

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1085)

5.2022



ВЕЧНАЯ СЛАВА
ПАВШИМ ГЕРОЯМ

С праздником
Победы!

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 5 (1085), май 2022 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь),
А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Редактор: Э. Э. Бабали

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617

почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 5 (1085), май 2022 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 09.06.2022. Формат 60x90/8.

Печ. л. 10,5. Офсетная печать. Бумага офсетная.

Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

Подписные индексы:

12985 («Пресса России»)

СОДЕРЖАНИЕ

30 лет Новотроицкому филиалу НИТУ «МИСиС»

<i>Д. Р. Ганин, А. А. Панычев, А. Ю. Фукс.</i> Новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья	4
<i>Г. А. Куницын, М. С. Кузнецов, А. Н. Шаповалов, И. В. Бакин.</i> Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям	9
<i>А. А. Токарев, А. В. Каляскин, А. В. Бархатов, Е. В. Братковский.</i> Совершенствование технологии позднего графитизирующего модифицирования при производстве тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна	16
<i>А. В. Нефедов, А. А. Китанов, Н. А. Чиченев.</i> Реинжиниринг роликовой закалочной машины листопрокатного цеха АО «Уральская Сталь»	22
<i>Д. А. Болдырев, С. П. Нефедьев, М. В. Харченко, Р. Р. Дема.</i> Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе «диск – колодка»	27
<i>А. В. Цуканов, К. В. Лицин, С. Н. Басков.</i> Разработка системы управления асинхронным электродвигателем на основе адаптивной модели в условиях листопрокатного производства	34

Подготовка сырьевых материалов

<i>А. Б. Лебедев, П. В. Мусинова.</i> Формирование прочности окомкованного многофазного спека двухкальциевого силиката	40
--	----

Прокатка

<i>В. А. Пименов.</i> Анализ влияния технологических режимов и состояния оборудования на возникновение вибраций при непрерывной холодной прокатке	47
<i>Д. Ю. Алексеев, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалеева, А. С. Кузнецова.</i> Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки	55

Нанесение покрытий и защита от коррозии

<i>Д. Д. Фазуллин, Г. В. Маврин, Л. И. Фазуллина, И. Г. Шайхиев, Н. М. Лядов.</i> Ингибиторы коррозии стали на основе растительного сырья для защиты нефтепромыслового оборудования	61
---	----

Сварка и наплавка

<i>М. А. Шекшеев, С. В. Михайлицын, А. Б. Сычков, А. Н. Емелюшин.</i> Исследование влияния шлаковой системы покрытых электродов на эффективность инокулирования металла сварочной ванны низкоуглеродистой стали.	68
--	----

Машиностроительные технологии

<i>А. Н. Малышев, С. А. Бысов, В. Д. Кухарь, Ю. В. Бессмертная.</i> Экспериментальное исследование вытяжки стальных квадратных коробок по схеме круг-квадрат в радиальной и конической матрицах	74
---	----

Технологические измерения

<i>А. Д. Гусев, И. В. Тихонова, Я. А. Стаханова.</i> Применение нейронных сетей для прогнозирования измерения микротвердости в зоне термического влияния листов углеродистых и низколегированных сталей после лазерной резки.	79
---	----

Юбилей

Леониду Николаевичу Шевелеву — 85 лет	84
---	----

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)

(по версии SCIMAGO)

Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям

Г. А. Куницын, технический директор¹, докт. техн. наук, эл. почта: g.kunitsyn@uralsteel.com

М. С. Кузнецов, начальник отдела¹, канд. техн. наук, эл. почта: m.kuznetsov@uralsteel.com

А. Н. Шаповалов, заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования², доцент, канд. техн. наук, эл. почта: alshapo@misis.ru

И. В. Бакин, начальник отдела инноваций, модернизации и технического развития³, эл. почта: igor.npp.bakin@gmail.com

¹АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

²Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

³ООО НПП «Технология», Челябинск, Россия.

Внепечная обработка стали кальцийсодержащими порошковыми проволоками является неотъемлемой частью современной технологии производства. Однако применение только силикокальция и алюминия не всегда позволяет изменять в нужном направлении морфологию неметаллических включений (НВ) и создавать условия для их удаления из жидкого металла.

Представлены результаты опытно-промышленного эксперимента по производству стали с повышенными требованиями к НВ, в ходе которого при внепечной обработке вместо стандартной проволоки с силикокальцием марки СК40 применяли порошковую проволоку с комплексными наполнителями, содержащими, кроме кальция, такие щелочноземельные металлы, как барий и стронций.

Установлено, что замена силикокальция на опытные варианты модификаторов обеспечила снижение максимального балла загрязненности листового проката по силикатам хрупким (СХ) с 4,0 до 1,5–2,5. Максимальная загрязненность листового проката по силикатам недеформирующимся (СН) снизилась с 4,0 баллов по стандартной технологии до 3,0–3,5 баллов при использовании опытных микрокристаллических модификаторов.

Результатом снижения загрязненности стали НВ при применении опытных модификатором стало улучшение основных физических свойств металлопроката. Замена силикокальция на опытные модификаторы привела к улучшению прочностных свойств проката как при статических испытаниях на растяжение, так и при динамических испытаниях на ударный изгиб при пониженных температурах. Указанное влияние наблюдалось при всех расходах опытных модификаторов. При этом с увеличением расхода модификаторов положительное влияние на механические свойства стали, как правило, усиливалось.

