

УДК 669.168

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТАЛИ БАРИЕМ И СТРОНЦИЕМ**Рожихина И.Д.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов**Нохрина О.И.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии**черных металлов (kafamsf@sibsiu.ru)**Дмитриенко В.И.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов**Платонов М.А.², к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов*¹ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Юргинский технологический институт-филиал Томского политехнического университета

(652000, Россия, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26)

Аннотация. Рассмотрен процесс модифицирования стали природными материалами, содержащими барий и стронций. С применением методов термодинамического моделирования рассмотрен процесс восстановления бария и стронция кремнием и алюминием. Изучено влияние процесса обработки стали барийстронциевым модификатором на формирование структуры и механические свойства стали. Результаты исследований реализованы при выплавке стали марок 25Г2С и Г13 в дуговой электропечи литейного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также ОАО «Юргинский машиностроительный завод» при выплавке сталей марок 35ХГСЛ, 30ХГСЛФЛ, 12НД2ФХ с применением двухшлаковой технологии. Анализ результатов промышленных испытаний показал, что барийстронциевый модификатор воздействует на микроструктуру и неметаллические включения, обеспечивает повышение запаса конструктивной прочности сталей, оцениваемой значениями пределов текучести, прочности и ударной вязкости при положительных и отрицательных температурах. Для выявления присутствия в стали бария и стронция был выполнен анализ структуры стали методом экстрактных реплик с использованием просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Наличие бария и стронция в объеме зерна свидетельствует о взаимодействии этих элементов с металлическим расплавом с определенным влиянием на структурообразование металлической матрицы.

Ключевые слова: барий, стронций, процесс модифицирования, термодинамическое моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-871-876

Одним из основных условий развития технологий производства стали является использование относительно недорогих материалов в виде различных комплексных сплавов и смесей, позволяющих целенаправленно управлять физико-химическим состоянием металлического расплава и, соответственно, получать металлопродукцию с улучшенными эксплуатационными характеристиками. При этом качественные характеристики материалов, используемых при рафинировании и модифицировании, в полной мере должны обеспечивать стабильность, эффективность, экономичность и экологическую безопасность технологий [1, 2].

Получение барий- и стронцийсодержащих лигатур является энерго-, трудо- и материалоемким производством в черной металлургии. При этом операции выплавки, разлива, грануляции, дробления, упаковки лигатур не только требуют больших затрат труда, но и сопровождаются потерями металла. Такие производства являются экологически вредными, пожаро- и взрывоопасными [3 – 7]. В связи с этим весьма перспективной является задача создания технологий, которые позво-

ляли бы проводить модифицирование стали барием и стронцием из природных материалов, минуя стадии производства лигатур [8, 9]. В природных материалах барий и стронций находятся главным образом в виде соединений $BaSO_4$, $SrSO_4$, $BaCO_3$, $SrCO_3$.

В России, на северо-востоке Иркутской области, открыто и разрабатывается уникальное месторождение комплексных карбонатных руд, содержащих кальций, барий и стронций. Руды имеют следующий минеральный состав: 70 – 80 % Sr-Ca-Ba-карбоната, 10 % калиевого полевого шпата, 10 – 20 % пироксена.

Предприятием ООО «НПК Металлтехнопром» освоен выпуск барийстронциевого модификатора БСК-2 по ТУ 1717-001-75073896 – 2005. Модификатор предназначен для производства стали, чугуна и цветных сплавов, а также для покрытий сварочных электродов [10, 11]. По результатам химического анализа барийстронциевый модификатор содержит 13,0 – 19,0 % BaO, 3,5 – 7,5 % SrO, 17,5 – 25,5 % CaO, 19,8 – 29,8 % SiO₂, 0,7 – 1,1 % MgO, 2,5 – 3,5 % K₂O, 1,0 – 2,0 % Na₂O, 1,5 – 6,5 % Fe₂O₃, 0 – 0,4 % MnO, 1,9 – 3,9 % Al₂O₃, 0,7 – 1,1 % TiO₂, 16,0 – 20,0 % CO₂.

Проведенный рентгенофазовый анализ показал, что основными соединениями, входящими в состав барийстронциевого модификатора, являются баритокаль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

цит $BaCa(CO_3)_2$, кальцит $CaCO_3$, кальциостронцианит $CaSr(CO_3)_2$, доломит $MgCO_3$ и сидерит $FeCO_3$.

