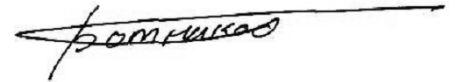


На правах рукописи



Ботников Сергей Анатольевич

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
И ТЕХНОЛОГИИ РАФИНИРОВАНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ
И СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИВКИ
СОРТОВОЙ МНЛЗ**

Специальность 05.16.02– «Металлургия черных, цветных
и редких металлов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2009

Работа выполнена на кафедре физической химии Южно-Уральского государственного университета и в ОАО «Челябинский металлургический комбинат».

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор **Г.Г. Михайлов**.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Ю.А. Гудим**
(ООО Промышленная компания
«Технология металлов», г. Челябинск),

кандидат технических наук
Ю.А. Агеев
(ОАО «НИИМ», г. Челябинск).

Ведущая организация – Государственный научный центр России
ВНИИМЕТМАШ имени академика А.И. Целикова.

Защита состоится **24 июня 2009 г.**, в 14:00, на заседании специализированного диссертационного совета Д 212.298.01 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Текст автореферата размещен на сайте университета:
<http://www.susu.ac.ru>

Отзывы на реферат (один экземпляр, заверенный печатью) просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. тел., факс (351) 267-91-23.

Автореферат разослан «13» мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.298.01
профессор, д.ф.-м.н.

Д.А. Мирзаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последнее десятилетие мировой объём разливаемой стали на сортовых машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) превысил 60 %. В России также, в связи с ростом потребности в мелкосортной продукции промышленного и гражданского строительства, увеличилось количество стали, разливаемой на сортовых МНЛЗ. Немаловажную роль сыграла потребность в товарной сортовой заготовке за рубежом. Растущий потребительский спрос на металлопродукцию строительного назначения не только гарантировал устойчивый сбыт, но и позволял рассчитывать на реализацию новых инвестиционных проектов. В связи с этим многие металлургические компании, несмотря на кризис, уже осуществляют и планируют дальнейшие крупные инвестиции в новое строительство и модернизацию существующих сортовых МНЛЗ.

Для металлургических предприятий стран СНГ использование новых или модернизированных сортовых МНЛЗ является производственной необходимостью. На каждом предприятии прослеживается тенденция к совершенствованию и внедрению новых технологических и технических решений, которые имеют свои особенности и отличаются от рекомендаций самих производителей МНЛЗ. Опыт работы на сортовых МНЛЗ показывает, что работники металлургических предприятий, занимающиеся промышленной эксплуатацией машин непрерывного литья заготовок, должны решать задачи по улучшению конструкции установок, технологии выплавки и внепечной обработки стали, подлежащей разливке на МНЛЗ, подбору огнеупорных материалов, совершенствованию процесса кристаллизации заготовки, защите металла от вторичного окисления, повышению качества заготовки и др.

Определение оптимальных параметров рафинирования стали на агрегате ковш-печь и работы комплекса МНЛЗ в условиях конкретных предприятий является крайне необходимым. В диссертационной работе рассматривается влияние химического состава металла, технологии рафинирования стали на параметры её разливки и качество отливаемой сортовой заготовки сечением 100×100 мм. Причины образования дефектов сортовой заготовки за последние 10 лет описаны только для малых скоростей разливки. Поэтому изучение причин образования дефектов в условиях современной высокоскоростной непрерывной разливки стали и методов борьбы с ними является актуальной задачей.

Цель работы и задачи исследования. Целью данного исследования является оптимизация химического состава, в пределах марочного, параметров непрерывной разливки в варианте технологии высокоскоростного литья заготовок, серийной разливки с большим числом плавов в серии, обеспечение требуемого качества получаемых литых заготовок.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. На базе физико-химического анализа и растровой микроскопии изучить регулирование химического состава стали в пределах марочного, а также влияние технологических параметров внепечной обработки и непрерывной разливки на образование дефектов непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) при высокоскоростной разливке.

2. Установить причины образования прорывов и обрывов кристаллизующейся корочки на сортовой заготовке и разработать мероприятия по снижению их количества.

3. Разработать и внедрить систему мероприятий по увеличению серийности разлива на сортовой МНЛЗ.

4. Вести в автоматическую программу качества МНЛЗ новые контролируемые технологические параметры для совершенствования системы прогнозирования качества непрерывнолитых заготовок.

Научная новизна:

1. Сформулирована система требований по оптимальному отношению $[Mn]:[Si]$ в низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали, разливаемой открытой струей на сортовых МНЛЗ. Оптимально выбранное отношение $[Mn]:[Si]$ исключает образование в металле твердых конгломератов, приводящих к шлаковым прорывам кристаллизующейся корочки металла под кристаллизатором. На основании термодинамических расчетов раскислительной способности марганца и кремния в стали установлено, что отношение $[Mn]:[Si]$, приводящее к образованию жидкоподвижных неметаллических включений в стали, существенно зависит от содержания кислорода в металле: чем больше содержание кислорода в исходном металле, тем меньшим должно быть отношение $[Mn]:[Si]$. Так, для концентрации кислорода в исходном металле 0,001–0,004 мас. % Мчедлишвили В.А. было установлено оптимальное отношение $[Mn]:[Si]$, равное 12–14. Для условий разлива стали открытой струей на МНЛЗ автором диссертации было определено оптимальное отношение $[Mn]:[Si]$, равное 2–3. Низкие значения отношения $[Mn]:[Si]$ объясняются поступлением кислорода в поверхностный слой металла.

2. На основании статистического анализа результатов разлива установлено, что для ликвидации шлаковых прорывов при разливе открытой струей отношение в металле $[Mn]:[Si]$ должно быть не меньше, чем 2–3. На основе выданных рекомендаций по отношениям $[Mn]:[Si]$ показана возможность разлива арматурной стали типа 35ГС открытой струей большими сериями через один промежуточный ковш без ухудшения механических свойств готовой продукции.

3. По проведенному корреляционному анализу проявления дефекта «осевые ликвационные полосы и трещины» ($ЛПТ_{осев}$) установлена статистическая связь проявления этого дефекта от отношения $[Mn]:[S]$. Так, при величине $[Mn]:[S] = 14–15$ балл дефекта достигал 3–4, при величине отношения $[Mn]:[S] = 18$ балл дефекта составил 1–2. При величине $[Mn]:[S]$, равной 22 и более, дефект практически не проявлялся или составлял минимальные значения.

4. С увеличением содержания углерода в металле с 0,12 до 0,40 мас. % и серы с 0,005 до 0,020 мас. % увеличивается максимальная величина ромбичности для заготовки сечением 100×100 мм с 10 до 16 мм. С целью снижения брака по ромбичности заготовки доказана необходимость уменьшения содержания серы до 0,005 мас. % или ниже, за счет наведения рафинировочного шлака на агрегате ковш-печь (АКП).

Практическая значимость:

1. Выполненный комплекс работ по совершенствованию технологии производства НЛЗ в ОАО «ЧМК»: корректировка отношений в металле $[Mn]:[Si]$ и $[Mn]:[S]$, оптимизация технологии раскисления стали, оптимизация шлакового режима в промежуточном ковше – позволил увеличить стабильность работы сортовой МНЛЗ и довести сред-

ную серийность на один промежуточный ковш до 39 плавов. До выполнения комплекса рекомендаций средняя серийность составляла 10 плавов.

2. Разработаны и внедрены технические рекомендации по устранению прорывов кристаллизующейся корочки металла для высокоскоростной сортовой МНЛЗ ОАО «ЧМК», которые обеспечили снижение числа прорывов в 4 раза. В частности, было рекомендовано следующее: низкоуглеродистый металл глубоко раскислять алюминием на выпуске из печного агрегата, выдерживать оптимальные отношения $[Mn]:[Si]$ и $[Mn]:[S]$.

3. На основании проведенных теплотехнических расчетов и экспериментов создан принцип оптимизации режима охлаждения кристаллизаторов 6-ти ручьевого сортовой МНЛЗ ОАО «ЧМК». Изменение режима охлаждения кристаллизаторов привело к экономии очищенной воды в количестве 620 л на тонну разлитой стали.

4. Введение контроля технологических параметров, таких как отношение $[Mn]:[Si]$ и содержание в металле углерода в автоматизированную систему МНЛЗ позволило выявлять степень риска появления брака по шлаковым включениям и краевым загрязнениям. Таким образом, отпала необходимость в полном осмотре всех заготовок на наличие этих дефектов, появилась возможность ограничиться выборочным контролем.