Ключевые слова: трубная сталь, ковшевая обработка, неметаллические включения, силикаты недеформирующиеся, модифицирование стали, силикокальций, микрокристаллические комплексные модификаторы.

DOI: 10.17580/chm.2022.05.02

Введение

Требования к качеству и эксплуатационным характеристикам металлопродукции постоянно ужесточаются. Поэтому для ряда марок сталей, в том числе трубных, занимающих значимое место в сортаменте сталеплавильной продукции АО «Уральская Сталь», предъявляют повышенные требования к содержанию неметаллических включений (НВ). Допустимая загрязненность НВ при выполнении отдельных заказов трубных марок стали (по ГОСТ 1778–70 [1]) составляет: оксиды, сульфиды и силикаты — не более 2,5 балла по среднему баллу и не более 3,0 балла по максимальному; силикаты недеформирующиеся — не более 3,0 по среднему баллу и 3,5 по максимальному.

По действующей в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) АО «Уральская Сталь» технологии при внепечной

обработке трубных сталей применяют порошковую проволоку с силикокальциевым наполнителем марки СК40. При этом достигаемые показатели качества сталей по загрязненности различными видами НВ не всегда удовлетворяют целевым показателям. Основные несоответствия по микроструктуре листового проката из трубных марок сталей наблюдаются по силикатам недеформирующимся, загрязненность металла по которым составляет в среднем 2,5 балла, достигая 4,5 баллов по максимальным значениям. В реальности эти НВ представляют собой алюминаты кальция сложного состава, поэтому для уменьшения их размеров и числа необходимо совершенствование технологии ковшевой обработки.

Одним из эффективных способов управления составом, свойствами и поведением НВ, является модифицирование

Таблица 1

Состав модификаторов (наполнителей), применяемых в ходе проведения экспериментов

Наполнитель	Содержание, %					
	Mg	Al	Si	Ca	Ba	Sr
СК40	–	1,0	42,2	39,9	–	–
INSTEEL®1.5	0,1	1,0	36,5	31,2	22,8	–
INSTEEL®9.4	0,1	1,1	46,8	18,4	10,4	11,2

стали поверхностно-активными элементами — магнием, кальцием, барием, редкоземельными металлами и др. Внепечная обработка стали кальцийсодержащими порошковыми проволоками является неотъемлемой частью современной технологии производства [2–7]. Однако использование только кальция и алюминия не всегда обеспечивает изменение в нужном направлении морфологии НВ [8–13] и создание условий для удаления их из жидкого металла. Поэтому перспективным направлением повышения качества металлопродукции является использование для модифицирования НВ комплексных щелочноземельных сплавов, содержащих, кроме кальция, и другие щелочноземельные металлы (ЩЗМ) [14–18], такие как барий и стронций. Применение бария [19, 20] и стронция [16–18, 21] для модифицирования НВ давно известно, однако в вопросе эффективности использования комплексных лигатур остаются пробелы.

Целью настоящей работы является разработка комплекса технологических рекомендаций по ковшевой обработке стали, обеспечивающих производство листового проката с загрязненностью силикатами недеформирующимися (по максимальному баллу) не более 3,5 балла при использовании комплексных микрокристаллических модификаторов.

Методика исследования

С целью определения возможности снижения загрязненности металла НВ, в первую очередь по силикатам недеформирующимся, был спланирован и проведен опытно-промышленный эксперимент по производству стали с повышенными требованиями к НВ, в ходе которого при внепечной обработке вместо стандартной проволоки с силикокальцием марки СК40 применяли порошковую проволоку с комплексными Ca–Ba–Sr наполнителями. Химический состав наполнителей представлен в **табл. 1**.

Выбор вариантов опытных модификаторов был основан на изучении положительного опыта их применения для модифицирования стали в различных производственных условиях [14, 15], в том числе и в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» [22, 23].

Программа опытно-промышленного эксперимента предусматривала проведение не менее 20 плавов с каждым видом модификатора. Выплавку и внепечную обработку сравнительных и опытных плавов проводили в соответствии с действующими технологическими инструкциями по схеме гибкая модульная печь (ГМП) – агрегат ковш-печь (АКП) –

установка вакуумирования стали (УВС) – установка непрерывной разливки стали (УНРС). Модифицирование стали проводили на УВС после завершения вакуумирования. Расход модификаторов на опытных плавках изменяли в диапазоне 80–100 % (от сравнительного варианта с СК40) по сумме ЩЗМ.

Отбор проб и оценку загрязненности стали НВ проводили по ГОСТ 1778–70 (метод Ш6) [1]. Микроспектральный анализ и оценку НВ в листовом прокате из стали опытных и сравнительных плавов осуществляли при помощи растрового электронного микроскопа JSM-6490LV в комплекте с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 250 при увеличении $\times 200$ (количество оцененных полей зрения в образце 30 ед.).

Результаты исследования и их обсуждение

Опытно-промышленные эксперименты по производству листового проката с использованием комплексных модификаторов серии INSTEEL в виде порошковой проволоки проводили с 14 по 31 октября 2021 г. на плавках стали класса прочности К52–К60.

Данные по основным параметрам модифицирования и маркировочному составу стали на сравнительных и опытных плавках по различным вариантам представлены в **табл. 2 и 3**.

Из данных табл. 2 следует, что расход модификатора INSTEEL®1.5 по различным вариантам обеспечил введение ЩЗМ от 82 % (вариант 1) до 103 % (вариант 3) от базовой технологии с использованием СК40, а при использовании модификатора INSTEEL®9.4 количество поступающих с проволокой ЩЗМ изменялось по вариантам от 79 до 90 %.