С целью изучения фазовых и структурных превращений, происходящих в рудных минеральных составляющих барийстронциевого модификатора при нагревании, использовали дифференциально-термический анализ. Из результатов этого анализа следует, что до температуры 1223 К происходит диссоциация доломита, кальцита, баритокальцита и кальциостронцианита. Это означает, что при температурах сталеплавильных процессов (1873 – 1923 К) представляет интерес изучение поведения именно оксидных соединений бария и стронция.

Обычно модифицирование проводится на конечной стадии производства: либо на выпуске из печи в ковш, либо при внепечной обработке стали в ковше, либо непосредственно при разливке. На разных этапах внепечной обработки в качестве восстановителей могут рассматриваться углерод, кремний, алюминий. Для определения условий восстановления бария и стронция из оксидов использовались методы термодинамического моделирования, реализованные в программном комплексе «Терра» [12]. Анализ результатов теоретических расчетов показал, что углерод при температурах 1873 – 1923 К практически не восстанавливает барий и стронций из их оксидов; кремний может восстанавливать барий примерно на 60 %, но плохо восстанавливает стронций (всего лишь на 15 %), а при использовании алюминия степень восстановления бария и стронция из оксидов достигает соответственно 70 и 50 %; температура в интервале 1873 – 2073 К оказывает незначительное влияние на степень восстановления этих элементов (рис. 1).

Из анализа результатов термодинамического моделирования, представленных авторами [13, 14], следует,

что восстановление бария и стронция из их оксидов более полно происходит при использовании в качестве восстановителя алюминия. Для эффективного его использования необходимо предварительное тщательное раскисление металла и шлака с целью снижения окислительного потенциала системы металл–шлак.

Результаты термодинамического моделирования были реализованы при выплавке стали марок 25Г2С и Г13 в дуговых электропечах литейного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Плавки проводили по двухшлаковой технологии. В качестве барийстронцийсодержащего материала использовали модификатор БСК-2, который присаживали в конце восстановительного периода совместно с раскислительной смесью (порошок ферросилиция и коксик). Часть модификатора (25 % от общего количества) вносили в ковш во время выпуска. Шлак перед выпуском дополнительно раскисляли гранулированным алюминием, а металл в ковше раскисляли чушковым алюминием (примерно 1 кг/т) [15].

Металл разливали в слитки массой 7,5 т, прокатывали на квадрат 100 с последующим перекатом на арматуру № 14.

Механические свойства стали контролировали по стандартным методикам в лаборатории механических испытаний ЦЗЛ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Для стали 25Г2С проводили дополнительные испытания на ударную вязкость при температурах 20; 0; –20; –40; –60; –70 °С. Для сравнения таким же испытаниям подвергли четыре плавки стали 25Г2С, выплавленные в 25-т дуговой печи без обработки модификатором БСК-2. Для стали марки Г13 испытания на ударную вязкость проводили при температуре +20 и –60 °С.

После обработки стали марки 25Г2С модификатором БСК-2 улучшились показатели прочности и пластичности и особенно ударной вязкости (табл. 1).

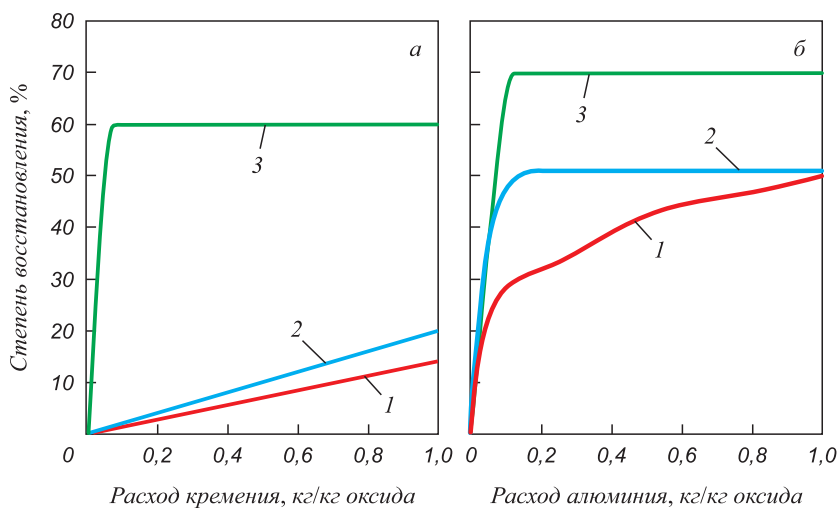


Рис. 1. Изменение степени восстановления стронция при температурах 1873 (1) и 2073 К (2) и бария при температурах 1873 – 2073 К (3) из их оксидов от расхода кремния (а) и алюминия (б)