5. Внедрение разработанных рекомендаций в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «ЧМК» привело к экономическому эффекту 72,4 млн. рублей.

На защиту выносятся результаты термодинамического анализа физико-химических процессов при разливке стали открытой струей на сортовой МНЛЗ, статистического анализа проявления брака отливок, также разработанного на их основе комплекса мероприятий по повышению серийности сортовой МНЛЗ и уменьшению количества брака.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах. Основные результаты работы доложены и обсуждены на двух Международных конференциях «Современные технологии и оборудование для внепечной обработки и непрерывной разливки стали» (г. Москва, 2006 и 2007 г.), на XIII международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Челябинск, 2007 г.), на III Конгрессе металлургов Урала (г. Челябинск, 2008 г.), на 5-й Юбилейной конференции молодых специалистов (г. Москва, ВНИИМЕТМАШ им. акад. А. И. Целикова, 2009 г.), на 2-м Международном промышленном Форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Челябинск, 2009 г.).

Личный вклад автора. Автор разрабатывал планы исследования по промышленным экспериментам в кислородно-конвертерном цехе ОАО «ЧМК». Проводил аналитическую обработку результатов исследования с оформлением заключений и технических отчетов. Принимал участие практически во всех опытных и опытно-промышленных плавках, организовывал отбор проб от непрерывнолитой заготовки и от оксидциркониевых стаканов-дозаторов, собирал и анализировал дефектные участки заготовок. Проводил исследования дефектов НЛЗ на растровом электронном микроскопе. Составил атлас дефектов сортовой непрерывнолитой заготовки. Участвовал в процессе выбора оптимизационных технологических параметров непрерывной разливки стали на высокоскоростных МНЛЗ ОАО «ЧМК».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, библиографического списка из 71 наименования и 1 приложения, изложенных на 171 странице машинописного текста, содержит 62 рисунка и 35 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обобщены литературные данные по технологическим параметрам разливки стали на высокоскоростных сортовых МНЛЗ и обеспечению максимальной серийности. Рассмотрены современные представления о методах разливки стали на высокоскоростных сортовых МНЛЗ. Проанализированы методы изучения дефектов НЛЗ. Представлено влияние параметров гильзы кристаллизатора на качество литых заготовок и производительность сортовых МНЛЗ. Рассмотрено также влияние отдельных химических элементов состава стали (кислорода, углерода, марганца, кремния, алюминия, кальция, серы) на качество непрерывнолитой заготовки и стойкости разливочных стаканчиков. Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты работы по изучению влияния химического состава металла на склонность к образованию дефектов НЛЗ.

Наиболее часто встречающимися дефектами макроструктуры непрерывнолитых заготовок являются: центральная пористость, осевая ликвация, пузыри. Также существуют специфические дефекты литых заготовок: краевые точечные загрязнения (КТЗ), ликвационные полосы и трещины (ЛПТ). На растровом микроскопе JEOL JSM-460LV произведен анализ 6 образцов, отобранных от дефектных участков непрерывнолитых заготовок сечением 100×100 мм из сталей марок SAE1006 (2 плавки) и 35ГС (3 плавки). Химический состав и технологические параметры выплавки, внепечной обработки и разливки сталей приведены в табл. 1.

Полученные на растровом микроскопе спектрограммы показывают, что краевое точечное загрязнение на образце №1 от заготовки из стали SAE1006 состоит из неметаллических включений: оксидов Si, Mn, Al, Ca, а также комплексных сульфидов марганца и железа. На рис.1 представлено одно из включений кремнезема, выделившегося в виде кристобалита из закристаллизовавшейся матрицы родонита. Размер включения около 110 мкм. Дополнительное исследование на дифрактометре показало присутствие в КТЗ оксида кремния в виде кристобалита (SiO_2), а также фаялита (Fe_2SiO_4).

Наличие большого количества оксидных включений кремния и марганца в КТЗ можно объяснить тем, что они являются продуктами реакции раскисления низкоуглеродистой стали и вторичного окисления стали, поступающей из промковша в кристаллизатор (разливка открытой струей). Кроме кристобалита и родонита в КТЗ образца №1 были обнаружены глобулярные (размером до 10 мкм) алюмосиликаты кальция и марганца с примесью магния и титана в оболочке из сульфидов MnS и CaS , размер которых в 10 раз меньше оксидных включений кремния и марганца. Раскисление стали вторичным алюминием на сливе из конвертера в ковше, а также силикокальциевой проволокой (СК30) в агрегате ковш-печь (АКП) в конце обработки приводит к образованию в стали сложных алюмосиликатных соединений. В ферросилиции марки 65, который присаживается в сталь для легирования и раскисления стали, содержится около 2 мас. % алюминия.

Таблица 1

Технологические параметры производства НЛЗ, из которых были отобраны образцы для растрового микроскопа

Технологический параметр	ОБРАЗЕЦ №1	ОБРАЗЕЦ №6	ОБРАЗЕЦ №2	ОБРАЗЕЦ №3	ОБРАЗЕЦ №4	ОБРАЗЕЦ №5
Дефекты	КТЗ	ЛПТ _{осев}	КТЗ	ЛПТ _{общ}	ЛПТ _{общ} и неметаллические включения	ЛПТ _{осев}
Номер плавки и (марка стали)	355402 (SAE1006)		274356 (35ГС)	276492 (35ГС)	350063 (35ГС)	170835 (SAE1006)
Химический состав стали (в непрерывно-литой заготовке)	С, мас. %	0,05	0,35	0,35	0,34	0,06
	Mn, мас. %	0,37	1,14	1,05	1,10	0,39
	Si, мас. %	0,11	0,65	0,52	0,68	0,095
	S, мас. %	0,025	0,020	0,025	0,014	0,022
	P, мас. %	0,019	0,028	0,014	0,020	0,022
	Al _{общ} , мас. %	0,003	0,004	0,005	0,005	0,004
	O _{общ} , мас. %	0,0110	0,0037	0,0040	0,0041	0,0097
	H, мас. %	-	0,0002	-	-	-
N, мас. %	0,012	0,008	0,012	0,012	0,012	
Замечание по технологии выплавки полупродукта в конвертере	Додувка на серу 76 с		Додувка на температуру 84 с	Додувка на температуру 150 с	Додувка на температуру 96 с	Додувка на температуру 158 с
Расход раскислителей и ферросплавов на сливе из конвертера, кг/т	Al – 1,4; SiMn – 2,8; FeSi – 1,1		Al – 0,3; C – 4,3; SiMn – 12,8; FeSi – 8,6	C – 4,5; SiMn – 12,8; FeSi – 3,6	Al – 0,3; C – 4,2; SiMn – 12,8; FeSi – 7,8	Al – 0,6; SiMn – 3,6; FeSi – 0,7
Расход порошковой проволоки СК30	250 м (70 кг)		250 м (70 кг)	150 м (40 кг)	250 м (70 кг)	200 м (55 кг)
Температура стали после слива из конвертера, °С	1654 ± 10		1593 ± 10	1594 ± 10	1609 ± 10	1653 ± 10
Температура стали после АКП, °С	1590 ± 5		1563 ± 5	1560 ± 5	1565 ± 5	1606 ± 5
Температура стали в промковше, °С	1561...1565		1520...1529	1520...1525	1522...1536	1545...1568
Средняя скорость разливки, м/мин	5,0		4,0	5,1	4,2	5,1
Средний уровень металла в промковше, мм	700 ± 10		600 ± 10	650 ± 10	550 ± 10	700 ± 10
Средний удельный расход вторичной воды, л/кг	2,2		2,0	2,2	1,8	2,3

Кроме того, часть ферросилиция присаживают в АКП для корректировки содержания кремния, что дает основание предположить, что кроме вторичного алюминия, присаживаемого в ковш во время слива, в сталь попадает алюминий из ферросилиция. Взаимодействие усвоенного кальция из порошковой проволоки с оксидами алюминия, кремния и марганца приводит к образованию алюмосиликатов кальция и марганца.