Химический состав стали сравнительных и опытных плавов по основным элементам сопоставим (см. табл. 3). Разливку стали опытных и сравнительных плавов проводили на слябовой УНРС по стандартной технологии при регламентируемых температурно-скоростных параметрах для получения слябовой заготовки сечением 220×1240 мм с последующей прокаткой в листопрокатном цехе № 1 на лист толщиной от 10 до 20 мм. Нарушений при разливке и прокатке стали сравнительных и опытных плавов выявлено не было. Указанные обстоятельства позволяют проводить объективный сравнительный анализ эффективности различных опытных вариантов модифицирования стали.

Результаты загрязненности НВ листового проката, полученного из слябовых заготовок от сравнительных и опытных плавов, проведенных по различным вариантам, представлены в **табл. 4**.

Данные оценки НВ (см. табл. 4) позволяют сделать следующие выводы:

- замена силикокальция на опытные варианты модификаторов обеспечила снижение максимального балла по силикатам хрупким (СХ) с 4,0 до 1,5–2,5;
- максимальная загрязненность по силикатам недеформирующимся (СН) снизилась с 4,0 баллов по стандартной технологии до 3,5 баллов при использовании модификаторов INSTEEL®9.4 по вариантам 1 и 2 и до 3,0 баллов

Таблица 2

Усредненные параметры модифицирования стали в период проведения опытно-промышленного эксперимента

Модификатор	Вариант	Число плавов, ед.	Значение параметров модифицирования (на плавку)			
			расход, м	расход наполнителя, кг	поступление Са, кг	поступление ЩЗМ, кг
СК40	Действующая технология	24	147,0	37,8	15,1	15,1
INSTEEL®1.5	1	6	104,0	23,1	7,2	12,5
	2	15	113,0	25,1	7,8	13,5
	3	4	130,0	28,9	9,0	15,6
INSTEEL®9.4	1	7	123,0	30,0	5,5	12,0
	2	9	131,0	32,0	5,9	12,8
	3	6	140,0	34,2	6,3	13,7

Примечание: масса плавки 120 т.

Таблица 3

Маркировочный состав анализируемых плавов сталей, микролегированных ниобием и ванадием, %

Элемент	Модификатор					
	СК40		INSTEEL®1.5		INSTEEL®9.4	
	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее
C	0,07–0,11	0,09	0,08–0,12	0,09	0,07–0,13	0,08
Si	0,25–0,40	0,36	0,25–0,40	0,36	0,30–0,50	0,38
Mn	1,45–1,65	1,56	1,50–1,70	1,57	1,45–1,60	1,53
P	0,005–0,015	0,010	0,005–0,015	0,011	0,005–0,015	0,010
S	0,002–0,005	0,002	0,002–0,003	0,002	0,001–0,003	0,002
Ti	0,004–0,035	0,015	0,004–0,025	0,014	0,004–0,020	0,015
Al	0,025–0,055	0,040	0,020–0,050	0,036	0,030–0,050	0,039
N	0,004–0,010	0,007	0,004–0,010	0,007	0,004–0,009	0,007
Ca, ppm	8–15	11	7–13	10	8–14	11
H, ppm	1,6–4,2	2,4	1,6–3,3	2,3	1,7–4,3	2,5

при применении модификатора INSTEEL®1.5 по вариантам 2 и 3, а также при максимальном расходе модификатора INSTEEL®9.4 (вариант 3);

- загрязненность НВ по среднему баллу не изменилась.

Отклонения от целевого уровня НВ на опытных и сравнительных плавках выявили:

- по СХ (более 3 балла) — на трех сравнительных плавках;

- по СН (более 3,5 балла) — на двух сравнительных и одной опытной плавках с использованием модификатора INSTEEL®1.5 с минимальным расходом (вариант 1).

Таким образом, для гарантированного получения толстолистового проката с максимальной загрязненностью по силикатам недеформирующимся, не превышающей 3,5 балла, можно рекомендовать применение:

- модификатора INSTEEL®1.5 с расходом не менее 25 кг наполнителя на плавку (не менее 113 м при наполнении 222 г/м), что соответствует введению не менее 13,5 кг кальция и бария (на плавку);

- модификатора INSTEEL®9.4 с расходом не менее 34 кг наполнителя на плавку (не менее 140 м при наполнении 244 г/м), что соответствует введению не менее 13,7 кг кальция, бария и стронция (на плавку).

Кроме снижения загрязненности стали силикатами недеформирующимися по максимальному баллу, применение опытных модификаторов с рекомендованными расходами (вместо силикокальция) позволило снизить уровень загрязненности проката по силикатам хрупким.

Исследование оксидных НВ, классифицированных как силикаты недеформирующиеся, на электронном микроскопе JSM-6490LV с микрорентгеноспектральным энергодисперсионным анализатором INCA Energy 250 показало, что данные включения в металлопрокате сравнительных плавов, обработанных силикокальцием, представляют собой комплексные алюмосиликаты кальция различного состава. В металле опытных плавов НВ также являются сложными комплексными соединениями системы Al-Si-Ca-O, в состав которых дополнительно входит до 4 % Ва. Последнее косвенно свидетельствует о преимущественном удалении из металла барийсодержащих НВ. Остаточные барийсодержащие включения существуют в сферических комплексных алюминатах и хаотично распределяются в стали, что дополнительно способствует улучшению механических свойств проката. В металлопрокате опытных плавов, обработанных INSTEEL®9.4, выявлены комплексные НВ с содержанием стронция, однако число таких включений незначительно,

