавов / Б.Ф. Белов, П.П. Харлашин, А.И. Троцан, П.С. Харлашин // Процессы литья. – 2003. – № 2. – С. 18–22.

9. Использование комплексных барийсодержащих модификаторов для улучшения качества колёсного металла / В.А. Голубцов, Р.Г. Усманов, И.В. Рябчиков и др. // Сталь. – 2009. – № 12. – С. 17–22.

10. Михайлов, Г.Г. Барий как раскислитель и модификатор жидкой стали / Г.Г. Михайлов, Л.А. Марковец, Д.А. Выдрин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 45–50.

Белов Борис Федорович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ООО «Центр металлургических исследований «Сатурн», г. Донецк, ДНР.

Бабанин Анатолий Яковлевич, д-р техн. наук, доцент кафедры технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, ДНР; bay1957@mail.ua.

Белоусов Вячеслав Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физики неравновесных процессов, Донецкий национальный университет, г. Донецк, ДНР.

Рябчиков Иван Васильевич, д-р техн. наук, профессор, консультант, ООО НПП «Технология», г. Челябинск, Россия.

Голубцов Валерий Александрович, канд. техн. наук, главный специалист по стали, ООО НПП «Технология», г. Челябинск, Россия.

Поступила в редакцию 2 ноября 2017 г.

THE CLASSIFICATION OF SILICOCALCIUM-BARIUM ALLOYS AND THEIR APPLICATION TO STEEL LADLE PROCESSING

B.F. Belov¹, A.Ya. Babanin²*, V.V. Belousov³, I.V. Ryabchikov⁴, V.A. Golubtsov⁴

¹ LLC Center for Metallurgical Research "Saturn", Donetsk, DPR,

² Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, DPR,

³ Donetsk National University, Donetsk, DPR,

⁴ LLC NPP "Technology", Chelyabinsk, Russian Federation

* bay1957@mail.ua

The paper presents the results of the investigation of silicocalcium-barium alloys for the determination of primary, intermediate, eutectic and base phases in them, and their effect on steel during its out-of-furnace treatment. For the first time, a polygonal diagram of the state of the Si–Ca–Ba system has been constructed, which makes it possible to systematically classify silicocalcium-barium alloys. The mechanism of the formation of primary nonmetallic inclusions in the deoxidation of steel with barium alloys with the formation of silicate or oxide of Ca–Ba is presented and proposed a mechanism for their modification into globular eutectic composition such as Rankinite A comparative analysis of the efficiency of deoxidation of steel with alloys of silicon, calcium and barium has been performed.

Keywords: silicocalcium barium alloy, polygonal state diagram, formation mechanism, primary and modified nonmetallic inclusions.

References

1. Ryabchikov I.V., Mizin V.S., Andreev I.I. *Kremnistye ferrosplavy i modifikatory novogo pokoleniya. Proizvodstvo i primeneniye* [Siliceous Ferroalloys and Modifiers of a New Generation. Production and Application]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ Publ., 2013. 295 p.
2. Bjelov B.F., Trocan A.I., Buga I.D. et al. *Metod pobudovy poligonal'nyh diagramm stanu potrijnyh metalurgijnyh sistem* [The Method of Motivating Polygonal Dyagrams Will Become a Post-Production Metallurgical System]. Patent UA, no. 48344, 18.03.2013.
3. Parenchuk I.V., Bjelov B.F., Trocan A.I., Kobec'V.S., Misjura O.S. *Splav kremniju z kal'cijem – sylikokal'cij dlja kivshevoi' obrobky stali* [The alloy of Silicon with Calcite]. Patent UA, no. 89504, 25.04.2014.
4. Parenchuk I.V., Bjelov B.F., Trocan A.I., Kobec' V.S. *Splav kremniju z barijem – sylikobarij – dlja obrobky metalurgijnyh rozplaviv* [Alloy Silicon with Barium]. Patent UA, no. 93964, 27.10.2014.
5. Hansen M. *Der Aufbau der Zweistofflegierungen. Eine kritische Zusammenfassung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1936. DOI: 10.1007/978-3-642-47516-0
6. Vakhobov A.V., Vigdorovich V.N., Dzhuraev E.D. [Systematization of the Types of Interaction in Binary Systems Based on Calcium, Strontium, Barium]. *Obshchie zakonomernosti v stroenii diagramm sostoyaniya metallicheskih sistem* [General Regularities in the Structure of State Diagrams of Metallic Systems]. Moscow, Nauka publ., 1973, pp. 121–124. (in Russ.)
7. Bjelov B.F., Trocan A.I., Brodec'kyj I.L., Krejdenko F.S. *Analiz stohastichnyh metalurgijnyh sistem za dopomogoju balansovyh rivnjan' sumarnyh strukturno-himichnyh reakcij* [Analysis of Stochastic Metallurgical Systems by Means of Balance Equations of Total Structural and Chemical Reactions]. Patent UA, no. 54359, 02.04.2014.
8. Belov B.F., Kharlashin P.P., Trotsan A.I., Kharlashin P.S. [On the Structure of Slag Melts]. *Protsessy lit'ya* [Casting Processes], 2003, no. 2, pp. 18–22. (in Russ.)
9. Golubtsov V.A., Demin K.Y., Demin Y.S. et al. Improving Wheel Steel by Means of Barium-Based Modifiers. *Steel Transl.*, 2009, 39, pp. 1078–1083. DOI: 10.3103/S0967091209120092

10. Mikhaylov G.G., Makrovets L.A., Vydrin D.A. Barium as Deoxidant and Modifier of Liquid Steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 45–50 (in Russ.)

Received 2 November 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Классификация сплавов силикокальцийбария и их применение для ковшевой обработки стали / Б.Ф. Белов, А.Я. Бабанин, В.В. Белоусов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 21–28. DOI: 10.14529/met180103

FOR CITATION

Belov B.F., Babanin A.Ya., Belousov V.V., Ryabchikov I.V., Golubtsov V.A. The Classification of Silico-calcium-Barium Alloys and Their Application to Steel Ladle Processing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 21–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180103