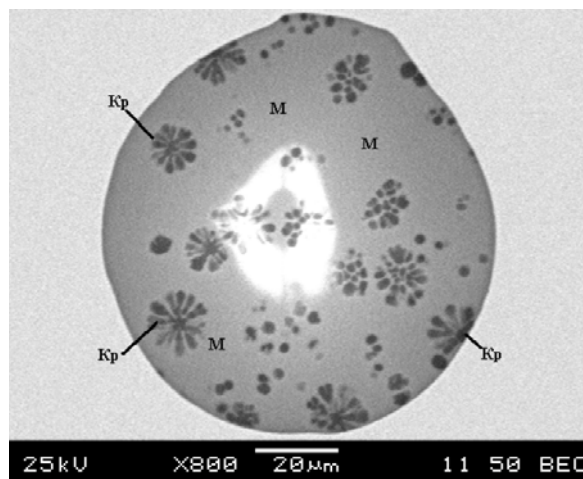


Рис. 1. Съемка оксидного включения во вторичных электронах (Кр – кристобалит, М – родонит), РЭМ, $\times 800$

В краевом точечном загрязнении на образце №2 от заготовки из стали 35ГС были обнаружены сложные неметаллические включения, состоящие из алюмосиликата кальция переменного состава с примесью магния и титана. Наличие в заготовке оксидов титана и магния объясняется использованием в огнеупорах промежуточного ковша магнезиального торкрет-слоя и оксидциркониевых стаканчиков, содержащих TiO_2 . На поверхности алюмосиликата кальция располагаются тонким слоем сульфиды марганца и кальция. Были обнаружены алюмосиликаты кальция и без сульфидной оболочки.

В трещине и около трещины на образце №3 от заготовки из стали 35ГС не были обнаружены ликваты. Это свидетельствует о том, что трещина образовалась в затвердевшей корочке металла без подпитки её жидким металлом с ликватами из центра заготовки.

Спектральный анализ образца №3 стали 35ГС показал, что в трещине содержатся только оксиды железа, образовавшиеся в результате окисления на воздухе по месту реза. Незалеченные трещины образовались в НЛЗ, по-видимому, в результате термических напряжений, за счет интенсивного вторичного охлаждения (на плавке №276492 удельный расход воды – 2,2 л/кг).

В отдельных трещинах образца №4 (35ГС) были обнаружены сульфиды марганца и железа.

На образце №5 низкоуглеродистой стали марки SAE 1006 с содержанием общего кислорода 97 ppm (плавка 170835) были обнаружены мелкие (2...3 мкм) глобулярные окисульфидные включения. Неметаллические включения алюмосиликатов или сульфидов в трещине на образце 5 обнаружены не были. Были обнаружены оксиды

железа, которые образовались в результате окисления на воздухе по месту реза.

На образце №6 (плавка 355402, сталь SAE1006) около крайней части осевой трещины были обнаружены сульфиды железа и марганца размером около 2...4 мкм. Непосредственно в самой трещине в крайней её части также найдены комплексные сульфиды железа и марганца. В результате образования осевого дефекта ликвационные полосы и трещины (ЛПТ_{осев}) в заготовке во время кристаллизации, скорее всего, происходит образование сульфидов марганца и железа. В образовавшуюся трещину из центра заготовки поступают ликвирующие элементы, к которым относится сера. После чего в трещине возможно образование комплексных сульфидов (железа и марганца), которые были обнаружены с помощью растровой микроскопии.

При освоении технологии разлива открытой струей сталей разных марок на мениске в кристаллизаторах образуется твердый конгломерат, состоящий из продуктов раскисления и вторичного окисления металла, значительное увеличение объема которого приводит к так называемым шлаковым прорывам кристаллизующейся корочки металла под кристаллизатором. Установлено, что образование конгломерата зависит от степени раскисленности, то есть от содержания кислорода в металле (от активности кислорода в металле), а от отношения [Mn]:[Si] зависит агрегатное состояние фазы (твердая или жидкая).

Из литературных источников следует, что для раскисленного металла с целью получения жидких включений необходимо выдерживать отношение [Mn]:[Si] более 12 и даже 20. Данные рекомендации следует применять для условий разлива закрытой струей, для разлива открытой струей в мениске кристаллизатора существуют другие условия. То есть необходимо рассматривать для открытой струи реальное содержание кислорода на мениске металла значительно больше, чем в металле промежуточного ковша.

Для того, чтобы рассмотреть особенности процесса раскисления железа кремнием и марганцем, необходимо построить поверхность растворимости компонентов в жидком металле (ПРKM) для системы Fe-Mn-Si-O в концентрационной области, отвечающей условиям раскисления и легирования железа марганцем и кремнием. На рис. 2 представлена построенная поверхность растворимости компонентов в жидком металле (ПРKM) для системы Fe-Mn-Si-O.

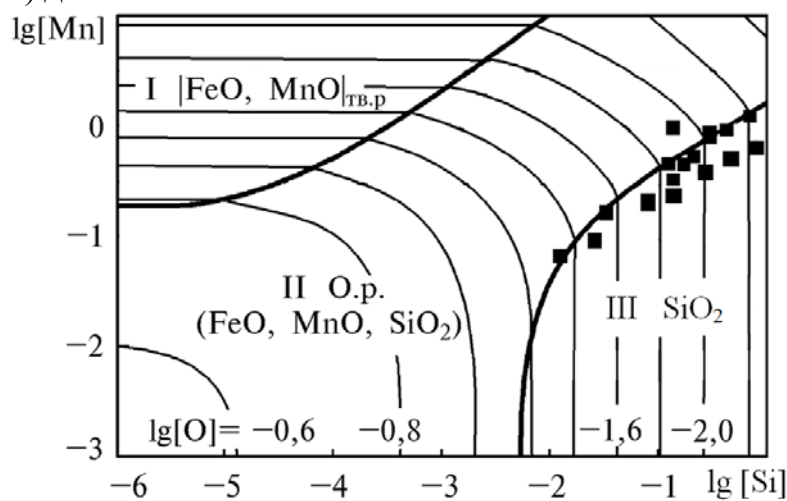


Рис. 2. ПРKM системы Fe-Mn-Si-O при 1600 °C (точками представлены экспериментальные данные)

Связь между количеством вводимых раскислителей и составами равновесных с металлом неметаллических фаз устанавливалась при решении системы балансовых уравнений. Расчет проводили на 1 т исходного металла (до раскисления). Допустим, что раскисление следует провести таким образом, чтобы в равновесии с металлом находились жидкие неметаллические включения (FeO , SiO_2 , MnO). Сделали следующее допущение для низкоуглеродистой стали SAE1006 ($[\text{C}] = 0,06$ мас. %): содержание углерода в металле приняли равным 0 %, для того чтобы можно было использовать результаты расчета ПРКМ системы Fe-Mn-Si-O . Для каждого из элементов рассматриваемой системы для стали SAE1006 записывали балансовые уравнения для получения при раскислении оксидного расплава.

Построили диаграмму расхода раскисляющих компонентов для больших расходов раскислителей при исходных концентрациях кислорода в стали 0,1 мас. % (см. рис. 3).

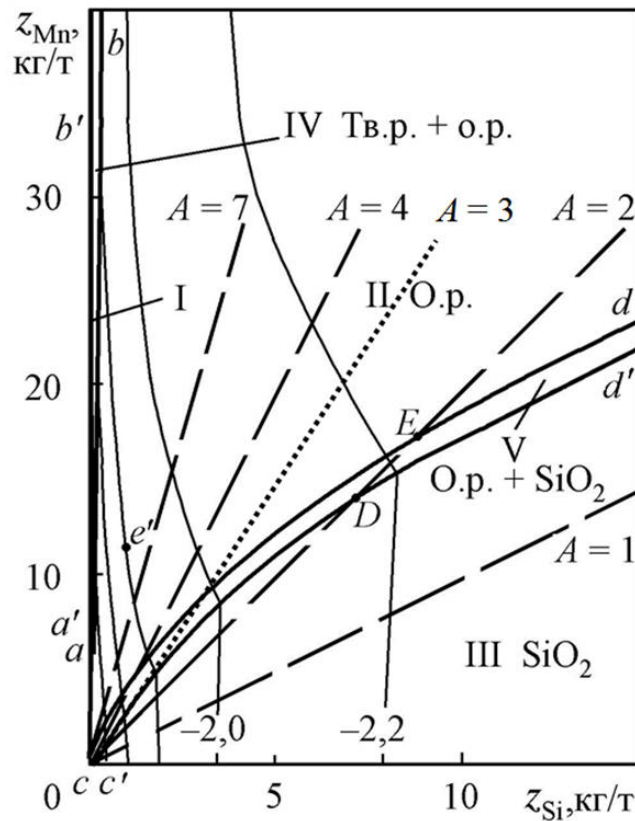


Рис. 3. Диаграмма расхода марганца и кремния при заданном $[\text{O}]_{\text{исх}} = 0,1$ мас. %