Fig. 1. Change of strontium reduction degree at the temperatures of 1873 (1) and 2073 K (2), as well as barium at the temperature of 1873 – 2073 K (3) from their oxides on the consumption of silicon (a) and aluminum (b)

Данные по обработке стали марки 25Г2С карбонатитом

Table 1. Data of 25G2S steel treatment with carbonatite

Номер плавки	Расход карбонатита, кг/т	КСУ, кгс·м/см ² , при температуре, °С						I·10 ⁻³	Г _{окс.} , %	Г _{окс.сул.} , %
		+20	0	-20	-40	-60	-70			
Ср.пл. (уср.)	0	10,83	9,38	7,54	7,12	4,21	3,39	77,96	14	13
760050	4,0	11,51	10,44	10,63	8,63	9,18	7,19	27,03	19	36
760260	4,3	12,80	11,20	8,63	10,43	8,33	5,10	30,8	19	75
760264	4,7	11,20	9,93	6,33	6,63	5,67	4,52	-	-	-
760267	7,7	16,3	13,6	12,63	12,17	10,8	10,20	41,02	68	59

Примечание. Г_{окс} и Г_{окс.сул} – глобуляризация оксидов и оксисульфидов

Анализ полученных данных показал, что обработка стали 25Г2С модификатором БСК-2 в количестве 4 кг/т приводит к улучшению ударной вязкости в интервале температур испытаний от +20 до -60 °С. Увеличение расхода модификатора БСК-2 с 4,0 – 4,7 до 7,7 кг/т приводит к дополнительному возрастанию ударной вязкости (в 2,57 – 3,02 раза) в области исследованных температур испытаний от -60 до -70 °С.

Как следует из данных металлографического анализа, обработка стали модификатором БСК-2 (рис. 2) снижает индекс I, характеризующий загрязненность стали неметаллическими включениями, и обеспечивает высокий уровень их глобуляризации (Г). При этом фиксировалось измельчение ферритоперлитной структуры стали за счет устранения грубых участков кремний-марганцовистых ликвационных образований.

Несколько серий плавков по модифицированию стали барийстронциевым модификатором были также про-

ведены в дуговых сталеплавильных печах цеха № 10 ООО «Юргинский машзавод» при выплавке стали марок 35ХГСЛ, 30ХГСФЛ, 12НД2ФХ с применением двушлаковой технологии.

После выпуска плавки во время разливки отбирали ковшовую пробу металла для проведения анализа химического состава и заливали пробные бруски для проведения механических испытаний.

Определение концентрации химических элементов, оценку неметаллических включений в литых пробах и механические испытания изготовленных образцов проводили в лабораториях ООО «Юргинский машзавод». Усредненные результаты проведенных механических испытаний стали 35ХГСЛ показали повышение запаса конструкционной прочности стали на 20 – 50 % после обработки барийстронциевым модификатором, характеризующейся значениями пределов текучести, прочности и ударной вязкости при положительных и отрицательных температурах (рис. 3). В технологическом плане производство сталей с указанными свойствами не вызывает затруднений.

Для изучения процесса взаимодействия шлаковых расплавов, содержащих соединения бария и стронция, с металлическим расплавом были проведены лабораторные исследования.

Подготовленные образцы были исследованы с применением металлографического анализа, результаты которого показали, что обработка металла соединениями бария и стронция не оказывает значительного влияния на формирование неметаллических включений, но в то же время влияет на структурообразование.

