РАСКИСЛЯЮЩИЕ И МОДИФИЦИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В СОСТАВЕ СПЛАВОВ ФЕРРОАЛЮМОСИЛИКОКАЛЬЦИЯ И ФЕРРОСИЛИКОБАРИЯ

*А. Э. ИЛЬЯСОВ¹, научный сотрудник, hmi-2013@mail.ru; С. Н. ШАРКАЕВ¹, научный сотрудник;
А. Б. АХМЕТОВ¹, канд. техн. наук, заведующий лабораторией “Металлургия стали и материаловедение”;
Г. Д. КУСАИНОВА¹, научный сотрудник; В. И. ЯБЛОНСКИЙ², директор
(¹ Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;
² ТОО “Курылысмет” АО “АрселорМиттал Темиртау”, Республика Казахстан,
Карагандинская обл., г. Темиртау)*

Аннотация. Одним из перспективных направлений получения сплавов с мелкокристаллической структурой является их модифицирование, в частности кальцием и барием. Комплексные ферросплавы — ферроалюмосиликокальций и ферросиликобарий были разработаны в Химико-металлургическом институте им. Ж. Абишева. Показано, что модифицирование стали кремний-алюминиевыми комплексными сплавами, содержащими химически активные элементы — кальций и барий, должно стать одним из наиболее эффективных способов повышения качества машиностроительной металлопродукции.

Приведен химический состав ферроалюмосиликокальция и ферросиликобария. Определена область температуры плавления неметаллического соединения, образующегося при раскислении стали комплексным сплавом, содержащим кальций. Рассмотрены результаты механических испытаний образцов стали, модифицированной комплексным сплавом, содержащим барий. Осуществлено сравнение микроструктуры стали текущего производства и раскисленной комплексными сплавами.

В ходе металлографических исследований опытных образцов стали установлено модифицирующее влияние на морфологию неметаллических включений кальция и бария, подаваемых в комплексе со сплавами алюминия и кремния.

Обработка металла комплексными сплавами типа ферросиликоалюминия с кальцием (ФАСК) и ферросиликобария (ФСАБ) дает возможность достигать более высокой степени рафинирования от оксидных неметаллических включений и более равномерного их распределения в слитке.

Работа была проведена в кислородно-конвертерном цехе АО “АрселорМиттал Темиртау” в ковше емкостью 300 т и в дуговой печи ДСП-6 ТОО “Курылысмет”.

Результаты промышленных плавов стали указывают также на возможность повышения качества литья за счет сокращения горячих термических трещин и дефектов газосадочного характера, более чистых границ зерен, значительного уменьшения количества и размера карбидных включений.

Ключевые слова: комплексные ферросплавы; ферроалюмосиликокальций; ферросиликобарий; микроструктура; раскисление стали; модификатор; неметаллические включения.

Ссылка для цитирования. Ильясов А.Э., Шаркаев С.Н., Ахметов А.Б., Кусаинова Г.Д., Яблонский В.И. Раскисляющие и модифицирующие свойства щелочноземельных металлов в составе сплавов ферроалюмосиликокальция и ферросиликобария // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9. С. 58–64.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-9-58-64

Важным направлением развития металлургии стали является повышение качества выпускаемой металлопродукции при одновременном снижении ее себестоимости, так как современные металлоконструкции и их элементы часто подвержены сложным режимам эксплуатации. Решением данной проблемы является совершенствование процесса производства стали на каждом этапе металлургического передела.

Многочисленные исследования показали [1–10], что одним из основных факторов, влияющих на качество металлопродукции, является количество, свойства и распределение неметаллических включений в стали. Поэтому присутствие в ней нежелательных включений может не-

великовать все усилия, затраченные на разработку ее состава и технологию производства. Регулирование через изменение состава неметаллических включений количества и их распределения в стали, а также ее структуры является важным резервом гарантии качества стальных изделий.