По оси абсцисс отложен полный расход кремния, по оси ординат – полный расход марганца. Точки в области I, которая на диаграммах исчезающе мала и расположена левее кривой $a'b'$, сливающейся с осью ординат, задают расходы кремния и марганца, обеспечивающие образование в жидком металле твердых растворов оксидов (FeO и MnO); в области II – жидких оксидных включений; в области III – кремнезема. Эти области характеризуют двухфазные равновесия: «металл – $[\text{FeO}, \text{MnO}]_{\text{тв.р.}}$ » (I), «металл – $(\text{FeO}, \text{MnO}, \text{SiO}_2)_{\text{о.р.}}$ » (II) и «металл – SiO_2 » (III). Еще две узкие области характеризуют трехфазные равновесия «ме-

талл – $[\text{FeO}, \text{MnO}]_{\text{тв.р}} - (\text{FeO}, \text{MnO}, \text{SiO}_2)_{\text{о.р}}$ » (область IV) и «металл – $(\text{FeO}, \text{MnO}, \text{SiO}_2)_{\text{о.р}} - \text{SiO}_2$ » (область V). Согласно рис. 3 для луча $A = 1$ в качестве неметаллических включений образуется кремнезем. При расходах меньше определяемых точкой D также будут для луча $A = 2$ образовываться кристаллы чистого SiO_2 . При расходах больше определяемых точкой E будут образовываться включения оксидного расплава $(\text{FeO}, \text{MnO}, \text{SiO}_2)_{\text{о.р}}$. При расходах, определяемых весьма узкими интервалами DE , будут образовываться включения из оксидного расплава, и кремнезема. Наконец, если отношения количеств марганца и кремния больше четырех (см. лучи $A = 4, \dots, A = 7$), то в основном при любом количестве введенных раскислителей включения будут жидкими растворами $(\text{FeO}, \text{MnO}, \text{SiO}_2)_{\text{о.р}}$.

Из рис. 2 и 3 следует, что при разливке низкоуглеродистых сталей отношение $[\text{Mn}]:[\text{Si}] \leq 3$ является критическим и по статистике рост прорывов наступает для данной марки стали при $A = [\text{Mn}]:[\text{Si}] \leq 2,2$, то есть термодинамический расчет качественно характеризует реальный процесс образования тугоплавких включений в кристаллизаторе МНЛЗ.

Построенный луч $A = 3$ соответствует стали SAE1006, которая находится в критической зоне начала образования твердых включений. Таким образом, при отношении марганца к кремнию в низкоуглеродистой стали SAE1006 менее 3 вероятно образование твердых включений.

Дополнительно для теоретического объяснения влияния химического состава металла на образование шлаковой фазы в кристаллизаторе было произведено математическое моделирование отношения $[\text{Mn}]:[\text{Si}]$ с использованием термодинамического расчета равновесия в системе металл–шлак–газовая фаза. Математическое моделирование отношения марганца к кремнию от 1,5 до 3,3 с шагом 0,1 для различного содержания в металле кислорода и алюминия в стали SAE1006 и 35ГС производили с помощью программы «ГИББС»*. Программа «ГИББС-равновесие» производит расчет состава и массы металла, шлака и газовой фазы.

В результате математического моделирования по программе ГИББС отношения концентрации марганца и кремния для металла, который разливается открытой струей, было установлено следующее:

1. В низкоуглеродистом металле (SAE1006) содержание общего алюминия стремится к нулю (алюминий находится в виде глинозема), а в среднеуглеродистой стали 35ГС доля связанного алюминия составляет 25...40 мас. % от общего содержания алюминия.

2. Определены оптимальные отношения $[\text{Mn}]:[\text{Si}]$ для различных марок сталей (см. табл. 2).

* Программа ГИББС-равновесие (V.2.0) разработана совместно Московским Институтом Стали и Сплавов и компанией Инновационное Бюро Металлургической Технологии. Группа разработчиков: Пономаренко Д.А., Косырев К.Л., Котельников Г.И., Толстолицкий А.А., Съемщиков Н.С., Пономаренко А.Г.

Рекомендуемые оптимальные отношения [Mn]:[Si]

Марка стали	Среднее содержание углерода в металле, мас. %	Рекомендованное отношение [Mn]:[Si] с целью снижения вероятности шлакового прорыва при разливке открытой струей
SAE1008, SAE1006	0,08	Не менее 3,0
25Г2С	0,27	Не менее 2,5
35ГС	0,35	Не менее 2,0

Использование результатов термодинамического расчета фазовых равновесий в системе Fe–Mn–Si–O и расчетов по программе ГИББС позволили теоретически определить требуемое оптимальное отношение [Mn]:[Si] для различного содержания в металле углерода с целью получения жидких шлаковых образований, которые не оказывают влияния на процесс непрерывной разливки стали. Полученные данные термодинамических расчетов хорошо коррелируют с практическими результатами разливки стали на сортовых МНЛЗ. На рисунке 4 представлены статистические данные за 2005-2006 гг. по отношению [Mn]:[Si] и количеству шлаковых прорывов для различных марок стали. Пунктирной линией на рис. 4 показано, при каком значении отношения [Mn]:[Si] в металле начинались шлаковые прорывы.

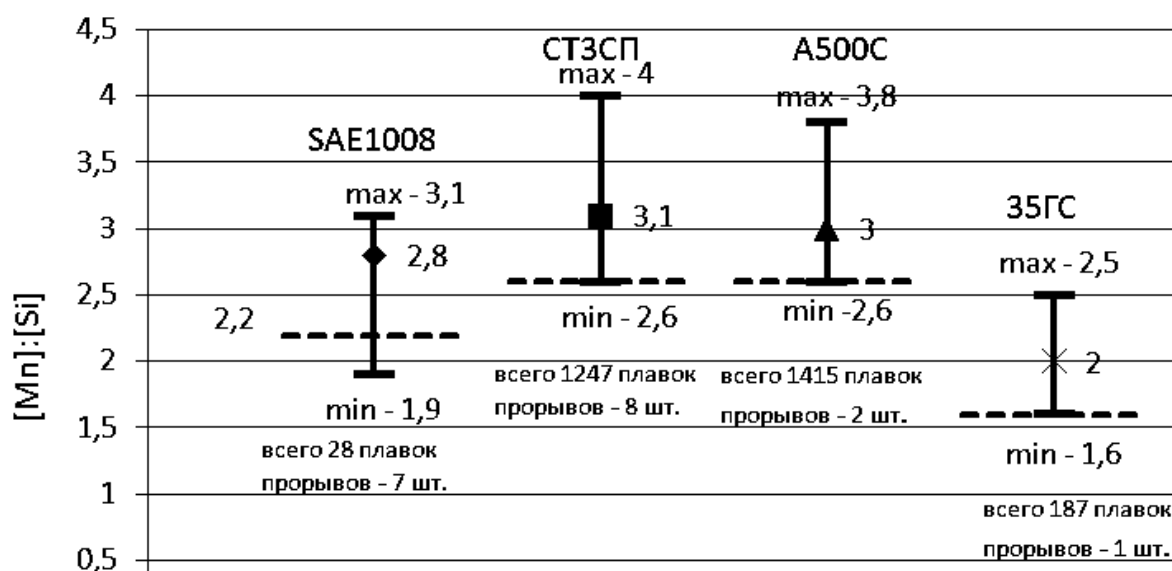


Рис. 4. Максимальные, минимальные и средние значения отношений [Mn]:[Si] для различных марок стали, разлитой на сортовой МНЛЗ ОАО «ЧМК» за 2005–2006 гг.

Для оценки влияния отношения [Mn]:[S] в стали SAE1006 на её склонность к трещинообразованию выполнен сравнительный анализ на сканирующем микроскопе образцов № 5 (плавка №170835) и №6 (плавка №355402), отобранных из центра литых заготовок, с отношением соответственно 17,7 и 14,8. Осевой дефект ликвационные полосы и трещины (ЛПТ_{осев}) для образца №5 составлял 0,5 балла, а для №6 – 2,5 балла. На электронном сканирующем микроскопе JEOL JSM–6460LV определяли химический состав включений и их морфологию, а для определения фазового состава включений использовали дифрактометр ДРОН–2.