Образец, при выплавке которого в состав шлакообразующей смеси не вводили соединения бария и стронция, имел видманштеттову структуру, характерную для сталей с низкими механическими свойствами, а образцы, обработанные шлакообразующими смесями, содержащими барий и стронций, имели структуру, представляющую собой пластинчатый перлит с выделениями феррита по границам зерен, и отдельными выделениями феррита внутри перлитных зерен, харак-

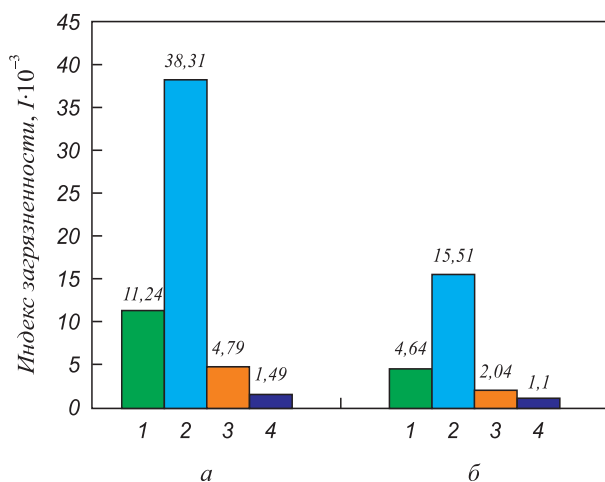


Рис. 2. Загрязненность стали 25Г2С (по результатам 5 плавков): а – без обработки модификатором; б – с обработкой модификатором; 1 – оксиды; 2 – оксисульфиды; 3 – сульфиды; 4 – силикаты

Fig. 2. 25G2S steel impurity (according to the results of 5 meltings): а – without treatment with modifier; б – with treatment with modifier; 1 – oxides; 2 – oxysulfides; 3 – sulphides; 4 – silicates

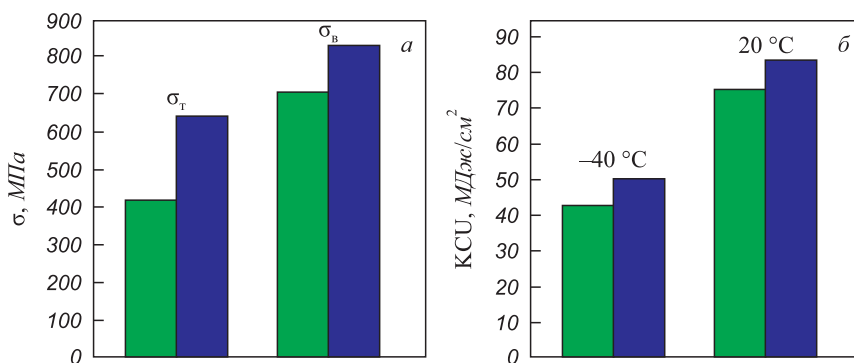


Рис. 3. Механические свойства (а) и ударная вязкость (б) стали 35ХГСЛ после нормализации (1143 – 1173 К) и отпуска (873 – 923 К): ■ – без обработки; ■ – с обработкой барийстронциевым модификатором

Fig. 3. Mechanical properties (a) and impact strength (б) of 35KhGSL steel after normalization (1143 – 1173 K) and tempering (873 – 923 K) : ■ – no treatment; ■ – treatment with barium strontium modifier

терную для сталей с более высокими механическими свойствами.

Результаты анализа химического состава не показали наличия в образцах бария и стронция, предположительно, из-за низкого их содержания. Для выявления присутствия в стали этих элементов образцы исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Результаты исследований представлены в табл. 2, из данных которой следует, что барий и стронций дифференцированно располагаются по структурным составляющим металлической матрицы. Более предпочтительными местами расположения бария и стронция является объем зерен перлита и феррита.

С целью обнаружения места локализации бария и стронция в стали (твердый раствор или включения вторых фаз) был выполнен анализ ее структуры методом экстрактивных реплик с использованием просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Из анализа полученных результатов следует, что частицы, экстрагированные на реплику, имеют малые размеры (в пределах 50 – 500 нм), при этом анализ микроэлектроннограммы показывает, что наряду с оксидами и карбидами железа в исследуемых образцах присутст-

вуют соединения бария и стронция: C_2BaO_4 , $SrFeO_{2,97}$, $Ba_2Fe_6O_{11}$, $BaSrFe_4O_8$, $Ba_3Fe_2O_6$, $Ba_2Fe_{14}O_{22}$ (рис. 4).