В настоящее время для этих целей широкое распространение получили модификаторы, содержащие щелочноземельные металлы, такие как кальций и барий [11–20]. Однако эффективное использование кальция и бария затрудняется в связи с их высоким сродством к кислороду, при введении их в жидкий металл они сильно окисляются. Поэтому рациональнее ис-

пользовать их с элементами, активными к кислороду, такими как алюминий и кремний. В Химико-металлургическом институте им. Ж. Абишева разработаны и получены плавкой в рудно-термической печи комплексные сплавы — ферро-алюмосиликокальций (ФАСК) и ферросиликобарий (ФСАБ) (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ВЫПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ ФАСК И ФСАБ, %

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF SMELTED
ALLOYS FASC AND FSAB, %

Комплексный сплав	Al	Si	Ca	C	Fe	Ba
ФАСК	20	46	12	1	14	—
ФСАБ	15	55	—	—	—	8

С целью оценки раскисляющих и модифицирующих свойств лабораторией “Металлургия стали и материаловедение” проведены опытные плавки стали в дуговой печи ДСП-6 ТОО “Курлысмет” АО “АрселорМиттал Темиртау” и в кислородно-конвертерном цехе АО “Арселор-Миттал Темиртау”. При этом оценивалась роль элементов кальция и бария как модификаторов неметаллических включений и их влияние на количество и свойства неметаллических включений.

Расчетными исследованиями установлено, что при использовании для раскисления стали комплексного сплава ФАСК, содержащего в своем составе в дополнение к кремнию и алюминию кальций, образуется, согласно диаграмме $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, более легкоплавкое соединение (рис. 1) с температурой плавления около 300 °С. Оно обладает свойством к быстрой коагуляции и образованию включений весьма благоприятной морфологии и формы — крупной

глобули, легко всплывающей из стали на ее поверхность.

Рис. 1. Область температуры плавления неметаллического соединения, образующегося при раскислении стали сплавом ФАСК (выделено на рисунке)

Fig. 1. The melting range of the nonmetallic compound formed at deoxidizing of steel by FASC alloy (highlighted in the figure)

Исследование неметаллических включений в стали 110Г13Л текущего производства показало, что неметаллические включения в стали, раскисленной стандартными алюминием и ферросилицием, не содержащими кальций и барий, представлены множеством включений оксидов алюминия Al_2O_3 остроугольной формы, а также сульфидов железа $(\text{Fe, Mn})\text{S}$, расположенных неравномерно в виде скоплений (рис. 2). Загрязненность неметаллическими включениями составила 4 балла, почти максимальное значение согласно ГОСТ 1778–70.

Рис. 2. Неметаллические включения в стали 110Г13Л, раскисленной без модификаторов

Fig. 2. Non-metallic inclusions in steel grades 110G13L, deoxidized without modifiers

В образцах стали 110Г13Л, раскисленной с применением ФАСК, продуктами раскисления являются комплексные включения алюминатов кальция ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Неметаллические включения сферической формы распределены равномерно, уменьшились их размер и количество, включения приобрели благоприятную глобулярную форму (рис. 3). Сульфиды в литом металле не обнаружены. Загрязненность неметаллическими включениями составила 2,5 балла.

Рис. 3. Неметаллические включения в стали 110Г13Л, раскисленной и модифицированной сплавом ФАСК

Fig. 3. Non-metallic inclusions in steel grades 110G13L, deoxidized and modified by alloy FASC

Для определения влияния модификаторов на микроструктуру металла в лабораторных условиях произведена термообработка текущего и опытного образцов литого металла 110Г13Л. Термообработку сталей проводили в электрической печи СНОЛ-1,6. Образцы сталей 110Г13Л были нагреты в электрической печи до температуры 1050 °С и после выдержки в печи в течение 30 мин подверглись закалке в воду. Образцы были подготовлены для металлографических исследований по стандартной методике изготовления шлифов с применением автоматического шлифовально-полировального станка EcoMet 250/300. Микроструктура образцов представлена на рис. 4 и 5. Размер зерна составил 2–3 балла.