В образце 5 сульфиды в трещинах не обнаружены. В металлической матрице сера присутствует в виде глобулярных оксисульфидных включений диаметром около 3 мкм.

Выполненное исследование на дифрактометре ДРОН–2 в излучении железного анода наличие в металле сульфидов не показало.

В образце 6 сульфидные включения расположены иначе. В области окончания осевой трещины (10...15 мм от центра заготовки) под микроскопом при увеличении $\times 1000$ обнаружены комплексные сульфидные включения, располагающиеся в самой трещине и по границам зерен металла. В центральной части осевой трещины сульфидов нет. Сера в центре дефекта ЛПТ_{осев} присутствует в виде эвтектических сульфидных включений. Эвтектическая сульфидная фаза имеет вид точек диаметром менее 1 мкм. Как и в образце 5, обнаружены мелкие окисульфидные включения диаметром 3...4 мкм, только количество таких включений в образце №6 значительно меньше. Таким образом, в исследованных образцах 5 и 6 выявлен различный тип сульфидных включений. В образце 6 с более низким значением $[Mn]:[S]$ (14,8) выявлено наличие преимущественно эвтектических (пленочных) комплексных сульфидов типа (Mn, Fe)S и (Fe, Mn)S, которые являются причиной развития и увеличения дефекта ЛПТ_{осев}. В образце 5 с отношением $[Mn]:[S]$, равным 17,7 сульфиды такого типа не обнаружены: сера присутствует в металле в виде глобулярных окисульфидных включений.

Для условий разливки квадратной заготовки 100×100 мм была установлена зависимость интенсивности проявления дефекта осевые ликвационные полосы и трещины (ЛПТ_{осев}) от отношения $[Mn]:[S]$. Для отношения марганца к сере порядка 14–15 значение балла ЛПТ_{осев} будет достигать 2,5...3,5, а для отношения $[Mn]:[S] = 18$ будет составлять не более 1,0 балла.

Проведено исследование по влиянию отношения $[Mn]:[S]$ на образование прорывов в зоне вторичного охлаждения. Экспериментально было установлено, что при отношении равном или менее 21 возможно образование на одной плавке нескольких прорывов на разных ручьях. Поэтому, исходя из практики работы МНЛЗ и проведенного исследования по выбору оптимального отношения марганца к сере, необходимо выдерживать его не менее 22. На рис.5 представлены статистические данные, которые были получены в процессе работы сортовой МНЛЗ ОАО «ЧМК». Пунктирной линией на рис. 5 показано, при каком значении отношение $[Mn]:[S]$ для стали SAE1006 и Ст3сп начинались прорывы в зоне вторичного охлаждения по трещине.



Рис. 5. Максимальные, минимальные и средние значения отношений $[Mn]:[S]$ для стали SAE1006 и Ст3сп, разлитых на МНЛЗ ОАО «ЧМК» за 2005–2006 гг.

Высокое отношение $[Mn]:[S]$ (более 22) и пониженная скорость литья оказывают благоприятное воздействие на качество НЛЗ в связи с повышением прочности корки и её сопротивляемости возникающим напряжениям.

Разность диагоналей (ромбичность) непрерывнолитой заготовки квадратного сечения является одним из наиболее распространенных дефектов профиля. В ОАО «ЧМК» проведено исследование по изучению влияния на ромбичность литой заготовки сечением 100×100 мм химического состава разливаемой стали. С 1 июля 2005 год по 28 февраля 2007 год на 6-ти ручьевой сортовой МНЛЗ №3 разлито 13 067 плавков со средним весом 140 тонн. На каждой плавке и на каждом ручье в начале, в середине и в конце разливки операторы газовой резки штангенциркулем или ромбомером (прибор для быстрого измерения диагонали заготовки, точность измерения $\pm 0,5$ мм) производили измерения длины диагоналей. Было установлено, что на 5970 плавках (45,6 %) разность диагоналей была более 5 мм. Содержание углерода в зависимости от марки разливаемой стали колебалось от 0,06 до 0,43 мас. %. Скорость разливки изменялась в пределах от 3,8 до 6,0 м/мин (средняя скорость 5,1 м/мин). Все плавки с ромбичностью более 5 мм были поделены на 3 группы в зависимости от содержания в стали углерода: группа 1 – углерод менее 0,12 мас. %; группа 2 – 0,12...0,28 мас. %; группа 3 – 0,28...0,40 мас. % (табл. 3).

На механизм образования ромбичности существенное влияние оказывают особенности формирования заготовок в зависимости от химического состава разливаемой стали – температура ликвидуса, температурный интервал кристаллизации, толщина формирующейся корочки, величина объемной и линейной усадки и т.д. В ОАО «ЧМК» с учетом объемов производства наиболее неблагоприятной оказалась среднеуглеродистая сталь марок 35ГС, ст5 и Grade60 (см. табл. 3).

Таблица 3

Максимальная ромбичность заготовки 100×100 мм для сталей разных марок

Группа	Марки стали	Максимальная ромбичность, мм
1	SAE1006–1008, Св08А	10,0 ± 0,5
2	Ст3, А500С, S235JR, 25Г2С	14,5 ± 0,5
3	35ГС, Grade60, ст5	16,0 ± 0,5

Если в литературе широко обсуждается влияние углерода на величину ромбичности, то о влиянии серы значимых работ нет. Однако, на основании статистических исследований нами было установлено, что с увеличением содержания серы в стали дефект ромбичности увеличивается. Причем, чем больше в металле углерода, тем выше влияние серы на ромбичность (см. табл. 4). Сера аналогично углероду влияет на процесс формирования толщины корочки в кристаллизаторе, то есть влияет на температурный интервал кристаллизации (температуры ликвидус и солидус). Влияние концентрации серы на ромбичность, также вероятно, связано с изменением вязко-упругих свойств кристаллизующейся корочки металла.

Влияние серы на ромбичность заготовки
для различного содержания в металле углерода

Группа	[S], %	Процент от общего количества плавков, %	Максимальная ромбичность, мм
[C] менее 0,12 мас. %			
1	Менее 0,005	–	–
2	0,005–0,015	28,86	10,0 ± 0,5
3	более 0,015	71,14	10,0 ± 0,5
0,12 ≤ [C] ≤ 0,28 мас. %			
1	Менее 0,005	0,16	7,0 ± 0,5
2	0,005–0,015	39,77	11,0 ± 0,5
3	более 0,015	60,07	14,5 ± 0,5
[C] более 0,28 мас. %			
1	Менее 0,005	0,56	8,0 ± 0,5
2	0,005–0,015	42,44	13,0 ± 0,5
3	более 0,015	57,00	16,0 ± 0,5

Таким образом, увеличение в металле углерода и серы приводит к развитию дефекта – ромбичность заготовки. С целью снижения брака по ромбичности заготовки необходимо уменьшать содержание серы до 0,005 мас. % или ниже, например, за счет наведения рафинировочного шлака на АКП.

В третьей главе изложены результаты анализа причин образования прорывов и обрывов кристаллизующейся корочки металла: проанализированы технологические параметры выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали. Дополнительно осматривали место прорыва с целью уточнения его характера.

По каждому прорыву фиксировали: марку стал; её химический состав; замечания по выплавке и внепечной обработке; температуру стали в сталеразливочном ковше; номер промежуточного ковша; номер ручья, на котором произошел прорыв; номер кристаллизатора и гильзы; общее количество разлитого металла через гильзу; диаметр разливочного стакана-дозатора; температуру стали в промковше (минимум и максимум); место и зону прорыва (под кристаллизатором или в зоне вторичного охлаждения).

В момент, когда уровень металла в кристаллизаторе начинал снижаться от заданного (начало прорыва), фиксировались следующие технологические параметры: температура в промковше (последнее измерение); скорость разливки; уровень металла в промежуточном ковше (вес металла); расход масла в кристаллизаторе; уровень металла в кристаллизаторе; частота качания стола кристаллизатора; амплитуда качания стола кристаллизатора; время опережения качания кристаллизатора.