Проведенные исследования подтвердили, что барий и стронций активно участвуют в образовании структурных составляющих в момент кристаллизации. Наличие бария и стронция в объеме зерна свидетельствует о взаимодействии этих элементов с металлическим расплавом с определенным влиянием на структурообразование металлической матрицы. Наличие сложных соединений, в состав которых входят барий и стронций, указывает на взаимодействие элементов с неметаллическими включениями. Выявленные размеры соединений подтверждают мнение о том, что взаимодействие соединений бария и стронция происходит на наноуровне.

Выводы. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно предложить такую последовательность процессов при модифицировании стали барийстронциевым модификатором: разложение карбонатов кальция, бария и стронция; расплавление барийстронциевого модификатора и восстановление бария из оксида кремнием при раскислении шлака; восстановление кальция, бария и стронция из оксидов и карбонатов введенным алюминием; довосстановление бария, стронция из оксидов алюминием и кремнием, растворенными в стали.

Таблица 2

Относительные средние значения результатов элементного анализа поверхности образцов

Table 2. Relative average value of the element analysis results of the sample surface

Содержание, %, бария/стронция		
в зерне феррита	в зерне перлита	на границе раздела
Образец № 4		
0,20/0,70	0,05/0,85	0/0,08
Образец № 5		
0,05/0,30	0,05/0,09	0,05/0

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ферросплавы с редкоземельными и щелочноземельными металлами / И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Н.П. Лякишев, А.С. Дубровин. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.
2. Кожевников Т.Н., Зайко В.П., Рысс М.А. Электротермия лигатур щелочноземельных металлов с кремнием. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
3. Григорьев Ю.В., Рябчиков И.В., Рошин В.Е. Термодинамический анализ совместного восстановления кремния и бария углеродом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 7. С. 3 – 5.
4. Парфенов А.А., Кашаев Ю.Я., Скуратович А.И. и др. Производство ферросилиция с барием – нового высокоэффективного модификатора. – В кн.: Повышение эффективности и качества ферросплавов: Науч. тр. НИИМ. – М.: Металлургия, 1986. С. 13 – 18.