Таблица 4

Результаты оценки загрязненности листового проката неметаллическими включениями по ГОСТ 1778–70 (метод Ш6) [1]

Модификатор	Вариант	Толщина листа, мм	Загрязненность неметаллическими включениями, балл		
			Оксиды точечные (ОТ)	Силикаты хрупкие (СХ)	Силикаты недеформирующиеся (СН)
СК40	Действующая технология	(10–11)/10,8	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–4,0)/0,5	(1,0–4,0)/1,5
INSTEEL®1.5	1	(10–12)/11,0	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–2,5)/0,5	(1,0–4,0)/1,5
	2	(11–12)/11,1	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–2,5)/0,5	(1,0–3,0)/1,5
	3	(11–13,4)/12,1	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–2,0)/0,5	(1,0–3,0)/1,5
INSTEEL®9.4	1	(11–11)/11,0	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–2,0)/0,5	(1,0–3,5)/1,5
	2	(11–16)/12,1	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–2,0)/0,5	(1,0–3,5)/1,5
	3	(11–20)/12,5	(0,5–0,5)/0,5	(0,0–1,5)/0,5	(1,0–3,0)/1,5

Примечание: в числителе — минимальные и максимальные значения, в знаменателе — среднее, другие виды НВ не обнаружены

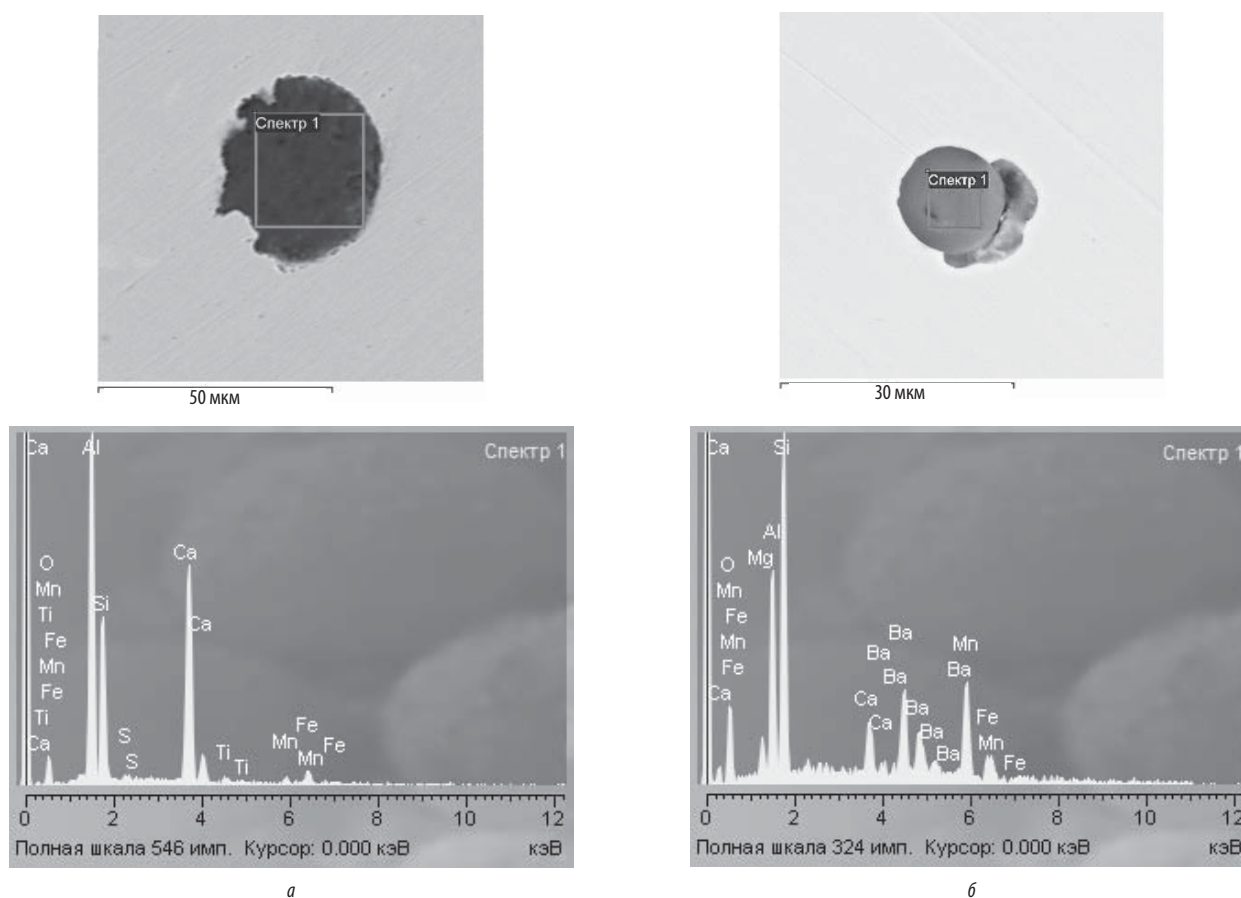


Рис. 1. Силикаты недеформирующиеся и их типичные рентгеновские спектры в металле сравнительных (а) и опытных (б) плавок

т. е. стронцийсодержащие НВ почти полностью удаляются из расплава и ассимилируются шлаком. Аналогичные результаты были получены и в других работах при обработке стального расплава стронцийсодержащими материалами [15]. Характерные результаты микроспектрального анализа проб листового проката сравнительных и опытных плавок представлены на **рис. 1**.