На рис. 6 представлен график снижения удельного числа прорывов за 27 месяцев работы сортовой МНЛЗ.

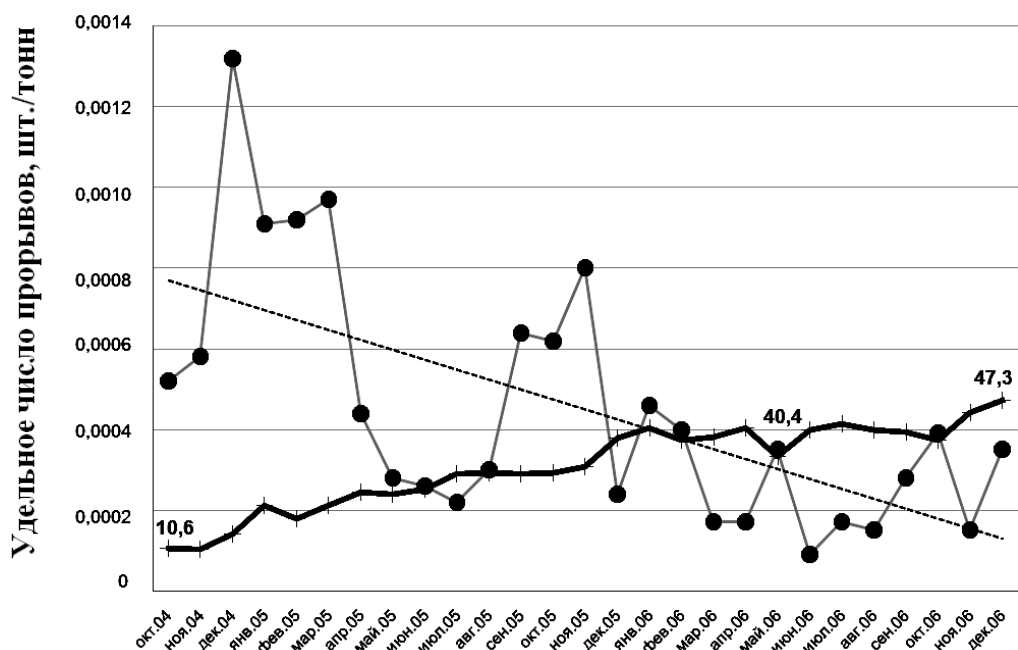


Рис. 6. Изменения среднего удельного числа прорывов (пунктирная линия) и увеличение средней серийности в плавках (сплошная линия) на сортовой МНЛЗ ОАО «ЧМК»

Всего за контрольный период произошло:

- прорывов подвисяния – 327 случаев (33,75 %);
- прорывов охлаждения, а также несоблюдения температурно-скоростного режима разлива – 311 случаев (32,09 %);
- стартовых или пусковых прорывов – 114 случаев (11,76 %);
- шлаковых прорывов – 43 случая (4,44 %).

Кроме того, 45 прорывов (4,64 %) произошло из-за несоблюдения отношения $[Mn]:[S]$ и 34 прорыва (3,51 %) – из-за смещения технологической оси ручья. Оставшиеся 95 прорывов (9,81 %) произошли по другим причинам, которые не рассматривались в анализе, так как по каждой из них было не более 3 % случаев.

Была установлена зависимость удельного числа прорывов от марки стали, а точнее, от содержания в металле углерода (см. рис. 7), который определяет процесс кристаллизации и температуры ликвидус и солидус. Наибольшее удельное число прорывов было зафиксировано на низкоуглеродистых сталях марок Св08А, SAE1008 и SAE1006 – 0,00100...0,00750 шт./т и на сталях перитектического класса (Ст3сп, А500С, S235JR) – около 0,00100 шт./т. Наименьшее количество прорывов имело место при разливе на среднеуглеродистых сталях (35ГС, 25Г2С, Grade60, SAE1040 и др.) – менее 0,00090 шт./т.

Для низкоуглеродистых сталей характерен узкий температурный интервал кристаллизации и её начало при температурах, близких к температуре затвердевания чистого железа ($T_{ликв} = 1525–1530$ °С). Это способствует резкому снижению скорости кристаллизации после образования тонкой корочки, которая подвергается повышенному ферростатическому давлению жидкого металла, приводящему либо к её прорыву, либо к вздутию.

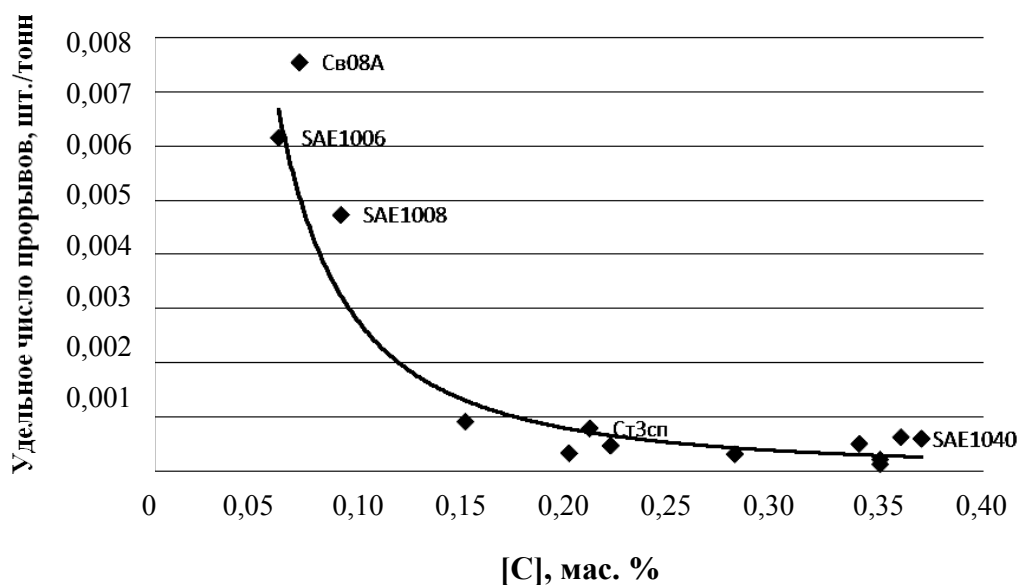


Рис. 7. Влияние содержания углерода в металле на удельное число прорывов на заготовке сечением 100×100 мм

Для стали перитектического класса и среднеуглеродистой стали интервал кристаллизации больше, а температура ликвидус меньше в сравнении с низкоуглеродистым металлом, поэтому толщина корочки в этих сталях больше, что объясняет более низкое удельное количество прорывов. Однако, на заготовках из стали 3сп и А500С в результате перитектического превращения, приводящего к снижению пластичности, в процессе кристаллизации возникают трещины, которые приводят к увеличению количества прорывов в сравнении со сталями 35ГС, SAE1040 и Grade 60.

Снижение количества четырех основных типов прорывов привело к общему снижению прорывов на сортовой МНЛЗ с уровня 0,0008 до 0,0002 шт./т. Снижение количества прорывов составило: прорывов подвисяния – с 0,00024 до 0,00006 шт./т, прорывов охлаждения – с 0,00015 до 0,00013 шт./т, стартовых прорывов – с 0,00010 до 0,00002 шт./т и шлаковых – с 0,00005 до 0 шт./т.

После установления причин образования прорывов и обрывов кристаллизуемой корочки металла на сортовой заготовке были внедрены корректирующие мероприятия в технологию производства НЛЗ, что позволило снизить удельное число прорывов с 0,0008 до 0,0002 шт./т.

Для проведения корректирующих мероприятий по снижению удельного числа прорывов на высокоскоростной сортовой МНЛЗ помимо известных мероприятий было рекомендовано следующее:

- низкоуглеродистый металл глубоко раскислять алюминием на выпуске из печного агрегата (расход алюминия не менее 1,0 кг/т и зависит от марки стали и технологии выплавки);
- внепечную обработку на АКП производить так, чтобы выдерживать оптимальные рекомендованные отношения [Mn]:[Si] (с учетом содержания в металле углерода) и [Mn]:[S];
- улучшить десульфурацию в ковше за счет наведения рафинировочного шлака присадками извести с расходом не менее 12 кг/т и шпата – 0,3 кг/т, а также за счет

раскисления рафинировочного шлака до белого цвета порциями карбида кремния или алюминиевой сечкой и кусковым силикокальцием.