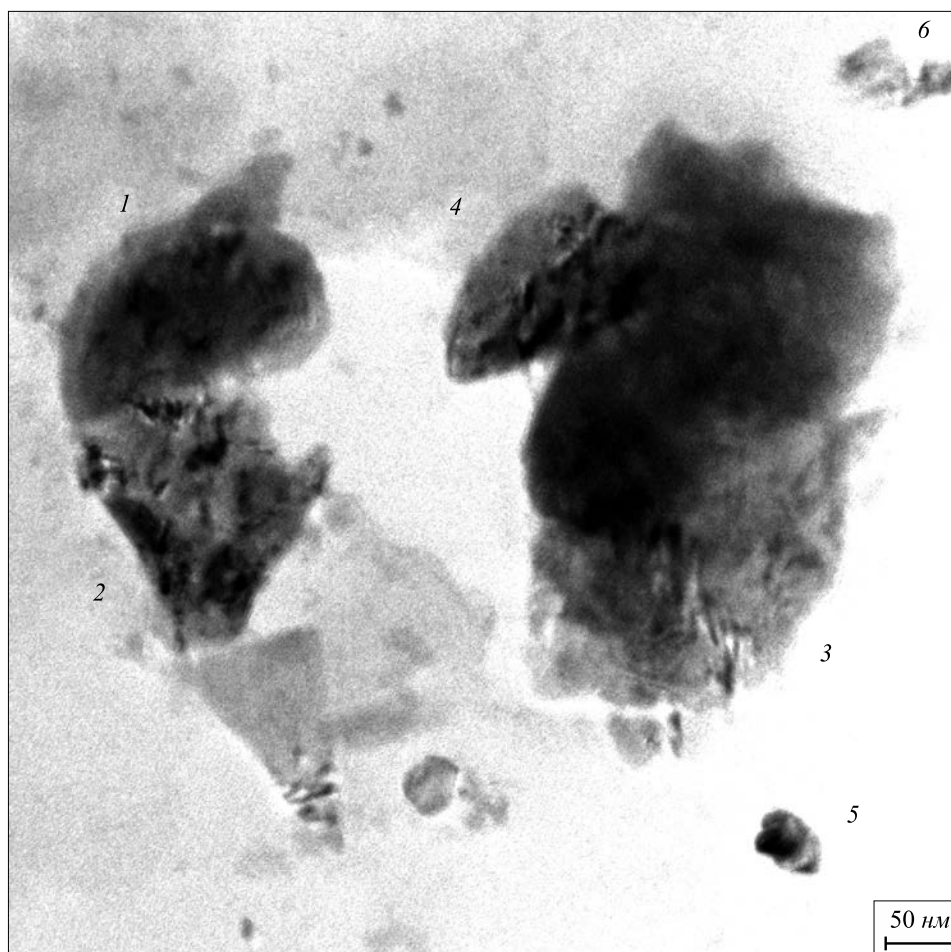


Рис. 4. Фрагмент электронно-микроскопического анализа методом электронных реплик:
 1, 2 – SrCO_3 ; 3 – Fe_3O_4 ; 4 – $\text{BaSrFe}_4\text{O}_8$; 5 – $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$; 6 – $\text{Ba}_2\text{Fe}_{14}\text{O}_{22}$

Fig. 4. Fragment of submicroscopic analysis by the method of electronic uniformity trial:
 1, 2 – SrCO_3 ; 3 – Fe_3O_4 ; 4 – $\text{BaSrFe}_4\text{O}_8$; 5 – $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$; 6 – $\text{Ba}_2\text{Fe}_{14}\text{O}_{22}$

5. Григорьев Ю.В., Рябчиков И.В., Рошин В.Е. Исследование углеродотермической технологии выплавки силикобария из кусковой шихты. – В кн.: Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XII Международной конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. С. 204 – 208.
6. Парфенов А.А., Исхаков Ф.М., Рысс М.А. и др. Технология выплавки 90 %-ного ферросилиция с барием // Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1987. № 12 (1040). С. 35, 36.
7. Быстрова И.С., Баев А.И. Особенности силикотермического восстановления бария из его сульфата. – В кн.: Совершенствование технологии ферросплавов: Сб. науч. тр. НИИМ. – М.: Металлургия, 1981. С. 25 – 30.
8. Дерябин А.А., Павлов В.В., Могильный В.В. и др. Эффективность нанотехнологий модифицирования рельсовой стали барием // Сталь. 2007. № 11. С. 134 – 141.
9. Дерябин А.А., Берестов Е.Ю. О механизме модифицирования стали щелочноземельными металлами // Электрометаллургия. 2008. № 6. С. 35 – 38.
10. Черняк С.С., Ромен Б.М. Высокомарганцовистая сталь в драгостроении. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1996. – 377 с.
11. Ивакин В.Л., Черняк С.С., Пимнев Д.Ю. Новая технология повышения качества металлов и сплавов барийстронциевым карбонатом. – Иркутск: Изд-во Иркутского госуниверситета, 2004. – 123 с.
12. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
13. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Платонов М.А., Дмитриенко В.И. Восстановление бария и стронция в процессе обработки стали // Черные металлы: Руда и металлы. 2011. № 4. С. 29 – 31.
14. Нохрина О.И., Дмитриенко В.И., Рожихина И.Д., Платонов М.А. Использование карбоната для микролегирования стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 38 – 40.
15. Дмитриенко В.И., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Айзатулов Р.С., Платонов М.А. Исследование восстановления бария и стронция применительно к условиям внепечной обработки стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 27 – 29.

Поступила 23 июня 2014 г.

MODIFICATION OF STEEL BY BARIUM AND STRONTIUM

I.D. Rozhikhina¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy*

O.I. Nokhrina¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy* (kafamf@sibsiu.ru)

V.I. Dmitrienko¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy*

M.A. Platonov², *Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Ferrous Metallurgy*

¹**Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²**Yurga Technological Institute of National Research Tomsk Polytechnic University** (26, Lelingskaya str., Yurga, Kemerovo Region, 652000, Russia)

Abstract. The article is devoted to the steel modification process with natural materials containing barium and strontium. Using the methods of thermodynamic simulation, the authors considered the reduction process of barium and strontium with silicon and aluminum. The influence of steel treatment with barium-strontium modifiers on the structure formation and mechanical properties of steel has been studied. The research results have been implemented when smelting of steel of 25G2S and G13 grades in electric arc furnace at casting shop of OJSC “EVRAZ ZSMK”, as well as at OJSC “Yurginskii Machine-Engineering Plant” when smelting of steel of 35CrGSL, 30CrGSLFL, 12ND2FCr grades using the two-slag technology. The results analysis of the production experiments has shown that a barium-strontium modifier influences the microstructure and non-metallic inclusions, as well as provides the supply increase of structural strength of steel estimated by the values of yield point, strength and impact strength at the positive and negative temperatures. To reveal the presence of barium and strontium in steel the analysis of steel structure has been done, when using the extraction replica method with the usage of transmission electron diffraction microscopy. The presence of barium and strontium in the grain capacity indicates the interaction of these elements with metallic melt having a certain influence on the structure formation of a metallic matrix.