Как видно из рис. 4, сталь текущего производства 110Г13Л имеет крупнозернистое строение и состоит из аустенита, избыточные карбиды (Fe , Mn)₃C выделились по границам зерен и внутри зерна. Известно, что выделение избыточных карбидов по границам зерен снижает межзеренную прочность и приводит к образованию горячих трещин с разрушением отливок при кристаллизации и эксплуатации.

Структура опытного образца стали 110Г13Л, раскисленной ФАСК, после термообработки отличается от стали текущей плавки более чис-

тыми границами зерен, количество и размер карбидных включений значительно уменьшились. Размер зерна стали меньше и составил 4–5 баллов по сравнению с 2–3 баллами в немодифицированной стали (см. рис. 5).

Рис. 4. Микроструктура стали 110Г13Л, раскисленной без сплавов с модификаторами

Fig. 4. Microstructure of steel grades 110G13L, deoxidized without alloys with modifiers

Рис. 5. Микроструктура опытной стали 110Г13Л, раскисленной сплавом ФАСК

Fig. 5. Microstructure of the experimental steel grade 110G13L, deoxidized by alloy FASC

Согласно исследованиям качества отливок промышленных испытаний раскисление стали сплавом ФАСК позволило снизить брак по поверхностным трещинам на 5–8 %.

Опытная партия ФСАБ была поставлена в кислородно-конвертерный цех АО «АрселорМиттал Темиртау», с ее применением было проведено три плавки стали 09Г2С. Сплав содержал в своем составе: 55 % Si; 5 % Al; 8 % Ba (см. табл. 1). Целью испытаний было исследовать раскисляющую и

модифицирующую роль комплексного сплава ФСАБ, содержащего щелочноземельный металл барий.

Раскислитель подавался в ковш емкостью 300 т на выпуске под струю выпускаемой стали. Из опытной стали отбирались пробы для анализа химического состава и металлографических исследований. Сталь разливалась на слитки по 18 т для прокатки на слябинге. При разливке ни на одной плавке не было затягивания стаканов (выпускных отверстий ковшей) глиноземом (Al_2O_3), что часто отмечалось на сравнительных плавках. Затягивание стаканов глиноземом вызывается его тугоплавкостью и, соответственно, ранней кристаллизацией. Наблюдаемое при использовании ФСАБ отсутствие случаев затягивания стаканов указывает на то, что, вероятно, глинозем максимально удален в составе продуктов раскисления с барием либо образует с ним легкоплавкие алюминаты, не затягивающие стаканы.

Химический состав сталей, раскисленных ФСАБ, всех трех плавков соответствовал требованиям ГОСТ 19281–2014 для стали 09Г2С (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОПЫТНОЙ СТАЛИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФСАБ, %

TABLE 2. CHEMICAL COMPOSITION OF THE EXPERIMENTAL STEEL MODIFIED BY FSAB ALLOY, %

Номер плавки	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti
1	0,099	1,50	0,61	0,014	0,022	0,035	0,013
2	0,100	1,55	0,60	0,013	0,021	0,032	0,015
3	0,980	1,52	0,65	0,013	0,020	0,038	0,014

Как видно из табл. 2, во всех трех плавках получены стабильно высокие содержания алюминия и марганца, свидетельствующие о глубокой раскисленности металла. Особое внимание вызывают низкие концентрации серы (0,013–0,014 %), возможно, вследствие десульфуризирующего свойства бария или меньшего количества неметаллических сульфидных включений.

При металлографическом анализе проката корунд и окисьюльфиды представлены в виде мелких, дезориентированных по шлифу включений балльностью, не превышающей 2а (рис. 6).