Четвертая глава посвящена разработке мероприятий по увеличению производительности, серийности и энергоэкономичности высокоскоростной МНЛЗ. Проведены исследования: по выбору оптимального режима первичного охлаждения МНЛЗ, по улучшению разливаемости стали через оксидциркониевые стаканчики и оптимизации шлакового режима в промежуточном ковше.

Выбор оптимального режима охлаждения произвели для кристаллизатора сечением 100×100 мм. Методика исследования заключалась в плавном снижении расхода воды от 1750 до 1450 л/мин на кристаллизатор с шагом 50 л/мин через каждые две разлитые плавки. Всего было разлито 16 экспериментальных плавков и 500 опытно-промышленных. Все эксперименты проводили на четырехконусных итальянских гильзах фирмы EUROPA METALLI. На каждой плавке контролировали технологические параметры разливки: фактический расход воды, давление воды на входе в кристаллизатор, температура входящей воды на кристаллизатор, разница температур входящей и выходящей воды на кристаллизатор, скорость разливки, температура металла в промковше, колебания уровня металла в кристаллизаторе, состояние геометрического профиля заготовок.

В середине и в конце каждой разлитой плавки на экспериментальном ручье производили отбор темплета для оценки макроструктуры. Для адекватности результатов дополнительно производили контроль расхода воды в зоне вторичного охлаждения. Расход воды на вторичное охлаждение на экспериментальном ручье составлял от 2,19 до 2,46 л/кг, в среднем по 16 плавкам – 2,24 л/кг.

Установлено, что расход воды на кристаллизатор 100×100 мм с водяным зазором 3,25 мм в пределах 1450...1500 л/мин в сравнении с повышенными расходами 1700...1750 л/мин не влияет на качество макроструктуры НЛЗ. Помимо этого пониженный расход воды на кристаллизатор приводит к экономии очищенной воды в количестве 620 л на тонну разлитой стали. Наряду с проведенными исследованиями были выполнены теплотехнические расчеты для гильзового кристаллизатора.

Существенную роль в обеспечении серийности играет стойкость стаканов-дозаторов (разливка без затягивания неметаллическими включениями) от системы быстрой замены при разливке открытой струей. Исследовались стаканы-дозаторы, на которых отмечалось затягивания и на которых затягивание отсутствовало.

Исследовали на растровом микроскопе JEOL JSM-6460LV состав отложений на оксидциркониевых стаканах-дозаторах, приводящих к из-закупориванию во время разливки. Съёмку образцов осуществляли с двух сторон: со стороны отложения и в разрезе с боковой стороны отложения в обратных электронах (BSE). Исследования выполнены на пяти оксидциркониевых стаканах-дозаторах систем быстрой замены, через которые разливали арматурную и углеродистую стали.

Установили, что на стаканах осаждаются тугоплавкие алюминаты кальция и магнезиальная шпинель (см. рис. 8). Причем, за счет проникновения в стакан по порам алюминатов образуется прочная основа для дальнейшего роста алюминатов и кристаллов шпинели. Глубина проникновения алюминатов и шпинелей в огнеупор со-

ставляет до 100 мкм. В случае разливки стали без «затягивания» наблюдается пропитка огнеупорного стаканчика оксидом железа на глубину до 60 мкм.

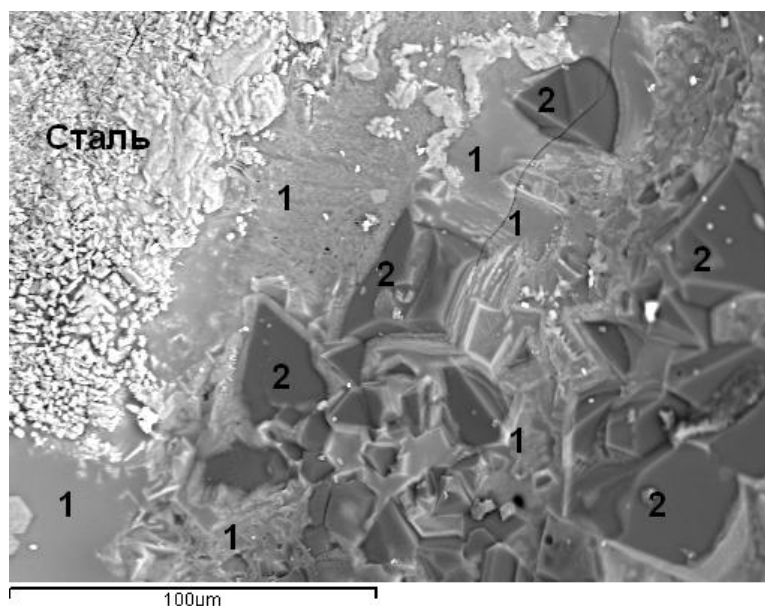


Рис. 8. Микроструктура отложений на стакане, РЭМ, $\times 700$:
1 – алюминаты кальция ($\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$);
2 – магнезиальная шпинель ($\text{MgO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)

С целью уменьшения и предотвращения затягивания оксидциркониевых стаканов алюминатами и шпинелями наряду с известными мероприятиями разработаны следующие:

1. Было снижено содержание общего алюминия в сталях, раскисленных кремнием и марганцем (для арматурных сталей). Для этого был снижен расход алюминия на раскисление с 1,0 до 0,3 кг/т и в пределах марочного химического состава уменьшен расход ферросилиция марки 65 за счет большего расхода ферросиликомарганца.

2. Рекомендовано иметь в качестве оптимальной окисленности металла в сталеразливочном ковше в пределах 0,003...0,005 мас. %.

3. Технически обеспечен постоянный и максимальный уровень металла в промежуточном ковше с первой плавки в серии (более 600 мм от дна ковша).

4. Рекомендовано разливку первой плавки в серии производить на "пусковом" стаканчике, а второй и последующих – на "новом" для исключения начального затягивания стаканчика на последующих плавках.

5. Рекомендовано вводить шлакообразующую смесь в промежуточный ковш только после достижения рабочего уровня металла (600...800 мм).

Снижение в металле содержания алюминия с 0,007 до 0,004 мас. % полностью исключило затягивание стаканов-дозаторов алюминатами кальция и шпинелями.

Изучена работа футеровки промковша и её взаимодействие со шлаком. Для увеличения серийности сортовой МНЛЗ был снижен износ магнезиального торкрет-слоя промковша за счет использования оптимальной шлаковой смеси промковша. На 6-ти ручьевой МНЛЗ ОАО «ЧМК» была испытана и внедрена технология использования смеси марки REFRAMAT SP-C на основе системы $\text{CaO}(\text{MgO})\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (суммар-

ное содержания CaO и MgO до 45 мас. %). Испытания производились на протяжении всей серии разливок квадратной заготовки сечением 100×100 мм из углеродистых и низколегированных сталей. В первой серии разлили 47 плавов, во второй – 50 плавов. Промежуточные ковши были торкретированы массой марки JEMATUN с содержанием MgO более 80 %.

Из данных по разлитым сериям установлено, что в процессе разливки происходило значительное изменение состава шлака, связанное с поглощением продуктов раскисления и вторичного окисления стали. Так, содержание SiO₂ увеличилось с 20 мас. % до 38 мас. %, MnO до 13 мас. %, Al₂O₃ с 15 мас. % до 18 мас. %. При этом основность шлака упала с 1,9 до 0,5. После скачивания шлака из промковша и наведения нового на обеих сериях содержание оксидов FeO, MnO и SiO₂ снижается, а содержание CaO и MgO увеличивается, т.е. создаются благоприятные условия для уменьшения эрозии магниального рабочего слоя промковша.

После окончания первой опытной серии произведена оценка износа шлакового пояса. После разливки 50 плавов с использованием шлакообразующей смеси (ШОС) REFRAMAT износ торкрет-слоя был на 20...30 % меньше в сравнении со стандартным вариантом. Толщина остаточного торкрет слоя при работе на смеси REFRAMAT составила 20...30 мм. При этом извлечение твердого остатка металла из промковша происходило без особых усилий.

Установлено, что шлакообразующие смеси на основе системы CaO(MgO)–SiO₂–Al₂O₃ обеспечивают удовлетворительное снижение агрессивного воздействия шлака на магниальную футеровку промковша.