Таким образом, результаты опытных плавок и комплексные исследования металлопроката показали,

что металл, полученный с использованием модификаторов серии INSTEEL, имеет меньшую загрязненность НВ по сравнению с прокатом, полученным по стандартной технологии с применением силикокальция, что связано с высокой раскислительной и модифицирующей способностями комплексных модификаторов.

Результатом снижения загрязненности стали НВ при применении опытных модификаторов стало улучшение основных физических свойств металлопроката, о чем

Таблица 5

Механические свойства (по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9454–78) листового проката сравнительных и опытных плавков

Модификатор	Вариант	Предел текучести σ_T , Н/мм ²	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Ударная вязкость КСУ ⁻⁶⁰ , МДж/м ²
СК40	Действующая технология	(435–510)/479,5	(520–584)/553,6	(110–335)/227,3
INSTEEL [®] 1.5	1	(455–510)/483,3	(550–630)/589,2	(133–270)/217,4
	2	(450–580)/505,4	(550–650)/596,3	(200–348)/259,3
	3	(464–530)/507,0	(555–630)/586,1	(195–498)/300,6
INSTEEL [®] 9.4	1	(450–525)/478,8	(530–600)/560,0	(165–353)/288,8
	2	(450–540)/505,0	(530–610)/573,6	(193–353)/274,5
	3	(455–550)/523,3	(540–630)/590,6	(240–358)/289,5

Примечание: в числителе — минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние.

свидетельствуют результаты механических испытаний (по ГОСТ 1497–84 [24] и ГОСТ 9454–78 [25]) образцов сравнительных и опытных плавков, представленные в **табл. 5**.

Из данных табл. 5 следует, что замена силикокальция на опытные модификаторы привела к улучшению прочностных свойств проката как при статических испытаниях на растяжение, так и при динамических испытаниях на ударный изгиб при пониженных температурах. Указанное влияние наблюдалось при всех расходах опытных модификаторов. При этом, с увеличением расхода модификаторов положительное влияние на механические свойства стали, как правило, усиливалось. Однако отмеченное улучшение свойств может быть связано не только с применением опытных материалов, но и с другими, одновременно действующими факторами, поэтому требуется проверка на большем массиве плавков.

Таким образом, применение комплексных модификаторов серии INSTEEL обеспечивает снижение общей загрязненности стали НВ и улучшение механических свойств металлопроката. Однако эффективность использования модификаторов зависит не только от их расхода, но и от уровня других технологических параметров ковшевой обработки. Состав маркировочной пробы стали на сравнительных и опытных плавках характеризуется значительным разбросом значений по содержанию алюминия и кальция, соотношение которых в металле во многом определяет состав НВ и их поведение. В результате максимальный балл по СН в пробах листового проката как на сравнительных, так и на опытных плавках колебался от 1,5 до 4,0.

Анализ технологии выплавки и ковшевой обработки на сравнительных и опытных плавках показал, что основные параметры обработки находились на сопоставимых уровнях как по средним значениям, так и по диапазонам варьирования, что свидетельствует об идентичных условиях проведения опытно-промышленного эксперимента. При этом статистическая обработка производственных данных позволила сформулировать технологические рекомендации для повышения эффективности модифицирования и, соответственно, получения металлопроката из стали класса прочности К52–К60 с минимальной загрязненностью силикатами недеформирующимися:

- минимизация переокисления и перегрева стали в ГМП в результате организации выплавки стального полупродукта с учетом фактической потребности в кислороде;
- продувка металла инертным газом на АКП с удельным расходом не менее 0,2 м³/т при интенсивности, исключающей оголение металла в районе продувочного пятна;
- проведение раскисления шлака на АКП до содержания FeO не более 0,6 %;
- десульфурация стали на АКП с получением содержания серы на уровне не более 0,003 %;
- проведение корректировки температуры металла на АКП для исключения необходимости интенсивной продувки аргоном после модифицирования;
- обеспечение минимальной активности кислорода в металле перед модифицированием в результате поддержания основности шлака не менее 2,0 ед. и дополнительного раскисления металла титаном;
- корректировка расхода алюминия на УВС с целью получения содержания алюминия в стали на уровне 0,020–0,030 %;
- модифицирование стали комплексными модификаторами серии INSTEEL с расходами, обеспечивающими достижение остаточного содержания кальция после модифицирования не менее 12 ppm;
- обеспечение соотношения Ca/Al не менее 0,03 и Ca/S не менее 0,4 в результате ограничения содержания алюминия и серы в стали на уровне 0,030 и 0,003 % соответственно.

Для иллюстрации совместного влияния наиболее значимых параметров обработки стали на степень загрязненности проката силикатами недеформирующимися были построены трехмерные зависимости максимального балла СН в металлопрокате от расхода порошковой проволоки и содержания алюминия в маркировочной пробе (**рис. 2, 3**).

Представленные на рис. 2 и 3 диаграммы позволяют установить рациональные расходы опытных модификаторов, обеспечивающие требуемый уровень загрязненности проката СН, в зависимости от содержания алюминия в стали.