а

б

Рис. 6. Неметаллические включения в сравниваемых образцах стали:

а — корунд в стали, раскисленной АВ87 и ФС65, $\times 100$; б — комплексные оксиды в стали, раскисленной ФСАБ, $\times 100$

Fig. 6. Non-metallic inclusions in the compared steel samples:

а — corundum in steel, deoxidized by AB87 and FS65 alloys, $\times 100$; б — complex oxides in steel, deoxidized by FSAB alloy, $\times 100$

Металлографическим анализом не обнаружены крупные включения и включения неблагоприятного распределения, характерные для стали, раскисленной ферросилицием ФС65 и алюминием АВ87. Как видно из шлифов опытной стали, раскисление барийсодержащим комплексным сплавом позволяет подтвердить модифицирующее влияние бария на неметалличе-

ские включения. Равномерное точечное их распределение по срезу металла значительно повышает его качество и служебные характеристики.

Механические испытания подтвердили высокие механические свойства образцов опытной стали (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СТАЛИ 09Г2С, РАСКИСЛЕННОЙ ФСАБ

TABLE 3. THE RESULTS OF MECHANICAL TESTING OF THE 09G2S STEEL DEOXIDIZED BY FSAB ALLOY

Номер плавки (толщина образцов 6 мм)	Механические свойства					
	ударная вязкость, Дж/м ²			временное сопротивление σ_b , МПа	предел текучести σ_t , МПа	относительное удлинение δ_s , %
	+20	-40	-70			
1	85,20	90,40	71,7	629	510	35,0
2	81,21	98,25	69,9	615	450	37,5
3	89,56	92,50	75,3	595	498	36,7

Таким образом, результаты проведенных трех плавов конвертерной стали 09Г2С с использованием ФСАБ показали высокую эффективность этого сплава по первичным признакам. Определенный расчетным путем и по данным промышленных испытаний раскисления стали ФСАБ состав сплава, содержащего 8–10 % Ва, по первым результатам испытаний достаточно оптимален

для его применения.

Металлографические исследования качества стального литья, выплавленного в дуговой сталеплавильной печи ДСП-6 из сталей 35ХМ, 110Г13Л, 40Х, показали, что присадки ФСАБ существенно изменяют природу и характер неметаллических включений (рис. 7).

Рис. 7. Неметаллические включения в стали, раскисленной ФСАБ:

а — 35ХМ; б — 110Г13Л; в — 40Х, $\times 100$

Fig. 7. Non-metallic inclusions in steel, deoxidized by FSAB alloy:

а — 35KhM; б — 110G13L; в — 40X, $\times 100$

При этом произошло значительное измельчение и снижение в 1,5–2 раза количества включений за счет уменьшения количества самостоятельных неметаллических включений, вероятно, вследствие образования и эффективного удаления сложных включений, имеющих округлую

форму, и равномерного рассредоточения по всей поверхности шлифа. Как видно из рис. 7, включения представлены в виде мелких дезориентированных оксидов (корунд) с превалированием отдельных мелких включений сульфидов и силикатов более благоприятного характера.

Выводы

Щелочноземельные элементы в составе комплексных кремний-алюминиевых раскислителей придают образующимся продуктам раскисления — оксидным неметаллическим включениям, легкоплавкость, более благоприятную форму и свойства к быстрой коагуляции.

Опытные плавки сталей показали, что применение сплавов ФАСК и ФСАБ взамен обычных раскислителей обеспечивало получение стали с высокими механическими свойствами, обеспечивая чистоту по неметаллическим включениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
2. Тюрин А.Г., Михайлов Г.Г. О комплексном раскислении стали // Вопросы производства и обработки стали: Сб. научн. тр./ЧПИ. — Челябинск: Южно-Уральское книжн. изд-во. 1978. Вып. 202. С. 18–24.