Внедрение результатов вышеуказанных экспериментов и расчетов позволили вывести сортовую МНЛЗ №3 ОАО «ЧМК» на среднюю серийность с 10 до 39 плавов на один промежуточный ковш.

В пятой главе представлено практическое применение результатов работ, изложенных во второй, третьей и четвертой главах диссертации.

На основе изучения качества отлитых заготовок и анализа технологии производства НЛЗ определены технологические параметры, влияющие на качество и производство заготовок. В зависимости от группы марок стали была выявлена возможность образования тех или иных дефектов НЛЗ.

На каждой современной МНЛЗ в процессе разливки стали автоматически регистрируются технологические параметры, которые остаются в отчетах по плавке. Фирмы, поставляющие на рынок современные МНЛЗ, в обязательном порядке снабжают их программным обеспечением 2-го уровня автоматизации, известным под названием «Управлением технологическим процессом», в которое входит одна из составляющих программ – программа качества заготовок. Программа качества заготовок – это программа оценки качества каждой заготовки путем применения математических правил сравнения заданных и фактических технологических параметров. После разливки каждой плавки такие программы качества формируют отчет по всем заготовкам с указанием их качества (отсутствие или наличие дефекта и его место в заготовке).

Для настройки программы качества при освоении новых марок стали был проведен набор статистических данных по технологическим параметрам и по качеству заготовок (визуальный контроль поверхности НЛЗ и металлографический контроль внут-

ренного качества). После получения статистических результатов анализа технологических параметров производства и качества металла произвели анализ влияния технологических параметров на образование тех или иных дефектов. С целью определения качества отлитых заготовок доказана необходимость введения в автоматическую систему МНЛЗ отслеживания по ручью следующих параметров: химический состав стали (отношение $[Mn]:[Si]$ и содержание углерода), температура стали в промковше, вес металла в стальковше и промковше, скорость разливки, параметры качания кристаллизатора, параметры первичного и вторичного охлаждения заготовки.

С помощью настроенной для МНЛЗ №3 программы качества теперь можно прогнозировать следующие дефекты заготовок: трещины по следу качания; грубые следы качания; внутренние трещины (ЛПТ); шлаковые включения и КТЗ; центральную пористость; пояс; светлый контур. Введение дополнительного контроля таких параметров, как отношение $[Mn]:[Si]$ и содержание в металле углерода в автоматическую программу качества заготовок позволило выявлять группы риска выбраковки заготовок по шлаковым включениям и краевым загрязнениям. Таким образом, отпала необходимость производить полный осмотр всех заготовок на наличие дефектов, и появилась возможность производить лишь выборочный контроль.

Общие выводы

1. Установлено, что шлаковые прорывы под кристаллизатором при разливке стали открытой струей связаны с образованием твердого конгломерата на мениске металла в кристаллизаторе. Термодинамические расчеты и практика разливки металла показывает, что избежать образования твердого конгломерата на мениске металла можно, если отношение $[Mn]:[Si]$ будет не ниже 2–3.

2. По проведенному корреляционному анализу проявления дефекта «осевые ликвационные полосы и трещины» ($ЛПТ_{осев}$) установлена статистическая связь проявления этого дефекта от отношения $[Mn]:[S]$. Так, при величине $[Mn]:[S] = 14–15$ балл дефекта достигал 3–4, при величине отношения $[Mn]:[S] = 18$ – балл дефекта составил 1–2. При величине $[Mn]:[S]$, равной 22 и более, дефект практически не проявлялся или составлял минимальные значения.

3. С увеличением содержания углерода в металле с 0,12 до 0,40 мас. % и серы с 0,005 до 0,020 мас. % увеличивается максимальная величина ромбичности для заготовки сечением 100×100 мм с 10 до 16 мм. С целью снижения брака по ромбичности заготовки доказана необходимость уменьшения содержания серы до 0,005 мас. % или ниже, за счет наведения рафинировочного шлака на АКП.

4. На основании полученных результатов (16 экспериментальных плавов и 500 опытно-промышленных плавов) установлен оптимальный режим первичного охлаждения НЛЗ для кристаллизатора сечением 100×100 мм, который подразумевает расход воды в пределах 1450...1500 л/мин и давление перед кристаллизаторами 10 бар. Изменение режима охлаждения кристаллизаторов привело к экономии очищенной воды в количестве 620 л на тонну разлитой стали.

5. Для условий ОАО «ЧМК» исследование зарастания канала оксидциркониевых стаканчиков показало, что на них осаждаются тугоплавкие алюминаты кальция и маг-

ниевая шпинель. Для того чтобы улучшить разливаемость стали открытой струей, необходимо снизить расход алюминия на раскисления с 1,0 до 0,3 кг/т и уменьшить расход ферросилиция марки 65 за счет большего расхода ферросиликомарганца; содержание алюминия в металле не должно превышать 0,004 мас. %.

6. Доказано, что использование шлакообразующих смесей системы $\text{CaO}(\text{MgO})\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (суммарное содержания CaO и MgO до 45 мас. %) при регламентированном содержании алюминия дает удовлетворительные результаты по снижению агрессивного воздействия шлака на магнезиальную футеровку промежуточного ковша, и уменьшению явления затягивания оксидциркониевых стаканчиков тугоплавкой магнезиальной шпинелью.

7. Введение контроля технологических параметров, таких как отношение $[\text{Mn}]:[\text{Si}]$ и содержание в металле углерода в автоматизированную систему МНЛЗ позволило выявлять степень риска появления брака по шлаковым включениям и краевым загрязнениям. Таким образом, отпала необходимость в полном осмотре всех заготовок на наличие этих дефектов, появилась возможность ограничиться выборочным контролем.

8. Выполненный комплекс работ по корректировке технологии непрерывной разливки стали позволил обеспечить стабильную работу МНЛЗ, удовлетворительное качество продукции и увеличение средней серийности с 10 до 39 плавок на один промежуточный ковш. Экономический эффект от выполненной работы в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «ЧМК» составил 72,4 млн. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Освоение технологии непрерывной разливки открытой струей арматурных сталей 35ГС и 25Г2С / А.Л. Подкорытов, С.А. Ботников, И.С. Мурзин и др. // Сталь. – 2006. – №5 – С. 45–47.

2. Ботников, С.А. Влияние химического состава стали и технологических параметров непрерывной разливки на образование и развитие дефектов формы и макроструктуры заготовки / С.А. Ботников, И.С. Мурзин, А.Л. Подкорытов // Сталь. – 2006. – №5 – С. 35

3. Ботников, С.А. Изучение шпинельных отложений на циркониевых стаканах-дозаторах и способы улучшения разливаемости стали на сортовых МНЛЗ / С.А. Ботников, А.Г. Браславский, Г.Г. Михайлов // Сталь. – 2007. – №5 – С. 34

4. Особенности технологии производства литых заготовок из низкоуглеродистой стали на сортовой МНЛЗ в условиях ОАО «ЧМК» / С.А. Ботников, Н.Н. Кузькина, И.С. Мурзин и др. // Металлург. – 2007. – №7 – С. 52–59.

5. Ботников, С.А. Выбор оптимального соотношения $[\text{Mn}]:[\text{Si}]$ для сталей, разливаемых на МНЛЗ открытым способом / С.А. Ботников // Современные проблемы электрометаллургии: сб. науч. тр. (часть 2) / под ред. В.Е. Рощина – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 90–95.

6. Улучшение разливаемости арматурной стали при применении оксидциркониевых стаканов-дозаторов / С.А. Ботников, А.Г. Ряполов, А.Г. Браславский и др. // Сталь. – 2008. – №2 – С. 25–27.

7. Ботников, С.А. Разработка современного атласа дефектов непрерывнолитой заготовки / С.А. Ботников // Материалы III Конгресса металлургов Урала. – Челябинск, 2008. – С. 22–24.

8. Ботников, С.А. Влияние химического состава и технологии рафинирования низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали на параметры разливки сортовой МНЛЗ / С.А. Ботников // Металлургия XXI века: сб. тр. / под. ред. Н.В. Пасечник – М.: ВНИИМЕТМАШ им. академика А.И. Целикова, 2009.

9. Особенности технологии высокоскоростной разливки стали на сортовых МНЛЗ ОАО «ЧМК» / С.А. Ботников, Г.Г. Михайлов, В.Н. Артюшов, и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Вып. 12. – Челябинск: изд. ЮУрГУ – 2009. – №14 (147) – С. 35–38.