Из рис. 2 и 3 следует, что для повышения эффективности модифицирования и гарантированного получения

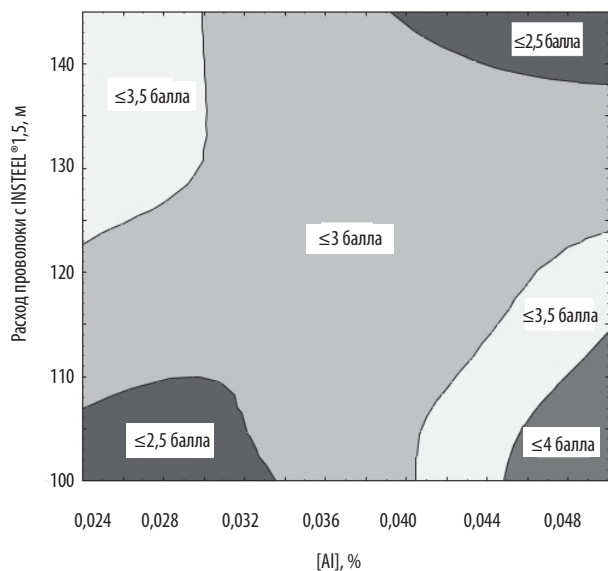


Рис. 2. Зависимость максимального балла СН в металлопрокате от расхода порошковой проволоки с наполнителем INSTEEL®1.5 и содержания алюминия в маркировочной пробе

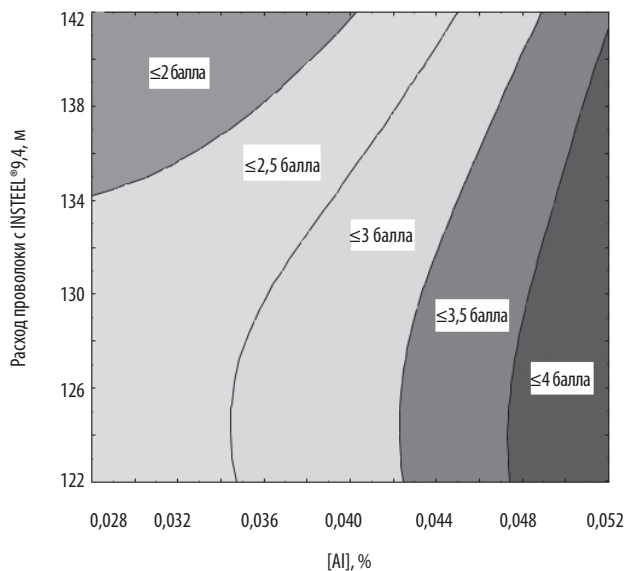


Рис. 3. Зависимость максимального балла СН в металлопрокате от расхода порошковой проволоки с наполнителем INSTEEL®9.4 и содержания алюминия в маркировочной пробе

максимального балла по СН не более 3,5, расход порошковой проволоки с наполнителями серии INSTEEL необходимо корректировать с учетом текущего содержания алюминия, обеспечивая благоприятное соотношение Са/Аl в стали не менее 0,03. Это еще раз показывает важность получения содержания алюминия в стали не более 0,030 %, что обеспечивает минимальный расход модификаторов.

Заключение

На основании анализа результатов опытно-промышленных экспериментов разработан комплекс технологических рекомендаций по производству стали, обеспечивающих производство листового проката (марки стали для производства газо- и нефтепроводных труб) с загрязненностью силикатами недеформирующимися (по максимальному баллу) не более 3,5 балла для условий ЭСПЦ АО «Уральская Сталь».

Реализация разработанных рекомендаций позволит повысить эффективность модифицирования и обеспечит достижение требуемого уровня загрязненности металлопроката силикатами недеформирующимися с минимальными расходами. При годовом объеме производства стали с повышенными требованиями по НВ 240 тыс т, максимальный расчетный экономический эффект 1,59 млн руб. (в ценах на май 2021 г.) достигается при использовании проволоки с модификатором наполнителем INSTEEL®1.5. Для уточнения количественного эффекта от применения опытных модификаторов необходимо их промышленное апробирование с учетом разработанных рекомендаций.

В работе принимали участие В. А. Голубцов, И. В. Рябчиков, А. А. Токарев, В. В. Новокрещенов, А. О. Оводов.

Библиографический список

- ГОСТ 1778–70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. — Введ. 01.01.1972.
- Дюдкин Д. А., Кисиленко В. В. Современная технология производства стали. — М.: Теплотехник, 2007. — 529 с.
- Basak S., Kumar Dhal R., Roy G. G. Efficacy and recovery of calcium during CaSi cored wire injection in steel melts // *Ironmaking & Steelmaking*. 2010. Vol. 37, Iss. 3. P. 161–168.
- Ren Y., Zhang L., Li Sh. Transient Evolution of Inclusions during Calcium Modification in Linepipe Steels // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, Iss. 12. P. 2772–2779.
- Zhao D., Li H., Cui Y., Yang J. Control of Inclusion Composition in Calcium Treated Aluminum Killed Steels // *ISIJ International*. 2016. Vol. 56, Iss. 7. P. 1181–1187.
- Gollapalli V., Venkata Rao M. B., Karamched Phani S., Borra Ch. Rao, Roy Gour G., Sriirangam P. Modification of oxide inclusions in calcium-treated Al-killed high sulphur steels // *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46, Iss. 7. P. 663–670.
- Liu C., Kumar D., Weblor B. A. et al. Calcium Modification of Inclusions via Slag/Metal Reactions // *Metallurgical and Materials Transaction*. 2020. Vol. 51. P. 529–542.
- Yang Sf., Li Js., Wang Zf. et al. Modification of MgO-Al₂O₃ spinel inclusions in Al-killed steel by Ca-treatment // *Int J Miner Metall Mater*. 2011. Vol. 18. P. 18–23.
- Yang W., Zhang L., Wang X., Ren Y., Liu X., Shan Q. Characteristics of Inclusions in Low Carbon Al-Killed Steel during Ladle Furnace Refining and Calcium Treatment // *ISIJ International*. 2013. Vol. 53, Iss. 8. P. 1401–1410.
- Zhao D., Li H., Bao Ch., Yang J. Inclusion Evolution during Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel and Deformation during Hot Rolling Process // *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, Iss. 10. P. 2115–2124.
- Zhang T., Liu C., Mu H., Li Y., Jiang M. Inclusion evolution after calcium addition in Al-killed steel with different sulphur content // *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 45, Iss. 5. P. 447–456.
- Хорошилов А. Д., Григорович К. В. Термодинамические особенности модифицирования неметаллических включений кальцием в низкоуглеродистых сталях, раскисленных алюминием // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. № 62(11). С. 860–869.
- Kumar B., Mishra S., Rao M. B. V., Roy G. G. Experimental investigation of recovery and efficiency of calcium addition through cored wire in steel melt at Visakhapatnam Steel Plant // *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46, Iss. 5. P. 454–462.
- Голубцов В. А., Милюц В. Г., Цуканов В. В. Влияние комплексного модифицирования на загрязненность неметаллическими включениями