3. Справочник химика 21. Химия и химическая технология [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://chem21.info/map/> (Дата обращения 23.08.2018 г.).
4. Голубцов В., Тихонов Л., Тазетдинов В. и др. Рациональная технология модифицирования стали // Национальная металлургия. 2003. № 3. С. 96–102.
5. Российский сайт литейщиков [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: http://rsl.npp.ru/articles/steel/Modifitsirovanie-stali/article_249.html (Дата обращения 23.08.2018 г.).
6. Шульга А.В. Структура и свойства быстрозакаленных нержавеющей сталей // Сб. трудов “Научная сессия МИФИ – 2001”. — М., 2001. Т. 9. С. 79–80.
7. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. — М.: Металлургия, 1987. — 176 с.
8. Морозов А.Н. Внепечное вакуумирование стали. — М.: Металлургия, 1975. — 288 с.
9. Жарменов А.А., Толымбеков М.Ж., Чекимбаев А.Ф. Испытания сплава ферросиликоалюминий при выплавке стали в 250-и тонной электропечи завода Çolakoğlu Metallurgy Inc., Турция // Абишевские чтения-2011. С. 425, 426.
10. Голубцов В.А., Воронин А.А., Тетюева Т.В. и др. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла // Металлург. 2005. № 4. С. 73–77.
11. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Лякишев Н.П., Дубровин А.С. Ферросплавы с редкоземельными и щелочноземельными металлами. — М.: Металлургия, 1983. — 272 с.
12. Кириленко В.П., Югов П.И., Журавлев В.М. и др. Раскисление и модифицирование конвертерной стали барием // Металлург. 1989. № 10. С. 33.
13. Скок Ю.Я., Мовчан М.Б., Алымов А.А. Модифицирование неметаллических включений в стали 17ГС // Сталь. 1983. № 8. С. 63–66.
14. Ахметов А.Б., Кусаинова Г.Д., Кусжанова А.А. и др. Влияние модифицирования кальцием на структуру стали Гадфильда и морфологию образующихся в ней неметаллических включений // Электрометаллургия. 2017. № 3. С. 8–12.
15. Ицкович Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. — М.: Металлургия, 1981. — 296 с.
16. Зинченко В.Г., Судоргин И.В. Внепечная обработка валковой стали комплексными модификаторами // Современные проблемы электрометаллургии стали. — Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2004. С. 127–128.
17. Гизатулин Р.А., Дмитриенко В.И. Внепечные и ковшовые процессы обработки стали. — Новокузнецк, 2006. — 181 с.
18. Ильясов А.Э., Ахметов А.Б., Кусаинова Г.Д. и др. Оценка влияния кальция на морфологию неметаллических включений в литой стали // Инновации в комплексной переработке минерального сырья: материалы Междунар. научно-практ. конф., посвященной 80-летию лауреата Государственной премии Республики Казахстан, академика Жанторе Нурлановича Абишева и 60-летию дважды лауреата Государственной премии Республики Казахстан, академика Абдурасула Алдашевича Жарменова. — Алматы, 2016. С. 448–453.
19. Шуб Л.Г. Рекомендации по модифицированию стали // Сб. докладов Литейного консилиума № 2 “Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из черных сплавов”. — Челябинск: Челябинский Дом печати, 2007. — С. 120.
20. Коваленко С.В., Кучкин В.И., Коваленко В.С. Влияние металлического кальция и бария на дендритную структуру и неметаллические включения стали 20Л // Изв. вузов. Черная металлургия. 1990. № 12. С. 47–49.

DEOXIDIZING AND MODIFYING PROPERTIES OF ALKALINE EARTH METALS WITHIN FERROALUMOSILICOCALCIUM AND FERROSILICOBARIUM ALLOYS

*A. E. IL'YASOV¹, Research assistant, hmi-2013@mail.ru; S. N. SHARKAEV¹, Research assistant;
A. B. AKHMETOV¹, PhD (Tech), Head of Laboratory “Metallurgy of steel and metal science”;
G. D. KUSAINOVA¹, Research assistant; V. I. YABLONSKY², Director
(¹ Chemical and metallurgical Institute after Zh. Abishev, Kazakhstan, Karaganda;
² SLL “Kurylysmet” JSC “ArcelorMittal Temirtau”, Kazakhstan, Karaganda rgn., Temirtau)*

Abstract. Modification of alloys, in particular, by calcium and barium, is one of the promising directions for obtaining alloys with a fine crystalline structure. Complex ferroalloys – ferroalumosilicocalcium and ferrosilicobarium – were developed in the Chemical and Metallurgical Institute after Zh. Abishev. It was shown, that modification of steel by silicon-aluminum complex alloys containing chemically active elements – calcium and barium, should become one of the most effective methods to improve the quality of machine-building metal products.