Keywords: barium, strontium, modification process, thermodynamic simulation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-871-876

REFERENCES

- 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, 1983. 272 p. (In Russ.).
- Kozhevnikov T.N., Zaiko V.P., Ryss M.A. *Elektrotermiya ligatur shchelochnozemel'nykh metallov s kremniem* [Electrothermics of additional alloys of alkaline-earth metals with silicon]. Moscow: Nauka, 1978. 224 p. (In Russ.).
- Grigor'ev Yu.V., Ryabchikov I.V., Roshchin V.E. Thermodynamic analysis of co-reduction of silicon and barium with carbon. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 7, pp. 3–5. (In Russ.).
- Parfenov A.A., Kashaev Yu.Ya., Skuratovich A.I. etc. Ferrosilicon production with barium – new high-performance modifier. In: *Povyshenie effektivnosti i kachestva ferrosplavov: Nauch. tr. NIIM* [Efficiency increase and ferroalloy quality: Scientific work of Research Institute of Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1986. pp. 13–18. (In Russ.).
- Grigor'ev Yu.V., Ryabchikov I.V., Roshchin V.E. Research of carbon-thermal smelting technology of silicon-barium from cobbled charge. In: *Sovremennyye problemy elektrometallurgii stali: Materialy XII Mezhduнародnoi konf.* [Modern problems of steel electro-metallurgy: Materials of XII International Conference]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2004, pp. 204–208. (In Russ.).
- Parfenov A.A., Iskhakov F.M., Ryss M.A. etc. Smelting process of 90 %-ferrosilicon with barium. *Chernaya metallurgiya. Byul. NTI*. 1987, no. 12 (1040), pp. 35–36. (In Russ.).
- Bystrova I.S., Baev A.I. Peculiarities of silicothermal reduction of barium from its sulphate. In: *Sovershenstvovanie tekhnologii ferrosplavov: sb. nauch. tr. NIIM* [Modern technologies of ferroalloys: collected scientific papers of Research Institute of Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 25–30. (In Russ.).
- Deryabin A.A., Pavlov V.V., Mogil'nyi V.V., Godik L.A., Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Gorkavenko V.V., Berestov E.Yu. Nanomodification of rail steel with barium. *Steel in translation*. 2007, vol. 37, no. 11, pp. 966–973.
- Deryabin A.A., Berestov E.Yu. On the steel modification mechanism with alkaline-earth metals. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 6, pp. 35–38. (In Russ.).
- Chernyak S.S., Romen B.M. *Vysokomargantsovistaya stal' v gradostroenii* [High-manganese steel in urban development]. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta, 1996. 377 p. (In Russ.).
- Ivakin V.L., Chernyak S.S., Pimnev D.Yu. *Novaya tekhnologiya povysheniya kachestva metallov i splavov bariistrontsiyevym karbonatom* [New technology of quality increase of metals and alloys by barium-strontium carbonate]. Irkutsk, 2004. 123 p. (In Russ.).
- Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems]. M.: Metallurgiya, 1994. 352 p. (In Russ.).
- Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Platonov M.A., Dmitrienko V.I. Barium and strontium reduction in steel treatment process. *Chernye metally: Ruda i metally*. 2011, no. 4, pp. 29–31. (In Russ.).
- Nokhrina O.I., Dmitrienko V.I., Rozhikhina I.D., Platonov M.A. Carbonatite application for steel microalloying. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 38–40. (In Russ.).
- Dmitrienko V.I., Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I., Aizatulov R.S., Platonov M.A. Study of barium and strontium recovery in relation to the conditions of out-of-furnace steel processing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 27–29. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science as the project part of the state task in the field of scientific research.

Received June 23, 2014