- ями судостроительной стали // Тяжелое машиностроение. 2013. № 1. С. 2–5.
15. Бакин И. В., Шабурова Н. А., Рябчиков И. В. и др. Экспериментальное исследование рафинирования и модифицирования стали сплавами Si–Ca, Si–Sr и Si–Ba // Сталь. 2019. № 8. С. 14–18.
 16. Irons G. A., Tong X.-P. Treatment of Steel with Alkaline-earth Elements // ISIJ International. 1995. Vol. 35, Iss. 7. P. 838–844.
 17. Рожихина И. Д., Нохрина О. И., Дмитриенко В. И., Платонов М. А. Модифицирование стали барием и стронцием // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. № 58(12). С. 871–876.
 18. Морозов С. С., Кузнецов А. А., Болдырев Д. А. Повышение эксплуатационной стойкости оснастки из жаропрочной аустенитной стали обработкой барий-стронциевыми карбонатитами // Сталь. 2020. № 4. С. 41–43.
 19. Mukai K., Han Q. Application of Barium-bearing Alloys In Steelmaking // ISIJ International. 1999. Vol. 39, Iss. 7. P. 625–636.
 20. Григорович К. В., Демин К. Ю., Арсенкин А. М. и др. Перспективы применения барийсодержащих лигатур для раскисления и модифицирования транспортного металла // Металлы. 2011. № 5. С. 146–156.
 21. Макроев Л. А., Самойлова О. В., Михайлов Г. Г., Бакин И. В. Фазовые равновесия, реализующиеся при раскислении силико-стронцием низкоуглеродистого расплава на основе железа // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. № 64(6). С. 413–419.
 22. Шаповалов А. Н., Голубцов В. А., Бакин И. В., Рябчиков И. В. Применение комплексных модификаторов для снижения загрязненности стали коррозионно-активными неметаллическими включениями // Черные металлы. 2020. № 6(1062). С. 4–10.
 23. Бакин И. В., Шаповалов А. Н., Кузнецов М. С. и др. Промышленные испытания микрокристаллических комплексных сплавов с ЦЗМ при выплавке трубной стали // Сталь. 2020. № 11. С. 21–25.
 24. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — Введ. 01.01.1986.
 25. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. — Введ. 01.01.1979.

“Chernye metally”, 2022, No. 5, pp. 9–15
DOI: 10.17580/chm.2022.05.02

Application of complex modifiers in the production of steel with increased requirements for non-ferrous metallic inclusions

Information about authors

G. A. Kunitsyn, Dr. Eng., Technical Director¹, e-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com;
M. S. Kuznetsov, Cand. Eng., Head of department¹, e-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com;
A. N. Shapovalov, Cand. Eng., Associate Professor, Head of the Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment², e-mail: alshapo@misis.ru;

I. V. Bakin, Head of Innovation, Modernization and Technical Development Department³, e-mail: igor.npp.bakin@gmail.com

¹ JSC Ural Steel, Novotroitsk, Russia.

² Novotroitsk Branch of NUST MISIS, Novotroitsk, Russia.

³ NPP Tekhnologiya, Chelyabinsk, Russia.

Abstract: Ladle treatment of steel with calcium-containing flux-cored wires is an integral part of modern production technology. However, using only silicocalcium and aluminum, steelmakers are not always able to change the morphology of non-metallic inclusions (NI) in the right direction and create conditions for their removal from the liquid metal.

The results of a pilot-industrial experiment on the production of steel with increased requirements for non-metallic inclusions are presented. During the experiment, instead of a standard wire with SC40 grade silicocalcium, a flux-cored wire with complex modifiers was used. Complex microcrystalline modifiers contained, in addition to calcium, such alkaline earth metals as barium and strontium.

It has been established that the replacement of silicocalcium with experimental variants of modifiers provided a decrease in the maximum score for brittle silicates in the sheet metal (according to GOST 1778) from 4.0 to 1.5–2.5. The maximum contamination of sheet metal with non-deforming silicates decreased from 4.0 points according to the standard technology to 3.0–3.5 points when using experimental microcrystalline modifiers.

Improvement of the basic physical properties of sheet metal was the result of the reducing the contamination of steel with non-metallic inclusions with experimental modifiers. Thus, the replacement of silicocalcium with experimental modifiers provided an increase in the strength properties of rolled sheets both in static tensile tests and in dynamic impact bending tests at low temperatures. The indicated influence was observed for all variants of experimental modifiers consumption. At the same time, with an increase in the consumption of modifiers, the positive effect on the mechanical properties of steel, as a rule, increased.