The chemical compositions of the smelted ferroaluminosiliconcalcium and ferrosilicobarium presented. The melting range of the nonmetallic compound formed during the deoxidation of steel by complex alloy containing calcium determined. Results of mechanical tests of the specimens of steel, modified by a complex alloy containing barium considered. A comparison of microstructure of the current production route steel and deoxidized with the complex alloys was carried out.

In the course of metallographic studies of experimental steel specimens, a modifying influence on the morphology of nonmetallic inclusions by calcium and barium, supplied in a complex with aluminum and silicon alloys, was established.

Metal processing by complex alloys such as ferrosilicoaluminum with calcium (FASC) and ferrosilicobarium (FSAB) indicates the possibility of achieving a higher degree of refining from oxide nonmetallic inclusions and a more even distribution of them in the ingot.

The results of the industrial heats also indicated a possibility of improving of quality of casting through the decreasing of hot thermal cracks and gas-shrinkage defects, cleaner grain boundaries, a significant reduction in the number and size of carbide inclusions.

Keywords: complex ferroalloys; ferroaluminosilicocalcium; ferrosilicobarium; microstructure; steel deoxidation; modifier; nonmetallic inclusions.

For citation: 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. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = 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

REFERENCES

1. Gol'dshtejn Ya.E., Mizin V.G. *Modificirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modification and microalloying of cast iron and steel]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russ.).
2. Tyurin A.G., Mixajlov G.G. [On the complex deoxidation of steel]. *Voprosy' proizvodstva i obrabotki stali: Sb. nauchn. tr./ChPI* [Questions of the production and processing of steel: Collection of scientific works]. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhn. izd-vo, 1978, no. 202, pp. 18–24. (In Russ.).
3. *Spravochnik ximika 21. Ximiya i ximicheskaya texnologiya* [Reference book of a chemist 21. Chemistry and Chemical Technology]. Electronic resource. Available at URL: <http://chem21.info/map/> (Accessed 23.08.2018).
4. Golubczov V., Tixonov L., Tazetdinov V., Voronin A., Romancev I. Rational technology of steel modification. *Nacional'naya metallurgiya*, 2003, no. 3, pp. 96–102. (In Russ.).
5. *Rossijskij sajt litejshhikov* [Russian foundry people site]. Electronic resource. Available at URL: http://rsl.npp.ru/articles/steel/Modifitsirovanie-stali/article_249.html (Accessed 23.08.2018).
6. Shul'ga A.V. [Structure and properties of rapidly quenched stainless steels]. *Sb. trudov "Nauchnaya sessiya MIFI – 2001"* [Collection of proceedings "Scientific session of MEFPI – 2001"]. Moscow, 2001, vol. 9, pp. 79–80. (In Russ.).
7. Morozov A.N. *Sovremennoe proizvodstvo stali v dugovy'x pechax* [Up-to-date steel production in arc furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 176 p. (In Russ.).
8. Morozov A.N. *Vnepechnoe vakuumirovanie stali* [Ladle vacuum treatment of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 288 p. (In Russ.).
9. Zharmenov A.A., Toly'mbekov M.Zh., Chekimbaev A.F. [Testing of ferrosilico-aluminum alloy during steel smelting in 250-ton electric furnace of Çolakoğlu Metallurgy Inc., Turkey]. *Abishevskie chteniya-2011* [Abishev Readings-2011]. 2011, pp. 425, 426. (In Russ.).
10. Golubczov V.A., Voronin A.A., Tetyueva T.V., Roshhin V.E., Usmanov R.G. The origin of nonmetallic inclusions and ways to reduce the pollution by them of a metal. *Metallurg*, 2005, no. 4, pp. 73–77. (In Russ.).
11. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Lyakishev N.P., Dubrovin A.S. *Ferrosplavy' s redkozemel'ny'mi i shhelochnozemel'ny'mi metallami* [Ferroalloys with rare-earth and alkaline-earth metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 272 p. (In Russ.).
12. Kirilenko V.P., Yugov P.I., Zhuravlev V.M., Pozhivanov M.A., Mel'nik S.G. Deoxidation and modification of converter steel by barium. *Metallurg*, 1989, no. 10, pp. 33. (In Russ.).
13. Skok Yu.Ya., Movchan M.B., Aly'mov A.A. Modification of nonmetallic inclusions in 17GS steel. *Stal'*, 1983, no. 8, pp. 63–66. (In Russ.).
14. Axmetov A.B., Kusainova G.D., Kuzhanova A.A., Il'yasov A.E., Sharkaev S.N. Influence of calcium modification on the structure of Hadfield's steel and the morphology of nonmetallic inclusions formed in it. *E'lektrometallurgiya*, 2017, no. 3, pp. 8–12. (In Russ.).
15. Iczkovich G.M. *Raskislenie stali i modificirovanie nemetallicheskich vklyuchenij* [Steel deoxidation and modification of non-metallic inclusions]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 296 p. (In Russ.).
16. Zinchenko V.G., Sudorgin I.V. [Ladle treatment of roller steel by complex modifiers]. *Sovremennyy'e problemy' e'lektrometallurgii stali: materialy' XII Mezhdunarodnoj konferencii* [Modern problems of electrometallurgy steel: materials of the XII th International Conference]. Chelyabinsk: izd-vo YuUrGU, 2004, pp. 127–128. (In Russ.).
17. Gizatulin R.A., Dmitrienko V.I. *Vnepechnyy'e i kovshovy'e processy' obrabotki stali* [Ladle treatment processes of steel processing]. Novokuznetsk: SibGIU, 2006, 181 p. (In Russ.).
18. Il'yasov A.E., Axmetov A.B., Kusainova G.D., Omarov M.X., Kuzhanova A.A., Karsenbekova L.A., Shinbaeva U.B. [Evaluation of the influence of calcium on morphology of nonmetallic inclusions in cast steel]. *Innovacii v kompleksnoj pererabotke mineral'nogo sy'r'ya: materialy' Mezhdunar. nauchno-prakt. konf., posvyashhennoj 80-letiyu Laureata Gosudarstvennoj premii Respubliki Kazaxstan, akademika Zhantore Nurlanovicha Abisheva i 60-letiyu dvazhdy' Laureata Gosudarstvennoj premii Respubliki Kazaxstan, akademika Abdurasula Aldashevicha Zharmenova* [Innovations in complex processing of mineral raw materials: materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the State Prize Laureate of the Republic of Kazakhstan, academician Zhantor Nurlanovich Abishev and the 60th anniversary of the two-times State Prize Laureate of the Republic of Kazakhstan, academician Abdurasul Aldashevich Zhar-menov]. Almaty, 2016, pp. 448–453. (In Russ.).
19. Shub L.G. *Rekomendacii po modificirovaniyu stali* [Recommendations on the modification of steel]. *Sb. dokladov Litejnogo konsiliuma № 2 "Teoriya i praktika metallurgicheskix processov pri proizvodstve otlivok iz cherny'x splavov"* [Collection of reports of the Foundry Council No. 2 "Theory and Practice of Metallurgical Processes in the Production of Castings from Black Alloys"]. Chelyabinsk: Chelyabinskij Dom pečati, 2007, 120 p. (In Russ.).
20. Kovalenko S.V., Kuchkin V.I., Kovalenko V.S. The influence of metallic calcium and barium on the dendritic structure and nonmetallic inclusions of 20L steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1990, no. 12, pp. 47–49. (In Russ.).