Key words: pipe steel, ladle treatment, non-metallic inclusions, non-deforming silicates, steel modification, silicocalcium, microcrystalline complex modifiers

V. A. Golubtsov, I. V. Ryabchikov, A. A. Tokarev, V. V. Novokreshchenov, A. O. Ovodov took part in the work.

References

1. GOST 1778–70. Steel. Metallographic methods for the determination of nonmetallic inclusions. Introduced: 01.01.1972.
2. Dyudkin D. A., Kisilenko V. V. Modern steel production technology. Moscow: Teplotekhnika, 2007. 529 p.
3. Basak S., Kumar Dhal R., Roy G. G. Efficacy and recovery of calcium during CaSi cored wire injection in steel melts. *Ironmaking & Steelmaking*. 2010. Vol. 37, Iss. 3. pp. 161–168.
4. Ren Y., Zhang L., Li Sh. Transient Evolution of Inclusions during Calcium Modification in Linepipe Steels. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, Iss. 12. pp. 2772–2779.
5. Zhao D., Li H., Cui Y., Yang J. Control of Inclusion Composition in Calcium Treated Aluminum Killed Steels. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56, Iss. 7. pp. 1181–1187.
6. Gollapalli V., Venkata Rao M. B., Karamched Phani S., Borra Ch. Rao, Roy Gour G., Srirangam P. Modification of oxide inclusions in calcium-treated Al-killed high sulphur steels. *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46, Iss. 7. pp. 663–670.
7. Liu C., Kumar D., Webley B. A. et al. Calcium Modification of Inclusions via Slag/Metal Reactions. *Metall. Mater. Trans. B*. 2020. Vol. 51. pp. 529–542.
8. Yang S., Li J., Wang Z. et al. Modification of MgO·Al₂O₃ spinel inclusions in Al-killed steel by Ca-treatment. *Int J Miner Metall Mater*. 2011. Vol. 18. pp. 18–23.
9. Yang W., Zhang L., Wang X., Ren Y., Liu X., Shan Q. Characteristics of Inclusions in Low Carbon Al-Killed Steel during Ladle Furnace Refining and Calcium Treatment. *ISIJ International*. 2013. Vol. 53, Iss. 8. pp. 1401–1410.
10. Zhao D., Li H., Bao Ch., Yang J. Inclusion Evolution during Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel and Deformation during Hot Rolling Process. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, Iss. 10. pp. 2115–2124.
11. Zhang T., Liu C., Mu H., Li Y., Jiang M. Inclusion evolution after calcium addition in Al-killed steel with different sulphur content. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 45, Iss. 5. pp. 447–456.
12. Khoroshilov A. D., Grigorovich K. V. Thermodynamic features of the modification of non-metallic inclusions with calcium in low-carbon steels deoxidized with aluminum. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2019. No. 62 (11). pp. 860–869.
13. Kumar B., Mishra S., Rao M. B. V., Roy G. G. Experimental investigation of recovery and efficiency of calcium addition through cored wire in steel melt at Visakhapatnam Steel Plant. *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46, Iss. 5. pp. 454–462.
14. Golubtsov V. A., Milyuts V. G., Tsukanov V. V. The effect of complex modification on the contamination of shipbuilding steel with non-metallic inclusions. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2013. No. 1. pp. 2–5.
15. Bakin I. V., Shaburova N. A., Ryabchikov I. V. et al. Experimental study of refining and modification of steel with Si–Ca, Si–Sr and Si–Ba alloys. *Stal*. 2019. No. 8. pp. 14–18.
16. Irons G. A., Tong X.-P. Treatment of Steel with Alkaline-earth Elements. *ISIJ International*. 1995. Vol. 35, Iss. 7. pp. 838–844.
17. Rozhikhina I. D., Nokhrina O. I., Dmitrienko V. I., Platonov M. A. Modification of steel with barium and strontium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2015. No. 58 (12). pp. 871–876.
18. Morozov S. S., Kuznetsov A. A., Boldyrev D. A. Increasing the service life of tooling made of heat-resistant austenitic steel by treatment with barium-strontium carbonates. *Stal*. 2020. No. 4. pp. 41–43.
19. Mukai K., Han Q. Application of Barium-bearing Alloys In Steelmaking. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39, Iss. 7. pp. 625–636.
20. Grigorovich K. V., Demin K. Yu., Arsenkin A. M. et al. Prospects for the use of barium-containing ligatures for deoxidation and modification of transport metal. *Metally*. 2011. No. 5. pp. 146–156.
21. Makrovets L. A., Samoylova O. V., Mikhaylov G. G., Bakin I. V. Phase equilibria realized in the deoxidation of a low-carbon iron-based melt with silicostrotrontium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2021. No. 64 (6). pp. 413–419.
22. Shapovalov A. N., Golubtsov V. A., Bakin I. V., Ryabchikov I. V. The use of complex modifiers to reduce the contamination of steel with corrosion-active non-metallic inclusions. *Chernye Metally*. 2020. No. 6. pp. 4–10.
23. Bakin I. V., Shapovalov A. N., Kuznetsov M. S. et al. Industrial tests of microcrystalline complex alloys with alkaline earth metals in the smelting of pipe steel. *Stal*. 2020. No. 11. pp. 21–25.
24. GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test. Introduced: 01.01.1986.
25. GOST 9454–78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature. Introduced: 01.01.1979.